

ARKEOLOGISTEN KOKOELMIEN 3D-DIGITOINTI

Annukka Debenjak-Ijäs



KARHUNHAMMAS 2

ARKEOLOGIA | TURUN YLIOPISTO

3D-digitoinnin menetelmät ja digitointiin liittyvät ohjeistukset muuttuvat nopealla aikataululla. Raportti ja liitteenä olevat ohjeet on koottu kesän 2020 aikana. Ohjeita päivitetään muutosehdotusten perusteella, ja päivitetty ohjeet julkaistaan hankkeen kotisivuilla <https://sites.utu.fi/ark3d/fi/>.

Toimittajat Visa Immonen, Henrik Asplund, Janna Jokela ja Tanja Ratilainen

Taitto T:mi Joonas Kinnunen | joonastkinnunen.com

Julkaisija Arkeologia, Turun yliopisto

Kuvat Annukka Debenjak-Ijäs

Liitteiden kuvat Annukka Debenjak-Ijäs
Annukka Debenjak-Ijäs & Akseli Tolvi (liite 3)

ISSN 0356-8601

ISBN 978-951-29-8229-5 (Painettu)
978-951-29-8230-1 (Sähköinen)

ARKEOLOGISTEN KOKOELMIEN 3D-DIGITOINTI

Annukka Debenjak-Ijäs



KARHUNHAMMAS 20

Sisällysluettelo

Alkusanat	6
Johdanto	9
<i>3D-digitoinnin käsitteitä</i>	11
Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi	17
<i>Tutkimushistoria</i>	17
<i>Kulttuuriperintöaineiston 3D-digitoinnin tutkimustyö: kotimaiset ja kansainväliset toimijat</i>	18
3D-digitointiprosessin suunnittelu	21
<i>Aineistonhallintasuunnitelma</i>	22
<i>Miksi ja kenelle 3D-digitointi tuotetaan?</i>	22
<i>Mitä 3D-digitoidaan?</i>	24
<i>3D-digitointimenetelmän valinta</i>	28
<i>3D-digitoinnin fyysinen ympäristö</i>	29
3D-digitointimenetelmät	31
<i>Digitaalinen fotogrammetria</i>	31
<i>3D-skannerit</i>	46
<i>3D-digitointimenetelmien vertailu</i>	49
3D-digitointien jälkikäsittely	55
3D-digitointien tallentaminen ja jakaminen	59
<i>Metatiedot</i>	60

<i>Yleiset 3D-aineistojen tallentamiseen käytetyt tiedostomuodot</i>	64
<i>Tallennus ja pitkäaikaissäilytys</i>	67
3D-aineistojen jakaminen ja julkaiseminen	69
Arkeologisten löytöjen 3D-digitointien käyttöesimerkkejä	71
<i>Arkeologinen tutkimus</i>	71
<i>Kokoelmatyössä</i>	73
<i>Yleisötyössä</i>	73
Lähteet	76
Liitteet	94
<i>Liite 1. Metashape-ohje</i>	
<i>Liite 2. RealityCapture-ohje</i>	
<i>Liite 3. Valokuvausohje fotogrammetrista 3D-digitointia varten</i>	
<i>Liite 4. RAWtherapee-ohje valokuvien jälkikäsittelyyn</i>	
<i>Liite 5. Digitointimenetelmien vertailu</i>	
<i>Liite 6. Blender-ohje 3D-digitoinnin jälkikäsittelyyn</i>	
<i>Liite 7. Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke 2019-2020</i>	

Alkusanat

Kolmiulotteiset, digitaalisesti käytettävät mallit ovat monelle arkipäivää niin viihdeteollisuuden kautta – videopeleissä ja elokuvien erikoisefekteissä – kuin vaikkapa virtuaalisten asuntoesittelyjen muodossa. Museoiden ja yliopistojen arkeologiseen kulttuuriperintöön keskittyvässä työssäkään 3D-mallit eivät ole vieraita, mutta niiden laajamittaiseen ja järjestelmälliseen hyödyntämiseen ollaan vasta siirtymässä. Tähän saakka ehkäisevänä tekijänä on ollut vaaditun, korkealuokkaisen teknologian kalleus sekä 3D-mallien tuottamisen vaatima työpanostus. Myös tiedon puute kulttuuriperintötyössä toimivista 3D-mallintamisen ratkaisuista on hidastanut teknologian käyttöönottoa. Toimintaa on jouduttu kehittämään tapauskohtaisesti, oppimalla yrityksistä ja erehdyksistä.

Edistääkseen arkeologisten 3D-mallien käyttöä kulttuuriperintötyössä Turun yliopiston arkeologian oppiaine, Aboa Vetus & Ars Nova -museo ja Turun museokeskus käynnistivät yhteishankkeen syksyllä 2019 (Immonen & Ratilainen 2019). Rahoitus hankkeelle saatiin opetus- ja kulttuuriministeriöltä. Vuoden kuluessa teimme 3D-malleja kunkin osapuolen kokoelmissa olevista arkeologisista löydöistä, testasimme digitointimenetelmiä sekä kokosimme ja tiedotimme saamistamme kokemuksista. Nyt julkaistava raportti on ensisijaisen tärkeä hankkeen tulosten jakamisessa.

Vaikka vuoden 2020 koronakriisi ja museoiden sulkemiset osoittivat, että kulttuuriperintöä on tärkeä saada virtuaalisesti vapaasti saavutettavaksi, tarve museokokoelmien 3D-digitointiin kumpuaa laajemmasta ja pidempiaikaista kulttuuriperintötyön muutoksesta. Euroopan neuvoston arkeologisen kulttuuriperinnön suojelemista koskeva yleissopimus astui Suomessa voimaan vuonna 1995. Siinä todetaan, että osapuolet sitoutuvat ”edistämään yleisön mahdollisuutta tutustua arkeologisen perintönsä tärkeisiin osa-alueisiin [...] ja kannustamaan arkeologisten esinekokoelmien esittelemistä julkisissa näyttelyissä” (Asetus arkeologisen perinnön suojelua koskevan tarkistetun eurooppalaisen yleissopimuksen voimaansaattamisesta 1995/26 § 9).

Suomen perustuslaki toteaa puolestaan, että vastuu kulttuuriperinnöstä kuuluu kaikille (Suomen perustuslaki 1999/731 § 20). Tätä vastuuta laajentaa eduskunnan vuonna 2017 hyväksymä Faron puiteyleissopimus (Valtioneuvoston asetus kulttuuriperinnön yhteiskunnallisesta merkityksestä tehdystä Euroopan neuvoston puiteyleissopimuksesta 2018/50). Sopimus korostaa sekä yksilöiden ja yhteisöjen oikeutta ja mahdollisuuksia osallistua kulttuuriperintötyöhön että kulttuuriperinnön monimuotoisuutta ja merkitystä nykyhetken voimavarana. Myös vuonna 2018 valmistunut uusi museopoliittinen ohjelma nostaa digitaaliset kokoelmat ja palvelut museoiden keskeiseksi kehittämiskokonaisuudeksi (Mattila 2018). Kolmiulotteisten mallien

luominen arkeologisista löydöistä ja niiden saattaminen yleiseen käyttöön on keino edistää kulttuuriperinnön saavutettavuutta ja sen käytön moninaisuutta.

Euroopan unioni sekä Suomessa opetus- ja kulttuuriministeriö ovat tarjoavat rahoitusta 3D-mallien tuottamiseen kulttuuriperinnöstä. Rahoituksen ja laajentuvan kulttuuriperintökäsityksen ohella keskeistä hankkeemme menestykselle on ollut digitoinnin edellyttämä ja mahdollistama museoiden ja yliopiston yhteistyö. Olemme onnistuneesti yhdistäneet tutkimus- ja kokoelmatyön. Toimivan ohjausryhmätyöskentelyn ohella oleellinen voimatekijä on ollut projektitutkija Annukka Debenjak-Ijäs, joka on asiantuntevasti ja energisesti yhdistänyt hankkeemme tavoitteet ja käytännön. Tämä raportti on pitkälti hänen aikaansaannostaan. Uskomme, että siinä esitellyt käytännöt, kokemukset ja ehdotukset tehostavat arkeologisen kulttuuriperinnön 3D-digitointia ja saavutettavuutta.

Arkeologisten löytöjen 3D-digitointihankkeen johtoryhmän jäsenet Visa Immonen, Henrik Asplund, Janna Jokela ja Tanja Ratilainen.

Johdanto

Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi on valtakunnallisesti vielä käynnistymisvaiheessa. Nyt tarvitaan pohjatutkimusta, eri toimijoiden koulutusta ja opetusta sekä suosituksia toimivista käytänteistä.

Hankehakemus, arkeologisten kokoelmien 3D-digitoinnin opetus-, tutkimus- ja tiedotushanke

Turun yliopiston arkeologian oppiaineen, Turun museokeskuksen ja Aboa Vetus & Ars Nova -museon yhteinen arkeologisten kokoelmien 3D-digitoinnin opetus-, tutkimus- ja tiedotushanke toteutettiin vuosina 2019–2020 Suomen opetus- ja kulttuuriministeriön rahoituksella.

Hankkeen aikana tehdyn kirjallisuuskatsauksen sekä saatujen käytännön kokemusten pohjalta koostettiin nämä ohjeet arkeologisten löytöjen 3D-digitointiin. Ohjeet kattavat 3D-digitointiprosessin koko elinkaaren alkaen 3D-digitoinnin suunnittelusta ja tavoitteiden määrittämisestä itse 3D-digitointiprosessiin ja valmiiden digitointien tallentamiseen, säilyttämiseen ja jakamiseen. Ohjeet on suunnattu suomalaiselle kulttuuriperintökentälle avoimesti käytettäväksi. Ohjeita täydentävät liitteet sisältävät yleisten, aihepiiriin liittyvien ohjelmien käyttöohjeita, valokuvausohjeita ja 3D-digitointien jälkikäsitteilyohjeet (Liitteet 1–7). Hankkeessa tuotettuja 3D-digitointeja voi katsella Sketchfab-palvelusta (2020a). Lisätietoja hankkeen toteutuksesta tarjoavat hankkeen kotisivut (Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke 2020).

3D-digitointimenetelmät kehittyvät jatkuvasti, joten uuden 3D-digitointihankkeen alussa on ensisijaisen tärkeää perehtyä uusiin menetelmiin ja työtapoihin. Ajantasaista tietoa tarjoavat esimerkiksi Archaeology Data Service / Digital Antiquity, GLAM 3D -sivusto ja Cultural Heritage Imaging -yhdistys (Archaeology Data Service / Digital Antiquity 2011a; CHI 2020a; GLAM 3D 2020). Etenkin valokuvapohjaisen digitaalisen fotogrammetrian alalla menetelmät ja työtavat vaihtelevat paljon tekijästä riippuen. Hyvään lopputulokseen voi päästä monella tavalla.

Näissä ohjeissa painottuvat ne 3D-digitointimenetelmät, jotka olivat hankkeen resursseilla saavutettavissa: valokuvapohjainen *digitaalinen fotogrammetria* sekä arkeologisten kokoelmien



Kuva 1. Keramiikan kappaleen valokuvaamista fotogrammetrista 3D-digitointia varten.

3D-digitointiin sopivat käsi­käyttöiset *rakennevaloskannerit*. Lisäksi kirjallisuuden avulla perehdyttiin tarkempiin laser- tai rakennevalopohjaisiin 3D-skannereihin. Ohjeet eivät kata suurten rakenteiden, rakennusten tai ulkokohteiden 3D-digitointimenetelmiä, eivätkä heikkolaatuisempia 3D-digitointimenetelmiä, jotka sopivat vain aineiston visualisointiin. Esimerkiksi älypuhelimella käytettäviin 3D-digitointisovelluksiin ei hankkeessa perehdytty.



3D-digitoinnin käsitteitä

3D-digitointi

3D-digitointi on todellisesta kappaleesta mittauksin tuotettu digitaalinen, kolmiulotteinen kopio. Sillä on siis olemassa fyysinen vastine ainakin sillä hetkellä, kun digitointi on tehty. 3D-digitointi koostuu muiden 3D-mallien tavoin pistepilvestä taikka polygonien muodostamasta pinnasta sekä mahdollisesti siihen liitetystä värityksestä, tekstuurista. Vaikka 3D-digitointi on ensisijaisesti objektiivinen “mittaustulos” fyysisestä objektista, sisältyy siihen kuitenkin jonkin verran epävarmuustekijöitä (digitointimenetelmän tarkkuus ja resoluutio) sekä tulkintaa (katvealueiden paikkaaminen 3D-mallinsohjelmassa).



Kuva 2. Kivikirveestä fotogrammetrialla tuotettu 3D-digitointi.

3D-malli

3D-malli on digitaalinen, kolmiulotteinen kappale, joka koostuu polygonien muodostamasta pinnasta, sekä mahdollisesti siihen liitetystä värityksestä, tekstuurista. 3D-malli voi olla todellisesta objektista esimerkiksi fotogrammetrialla tai 3D-skannerilla tuotettu digitaalinen kopio, 3D-digitointi, tai 3D-mallinnohjelmassa luotu kappale ilman fyysistä vastinetta. Usein 3D-malli sijoittuu näiden kahden ääripään välimaastoon. 3D-malli on esimerkiksi voitu digitoida todellisesta objektista, mutta katvealueisiin jääneet aukot on paikattu 3D-mallinnohjelmassa mallinnetulla “born-digital” -pinnalla. (Remondino & El-Hakim 2006: 269; Viinikkala 2018: 34; Flynn 2019: 74.)

3D-skannaus

3D-skannauksessa fyysisen objektin pinnasta tuotetaan digitaalinen rekonstruktio laser-, infrapuna- tai rakennevaloon perustuvien, pistemäisten mittausten avulla (Remondino & El-Hakim 2006: 271; Grussenmeyer et al. 2016: 305).

Born-digital

Englanninkielinen käsite viittaa 3D-malliin tai sen osaan, joka on tuotettu ilman todelliseen objektiin perustuvia, fotogrammetrialla tai 3D-skannerilla tehtyjä mittauksia. Pinta on siis “syntyjään digitaalinen”. Esimerkiksi pelkästään kirjallisten lähteiden, piirustusten tai valokuvien pohjalta tehtyyn, arkeologista kohdetta esittävään 3D-malliin voi viitata käsitteellä born-digital. (DeVet et al. 2018).

Fotogrammetria

Menetelmässä kohteen kolmiulotteinen muoto lasketaan kohteesta otettujen valokuvien pohjalta. Fotogrammetria-algoritmi tunnistaa valokuvista näkyviä yksityiskohtia ja laskee valokuvia toisiinsa vertailemalla yksityiskohtien sijainnin kolmiulotteisessa pistepilvessä, josta lopulta muodostetaan teksturoitu polygoniverkko. (Grayburn et al. 2019: 126).

Metatieto

Metatieto on tietoa, joka kuvailee kohdeaineiston sisältöä, rakennetta, elinkaarta ja hallinnointitietoja (Digitalpreservation.fi 2019a). 3D-digitoinnin metatieto sisältää yleensä tiedon siitä, millä menetelmällä, kalustolla ja asetuksilla digitointi on tuotettu, mitä tiedostoja digitointiin kuuluu sekä kontekstitietoja alkuperäisestä, 3D-digitoidusta esineestä.

Pistepilvi

Pistepilvi koostuu nimensä mukaisesti joukosta X-, Y-, Z- koordinaatistossa sijaitsevia pisteitä. Usein pisteet kuvaavat 3D-digitointimenetelmän mittaustuloksia, esimerkiksi laserskannerin mittaamia todellisen objektin pinnan koordinaatteja. Pistepilven laadun määrittää siksi sen tiheys (resoluutio) ja tarkkuus (pisteen koordinaattien virhemarginaali). (Grussenmeyer et al. 2016: 306–309; Grayburn et al. 2019: 126).



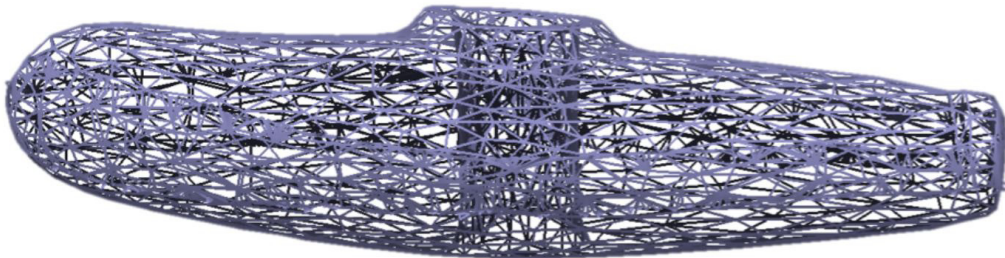
Kuva 3. Kivikirveestä 3D-digitoimalla luotu pistepilvi.

Pitkäaikaissäilytys, PAS

PAS-palveluilla tarkoitetaan kulttuuriperintöaineistojen ja tutkimusaineistojen pitkäaikaissäilyttämiseen tuotettuja palveluita yhdessä. -- Pitkäaikaissäilytys tarkoittaa digitaalisen informaation säilyttämistä ymmärrettävänä ja käytettävänä useiden kymmenien ja jopa satojen vuosien ajan. Laitteet, ohjelmistot ja tiedostomuodot vanhenevat ajan myötä, mutta informaation täytyy säilyä. Luotettava pitkäaikaissäilyttäminen edellyttää sisällön eheyden aktiivista valvontaa ja monenlaisiin riskeihin varautumista. Tässä ovat keskeisessä asemassa metatiedot, jotka kuvailevat mm. aineiston sisällön, historian ja alkuperän sekä tiedot siitä, miten informaatiota voidaan käyttää. (Digitalpreservation.fi 2020b: 4.)

Polygonimalli

Polygoniverkko tai -malli koostuu kolmioiden tai monikulmioiden muodostamasta pinnasta (mesh). Monikulmiot koostuvat tasoista (face), reunoista (edge) sekä monikulmion kulmien pisteistä (vertices), joille on määritetty sijainti kolmiulotteisessa koordinaatistossa. (Grayburn et al. 2019: 126.)



Kuva 4. Kivikirveen pistepilvestä laskettu yksinkertaistettu polygoniverkko.

Tarkkuus

3D-digitoinnin tarkkuudella kuvataan virhemarginaalia, jonka sisällä polygonimallin pinta tai pistepilven pisteet ovat alkuperäisen, digitoidun kappaleen pinnasta (Khoshelham & Elberink 2012). Esimerkiksi 0,1 mm tarkkuudella tuotettu fotogrammetrinen 3D-digitointi voi olla <0,1 millimetriä leveämpi kuin kuvaamansa fyysinen kappale.

Tekstuuri

Tekstuurilla kuvataan 3D-mallin väritystä ja informaatiota siitä, miten väritys liittyy polygoniverkon pintaan (Grayburn et al. 2019: 126). Tekstuuri on yleensä kuvatiedosto, joka liitetään polygoniverkkoon tekstuurikartan avulla.

Resoluutio

Resoluutiolla kuvataan mittausmenetelmän erottelukykyä, esimerkiksi 3D-skannauksella tuotetun pistepilven tiheyttä. Laadukkaaseen 3D-digitointiin ei riitä pelkästään hyvä tarkkuus, jos tarkkojen mittausten välimatkat ovat niin suuria, että niiden väliset yksityiskohdat jäävät taltioimatta. (Khoshelham & Elberink 2012.)

Virtuaaliarkeologia

Virtuaaliarkeologia tutkii ja kehittää tapoja arkeologisen aineiston digitaaliseen visualisointiin, tutkimukseen ja dokumentointiin (Seville Principles 2017: 2).

Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi

Technology is relentlessly driving the advancement of archaeological method and the ubiquity of certain technologies (such as photogrammetry and 3D scanners) has vastly increased the volume of 3D representations of both sites and artefacts. This is of course a good thing in many ways, but not if it means that other aspects of the archaeological record are being ignored because they are too hard to capture. We must not be guilty of blindly following the latest technological advance, without thinking through the ways in which we work to produce knowledge.

Eve 2018

Tutkimushistoria

3D-digitointien, mallinnosten ja laajemmin virtuaalisen arkeologian kehitys ajoittuu 1980–1990-luvuille (Frischer et al. 2002). Varhaisiin arkeologiassa käytettyihin 3D-mallintamismenetelmiin kuuluivat analoginen fotogrammetria sekä tietokoneella tehdyt mallinnokset (ks. esim. Ogleby & Rivett 1985; Reilly 1989; Reilly 1990). Tietokone- ja maanmittausteknologian, 3D-skannereiden sekä fotogrammetrian kehittymisen myötä 3D-digitointimenetelmien valikoima kasvoi ja 3D-malleja tuotettiin arkeologisista kaivauksista, maastokohteista ja esineistä (Remondino & El-Hakim 2006. Ks. myös esim. Forte & Siliotti 1997; Beraldin et al. 2002; Borg & Cannataci 2002; Junnilainen et al. 2008). 3D-digitointien yleistymistä rajoittivat kuitenkin laitteiston hinta ja sen käyttöön tarvittava osaaminen.

2000-luvun alkupuolella kehitetty uusi fotogrammetrian menetelmä, *Structure from Motion*, teki fotogrammetriasta edullisen ja helposti omaksuttavan 3D-digitointimenetelmän. Erona varhaiseen fotogrammetriaan, jossa kuvien yhdistäminen vaati kameran sijaintikoordinaattien mittaamista, SfM-pohjainen fotogrammetria-ohjelma laskee kameran sijaintitiedot suoraan valokuvista. (Doneus et al. 2011.) Samoihin aikoihin rakennevaloon perustuvat 3D-skannerit yleistyivät ja tarjosivat edullisemman vaihtoehdon laserskannereille (esim. Winkelbach et al. 2006).

2020-luvulla digitaalinen fotogrammetria on kaikkien saatavilla niin avoimen lähdekoodin ohjelmien kuin ilmaisten mobiilisovellusten kautta. Vaikka käytetyn ohjelman, kuvauskaluston

sekä fotogrammetrian osaamisen taso vaikuttavat 3D-digitoinnin laatuun, kehittyvät helppokäyttöiset sovellukset kovaa vauhtia. Samaan aikaan yleistyvät edulliset, infrapunavaloon perustuvat syvyyskamerat, jotka soveltuvat myös arkeologisen aineiston karkeaan 3D-digitointiin (Ravanelli et al. 2017a).

Koska mahdollisuudet 3D-digitointiin ovat helposti saatavilla ja eri menetelmien ja työtapojen määrä kasvaa, nousee yhteistyön ja tiedonvälityksen merkitys entistä tärkeämmäksi. Laajoja, kansainvälisiä kulttuuriperinnön 3D-digitointia edistäviä hankkeita ovat muun muassa vuosina 2015–2018 toteutettu Inception-hanke (Inception 2019) sekä vuonna 2019 laadittu EU-jäsenmaiden yhteistyösopimus (European Commission 2019), jonka puitteissa on koostettu Euroopan komission ohjeet kulttuuriperinnön 3D-digitointiprosessin vaiheisiin (European Commission 2020).

Kulttuuriperintöaineiston 3D-digitoinnin tutkimustyö:

kotimaiset ja kansainväliset toimijat

Kulttuuriperintöalan ammattilaisilta 3D-digitointien yleistyminen edellyttää laajempaa tietoisuutta digitointien käyttötavoista, rajoituksista ja puutteista. Vaarana on, että uuden teknologian huumassa digitointeja tuotetaan ilman varsinaista käyttötarkoitusta, digitaalisiksi kuriositeeteiksi (Simon et al. 2009). 3D-digitointien liiallinen painottaminen voi vääristää arkeologista tutkimusta, sillä digitoinnit säilyttävät vain kohteen ulkoiset muodot ja värityksen – eivät materiaalia, painoa tai pinnan tuntua (Eve 2018). 3D-digitointi ei koskaan korvaa alkuperäistä kohdetta, vaikka digitoinnilla voidaan dokumentoida esimerkiksi tuhoutuva kohde mahdollisimman kattavasti.

3D-digitointimenetelmien rinnalle kehityskohteeksi onkin noussut 3D-digitointien käyttö osana tieteellistä tutkimusta ja dokumentointia. Tieteellisessä keskustelussa on tuotu esille 3D-digitoinnin hyötyjä ja haittapuolia (Tsiafaki & Michailidou 2015) sekä 3D-digitointien säilytyksen, laadunvalvonnan, jakamisen ja viittaamisen problematiikkaa (Vatanen 2002; D’Andrea & Fernie 2013; Flynn 2019; Moore et al. 2019; Rourk 2019).

Näihin kysymyksiin ottavat kantaa myös kansainväliset sopimukset 3D-mallinnosten käytöstä kulttuuriperintöalalla (London Charter 2009) sekä virtuaaliarkeologian periaatteista (Seville Principles 2017). Ohjeita 3D-mallinnosten ja -digitointien käyttöön ja tallentamiseen tuottavat myös Archaeology Data Service / Digital Antiquity (2011a) sekä Cultural Heritage Imaging -yhdistys (CHI 2020a).

Suomessa kulttuuriperintöaineistoa on 3D-digitoitu laajalti museoissa, esimerkiksi Kuopion korttelimuseossa (2020), Lelumuseo Hevosenkengässä (2020), Siidassa (2020), Tampereen museoissa (Koskinen 2019), Teatterimuseossa (Keränen 2020), Trafikki-museoissa (2019) ja Urheilumuseossa (2020) sekä Museoviraston tutkimus- ja digitointihankkeessa (Kulttuurista perinnöksi 2019). Lisäksi 3D-digitointeja on tuotettu kulttuuriperintöaineistosta ainakin Turun yliopiston arkeologian oppiaineen Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeessa (2020) ja Helsingin yliopiston Lapin synkkä kulttuuriperintö -tutkimushankkeessa (Seitsonen 2018) sekä osana arkeologian ja mediatekniikan opinnäytetöitä (mm. Kivioja 2014; Debenjak 2015; Järveläinen 2016; Ruotsala 2016; Savolainen 2019).

Kulttuuriperintöaineiston digitointiin liittyvistä aiheista viestii Kansalliskirjaston ylläpitämä Digime – digitaalinen kulttuuriperintömme -sivusto (2020). 3D-aineiston tuottamista, käyttöä ja tallentamista Suomen kulttuuriperintöorganisaatioissa edistää myös opetus- ja kulttuuriministeriön vuosittainen rahoitus. Aihe on ajankohtainen ja kehittyy nopeasti. Esimerkiksi hakupalvelu Finnaan kehitetään kirjoitushetkellä tukea 3D-aineistojen näyttämiseksi (Eklund & Malinen 2020).

■ *Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi*

3D-digitointiprosessin suunnittelu

Prior to the development of any computer-based visualisation, the purpose or goal of the work must always be clear. -- Computer-based visualisations must be always at the service of archaeological heritage rather than archaeological heritage being at the service of computer-based visualisations. The main objective of applying new technologies in the comprehensive management of archaeological heritage must be to satisfy the real needs of archaeologists, curators, restorers, heritage interpreters, historians, museographers, managers and/or other professionals in the field of heritage and not vice-versa.

Principles of Seville 2017. Principle 2: Purpose

Vastuullisessa 3D-digitointiprosessissa aineistoa ei digitoida ilman selkeää syytä (Seville Principles 2017; ks. myös Immonen & Malinen 2020). Huolellisella suunnittelulla varmistetaan, että 3D-digitoinnilla on käyttötarkoitus ja tuotettu aineisto vastaa sille asetettuihin tarpeisiin. Esimerkiksi 3D-digitointien laatua ja metatietoja koskevia valintoja on hankala muuttaa kesken digitointiprojektin, minkä vuoksi on tärkeää, että ne on tehty tietoisesti jo etukäteen.

3D-digitointiprosessin suunnittelun voi jakaa kolmeen pääkysymykseen: *Miksi ja kenelle* digitoidaan, *mitä* digitoidaan sekä *miten* prosessi toteutetaan. Suunnittelu käsittää digitoidun aineiston koko elinkaaren. Esimerkiksi Euroopan komission digitaalisen kulttuuriperinnön asiantuntijaneuvosto, Archaeology Data Service, GLAM 3D sekä Ruotsin Riksantikvarieämbetet tarjoavat neuvoja digitointiprosessin eri vaiheista: digitoinnin ja tiedostonhallinnan suunnittelusta, itse digitointiprosessista, digitointien tallentamisesta, säilyttämisestä ja jakamisesta (Archaeology Data Service / Digital Antiquity 2011a; Riksantikvarieämbetet 2019a; European commission 2020; GLAM 3D 2020). Myös Ahmed et al. (2014) sekä Gniady & Rogers (2018) esittelevät 3D-digitointiprosessin elinkaarta suunnittelusta menetelmien valintaan, toteutukseen ja julkaisuun.

Aineistohallintasuunnitelma

Aineistohallintasuunnitelmalla varmistetaan, että 3D-aineiston säilymisen ja jatkokäytön edellytykset täyttyvät. Suunnitelma käsittää tutkimusaineiston hankinnan, käytön ja säilytyksen hyvän tieteellisen käytännön mukaisesti niin tutkimusprosessin aikana kuin sen päätyttyä. (Tietoarkisto 2020a: aineistohallinnan suunnittelu). Lisäksi aineistohallintasuunnitelmassa voidaan huomioida vaikkapa sensitiivisen aineiston käyttöoikeuksiin ja säilytykseen liittyviä tarpeita. Esimerkiksi forensiseen arkeologiaan liittyvien, 3D-digitoitujen ihmisluaaineistojen katselu- ja latausoikeudet voidaan määrittää jo aineistohallintasuunnitelmassa (Decker & Ford 2017: 189–190).

Etenkin suurten aineistomäärien hallintaa voidaan helpottaa tiedostonhallintaohjelmilla. Esimerkiksi Smithsonian Digitization Program Office on kehittänyt avoimen lähdekoodin ohjelmistopakettin 3D-digitointiin liittyvien tiedostojen hallinnointiin kokonaisuudessaan: Packrat-ohjelmalla hallinnoidaan digitointiprosessiin liittyviä tiedostoja, Cook-ohjelma mahdollistaa useiden erilaisten digitointiohjelmien saumattoman käytön saman digitoinnin työstämiseen, ja valmiita digitointeja voi katsella Voyager-ohjelmalla (Rossi et al. 2019).

Miksi ja kenelle 3D-digitointi tuotetaan?

Suunnitteluvaiheen ensimmäinen askel on päättää, miksi 3D-digitointi tehdään: ketä tai minkälaista käyttöä se palvelee ensisijaisesti, ja minkälaiset tulevat käyttötavat 3D-aineistolle halutaan mahdollistaa? Tämä päämäärä ohjaa koko 3D-digitointiprosessia. Esimerkiksi tutkimuskäyttöön suunnattu tai peräti tuhoutuvan löytöaineiston tai kohteen tallentamiseksi tarkoitettu 3D-digitointi vaatii erilaiset metatiedot kuin puhtaasti visualisointiin tai 3D-tulostukseen suunniteltu digitointi.

3D-digitoinneille on runsaasti erilaisia käyttötapoja (ks. esim. Simon et al. 2009; Molloy & Milić 2018; Immonen & Malinen 2020), joihin liittyy omat tarpeensa:

- Tutkimuskäyttö
 - Kattavat metatiedot. 3D-digitointiprosessi on pystyttävä rekonstruoimaan kokonaan metatietojen perusteella.
 - Selvitys 3D-digitoitavan aineiston ja digitointimenetelmän valintaan vaikuttavista tekijöistä.
 - Varmuus 3D-aineiston pysyvästä tallennuksesta.
 - Mahdollisuus viitata aineistoihin.
 - Mahdollisuus ladata alkuperäinen aineisto omalle koneelle.
- Tuhoutuvan aineiston dokumentointi
 - Mahdollisimman tarkka ja yksityiskohtainen 3D-digitointimenetelmä.
 - Selvitys 3D-digitoitavan aineiston ja digitointimenetelmän valintaan vaikuttavista tekijöistä.
 - Kattavat metatiedot. 3D-digitointiprosessi on pystyttävä rekonstruoimaan kokonaan metatietojen perusteella.
 - Alkuperäisen, muokkaamattoman 3D-digitoinnin tallennus. Fotogrammetrian tapauksessa alkuperäisten valokuvien tallennus.
 - Varmuus 3D-aineiston asianmukaisesta pitkäaikaissäilytyksestä.
 - (3D-tulostus: fyysisen kopion tuottaminen 3D-digitoinnin pohjalta.)
- Popularisointi, näyttely- tai opetuskäyttö
 - Kohderyhmälle sopiva visualisointi- ja julkaisutapa.
 - Esimerkiksi pienille lapsille käsin kosketeltava 3D-tuloste voi olla luontevampi tapa tutustua aineistoon.
 - Yleisölle suunnatun käyttöliittymän on oltava helppokäyttöinen, ilman edellytystä aiemmasta kokemuksesta 3D-mallien katselusta.
 - Tarvittaessa 3D-digitoinnin yksinkertaistaminen sujuvan katselukokemuksen varmistamiseksi.
 - Selkeät ja yksinkertaiset metatiedot aineiston alkuperästä, 3D-digitointiprosessista ja käyttöoikeuksista.
- 3D-tulostus
 - Mahdollisuus ladata aineisto omalle koneelle.
 - Käyttöoikeus aineiston muokkaamiseen ja tulostamiseen.

Mitä 3D-digitoidaan?

3D-digitoitavien esineiden valintaan vaikuttavat niin esineen fyysiset ominaisuudet kuin esineitä valitsevan tahon tiedostamattomat ja tiedostetut valinnat. Näiden valintaprosessin taustalla vaikuttavien tekijöiden kertominen lisää 3D-digitointiprosessin läpinäkyvyyttä. Onko digitoitava aineisto rajattu esimerkiksi jonkin tutkimuskysymyksen tai esineryhmän mukaan, kuten Turun yliopiston arkeologian oppiaineen roomalaisaikaisten korujen kokoelma? Tai kokoelmanhallintaan liittyvän rajauksen mukaan, kuten Turun museokeskuksen pohjoisessa näyttelyhallissa sijaitsevien aineistojen 3D-digitoinnit (Sketchfab 2020b)? Vai onko esineet valittu museopedagogisesta näkökulmasta, kuten Aboa Vetus & Ars Nova -museon historiallisen ajan esineiden 3D-digitoinnit (Sketchfab 2020c)?

Usein kulttuuriperintöalan ammattilaiset valitsevat 3D-digitoitavat esineet – silloinkin kun digitointi on suunnattu laajalle yleisölle. Näkökulmien laajentamiseksi esineiden valinnassa voidaan osallistaa tulevaa kohderyhmää, jolloin lopputuloksena on monimuotoisempi, kohderyhmää paremmin palveleva 3D-aineisto. (Immonen & Malinen 2020.)

3D-digitointiin vaikuttavat piirteet

3D-digitointimahdollisuutta rajaa väistämättä myös esineen fyysinen ulkomuoto, sillä optiikkaan perustuvat digitointimenetelmät eivät pysty luotettavasti digitoimaan kiiltäviä, läpinäkyviä tai hyvin yksivärisiä pintoja (Christie 2019). Alla on esitelty sellaisia piirteitä, jotka hankaloittavat esineen 3D-digitointia, sekä muutamia ratkaisuja, joilla hankaliakin esineitä voidaan digitoida.

Kiiltävä tai läpinäkyvä pinta: metallit, sileät kivet, lasi, lasitettu keramiikka, tietyt kivilajit (kvartsi, pii)

Kiiltävä pinta on erityisen haastava 3D-skannereille, jotka aktiivisesti heijastavat valoa esineen pintaan. Sen sijaan fotogrammetriassa kiiltoa voidaan häivyttää käyttämällä epäsuoraa, hajotettua valaistusta sekä pyöröpolarisaaatiosuodinta (Guidi et al. 2014; Hess et al. 2018).

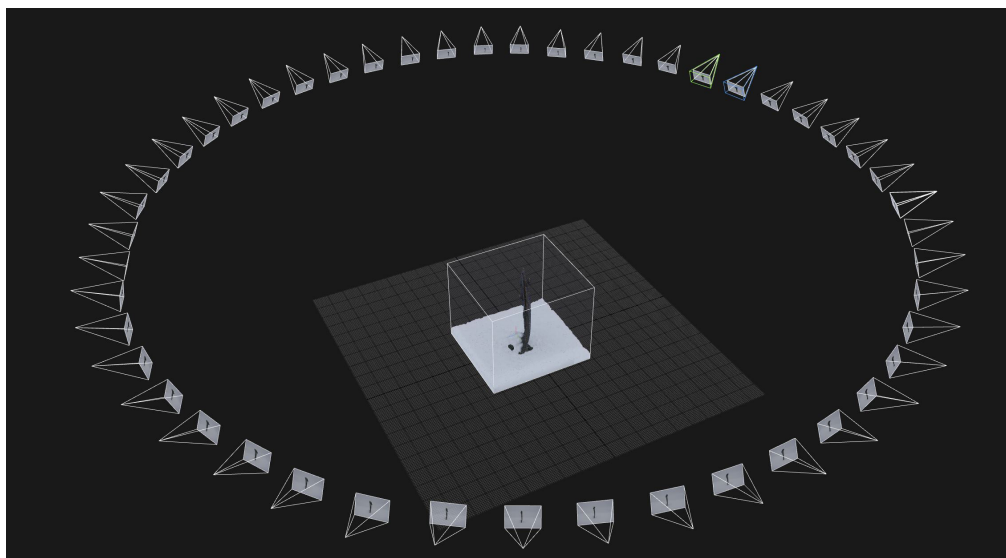
Joissain tapauksissa läpinäkyvän tai kiiltävän esineen pintaan voidaan turvallisesti lisätä 3D-digitointiin tarkoitettua peitesuihketta. Kontaminaatiovaaran vuoksi suihkeen käyttöä on kuitenkin harkittava tarkkaan yhteistyössä esineestä vastaavan henkilön kanssa. Esimerkiksi



Kuva 5. Yllä kiiltäväpintainen rautakautinen solki kuvattuna ilman polarisaatio-suodinta, alla polarisaatio-suotimen kanssa kuvattuna.

obsidiaanista valmistettujen kiviesineiden 3D-digitoinnissa peitesuihke tai talkkijauhe on osoittautunut toimivaksi (Porter et al. 2016a).

Fotogrammetriassa läpinäkyvien pintojen digitoinnissa voi hyödyntää värisuotimia. Estämällä ja vahvistamalla tiettyjä värisävyjä voidaan korostaa esineen pinnan sävyjä, jolloin esine on valokuvissa vähemmän läpinäkyvä. Menetelmää on menestyksekkäästi käytetty muun muassa osin läpinäkyvien lasihelmien 3D-digitointiin (Christie 2019: 96–102).

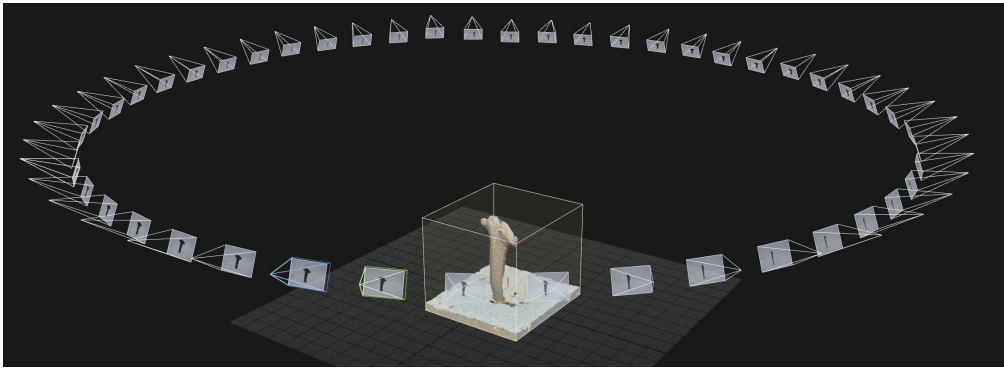


Kuva 6. Ohut, levymäinen kirjan solki kuvattiin pystyasennossa 7,5 asteen välein. Soljen kummaltakin litteältä puolelta otetut kuvakehät yhdistetään pystyasennossa kuvatun kuvakehän avulla.

Tasainen, homogeeninen väritys tai hyvin tasainen pinta

Fotogrammetria perustuu yksityiskohtien tunnistamiseen kohdetta esittävistä valokuvista. Jos esine on kuitenkin hyvin homogeeninen (esimerkiksi kokonaan yksivärinen, pinnaltaan tasainen tai väritykseltään niin tumma etteivät yksityiskohdat erotu) tunnistettavia yksityiskohtia ei löydy, eikä valokuvien yhdistäminen 3D-digitoinniksi onnistu.

Tällaisten pintojen 3D-digitointiin 3D-skannerit soveltuvat paremmin kuin digitaalinen fotogrammetria. Esimerkiksi rakennevaloskanneri lisää kohteen pinnalle tunnistettavia yksityiskohtia heijastamansa valokuvion avulla. Samanlaista valokuviota voidaan käyttää myös fotogrammetriassa, jolloin kustakin kuvakulmasta otetaan yksi kuva, jossa valokuvio on heijastettu kohteen pintaan, ja yksi kuva ilman valokuviota. Kuvien yhdistämisessä käytetään kuvasarjaa, jossa valokuvio lisää yksityiskohtia kohteen pinnalle, mutta teksturointia varten tilalle vaihdetaan kuvasarja ilman valokuviota (Nicolae et al. 2014). Samaa menetelmää voidaan käyttää myös tummien pintojen fotogrammetrisessä digitoinnissa: tavallisen kuvan lisäksi otetaan aina yksi ylivalotettu kuva, jossa pinta on vaaleampi ja yksityiskohdat erottuvat paremmin. Kuvien yhdistämisessä käytetään ylivalotettuja kuvia, mutta teksturointia varten todellista väritystä vastaavia, tummempia kuvia (Marziali & Dionisio 2017: 301).



Kuva 6b.

Geometrisesti monimutkainen muoto

Hyvin monimutkaisessa muodossa haasteena ovat katvealueet, jotka syntyvät syvennyksiin tai kahden hyvin lähekkäisen pinnan estäessä 3D-digitointimenetelmän näkyvyyden. Tällainen esine kannattaa kuvata tai skannata mahdollisimman monessa eri asennossa, jotta katveja syntyy mahdollisimman vähän.

Hyvin ohut tai hiusmainen muoto

Fotogrammetriassa kuvien, ja 3D-skannereiden osalta yksittäisten skannausten, yhdistäminen tapahtuu eri kuvissa tai skannauksissa näkyvien yhteisten pintojen avulla. Litteissä, levymaisissa esineissä haasteena on esineen eri puolien yhdistäminen toisiinsa, kun yhteisiä pintoja on hyvin vähän. Tällaiset kappaleet kannattaa kuvata tai skannata pystyasennossa, varovasti esineen ympäri kiertäen, niin että kumpikin puoli näkyy samassa skannauksessa tai kuvasarjassa. Fotogrammetriassa kuvat tulee tällaisessa tilanteessa ottaa hyvin päällekkäisinä, alle 10 asteen välein.

Hyvin ohuissa tai hiusmaisissa kappaleissa yhteisiä pintoja ei aina löydy tarpeeksi, jotta 3D-digitointi onnistuisi. Asiaan voi vaikuttaa valitsemalla esineen kokoon sopivan kaluston, esimerkiksi fotogrammetriassa makro-objektiivin.

Liikkuvat osat

3D-digitointi koostetaan yleensä useasta, esineen eri asennoista otetusta kuvasarjasta tai skannauksesta, jotta kohde saadaan digitoitua joka puolelta. Esimerkiksi yksinkertainen kivikirves kuvataan fotogrammetriassa ensin yhdeltä puolelta, käännetään ympäri ja kuvataan toiselta puolelta. Liikkuvien osien haasteena on, ettei kohdetta voi kääntää eri asentoihin ilman että osat liikkuvat eri asentoon suhteessa toisiinsa.

Ratkaisuna digitoitava kohde voidaan ripustaa roikkumaan niin, että se on mahdollista skannata tai kuvata yhdessä asennossa, ilman että kohdetta joudutaan välissä kääntämään. Toinen vaihtoehto on koettaa asettaa kohde puhtaalle, läpinäkyvälle lasilevyllä, ja kuvata kohde alapuolelta lasilevyn läpi.

Yllä lueteltujen piirteiden lisäksi 3D-digitoitavan kappaleen koko vaikuttaa digitointimenetelmän toimivuuteen. Koko kuitenkin harvoin on digitoinnin esteenä, kunhan käytössä on sopiva kalusto. Fotogrammetriassa makro-objektiivin käyttö mahdollistaa hyvin pienikokoisten esineiden kuvaamisen (ks. esim. Yanagi & Chikatsu 2010; Gajski et al. 2016). Etenkin tasokkaammissa 3D-skannereissa on mahdollista vaihtaa skannerin optiikka kohteen kokoon sopivaksi (Hexagon 2020).

3D-digitointimenetelmän valinta

3D-digitointimenetelmän valintaan vaikuttavat käytettävissä olevat ajalliset ja taloudelliset resurssit sekä digitoinnin käyttötarkoitus (Gniady & Rogers 2018: 9–14). Tieteelliseen käyttöön tai dokumentointiin on tuotettava mahdollisimman yksityiskohtainen ja tarkka 3D-digitointi. Pelkkään aineiston visualisointiin esimerkiksi yleisötyössä taas riittää yksinkertaisempikin 3D-digitointi. (Immonen & Malinen 2020.) Haluttua tarkkuutta ja laatua pohdittaessa on hyvä ottaa huomioon myös aineiston tulevat käyttötarpeet. Tuottamalla saman tien laadukas 3D-digitointi voidaan vähentää tarvetta uudelleendigitointiin, ja välttää siten esineeseen kohdistuvaa räsitusta.

Myös pitkäaikais säilytyksen tarpeet vaikuttavat menetelmän valintaan: esimerkiksi fotogrammetrialla tuotetusta 3D-digitoinnista on mahdollista säilyttää alkuperäiset valokuvat, joiden pohjalta 3D-digitointi voidaan tulevaisuudessa tuottaa uudestaan. 3D-aineiston vaatima tallennustila kannattaa arvioida etukäteen, digitointiprojektin suunnitteluvaiheessa, sillä yksityiskohtaiset valokuvat tai skannaukset vaativat huomattavan paljon tallennustilaa.

3D-digitointimenetelmän hinta on usein sidoksissa sen vaatimaan osaamiseen (Riksantikvarieämbetet 2019b). Digitaaliseen fotogrammetriaan on useita avoimen lähdekoodin ohjelmistoja (ks. esimerkiksi AliceVision 2020; Colmap 2020; MeshLab 2020; Regard3D 2020; VisualSfM 2020), joiden käyttäminen kuitenkin edellyttää tietoteknistä osaamista. Suositujen kaupallisten fotogrammetriaohjelmien hinta vaihtelee RealityCapturen PPI-lisenssin kuvakohtaisesta maksusta Enterprise-lisenssin 15 000 euroon tai Agisoft Metashape Professionalin noin 3 000 euroon (Agisoft 2020; CapturingReality 2020). Esimerkiksi Metashape tarjoaa kuitenkin edullista “Educational license” -pakettia opiskeluun ja akateemiseen käyttöön. 3D-skannereiden hinta voi nousta jopa 330 000 euroon, yksinkertaisen 3D-skannerin hinnan ollessa noin 600 euroa (Kuusela 2019: 35; Riksantikvarieämbetet 2019b).

Vaihtoehtona voi olla 3D-digitointipalvelun tilaaminen ulkopuoliselta toimijalta. Tällöin on kuitenkin muistettava, ettei 3D-digitointipalvelun tuottajalla ole välttämättä tietoa arkeologisten löytöjen tai museoesineiden käsittelystä tai tieteelliseen käyttöön suunnattujen 3D-digitointiin metatietovaatimuksista. Yhteistyö ulkopuolisen toimijan kanssa vaatii sujuvaa kommunikointia ja 3D-digitointiprosessin huolellista suunnittelua yhdessä, kummankin osapuolen tarpeet huomioiden. Vaatimukset kulttuuriperintöalalla tuotettujen 3D-digitointiin tarkkuudesta ja todenmukaisuudesta voivat poiketa näyttävään visuaalisointiin tähtäävistä 3D-digitoinneista. Palvelun tuottajalle kannattaakin antaa jo etukäteen tietoja 3D-digitoinnin halutusta tarkkuudesta, resoluutiosta ja käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi Sketchfab-palvelusta valituilla esimerkeillä voidaan näyttää, minkälainen lopputulos on tavoitteena.

3D-digitoinnin fyysinen ympäristö

Etenkin suurten esinemäärien 3D-digitoinnin suunnitteluvaiheessa on hyvä huomioida digitointiin tarvittava fyysinen ympäristö. Digitoitavien esineiden turvallinen säilytys vaatii hyllytilaa lähellä 3D-digitointipistettä. Itse digitointiin tarvitaan ainakin pöytätilaa, studiovaloja ja valotelttä. Automatisoitu tai käsin pyöritettävä kuvaustaso nopeuttaa kuvaus- tai skannausprosessia. Esineiden tukemiseen soveltuvat parhaiten vaahto- tai solumuovitetut (Ahmed et al. 2014: 143). Metatietojen syöttämistä varten 3D-digitointipisteellä on hyvä olla tietokone tai tabletti, vaikka 3D-digitoinnin lasketus tapahtuisikin muualla.

3D-digitointiin laskettamiseen käytetyssä tietokoneessa on oltava laadukas prosessori (CPU) ja grafiikkaprosessori (GPU) sekä runsaasti keskusmuistia (RAM) – usein pelikäyttöön suunnitellut tietokoneet vastaavat hyvin 3D-digitoinnin tarpeisiin. Tietokonetta hankkiessa on tärkeää tutustua 3D-digitointiohjelmien vaatimuksiin, jotka komponenttien tehon lisäksi voivat olla merkittäviä. Esimerkiksi RealityCapture-ohjelma vaatii nimenomaan NVIDIA:n



Kuva 7. 3D-digitointistudion ei tarvitse olla kookas, kunhan tilaa on tarvikkeille, valoteltalle ja digitoitaville löydöille. Kuvan Turun yliopiston arkeologian oppiaineen 3D-studiossa voi kuvata jopa 45 cm pitkiä löytöjä.

näytönohjaimen (CapturingReality 2019a) ja Artec'n skannereiden kanssa käytettävä Artec Studio ei tue AMD:n valmistamia prosessoreita (Artec 2020a).

Turun yliopiston arkeologian oppiaineessa 3D-digitointikäytössä on Dell Alienware Aurora R8 -pöytäkone seuraavin komponentein:

- CPU Intel(R) Core (TM) i7-9700K
- GPU NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti
- RAM 32 GB
- Windows 10

Koneen keskusmuisti ja prosessori olivat arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeen 3D-digitoinnissa suurin pullonkaula, sillä 64 gigatavun keskusmuisti ja tehokkaampi prosessori olisivat vastanneet tarpeisiin paremmin.

3D-digitointimenetelmät

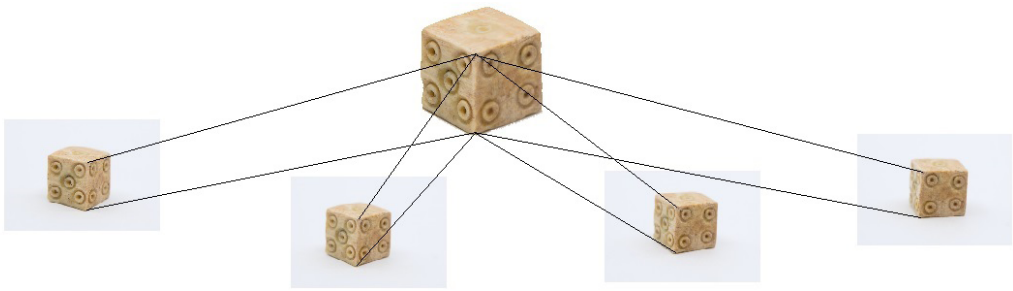
Yleisiä 3D-digitointimenetelmiä ovat digitaalinen fotogrammetria sekä infrapuna-, laser- tai rakennevaloon perustuvat 3D-skannerit (Gniady & Rogers 2018). Usein 3D-digitointimenetelmien yhteydessä mainitaan myös RTI-kuvaus, jolla kaksiulotteiseen valokuvaan lisätään syvyysvaikutelma yksityiskohtien erottamiseksi. RTI-kuvaus ei kuitenkaan tuota varsinaista kolmiulotteista pistepilveä tai polygoniverkkoa, eikä siihen siksi perehdytä tässä työssä. Tarkempia tietoja menetelmästä tarjoavat esimerkiksi Christie (2019) ja Porter et al. (2016b).

Erityisesti haastavien kohteiden 3D-digitointiprosessissa voidaan käyttää useampaa 3D-digitointimenetelmää tai -ohjelmaa. Esimerkiksi Turun yliopiston arkeologian oppiaineen rautakautisten metallilöytöjen 3D-digitoinnissa on käytetty Agisoft Metashape, RealityCapture- ja Blender -ohjelmia. Smithsonian Digitization Program Office onkin kehittänyt Cook-hallintapalvelun usean ohjelman yhteiskäytön helpottamiseksi (Rossi et al. 2019).

Digitaalinen fotogrammetria

Fotogrammetriassa kohteen kolmiulotteinen muoto lasketaan kohdetta esittävien valokuvien pohjalta. Menetelmä on kehittynyt huomattavasti 1900-luvun lopussa ja etenkin 2000-luvun alun aikana (ks. esim. Doneus et al. 2011; Kjellmann 2012; Christie 2019). Nykyisessä *Structure from Motion* eli SfM-menetelmässä myös kameran sijaintitieto lasketaan valokuvien pohjalta, eikä kameran koordinaatteja tarvitse erikseen mitata. Kameralla voidaan siis vapaasti kuvata kohdetta joka puolelta niin, että kukin kohteen piste esiintyy useammassa valokuvassa eri suunnista nähtynä.

Fotogrammetria on monipuolisuutensa ansiosta arkeologiassa suosittu 3D-digitointimenetelmä. Menetelmä mahdollistaa tarkkojen, hyvin teksturoitujen digitointien teon edullisella kalustolla, sillä kamera on usein jo saatavilla ja kuvausvarusteet on mahdollista hankkia tee se itse -periaatteella. Kaupallisten ohjelmien, kuten Agisoft Metashapen, Capturing Realityn RealityCapturen ja PhotoModelerin, lisäksi tarjolla on myös laadukkaita avoimen lähdekoodin ohjelmia, kuten Colmap, Meshlab, Meshroom, Regard3D ja VisualSfM (AliceVision 2020; Colmap 2020; MeshLab 2020; PhotoModeler Technologies 2020; Regard3D 2020; VisualSfM 2020). Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke on tuottanut ohjeet fotogrammetriseen



Kuva 8. Fotogrammetria-ohjelma tunnistaa kustakin kuvasta pikseliryhmiä ja vertailee niitä muihin kuviin. Esineen pinnan laskemiseksi kutakin esineen kohtaa kuvaavaan pikseliryhmän tulee esiintyä useammassa, eri suunnasta otetussa valokuvassa.

3D-digitointiin Metashapen ja RealityCapturen avulla (Liitteet 1 ja 2), sekä ohjeet fotogrammetriaan soveltuvien valokuvien ottamiseen Turun yliopiston arkeologian oppiaineen kalustolla (Liite 3). Laadukkaita ohjeita ovat tuottaneet myös muun muassa arkeologi Samantha Porter (Porter 2015), Readingin yliopisto (McNutt 2019), Ruotsin Riksantikvarieämbetet (2019c) ja Cultural Heritage Imaging -organisaatio (CHI 2020b).

Valokuvaus fotogrammetriassa

Fotogrammetrisen 3D-digitoinnin ensimmäinen työvaihe on kohteen, tässä tapauksessa arkeologisen esineen, kuvaaminen. Fotogrammetrialla tuotetun 3D-digitoinnin laatu on suoraan sidoksissa käytettyjen valokuvien laatuun ja riittävään määrään. Kuvatessa huomio on kiinnitettävä taustaan, valaistukseen, valotukseen ja kuvan terävyyteen.

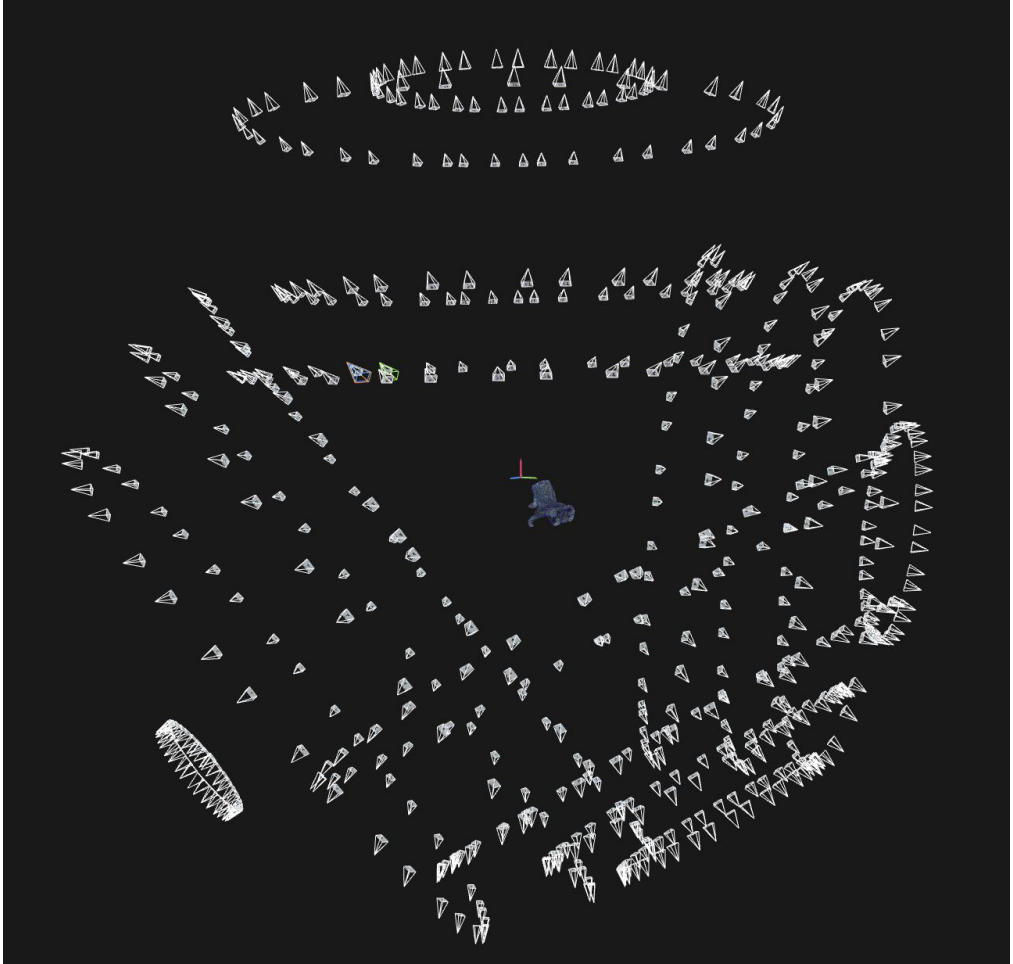
Kuvaustaustan poistaminen

Jos esine halutaan kuvata joka puolelta, on kuvissa näkyvä tausta “irrotettava” esineestä (Sapirstein 2018: 34–35). Tällöin fotogrammetria-ohjelma huomioi 3D-digitoinnissa vain itse esineen piirteet, eikä digitoinnissa ole esimerkiksi osia tasosta, jolle esine on asetettu kuvattavaksi. Tämä mahdollistaa esineen kuvaamisen eri asennoissa eri kuvissa, esimerkiksi sen kääntämisen ylösalaisin.



Kuva 9. Kivikautisen reikäkiven tausta on peitetty Metashape-ohjelman maskaustyökälulla, jotta ohjelma huomioi kuvista vain itse kiven tunnistettavat piirteet. Kiven asentoa suhteessa kuvaustaustaan voidaan siksi vapaasti muuttaa, jolloin kivi voidaan kuvata ensin oikein ja sitten väärin päin.

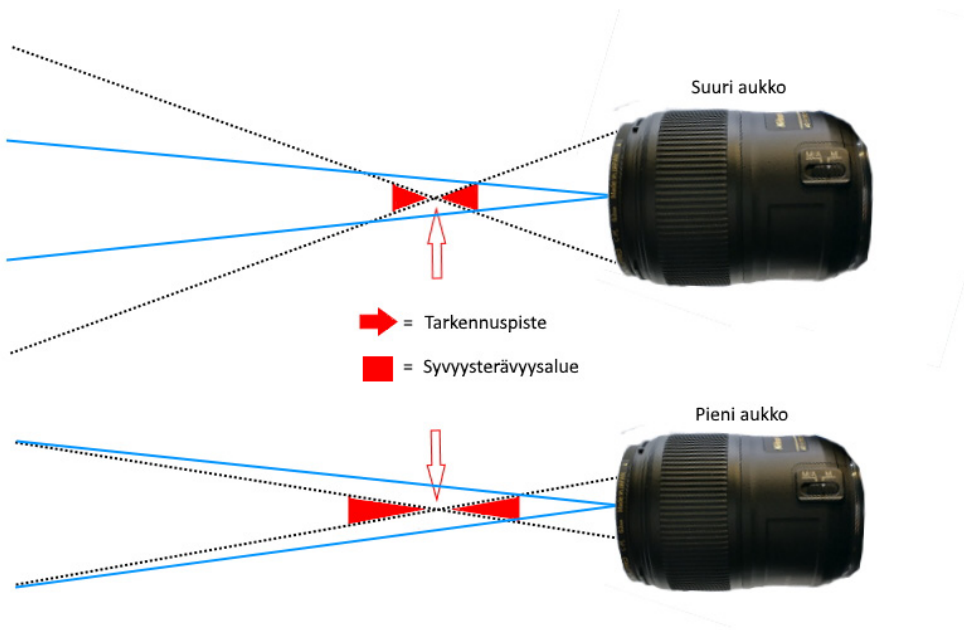
Kuvaustausta voidaan irrottaa esineestä monella tapaa: jos kuvatessa käytetään valkoista tai mustaa hyvin yksiväristä kuvaustaustaa, ei fotogrammetria-ohjelma tunnista siitä helposti erotettavia pisteitä, eikä pysty luomaan pistepilven pisteitä taustan alueesta (ks. esimerkiksi Falkingham 2019). Toinen vaihtoehto on peittää tausta maskilla kuvankäsittelyohjelmassa tai fotogrammetria-ohjelmassa (ks. esim. Bischoff 2019). Tällöin voidaan käyttää esimerkiksi kirkkaan vihreää kuvaustaustaa (ns. green screen). Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeessa kirkkaasti valaistu valkoinen kuvaustausta toimi hyvin yhdessä RealityCapture-ohjelman kanssa, eikä kuvien taustaa tarvinnut erikseen peittää maskilla.



Kuva 10. Rautakautisen soljen 3D-digitointi RealityCapturessa. Soljesta otetut kuvat näkyvät valkoisina suorakulmioina. Solki on kuvattu neljässä eri asennossa, kussakin asennossa neljä kuvakehää. Kuvien suuri määrä ja päällekkäisyys varmistavat, että eri asennoissa otetuissa kuvasarjoissa on riittävästi yhteisiä pintoja kuvakehien yhdistämiseen fotogrammetria-ohjelmassa.

Kuvien määrä, suunta ja päällekkäisyys

Laadukkaaseen 3D-digitointiin tarvitaan tarkkoja valokuvia joka puolelta kohdetta niin, että kuvissa on runsaasti päällekkäisyyttä. Yleinen periaate on kuvata kohde ensin yhdessä asennossa kehämäisesti joka suunnasta, kuvien välin ollessa noin 10 astetta. Kehiä kuvataan eri korkeuksilta, ensin lähes vaakatasosta ja lopuksi kohteen yläpuolelta. (Evin et al. 2016.) Kohteen asentoa käännetään ja kuvaaminen toistetaan, kunnes kohteen kaikki sivut on kuvattu. Kuvatessa on varmistettava, että eri suunnista otetuissa kuvakehissä näkyy tarpeeksi yhteisiä pintoja, jotta eri kuvakehät voidaan yhdistää toisiinsa.



Kuva 11. Aukon koon vaikutus kuvan syvyysterävyysalueeseen.

Kuvien terävyys

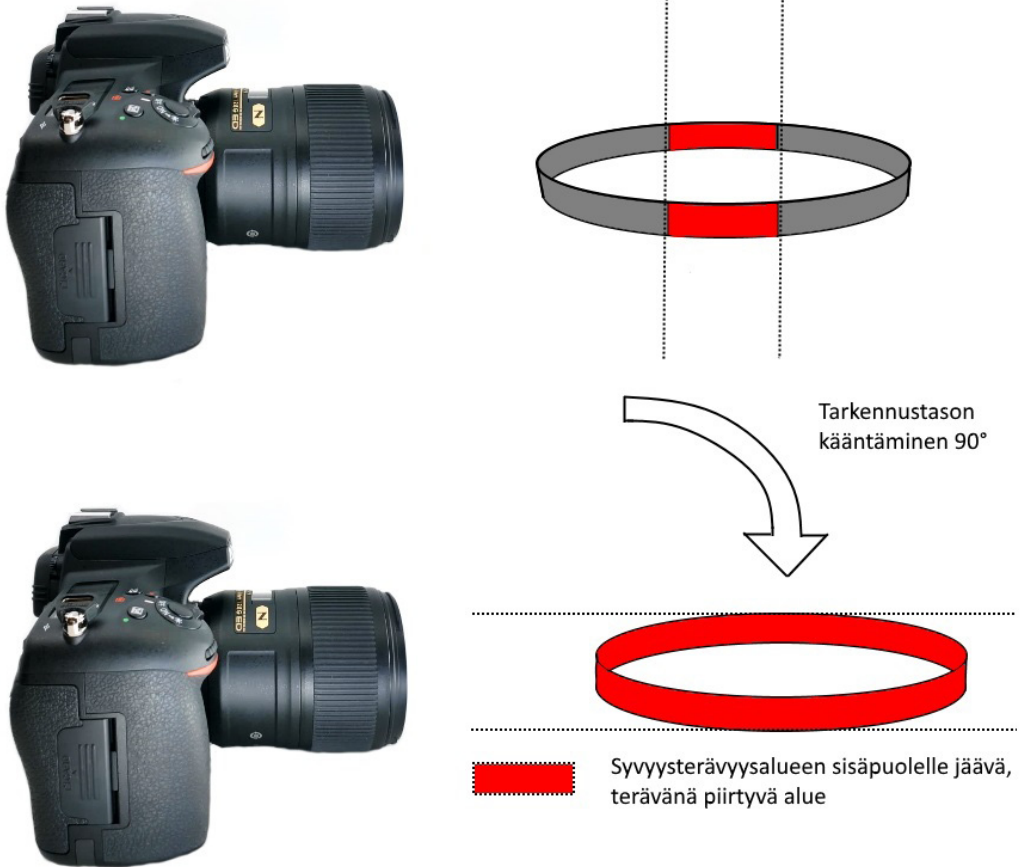
Fotogrammetriassa käytettyjen kuvien terävyys vaikuttaa 3D-digitoinnin tarkkuuteen ja tekstuurin laatuun (Magnani et al. 2016). Tavoitteena ovat kauttaaltaan syväterävät kuvat. Kamerassa kuvien syväterävyyteen vaikuttavat objektiivin polttoväli suhteessa kennon kokoon, kuvausetäisyys sekä käytetty aukon koko.

Mitä kauempana kamera on kohteesta, sitä pidempi kuvan syvyysterävyysalue on. Myös pieni aukko (eli suuri lukema, esimerkiksi $f/8$, $f/11$ tai $f/16$) tuottaa pidemmän syvyysterävyysalueen. Aukon kokoa ei kuitenkaan kannata pienentää liikaa, sillä silloin kuvan terävyys heikkenee koko kuvan alalla (Marziali & Dionisio 2017: 300; Sapirstein 2018: 34). Pienin aukon koko, jolla voidaan ottaa laadukkaita valokuvia, on kamerakohtainen.

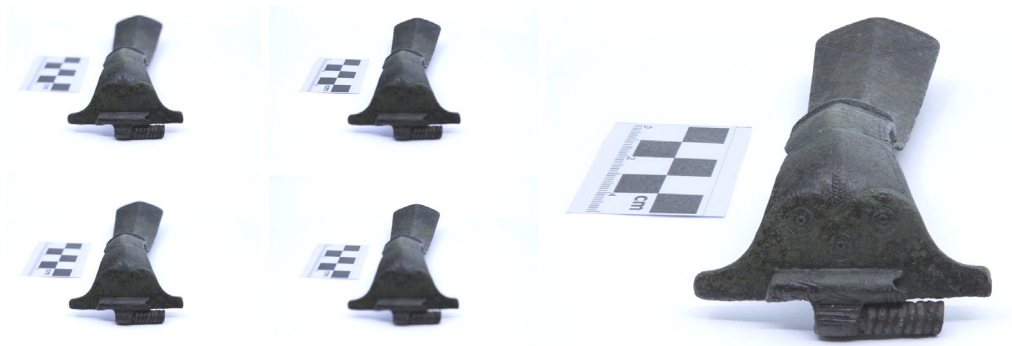


Kuva 12. Yllä aukolla f/22 (pieni aukko) otettu valokuva, alla aukolla f/5.6 (suuri aukko) otettu valokuva.

Etenkin pienten esineiden kuvaamisessa syvyysterävyys on haaste, sillä yksityiskohtien erottamiseksi kuvausetäisyys on pidettävä lyhyenä. Kuvien syvyysterävyyden parantamiseksi on erilaisia käytännön ratkaisuja (kuvat 13–15).



Kuva 13. Tilt-shift-objektiivilla kameran tarkennustaso voidaan kääntää esineen muodon suuntaiseksi, kun se yleensä on kohtisuoraan kameran objektiivin suhteen. Näin syvyysterävyysalueen suunta saadaan vastaamaan paremmin kuvauskohteen muotoa. Tilt-shift-objektiivi ei noudata täsmälleen fotogrammetriassa yleensä käytettävää matemaattista mallia, mutta objektiivin aiheuttama virhe 3D-digitoinnin tarkkuudessa jää alle 0,2 millimetrin (Nocerino et al. 2016: 105).



Kuva 14. Focus stacking tai focus bracketing -menetelmässä kohteesta otetaan täsmälleen samasta kohdasta useampi kuva eri tarkennuksilla – aloittaen esineen etummaisesta osasta ja jatkaen kohti esineen kaukaisinta osaa. Nämä “raakakuvat” yhdistetään kuvankäsittelyohjelmassa yhdeksi valokuvaksi, johon on poimittu terävinä näkyvät alueet. (Clini et al. 2016.)



Kuva 15. Esine voidaan myös kuvata tavanomaisella kalustolla, mahdollisimman pienellä aukolla, ja sumeat alueet voidaan poistaa jälkikäteen kuvista maskaamalla (Bischoff 2019). Tällöin kuvia on oltava runsaasti, jotta esineen joka puolelta on myös riittävästi kuvia, joissa kyseinen kohta näkyy terävänä. Kuvassa olevasta rannerenkaasta kuvattiin ensin kuvakehä tarkentaen rannerenkaan etummaiseen osaan (vasemmalla), sitten toinen kuvakehä tarkentaen takimmaiseen osaan (oikealla). Näin koko kuvakehä voitiin maskata samalla maskilla.

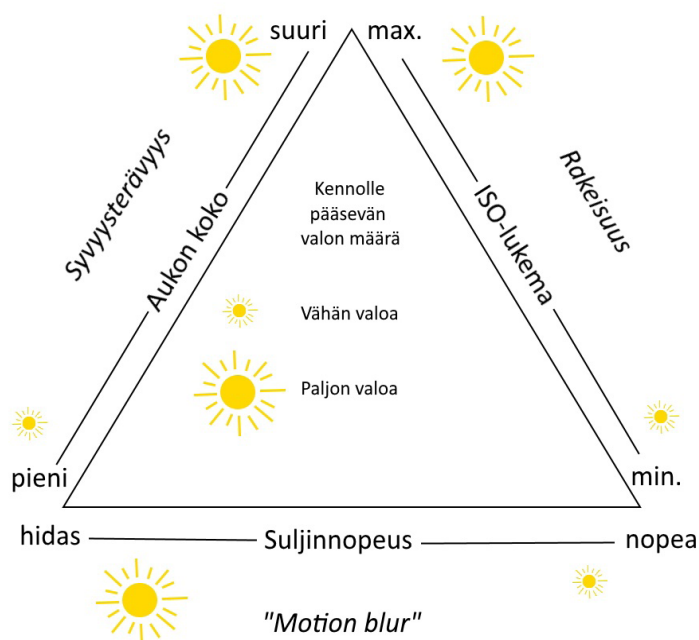


Kuva 16. Epäsuoralla valolla saadaan tasainen valaistus eikä esineen pinnalle tai alle jää varjoja. Kuvassa Foldio360 -kuvausteltoa valoineen.

Syväterävyyden lisäksi kuvissa on vältettävä liikkeestä aiheutuvaa sumeutta. Koska esineet kuvataan pienellä aukolla, on kameran suljinaika pitkä, jotta kuvat valottuvat riittävästi. Käsivaralla kuvaamisen sijaan on käytettävä kameran jalustaa sekä etälaukaisinta, jotta kamera pysyy aivan paikallaan kuvaamisen ajan.

Valotus

Jotta esineen yksityiskohdat erottuvat kuvissa ja 3D-digitoinnin tekstuuri vastaa esineen todellista värisävyä, on valokuvien valotuksen oltava kunnossa. Valotukseen vaikutetaan sekä ulkoisesti, kuvaamalla esine neutraalin sävyisessä, tasaisessa ja riittävän kirkkaassa valossa, että kameran asetusten avulla (Marqués 2016; Verhoeven 2016: 194–227).



Kuva 17. valotukseen vaikuttavat kameran asetukset.

Kun riittävän kirkas valo suodatetaan esimerkiksi valkoisen, harsomaisen kankaan läpi, esineen pinnalle ei jää voimakkaita varjoja eikä heijastuksia. Valkoinen “valotelta” on edullinen ostaa tai rakentaa itse. Valot sijoitetaan valotelan ulkopuolelle tai sisäpuolelle kohti valotelan seiniä, jolloin valo heijastuu seinistä. Valonlähteen sävyn tulisi olla lähellä 5 500 kelviniä eli kirkkaan päivänvalon sävyä. Jos valo on esimerkiksi liian kellertävää, myös 3D-digitoinnin tekstuurista tulee luonnottoman kellertävä. Kuvien väritys voidaan korjata kameran valkotasapainon asetuksista sekä jälkikäteen kuvankäsittelyohjelmassa.

Kameran asetuksissa valotukseen vaikuttavat ISO-lukema, suljinaika ja aukon koko. Fotogrammetriassa kuvat otetaan yleensä hyvin pienellä aukolla, jotta kuvien syvyysterävyysalue on mahdollisimman laaja. Pientä aukkoa käytettäessä kohde tulee valaista hyvin ja kuvien valotusajan on oltava tarpeeksi pitkä. Esimerkiksi arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeessa käytettiin neljää 5 500 kelvinin sävyistä LED-valoa ja suljinaika oli yleensä 1/5 sekuntia. ISO-lukema on laadukkaan, kohinattoman valokuvan saamiseksi pidettävä mahdollisimman pienenä. (Porter et al. 2016c.)

Kiiltäviä materiaaleja kuvatessa voidaan käyttää polarisaatiosuodinta ehkäisemään kirkkaita heijastuksia. Tällöin kameran suljinaika on pidettävä hieman pidempänä, esimerkiksi 1/3 sekuntia, sillä suodin estää osittain valon pääsyn kameran kennolle.

Valokuvien käsittely ja tiedostomuodot

Jos mahdollista, 3D-digitointia varten otetaan valokuvat RAW-muodossa, eli yksinkertaistamattomassa tiedostomuodossa, josta valokuva on helppo muuntaa toiseen tiedostomuotoon tai muokata. Ennen fotogrammetria-ohjelmaan vientiä RAW-muotoiset kuvat jälkikäsitellään ja muunnetaan arkistokelpoiseen tiedostomuotoon kuten .tif. Lisäksi kuvista tuotetaan RAW-muotoinen varmuuskopio esimerkiksi Adoben digital negative (.dng) -tiedostomuodossa.

Jälkikäsitelyn yhteydessä voidaan säätää esimerkiksi kuvien kirkkautta ja värilämpötilaa. Kuviin tehdyt muokkaukset on tärkeä kirjata 3D-digitoinnin metatietojen yhteyteen.

Fotogrammetria-ohjelmat eivät yleensä tallenna itse valokuvia, vaan pelkästään tiedostopolun siihen kansioon, josta valokuvat on tuotu ohjelmaan. Kansion ja valokuvatiedostojen sijainti ja nimi kannattaa siksi korjata jo etukäteen halutunlaisiksi, sillä esimerkiksi jälkikäteen muutettu kansion nimi on korjattava myös ohjelman tietoihin, jotta ohjelma löytää valokuvat.

Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke on tuottanut ohjeet valokuvien yksinkertaiseen jälkikäsitelyyn ja tiedostomuodon muuntamiseen RAWtherapee-ohjelmassa (Liite 4).

Kuvausprosessin automatisointi

Suuria esinemääriä kuvattaessa kuvausprosessia voidaan nopeuttaa ja automatisoida erilaisilla sovelluksilla. Käyttämällä pyörivää kuvaustasoa kamera voidaan pitää paikoillaan jalustalla ja esinettä voidaan kääntää suhteessa kameraan. Edulliseksi, käsikäyttöiseksi kuvaustasoksi käy esimerkiksi pyörivä juustotarjotin (Porter et al. 2016c). Automatisoituja, sähköisiä kuvaustasoja ohjataan tietokoneen tai älypuhelimien kautta, ja kuvaustaso voidaan yhdistää myös kameraan, jolloin kuvaustaso kääntyy esimerkiksi 10 astetta, kamera ottaa automaattisesti kuvan, kuvaustaso kääntyy taas 10 astetta ja niin edespäin, kunnes koko kuvakehä on kuvattu (ks. esim. Sapirstein 2018).

Osa kuvaustasoista tukee useamman kameran samanaikaista käyttöä, esimerkiksi Foldio-kuvaustaso ohjaa kameroita infrapunavalon kautta, jolloin kuvaustasoon voidaan yhdistää haluttu määrä kameroita (Orangemonkie 2020). Kuvausprosessi nopeutuu useammalla kameralla samanaikaisesti kuvaamalla, mutta kameroiden ja objektiivien mallin tulisi olla samoja. Useamman eri kameramallin tai objektiivin käyttäminen voi aiheuttaa epätarkkuuksia 3D-digitoinnin geometriaan. Osa fotogrammetriaohjelmista, esimerkiksi Metashape



Kuva 18. Foldio360-kuvaustasoa ohjataan kännykkäsovelluksella. Sovellus ottaa automaattisesti 24, 36 tai 48 valokuvan kuvakehän. Etäyhteys kameraan tai kameroihin tapahtuu infrapunavalolla. Useampaa kameraa käyttämällä säästyy työaikaa, koska eri korkeuksilta otettavat kuvakehät voi kuvata samanaikaisesti.

ja RealityCapture, tunnistaa ohjelmaan vietyjen valokuvien tiedot ja ryhmittelee kuvat kuvauskaluston mukaan ennen kuvien yhdistämistä.

Objektiivin valinta ja kuvien kalibrointi

Objektiivin valinta vaikuttaa tuotetun polygonimallin tarkkuuteen. Fotogrammetriassa suositellaan käyttämään ensisijaisesti prime-objektiivia, jotta objektiivin polttoväli on kaikissa kuvissa sama (Luhmann et al. 2016: 38). Zoom-objektiivia käytettäessä objektiivi voidaan kiinnittää paikoilleen esimerkiksi teipillä. Normaaliobjektiivilla eli objektiivilla, jonka polttoväli on lähellä 50 mm täysikennoisella kameralla tai 30–35 mm kroppikennoisilla kameroilla valokuvat vääristyvät mahdollisimman vähän ja 3D-digitointi on mahdollisimman tarkka (Verhoeven 2016: 191–193; Verdiani et al. 2018: 245). Voimakkaasti vääristävällä hyvin lyhyen tai pitkän polttovälin objektiivilla otetut valokuvat voidaan kalibroida, jolloin objektiivista syntyvä vääristymä korjataan ennen varsinaista kuvien yhdistämistä fotogrammetria-ohjelmassa. Osa fotogrammetriaohjelmista, kuten Metashape ja RealityCapture, kalibroi kuvat automaattisesti. Erikseen tehtävän kalibroinnin hyödyistä on ristiriitaisia tietoja. Arkeologisia löytöjä on 3D-digitoitu tutkimustarkoitukseen kalibroimattomista kuvista (mm. Katz & Friess 2014; Magnani et al. 2016), mutta toisaalla suositellaan erillistä kuvien kalibrointia (Archaeology Data Service / Digital Antiquity 2011a; Karme 2020). Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeessa tutkittiin siksi valokuvien kalibroinnin vaikutusta 3D-digitoinnin tarkkuuteen. Kalibroidusta ja kalibroimattomasta kuvasarjasta Metashape-ohjelmalla tehdyt 3D-digitoinnit poikkesivat toisistaan keskimäärin 0,000134 mm, vaihteluvälin ollessa 0,000393 mm. Poikkeaman ollessa näin pieni, ei hankkeessa kalibroitu kuvia erikseen ennen fotogrammetria-ohjelmaan vientiä. Kalibroinnin tarpeellisuutta kannattaa kuitenkin pohtia tapauskohtaisesti, 3D-digitoinnin tavoitteet ja käytetty kalusto huomioiden.



Kuva 19. Kuvat on otettu 24, 35 ja 50 mm polttovälillä (ylhäältä alas). Kameran ja soljen välistä etäisyyttä ei ole muutettu kuvien välissä, vaan kuvien välinen eroavaisuus johtuu eri polttoväleistä.

3D-digitointiprosessi fotogrammetria-ohjelmassa

Valmiit kuvat viedään fotogrammetria-ohjelmaan, jossa suoritetaan seuraavat työvaiheet (suluissa olevat englanninkieliset termit ovat fotogrammetriassa yleisesti käytössä olevia nimityksiä kullekin työvaiheelle):

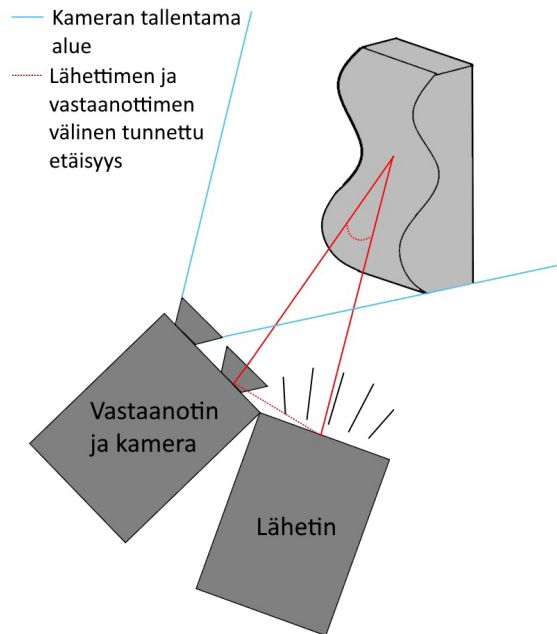
1. Kuvien yhdistäminen (align): Valokuvien sijainnin ja kohteen kolmiulotteisen muodon laskeminen valokuvissa näkyvien piirteiden pohjalta. Työvaiheen tuloksena on pistepilvi, jota osassa ohjelmia voidaan vielä tarkentaa (Agisoft 2019: 25).
2. Polygonimallin laskeminen (build reconstruction, build mesh): Polygonimalli lasketaan pistepilven pohjalta. Usein fotogrammetria-ohjelmat tarjoavat eri vaihtoehtoja, kuinka tarkasti ja millä resoluutiolla polygonimallin pinta noudattaa pistepilven muotoa (esimerkiksi RealityCapturen “Preview”, “Normal detail” ja “High detail”). Valmistaa polygonimallia voi yleensä muokata jo fotogrammetria-ohjelmassa, esimerkiksi valita ja poistaa ylimääräisiä polygoneja.
3. Polygonimallin teksturointi (build texture): Kohteen värityksen eli tekstuurin laskeminen valokuvien pohjalta. Jos värityksessä halutaan välttää sumeita alueita, voi sumeat alueet peittää ennen tätä työvaihetta joko samassa ohjelmassa (Agisoft 2019: 82) tai erillisessä ohjelmassa, jolloin kuvat on tuotava alkuperäisten kuvien tilalle fotogrammetria-ohjelmaan (CapturingReality 2019b).
4. Mallin asettaminen mittakaavaan: Fotogrammetriassa kohde ei ole automaattisesti oikeassa mittakaavassa, vaan tieto kohteen koosta on tuotava ohjelmaan valokuvissa näkyvän mittakaavajanan avulla. Valokuviin merkitään ohjelmassa mittakaavajanan päät pistetyökälulla (control point, marker) ja niiden välinen etäisyys määritetään (define distance, create scale bar). Mittakaava voidaan asettaa myös lisäämällä kuvaustasolle automaattisesti tunnistettavia markkereita, joiden sijainti valitussa koordinaatistossa viedään ohjelmaan. Mittakaavaa asetettaessa on tärkeä tarkistaa, että ohjelmassa on valittu oikea mittayksikkö, jotta esimerkiksi metreinä syötetty mittakaava ei näy ohjelmassa millimetreinä.
5. Valmis 3D-digitointi viedään ohjelmasta jälkikäsiteltäväksi, esimerkiksi objektiedostomuodossa.



Kuva 20. O.-P. Puttonen skannaa kalloa Artec Space Spider -3D-skannerilla.

3D-skannerit

3D-skanneri mittaa kohteen kolmiulotteisen muodon erilaisilla valon heijastamiseen ja vastaanottamiseen perustuvilla menetelmillä. Termi käsittää laajan kirjon erilaisia skannereita, joiden toimintaperiaate, tarkkuus, hintaluokka ja käyttötapa vaihtelevat huomattavasti. Yleisimmät 3D-skannerit perustuvat laservaloon, infrapunavaloon tai rakennevaloon eli valokuvion heijastamiseen kohteen pinnalle (ks. esim. Grussenmeyer et al. 2016; Kalantari & Nechifor 2016; Lachat et al. 2017; Artec 2020b, Artec 2020c).



Kuva 21. Laserskannerin toimintaperiaate.

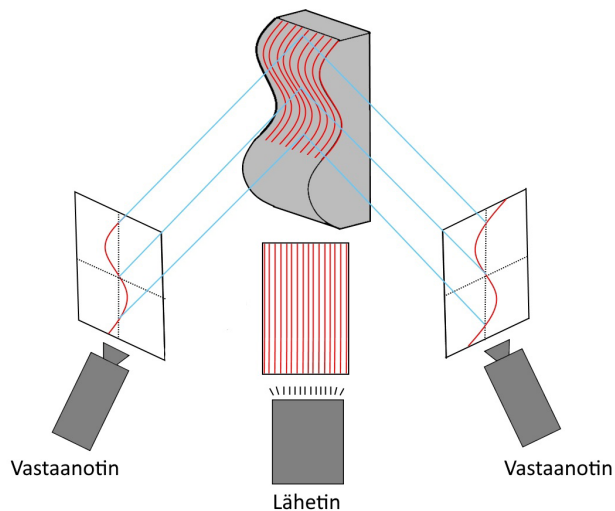
Lasersäteeseen perustuva 3D-skanneri

Laserskanneri lähettää kohteeseen lasersäteitä ja vastaanottaa kohteesta heijastuneet säteet. Kohteen kolmiulotteinen muoto voidaan laskea heijastuksista trigonometrian avulla (triangulation-based scanners, ks. Grussenmeyer et al. 2016: 317) tai mittaamalla lasersäteiden kulkuaikaa tai aaltoa (time of flight systems, ks. Grussenmeyer et al. 2016: 311–316).

Laseriin perustuvia 3D-skannereita ovat esimerkiksi 3D Sense (Pekkarinen 2020), Faro Freestyle X (Lachat et al. 2017), Konica Minolta VI-910 (Reuter 2014) sekä NextEngine 3D (Fragkos et al. 2018).

Rakennevaloskanneri

Rakennevaloon perustuvan 3D-skannerin projektori heijastaa kohteen pinnalle geometrisen valokuvion, esimerkiksi viivoja. Skanneriin kuuluva kamera tallentaa tiedot valokuvion



Kuva 22. Rakennevaloskannerin toimintaperiaate. Kuva H. Hamidin (2020) mukaan A. Debenjak-Ijäs.

muutoksista kohteen pinnalla, ja skanneri laskee trigonometrian avulla valokuvion kunkin pisteen sijainnin kohteen pinnalla (Georgopoulos et al. 2010).

Rakennevaloskannereita ovat esimerkiksi 3D3 White Light Scanner (Haukaas 2014), ArtecIn Space Spider, Eva ja Leo -mallit (Campanacho 2017; Zachar & Jončić, 2017), ATOS (Kersten et al. 2016), Breuckmann (nyk. Aicon) Smartscan ja StereoScan -skannerit (Evin et al. 2016; Katz & Friess 2014; Kivioja 2014) sekä David SLS (Pekkarinen 2020).

Infrapunavaloon perustuva 3D-skanneri

Edulliset, infrapunavaloon perustuvat 3D-skannerit heijastavat kohteen pinnalle infrapunavalokuvion ja laskevat kohteen kolmiulotteisen muodon kuvion perusteella, rakennevaloskannereiden tavoin (Kalantari & Nechifor 2016). Infrapunavaloon perustuvia 3D-skannereita ovat esimerkiksi Microsoft Kinect v1 ja v2 (Kersten et al. 2016) sekä Structure Sensor (Kalantari & Nechifor 2016; Virtanen et al. 2019).

3D-Skannausprosessi

3D-skannausprosessi koostuu yleensä seuraavista työvaiheista (Akca et al. 2006).

1. Skannaus: kohde skannataan joko pyörivällä kuvaustasolla (kiinteät skannerit) tai kiertämällä kohteen ympäri (käsikäyttöiset skannerit). Skannausten välillä kohteen asentoa käännetään niin, että se on lopulta skannattu joka puolelta.
2. Skannausten yhdistäminen: Ohjelmasta riippuen eri puolilta kohdetta otetut skannaukset yhdistetään joko manuaalisesti tai automaattisesti.
3. Polygonimallin laskeminen yhdistettyjen skannausten pohjalta.
4. Teksturointi: Tiedot kohteen väryksestä tallennetaan skannauksen yhteydessä 3D-skanneriin yhdistetyn kameran avulla. Polygonimalli teksturoidaan näiden tietojen pohjalta.
5. 3D-digitointi viedään jälkikäsiteltäväksi esimerkiksi .obj -tiedostomuodossa. 3D-skannerilla tuotettu 3D-digitointi on suoraan oikeassa mittakaavassa, mutta mittayksikkö kannattaa tarkistaa ennen digitoinnin viemistä.

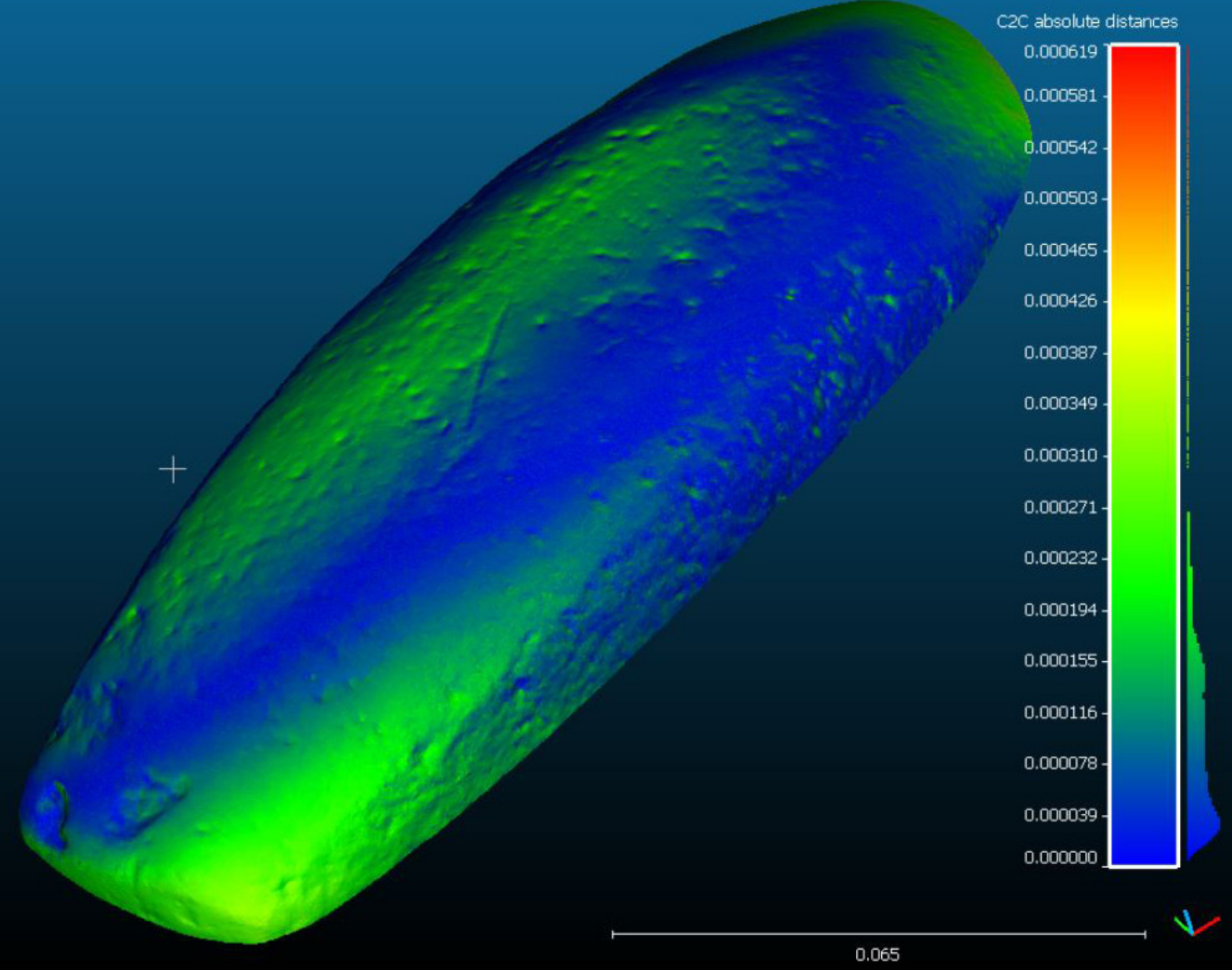
Osteologisten aineistojen 3D-skannaamiseen Artec Space Spider -rakennevaloskannerilla on tuotettu laadukas, yksityiskohtainen ohje (Campanacho 2017).

3D-digitointimenetelmien vertailu

First, it cannot be argued that the use of 3D technologies in archaeology can be an automated procedure (De Reu et al., 2014; Forte et al., 2015) or that there is a single solution that can be considered as a panacea (Koutsoudis et al., 2013).

Tsiafaki & Michailidou 2015: 42

Eri 3D-digitointimenetelmiä voidaan vertailla esimerkiksi tarkkuuden, tekstuurin laadun, prosessin keston tai yleisen käytettävyyden suhteen. Tarkkuuden vertailu tapahtuu yleisesti vertailemalla 3D-digitointia joko pistepilvenä tai polygonimallina toisella menetelmällä tuotettuun referenssiaineistoon. Tuloksena saadaan 3D-digitointien välinen eroavaisuus



Kuva 23. Vertailuun voidaan käyttää esimerkiksi CloudCompare tai GOM Inspect -ohjelmia. Kuvassa fotogrammetrialla kalibroidusta ja kalibroimattomasta kuvasarjasta tuotettujen 3D-digitointien vertailua CloudComparaessa. Kuva: Akseli Tolvi.

esimerkiksi millimetreissä. Tuloksen tarkastelussa on kuitenkin huomioitava referenssimallin tarkkuus. Esimerkiksi digitaalisella fotogrammetrialla tuotettuja 3D-digitointeja käytetään paikoin luotettavana vertailuaineistona (esimerkiksi Lachat et al. 2017; Ravanelli et al. 2017a; Virtanen et al. 2019), paikoin tutkimuksen kohteena olevana uutena menetelmänä (esim. Evin et al. 2016; Kersten et al. 2016).

Menetelmien välisten tarkkuusvertailujen lisäksi on muistettava, että myös menetelmän sisällä voi olla suuria laite- ja prosessikohtaisia eroja. Esimerkiksi FARO Freestyle 3D X -laserskannerilla tehdyn 25 skannauksen välillä oli jopa viiden millimetrin eroavaisuuksia (Lachat et al. 2017). Fotogrammetriassa kuvaustapa vaikuttaa voimakkaasti digitoinnin tarkkuuteen (Magnani et al. 2016; Sapirstein 2018).

Menetelmävertailuja on julkaistu runsaasti, sillä menetelmät kehittyvät nopeasti ja muutamankin vuoden takainen vertailu voi olla osin jo vanhentunut. Vertailuihin kannattaa siksi tutustua kattavasti, omat tavoitteet ja tutkimuskysymykset huomioiden. Yleisiä vertailuja ovat koonneet muun muassa Gniady & Rogers (2018) sekä Ruotsin Riksentikvarieämbetet (2019d). Liitteeseen 5 on koottu eri 3D-digitointimenetelmien vertailuja tarkkuuden, tekstuurin laadun sekä menetelmän keston suhteen.

Menetelmien erot sekä hyvät ja haastavat puolet voidaan summata seuraavasti:

Fotogrammetria

Tarkkuus

Riippuu voimakkaasti käytetystä ohjelmasta sekä valokuvien laadusta (Magnani et al. 2016). Yltää jopa 0,2 mm. tarkkuuteen laadukkailla, hyvällä kuvauskalustolla otetuilla kuvilla (Kersten et al. 2016: 512).

Kesto

Hyvin vaihteleva, riippuen valokuvien määrästä, ohjelmasta ja tietokoneesta. Yksinkertaisia 3D-digitointeja voidaan tuottaa jopa 30–60 minuutissa (Máte-González et al. 2017). Yleisesti prosessin kesto on noin kahdesta neljään tuntia (Mathys et al. 2013: 204; Katz & Friess 2014: 156; Marziali & Dionisio 2017; Gniady & Rogers 2018: 43; Pekkarinen 2020; Waugner 2020). Hyvin yksityiskohtaisen ja tarkan fotogrammetrisen 3D-digitoinnin tuottaminen voi kuitenkin kestää jopa yli kokonaisen työpäivän (Haukaas 2014; Järvinen 2019; Åsten 2019). Fotogrammetriassa suuri osa prosessin kehosta on kuitenkin passiivista laskenta-aikaa, jolloin ohjelman voi jättää laskemaan digitointia yön yli.

Hyvät puolet

- Hyvin toteutettuna menetelmä on riittävän tarkka vaativaankin tutkimuskäyttöön.
- Toimii muita menetelmiä paremmin haastaville, esimerkiksi kiiltäville, pinnoille.
- Laadukas, realistinen tekstuuri (Mathys et al. 2013; Gutiérrez-Heredia et al. 2015; Evin et al. 2016).
- Helposti siirrettävä kalusto (ks. esim. Katz & Friess 2014: 156; Porter et al. 2016c).

- Hinta-laatu -suhteeltaan erinomainen menetelmä (Gutiérrez-Heredia et al. 2015: 189).

Haasteet

- Digitointien laatu ei ole “vakioitu” vaan vaihtelee voimakkaasti riippuen käytetystä kalustosta, valokuvista ja ohjelmasta (Magnani et al. 2016). Tietyn digitointiprosessin tarkkuuden arviointi vaatii käytännössä vertailua esimerkiksi CT-skannauksella tai muulla tarkkuudeltaan tunnetulla menetelmällä tuotetun 3D-digitoinnin kanssa.
- Laadukkaiden, syvyysterävyydeltään riittävien kuvien ottaminen vaatii hyvää valokuvausosaamista.

Laadukkaat, kiinteät 3D-skannerit

Tarkkuus

Parhaimmillaan 0,01–0,02 millimetriä. (Kersten et al. 2016: 508).

Kesto

Nopeimmillaan, esineiden ollessa yksinkertaisia, voi skannaus kestää alle tunnin (Mathys 2013: 204; Katz & Friess 2014: 156; Reuter et al. 2014: 131; Mathys 2013: 204). Sustainable Archaeology -hankkeessa yhden esineen skannaus kesti noin puolitoista tuntia kolmen hengen ryhmältä (Ahmed et al. 2014: 150). Yleinen työaika on kahdesta kolmeen tuntia esinettä kohden (mm. Haukaas 2014; Kivioja 2014). Skannausprosessin kestoa käsittelevät julkaisut ovat kuitenkin osin jo vanhentuneita, ohjelmistojen ja komponenttien kehittyessä nopeammiksi. Myös laitteiden väliset eroavaisuudet ovat suuria, esimerkiksi Mephisto EX-Pro -rakennevaloskannerilla ihmisen kallon digitointi kesti hieman alle kaksi tuntia ja saman tekijän NextEngine -laserskannerilla tekemä digitointi lähes seitsemän tuntia (Mathys et al. 2013: 204).

Hyvät puolet

- Toistettavuus ja luotettavuus esimerkiksi tarkkuuden suhteen.
- Parhaimmillaan hyvin tarkka.

Haasteet

- Korkea hinta (Kersten et al. 2016: 508; Kuusela 2019: 35).
- Hintavan skannausohjelman käyttöön saatava tuki rajoittuu yleensä valmistajan tarjoamiin ohjeisiin, eikä yksinkertaistettuja ohjeita tai foorumikeskusteluja ole tarjolla samalla tavalla kuin edullisemmille fotogrammetriaohjelmille.
- Skannerit sopivat yleensä hyvin rajatun kokoisille esineille. Isompien tai pienempien esineiden digitoimiseksi on ostettava lisäosia (esim. Hexagon 2020).
- Tekstuurin laatu ei ole niin hyvä kuin fotogrammetriassa (Mathys et al. 2013; Gutiérrez-Heredia et al. 2015; Evin et al. 2016).

Laadukkaat käsikäyttöiset 3D-skannerit

Tarkkuus

Yleensä noin 0,05 millimetriä. (Kersten et al. 2016: 508).

Hyvät puolet

- Verrattain helposti siirrettävä kalusto (osa skannereista on skannaamisen ajaksi kiinnitettävä USB-johdolla esimerkiksi kannettavaan tietokoneeseen, mikä hankaloittaa käyttöä kentällä).
- Toistettavuus ja luotettavuus.
- Verrattain tarkka.

Haasteet

- Korkea hinta (Kersten et al. 2016: 508; Kuusela 2019: 35).
- Tekstuurin laatu ei ole niin hyvä kuin fotogrammetriassa.
- Vaateliias esineen geometrian suhteen. Monimutkaiset kohteet jäävät helposti reikäisiksi (arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeen oma havainto).
- Aktiiviseen valon heijastamiseen perustuvana menetelmänä toimii huonosti kiiltäville pinnoille.

Edulliset, mobiililaitteeseen liitettävät syvyyskamerat

Tarkkuus

Optimaalisella kuvausetäisyydellä noin 0,5–5 millimetriä (Kersten et al. 2016: 508; Virtanen et al. 2019: 451).

Hyvät puolet

- Edullinen (Kersten 2016: 508; Virtanen et al. 2019).
- Helppokäyttöinen.
- Vastaa yksinkertaisen visualisoinnin ja mittausten tarpeisiin (Ravanelli et al. 2017a, Ravanelli 2017b; Virtanen 2019).

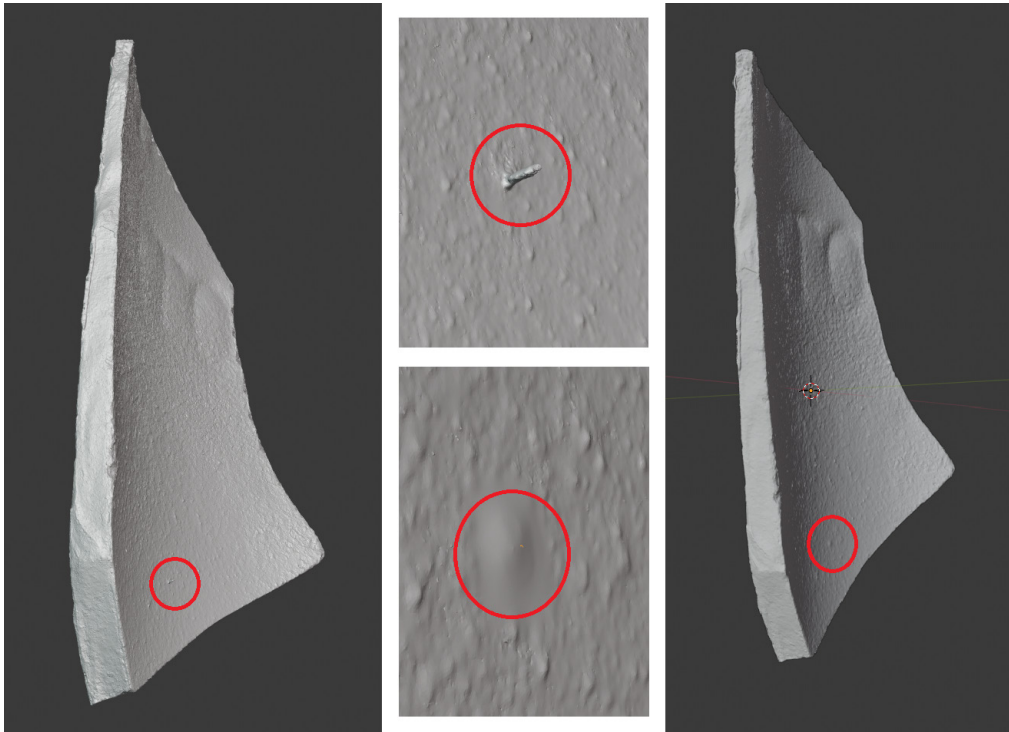
Haasteet

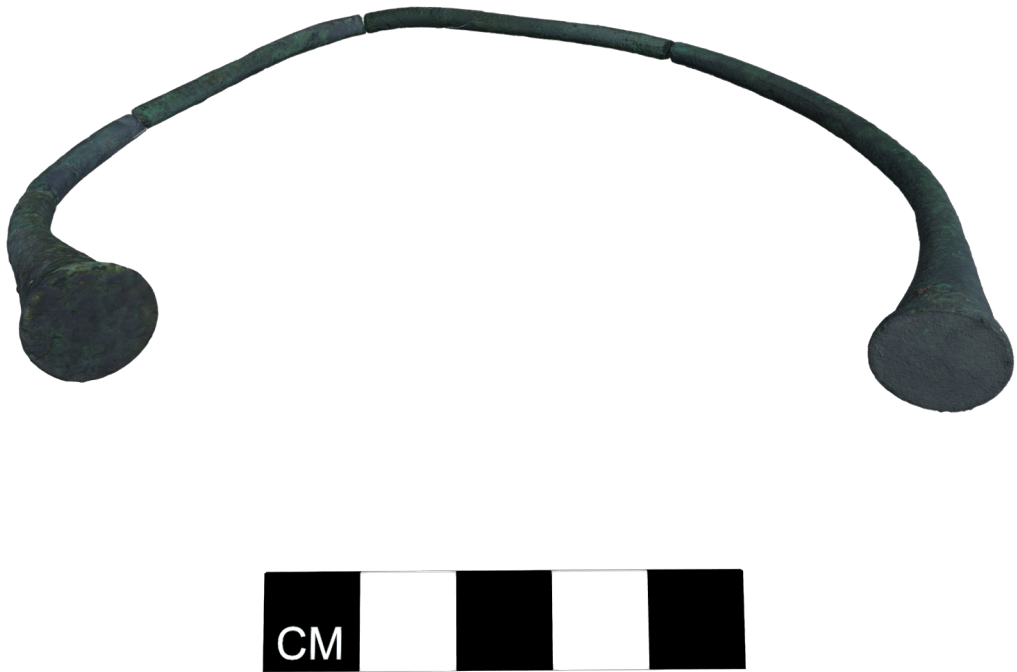
- Epätarkka etenkin kulmien kohdalla (esim. Virtanen 2019: 454–455).
- Aktiiviseen valon heijastamiseen perustuvana menetelmänä toimii huonosti kiiltäville pinnoille (Ravanelli et al. 2017b).
- Infrapunavaloon perustuvat syvyyskamerat toimivat heikosti kirkaassa auringonpaisteessa (Ravanelli et al. 2017b).

3D-digitointien jälkikäsittely

3D-digitointiohjelmalla tuotettu polygonimalli on harvoin valmis sellaisenaan julkaistavaksi. Jälkikäsittelyn avulla varmistetaan, että digitointi vastaa tulevia käyttötarpeita. Jos jälkikäsittelyn aikana muokataan digitoinnin polygoniverkkoa tai tekstuuria, on muokkaukset tehtävä aina kopioon, ei alkuperäiseen 3D-digitointiin. Muokkaukset on aina mainittava 3D-digitoinnin metatiedoissa. ”Ennen ja jälkeen” -tyyppinen kuvapari helpottaa muokkauksen hahmottamista jälkikäteen.

Kuva 24. Lasipullon katkelman 3D-digitoinnista silotettiin heijastuksen vuoksi syntynyt virhe. Kuvassa metatietoihin liitetty ”ennen ja jälkeen” -kuvapari.





Kuva 25. Jälkikäsitteilyohjelmassa voidaan myös yhdistää yksittäisistä esineen katkelmista tuotettuja 3D-digitointeja. Kuvassa yksitellen 3D-digitoituista kaularenkaan katkelmista jälkikäsitteilyyn yhteydessä tuotettu rekonstruktio kaularenkaan alkuperäisestä muodosta. Rekonstruktio J. Leppänen & P. Tervonen.

Jälkikäsitteilyyn voivat kuulua esimerkiksi seuraavat työvaiheet:

- Asettaminen koordinaatiston origoon, jolloin 3D-digitointi on helposti löydettävissä, kun digitointi tuodaan katselu- tai muokkausohjelmaan.
- Kääntäminen ”oikein päin”.
- Polygoniverkon muokkaaminen: esimerkiksi katvealueisiin jääneiden reikien paikkaaminen tai virheellisten kohoumien silottaminen.
- Tekstuurin korjaaminen.
- 3D-digitoinnin mittakaavan tarkistaminen ja digitaalisen mittakaavan liittäminen 3D-digitoinnin yhteyteen.

Jälkikäsitteily on helppo tapa varmistaa, että 3D-digitointi on arkistointikelpoinen, sillä työvaiheen yhteydessä inhimillisestä virheestä johtuvat viat on helppo nähdä ja korjata. Toisaalta työvaihe on aikaa vievä, joten jälkikäsitteilyn tarve kannattaa arvioida etukäteen ja varata työvaiheelle riittävästi aikaa.

3D-aineiston muokkaamiseen sopivia ohjelmia on lukuisia. Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke on tuottanut ohjeet 3D-digitointien jälkikäsitteilyyn, muokkaamiseen ja yhdistämiseen Blender-ohjelmassa (Liite 6). Muita maksuttomia ohjelmia ovat esimerkiksi ilmaiset Meshlab (2020) tai Meshmixer (2020).

■ *Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi*

3D-digitointien tallentaminen ja jakaminen

Useat arkeologisen aineiston 3D-digitointia käsittelevät julkaisut nostavat esille 3D-digitointien tallentamisen, pitkäaikaissäilytyksen ja uudelleenkäytön haasteet (mm. Forte et al. 2015: 54–55; Tsiafaki & Michailidou 2015: 42–43; Brunke 2017; Niven & Richards 2017; Immonen & Malinen 2020; Roiha 2020). Esille nousevat seuraavat kysymykset:

Laatu: Onko 3D-digitointiprosessi dokumentoitu riittävällä tarkkuudella niin, että tuleva käyttäjä voi arvioida vastaako digitointi hänen käyttötarpeitaan? Löytyvätkö 3D-digitoinnin ohesta metatiedot, jotka sisältävät digitointia koskevien tietojen ja kuvailun lisäksi tietoa 3D-digitoidusta originaalista?

Näkyvyys: Onko 3D-digitointi julkaistu niin, että sen olemassaolo on yleisesti tiedossa? Löytävätkö potentiaaliset tulevat käyttäjät 3D-digitoinnin?

Saatavuus: Onko 3D-digitointi saatavissa yleisesti käytetyssä tiedostomuodossa, jonka voi avata maksuttomalla, yleisellä 3D-katseluohjelmalla? Löytyvätkö julkaistun 3D-digitoinnin yhteydestä sen käyttöoikeudet ja tarvittaessa ohjeet siitä, mistä alkuperäisen, yksinkertaistamattoman 3D-digitoinnin ja siihen liittyvät lisämateriaalit saa käyttöönsä?

Seuranta: Vastaako jokin taho sekä itse 3D-digitoinnin että siihen liittyvien tiedostojen aktiivisesta päivittämisestä uusiin tiedosto- ja tallennusmuotoihin? Onko aineistoa hallinnoivalla organisaatiolla pitkän tähtäimen strategia 3D-aineistojen säilyttämisestä?

Viime vuosina mainittuihin kysymyksiin on haettu entistä aktiivisemmin ratkaisuja luomalla yhteisiä käytäntöjä ja laatuvaatimuksia. Näitä ovat kansainväliset sopimukset kulttuuriperintöaineiston digitointiin ja virtuaaliarkeologiaan liittyen, yleiset metatietomallit, sekä kansainväliset FAIR-periaatteet, joiden tavoitteena on tehdä digitaalinen tutkimusaineisto löydettäväksi, saavutettavaksi, yhteentoimivaksi ja uudelleenkäytettäväksi (London Charter 2009; Archaeology Data Service 2011b; Seville Principles 2017; DPO 2018; Europeana 2020b; FAIRDATA 2020).

Metatiedot

Metatieto on *“aineiston kontekstia, sisältöä ja rakennetta sekä niiden hallintaa ja käsittelyä koko elinkaaren ajan kuvaavaa tietoa. Metatietoa voidaan käyttää muun muassa aineiston hakuun, paikallistamiseen, pitkäaikaissäilyttämiseen ja tunnistamiseen”* (Digitalpreservation.fi 2019a). Paratiedolla kuvataan aineiston tulkintaan liittyviä tietoja, erotuksena itse aineistoa ja sen käsittelyä kuvailevista metatiedoista (London Charter 2009: 13). FAIR-periaatteista erityisesti yhteentoimiva ja uudelleenkäytettävä edellyttävät laadukkaita metatietoja.

3D-aineiston kohdalla meta- ja paratiedot nousevat erityisen tärkeiksi, sillä digitointimenetelmien ja työtapojen hajanaisuuden takia digitaalisen kopion ja alkuperäisen esineen välinen suhde voi helposti hämärtyä (DPO 2018). Kulttuuriperintöaineistosta tuotettu 3D-malli voi rakentua mittauksen, kuten 3D-skannereiden tai fotogrammetrian varaan, tai se on voitu tuottaa arkistolähteiden pohjalta 3D-mallinsohjelmalla. Kuten muunkin arkeologisen tiedon, myös 3D-digitoinnin epätarkkuus jakautuu käytetyn lähdeaineiston laatuun, kattavuuteen ja luotettavuuteen sekä lähteistä johdettujen tulkintojen määrään ja tasoon (Brusaporci 2017: 129). Tärkeä metatietoaineiston piirre onkin avoimuus tietojen keruutavasta, mahdollisista virhelähteistä sekä 3D-digitoinnin perustana olevista tulkinnoista (FAIRDATA 2020; Brunke 2017: 22). Aineiston jatkokäytön kannalta on tärkeää, että metatietojen avulla voidaan todentaa digitoinnin vastaavuus, joten metatiedoissa on mainittava, miltä osin digitointi oikeasti vastaa alkuperäistä objektia (Hupaniitty 2012: 8, 38, 55). 3D-aineiston jatkokäytön sujuvuuteen liittyy myös käytettyjen ohjelmien ja niiden asetusten ja työvaiheiden tarkka kuvailu. Esimerkiksi fotogrammetriaprosessissa käytetyt asetukset vaikuttavat voimakkaasti tuotetun 3D-digitoinnin luotettavuuteen. Parhaimmillaan metatiedot riittävät kaikkien työvaiheiden rekonstruointiin (esim. Zachar & Jončić 2017: 133, katso myös arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeen tuottama esimerkki 3D-digitoidun löydön metatiedoista liitteessä 7).

Arkeologian alalla Archaeology Data Service on yksi digitaalisen aineiston metatietoja ja uudelleenkäytettävyyttä kehittäneistä edelläkävijöistä (Archaeology Data Service 2011a; Niven & Richards 2017: 178). Viime vuosina myös suuret kulttuuriperintötoimijat kuten Europeana ja Smithsonian Digitization Program Office ovat tuottaneet selkeitä ohjeita 3D-aineistojen metatiedoista (DPO 2018; Europeana 2020a; Europeana 2020b). Ohjeistuksiin perehtyessä on kuitenkin muistettava, että osa on laadittu ensisijaisesti kiinteiden muinaisjäännösten 3D-dokumentointia ajatellen tai tilanteisiin, joissa digitoitava kohde tuhoutuu esimerkiksi arkeologisten kaivausten myötä. Tällainen tilanne poikkeaa konservoidun museoesineen 3D-digitoinnista, jossa myös originaali säilytetään.

Yleisiä metatietomalleja ovat muun muassa:

- CARARE (D'Andrea & Fernie 2013; Carare Pro 2020)
- Europeana Data Model (Europeana 2020b)
- Smithsonian 3D metadata model (DPO 2018)

Muita kulttuuriperintöaineistolle suunnattuja metatietomalleja ovat muun muassa CRMdig (CIDOC-CRM 2016), erityisesti arkeologiselle aineistolle suunniteltu STARC metadata model (Clowder 2020) sekä Ruotsin Riksantikvarieämbetetin julkaisema metatietomalli (Riksantikvarieämbetet 2019e).

3D-digitointiin liittyviä tietoja voidaan ryhmitellä esimerkiksi projektitason metatietoihin ja yksittäistä objektiä koskeviin metatietoihin (Niven & Richards 2017: 181) tai erilaisiin ryhmiin, kuten aineiston hallinnointiin, kuvailuun, teknisiin tietoihin ja rakenteisiin liittyviin metatietoihin (Blundell et al. 2018; Digitalpreservation.fi 2019b). Kattavat metatiedot vastaavat ainakin seuraaviin kysymyksiin (Archaeology Data Service 2011b; Blundell et al. 2018; Europeana 2020a):

Projektikohtainen metatieto

- 3D-digitointiprojektin tai -hankkeen esittely
 - Hankkeen nimi
 - Hankkeen kuvailu: tutkimuskysymykset, tavoite, menetelmät
 - Toteutusajankohta
 - Päätoimijat
 - Tulosten julkaisukanava
- 3D-digitointiprosessi
 - Mitä tutkimuskysymyksiä tai tarpeita ajatellen 3D-aineisto on kerätty
 - 3D-digitoidun aineiston ja koko kokoelman välinen suhde (onko digitoitu koko kokoelma vai vain sen osa, ja jos vain osa, niin millä perusteella se on valittu; ks. myös Hupaniitty 2012: 33)
 - 3D-aineiston tuottamiseen ja laatuun vaikuttavat olosuhteet (esimerkiksi keho keli maastokohteen digitoinnissa, kiireinen projekti- ja aikataulu,

- tekijöiden osaaminen)
- 3D-aineiston tuottamiseen käytetty kalusto, menetelmät ja sovellukset sekä mahdolliset kalibroititiedot
- 3D-digitoinnin toteuttajat
- Tuotettu 3D-aineisto kokonaisuutena
 - Tallennuspaikka
 - Hankkeen kansiorakenteen kuvaus, ja maininta jos esimerkiksi osa tiedostoista koostuu useasta osasta, kuten .obj -muotoiset 3D-mallit.
 - Aineiston käyttöoikeus (FAIRDATA 2020)
 - Ohjeistus aineistoon viittaamisesta (Hupaniitty 2012: 8, 39)

Yksittäisen objektin metatieto

- Originaalin objektin kuvailu
 - Kokoelmatunnus tai muu yksilöivä nimeke
 - Kuvaus objektista (esimerkiksi esinetyyppi tai löytölaji, sanallinen esinekuvaus, mitat, tulkinnat)
 - Maantieteellinen ja ajallinen konteksti
 - Originaalin sijainti tai maininta, jos originaali on tuhoutunut 3D-digitointiprosessin jälkeen
 - Originaalin käyttöoikeudet ja niihin vaikuttavat tekijät
 - Lähteet
 - Hakusanat (yleisesti tunnettuja sanastoja ja ontologioita käyttäen; FAIRDATA 2020)
- Objektin 3D-digitointiprosessin tiedot
 - Digitoinnin toteuttanut henkilö
 - Digitointipäivämäärä(t)
 - Digitointiympäristö (esimerkiksi valaistus, tausta)
 - Digitointimenetelmä

- Aineiston kalibrointi
- Mittakaavan asetus (fotogrammetrian tapauksessa avaa sitä, miten 3D-digitointi on asetettu mittakaavaan, vai onko ollenkaan)
 - Käytetty mittayksikkö (esimerkiksi mm, cm, m)
 - Kuvaus siitä, miten 3D-digitointi on asetettu mittakaavaan (onko käytetty kuvissa näkyvää, fyysistä viivoitinta, tulostettua mittakaavaa, kalibroitua mittakaavaa tai ohjelmien omia markkereita, joilla on tunnetut koordinaatit tai etäisyys)
 - Arvio mittakaavan tarkkuudesta (millä virhemarginaalilla 3D-digitointi on asetettu mittakaavaan)
- Digitointiasento/-asennot (kuinka monessa asennossa/positiossa objekti on 3D-digitoitu, esimerkiksi vain pystyasennossa vai pysty- ja vaaka-asennossa).
- Kuvausprosessi (miten objekti on valokuvattu kussakin asennossa, esimerkiksi kolme 24 kuvan kuvasarjaa, joista ensimmäinen 10 asteen, toinen 40 asteen ja kolmas 75 asteen kulmassa)
- Käytetty kalusto ja kaluston asetukset (esimerkiksi onko fotogrammetrinen kuvasarja otettu automaattisella, vaihtuvalla tarkennuksella vai kiinteällä tarkennuksella, millä polttovälillä ja valotusajalla jne.)
- Käytetyt ohjelmat ja niiden asetukset
- Prosessissa käytetyt tiedostot, esimerkiksi valokuvat ja kalibrointitiedostot
- Muut huomiot: vapaakenttä, johon liitetään selitys mahdollisista poikkeuksista
- 3D-objektin tiedot
 - 3D-objektin tunniste
 - 3D-mallin kuvaus: tyyppi (pistepilviaineisto tai polygoniverkko), koko (polygonien tai pisteiden määrä), tekstuuri, lisätyt objektit
 - 3D-malliin tehdyt muokkaukset (automaattinen tai manuaalinen katvealueisiin jääneiden reikien paikkaus, silottaminen tai muu polygoniverkon muokkaus, tekstuurin muokkaus)
 - Versiotiedot: onko 3D-digitoinnista tuotettu esimerkiksi alkuperäinen sekä yksinkertaistettu versio? Miten versiot ovat erotettavissa toisistaan?
 - Tallennuspaikka
 - Käyttöoikeudet

- 3D-objektin sekä mahdollisten siitä johdettujen versioiden tiedostomuoto tai -muodot
- Tiedostolistaus yksittäiseen 3D-digitointiin liittyvistä tiedostoista. Esimerkiksi:
 - Valokuvat
 - Kalibroititiedosto
 - 3D-digitointiohjelman tiedosto
 - Tuotettu 3D-digitointi alkuperäisessä tarkkuudessa
 - Yksinkertaistettu 3D-digitointi
 - 3D-digitoinnista tehty video

Yleiset 3D-aineistojen tallentamiseen käytetyt tiedostomuodot

3D-aineiston tallentamiseen ja jakamiseen on tarjolla lukemattomia tiedostomuotoja, sillä 3D-digitointi- ja mallinnohjelmissä on omat tiedostomuotonsa, ja aineiston siirtämiseen eri ohjelmistojen välillä on kehitetty eri tarpeisiin sopivia ratkaisuja. Keskeistä tiedostomuodoille on, että niillä on mahdollista tallentaa tieto sekä 3D-digitoinnin kolmiulotteisesta rakenteesta että väriyksestä. Niven & Richards (2017: 180) nostavat esille digitaalisten aineistojen pitkäaikaissäilyttämiseen sopivan tiedostomuodon kolme tärkeää piirrettä:

- Avoin, ei-kaupallinen tiedostomuoto, jonka kehitysvaiheet on dokumentoitu ja joka on avoimesti saatavilla
- Tekstimuotoinen tallennustapa, kuten ASCII- tai XML -pohjainen tiedosto
- Tiedostomuoto ei pakkaa (kompresso) aineistoja

Yleisimpiä ohjelmistojen välisiä tiedostomuotoja ovat obj, ply ja collada (dae). Archaeology Data Service suosittelee 3D-aineiston tallentamista pistepilvimuodossa ASCII txt -tiedostona tai polygonimuodossa obj-tiedostona (Barnes & Niven 2011: section 4; Payne & Niven 2011: section 3). Obj-tiedostomuodon rinnalle on noussut aivan viime vuosina yleistynyt, 3D-aineiston visualisointiin kehitetty glb/glTF-muoto. Finnan 3D-työryhmä suosittelee aineiston visualisointiin Finnassa glTF embedded (gltf) taikka glTF binary (glb) -tiedostoa ja reilusti alle 100 megatavun tiedostokokoa (Tiisanoja 2020). Fotogrammetrian pohjalta

tuotetuissa 3D-malleissa kaikkein varmintaa on säästää itse valokuvat pakkaamattomina tif- tai dng-tiedostoina.

Kirjoitushetkellä käytössä ovat muun muassa seuraavat yleiset tiedostomuodot:

Wavefront OBJ

Obj on yksinkertainen ASCII-pohjainen tiedostomuoto 3D-aineiston tallentamiseen ja jakamiseen. Tiedostomuoto koostuu varsinaisesta polygonimallista (obj), mahdollisesta kuvamuotoisesta tekstuurista (jpg, png, tif tai muu kuvaformaatti) sekä näitä yhdistävästä mtl-kirjastosta (Fileformat.info 2020). Tiedostomuodon etuna on sen yleinen, vakiintunut asema, jonka ansiosta valtaosa nykyisin käytössä olevista 3D-katselu- ja editointiohjelmissä tukee obj-tiedostoja.

DAE (Collada)

Collada on XML-pohjainen, avoin tiedostomuoto 3D-aineistojen pakkaamattomaan ohjelmistojenväliseen siirtämiseen. Tiedostomuoto on yleensä dae-päätteinen. Khronos groupin kehittämä tiedostomuoto muodostaa parin yhdessä glTF-tiedostomuodon kanssa. Näistä Collada on suunniteltu 3D-aineistojen siirtämiseen ohjelmien välillä esimerkiksi 3D-digitointi- tai mallinnosprosessin eri vaiheissa, kun taas glTF on suunnattu 3D-aineiston helppoon jakamiseen ja visualisointiin. (Khronos 2020.)

GLB/glTF

GlB/glTF on avoin tiedostomuoto 3D-aineistojen tehokkaaseen jakamiseen ja lataamiseen. glTF minimoi tiedostopakettien koon, sekä sen avaamiseen ja käyttämiseen tarvittavan ajan. Uudesta, vielä kehittyvästä tiedostomuodosta on useita versioita: glb / glTF embedded -muoto pakkaa 3D-aineistoon kuuluvat osat (polygonimalli, tekstuuri) yhteen ainoaan tiedostoon, mikä on etu verrattuna kolmesta tiedostosta koostuvaan obj-tiedostomuotoon. (Khronos 2019). Alkuperäisessä glTF-muodossa nämä aineistot ovat erikseen kolmena tiedostona (gltf-, bin- sekä tekstuuritiedosto), samaan tapaan kuin obj-tiedostoissa.

PLY

PLY on 3D-aineiston polygonimuotoiseen tallentamiseen suunniteltu tiedostomuoto. Muoto tunnetaan kehittäjänsä mukaan myös Stanford Triangle Format -nimellä. Tiedostomuoto sitoo polygoniverkon muotoa, väritystä, normaaleja, tekstuuria ja koordinaatteja kuvaavan tiedon yhteen tiedostoon. (Library of Congress 2020.)

XYZ

XYZ on ASCII-pohjainen tiedostomuoto, joka esittää tekstitiedostona 3D-digitoinnin pisteiden sijainnin X-, Y- ja Z-koordinaatistossa. Tiedostomuodon hyvä puoli on sen yksinkertaisuus. Haasteena on 3D-mallia määrittävien tietojen vähäisyys, esimerkiksi tieto 3D-mallin yksikkömuodosta on toimitettava tiedoston mukana. (Thomson 2020.)

DWG

AutoCAD-ohjelmistoperheen oma DWG-muoto nostetaan Avoin tiede ja tutkimus -hankkeessa esille turvallisenä 3D-mallien tallennusmuotona. Hankkeen näkökulma lienee kuitenkin lähinnä born-digital-tyyppisissä, mallinosohjelmalla tuotetuissa vektorimalleissa, jotka ovat verrattain yksinkertaisia ja teksturoimattomia (Tutkimus-PAS-työryhmä 2017: 27).

3D-PDF

3D-PDF on 3D-aineistoa sisältävä pdf-tiedosto, jossa 3D-mallia voi katsella, liikuttaa ja suurentaa. Tiedostomuoto on suunniteltu 3D-aineiston helppoon jakamiseen, sillä se mahdollistaa 3D-aineiston visualisoinnin esimerkiksi Adobe Reader-ohjelmalla. Tiedostomuoto toimii parhaiten verrattain yksinkertaisille 3D-malleille. 3D-PDF:n voi tallentaa arkistointiin suunnitellussa PDF/E-muodossa. (PDF3D 2020.)

Tallennus ja pitkäaikaissäilytys

3D-aineiston säilyvyyden ja uudelleenkäytettävyyden varmistaminen vaativat paljon muutakin kuin itse 3D-digitoinnin tallentamisen (Niven & Richards 2017: 177). 3D-digitoinnin käyttökohde vaikuttaa siihen, miten ja kuinka pitkäksi aikaa 3D-digitointi tallennetaan (Decker & Ford 2017: 189–190). Muita vaikuttavia tekijöitä ovat käytössä olevat tekniset ja taloudelliset resurssit ja digitoitavan esineen säilyvyys. Varmalle tallennus- ja pitkäaikaissäilytysratkaisulle on erityinen tarve silloin, kun alkuperäinen esine tuhoutuu esimerkiksi hauraan materiaalin takia, tai on saatavissa vain lyhyen ajan, kuten jälleenhaidattavat osteologiset aineistot. (Niven & Richards 2017: 177.)

3D-aineiston tallentaminen

3D-digitointiin liittyvä, tallennettava kokonaisuus sisältää Archaeology Data Servicen ohjeiden mukaisesti seuraavat tiedostot (2011b):

- 3D-digitoinnin yksinkertaistamattoman, mahdollisimman laadukkaan originaalin.
 - Mahdollisesti lisäksi yksinkertaistetun 3D-digitoinnin esimerkiksi selainpohjaista katseluohjelmaa varten.
- 3D-digitointiohjelman tiedosto.
- Kalibrointitiedot, kuten 3D-skannerin kalibrointitiedosto, jos aineisto on kalibroitu.
- Fotogrammetriaa käytettäessä tallennetaan myös alkuperäiset kuvat pakkaamattomina (Niven & Richards 2017: 181).
- Kattavat metatiedot txt- tai pdf-muodossa.

Pitkäaikaissäilytys

Pitkäaikaissäilytys (PAS) tarkoittaa digitaalisen informaation säilyttämistä ymmärrettävänä ja käytettävänä useiden kymmenien ja jopa satojen vuosien ajan. Laitteet, ohjelmistot ja tiedostomuodot vanhenevat ajan myötä, mutta informaation täytyy säilyä. Luotettava pitkäaikaissäilyttäminen edellyttää sisällön eheyden aktiivista valvontaa ja monenlaisiin riskeihin varautumista. Tässä ovat keskeisessä asemassa metatiedot, jotka kuvailevat mm. aineiston sisällön, historian ja alkuperän sekä tiedot siitä, miten informaatiota voidaan käyttää. PAS-palveluilla

tarkoitetaan kulttuuriperintöaineistojen ja tutkimusaineistojen pitkäaikaissäilyttämiseen tuotettuja palveluita yhdessä.

Digitalpreservation.fi 2020

Pitkäaikaissäilytyksestä vastaavat Suomen tutkimus- ja kulttuuriperintöaineistojen osalta Tieteen tietotekniikan keskus CSC sekä Tietoarkisto, tosin Tietoarkiston palvelut eivät kata tutkimuksessa tuotettua 3D-aineistoa. CSC:n PAS-palveluita tarjotaan ensisijaisesti opetus- ja kulttuuriministeriön alaisille, henkisen ja aineellisen kulttuuriperinnön säilyttämisestä vastaaville organisaatioille. (Digitalpreservation.fi 2020; Tietoarkisto 2020b.) PAS-palveluita varten aineiston on täytettävä METS-metatietostandardi, joten pitkäaikaissäilytys on hyvä huomioida jo aineiston muodostumisvaiheessa (Digitalpreservation.fi 2019b).

Jos pienen digitointihankkeen resurssit eivät riitä PAS-palvelun avulla tuotettuun pitkäaikaissäilytykseen, nousee etukäteen laadittu aineistohallintasuunnitelma entistä tärkeämpään asemaan. Suunnitelmassa huomioidaan tuotetun aineiston säilytys, käyttö- ja arkistokopiot, aineistosta tiedottaminen, käyttöehdot ja jakelu. Yksityiskohtaiset ohjeet aineistohallintaan ja säilytykseen löytyvät esimerkiksi Tietoarkiston tuottamassa *aineistohallinnan käsikirjasta* (Tietoarkisto 2020a).

Yksittäisten tai määrällisesti pienten 3D-digitoitujen aineistojen tallennuksessa on hyvä muistaa seuraavat askeleet:

3D-aineiston varmuuskopiointi vähintään kahteen tunnettuun sijaintiin, esimerkiksi ulkoiselle kovalevylle sekä organisaation palvelimelle. Aineiston ja tallennuspaikkojen nimeäminen organisaation tietokantaan niin, että ne näkyvät esimerkiksi organisaation puorakenteessa.

- Kopioinnin yhteydessä on varmistettava, ettei tiedostoja korruptoidu tai katoa. Tähän voi käyttää erillistä sovellusta, esimerkiksi Smithsonian 3D Digitization Program Officen BackIt -työkalua (Kunze et al. 2018).
- 3D-aineiston mainitseminen esimerkiksi alkuperäisten esineiden tietojen yhteydessä kokoelmanhallintajärjestelmässä.
- 3D-aineistoa hallinnoivan vastuuhenkilön nimeäminen. Tämä on erityisen tärkeää, jos kyseessä on organisaatio, jossa tehtävät vaihtuvat usein ja 3D-digitointi on hajanaista ja projektimuotoista. Vastuuhenkilön tehtävä on hyvä sitoa sopivaan työnimikkeeseen tai virkaan, jolloin tieto tehtävästä ei katoa henkilöstönvaihdoksen myötä ja tehtävän hoitamiseksi on helpompi osoittaa riittävästi aikaa.

3D-aineistojen jakaminen ja julkaiseminen

Vaikka julkaiseminen on vain viimeinen vaihe pitkässä prosessissa, on julkaisualustan merkitys museoesineen muuttamisessa virtuaaliseksi objektiksi suuri.

Pekkarinen 2020

Julkaiseminen tuo 3D-digitoinnin tutkijakunnan ja suuren yleisön saavutettavaksi, ja lisää näin merkittävästi digitoinnin arvoa. Arkeologeille suunnatussa työpajassa digitaalisen tiedon saavutettavuus nousi esille merkittävä kehityskohteena (Debenjak-Ijäs 2019; Eklund 2019). Sama huomio näkyi jo vuonna 2012 kulttuuriperintöalojen tutkijoille suunnatussa kyselyssä (Hupaniitty 2012).

3D-aineistoa on mahdollista julkaista usean eri kanavan kautta, ja vastata näin erilaisiin käyttötarpeisiin. Julkaiseminen tieteelliseen käyttöön vaatii ennen kaikkea varmuutta 3D-aineiston tallennuspaikan pysyvyydestä, sekä kattavia meta- ja paratietoja (ks. esim. Tostevin et al. 2019). Aineistoa koskeva tieteellinen artikkeli lisää sen luotettavuutta ja käyttömahdollisuuksia.

Yleisötyön kannalta on tärkeää, että julkaisualusta mahdollistaa 3D-digitointien katselun ilman tarvetta erilliselle ohjelmalle tai tiedostojen lataamiselle. Tällaisia helppokäyttöisiä, selainpohjaisia julkaisualustoja tarjoavat muun muassa Sketchfab tai Scan the world (MyMiniFactory 2020; Sketchfab 2020d). Sketchfabin kaltaisiin, organisaatioille maksullisiin palveluihin liittyy kuitenkin omat rajoitteensa. Määräaikaisissa 3D-digitointiprojekteissa on haastavaa varmistaa, että palvelun vuosimaksun maksamiseen on resursseja projektin päättymisen jälkeenkin. 3D-digitointeja voi ladata myös Wikimedia Commons tai Google Poly -sivustoille (Google 2020; Wikimedia Commons 2020). Näistä Wikimedia Commons tukee vain stl-tiedostomuotoa. Vaihtoehtona on teettää organisaation tarpeisiin vastaava, selainpohjainen julkaisualusta yksityisellä toimijalla, tai käyttää esimerkiksi Smithsonian 3D Digitization Program Officen julkaisemaa avoimen lähdekoodin 3D-julkaisualustaa (GitHub 2020).



Kuva 26. Keramiikan katkelman 3D-digitointi Sketchfab-palvelussa. Digitointiin on liitetty Annotations-työkalulla keramiikkatyyppin tunnistamiseen liittyviä tietoiskuja.

Julkaiseminen laajasti käytetyn palvelun kautta edistää 3D-aineiston löydettävyyttä ja käyttömahdollisuuksia. Esimerkiksi Europeana-kulttuuriperintöportaali tukee 3D-aineiston julkaisemista, ja sama ominaisuus on tulossa myös Finnaan. Europeana tai Finna eivät kuitenkaan vastaa aineiston säilyttämisestä, joten aineisto on julkaistava toisessa, Europeanaan linkitetystä palvelusta, jonka kautta se näkyy Europeanan hakutuloksissa. Sketchfabissa julkaistuja 3D-aineistoja voi viedä Europeanaan avoimen Share3D-palvelun kautta, jolloin aineisto näkyy Europeanassa niin kauan kuin se on aineistohaltijan käytössä olevalla Sketchfab-tilillä (Share3D 2020).

Tiedon linkittämisellä on suuri merkitys 3D-aineiston löytymiselle ja toisaalta kontekstietojen helpolle saatavuudelle. Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeen 3D-digitointeihin on esimerkiksi lisätty linkki alkuperäisen löydön löytö- tai kaivauspaikkaan Museoviraston ylläpitämässä Muinaisjäännösrekisterissä.

Arkeologisten löytöjen 3D-digitointien käyttöesimerkkejä

The adoption of 3D laser scanning by the field of archaeology has brought with it several commonly discussed benefits such as increased measurement precision, ability to reconstruct artifacts and reunite collections, and ease of investigation around an entire object with the possibility of sustained views at difficult angles. Most notably this technology facilitates virtual preservation and ease of digital data dissemination, two applications that were impossible prior to the advent 3D laser scanning.

Simon et al. 2009

Arkeologisista löydöistä tuotettuja 3D-digitointeja voidaan hyödyntää monipuolisesti tutkimuksessa, kokoelmanhallinnassa, yleisyydessä ja arkeologian opetuksessa (Simon et al. 2009).

Arkeologinen tutkimus

Tutkimuskäytössä 3D-digitointien etu perustuu niiden helppoon jakamiseen, mitattavuuteen ja visualisoinnin mahdollisuuksiin. Erilaisia, esimerkiksi esinetutkimuksessa tai osteologisessa tutkimuksessa tarpeellisia mittauksia voidaan tehdä automaattisesti suoraan 3D-aineistosta (ks. esimerkiksi Shott & Trail 2010; Neiß et al. 2014; Hess et al. 2018; Morris et al. 2018). Etenkin pienten esineiden tai piirteiden hyvin tarkat mittaukset ovat mahdollisia vain 3D-digitoinnin avulla. Esimerkiksi roomalaisiin kolikoihin lyötyjen leimojen piirteitä tutkittiin mikrometrin tarkkojen 3D-skannausten avulla. Mittausten avulla voitiin selvittää rahojen relatiivinen kronologia, ja sitä kautta kolikoita sotaväelleen jakaneen kenraali Publius Quintilius Varuksen liikkeitä Reinin alueella. (Tolksdorf et al. 2017.)

Toinen pitkälle viety esimerkki on Saksi-Anhaltin osavaltion arkeologisen viraston (Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt) 3D-digitointiosaston ja Chemnitzin teknillisen korkeakoulun kehittämä TroveSketch-ohjelmisto. Nimenomaan arkeologiselle 3D-aineistolle ja tutkimuskysymyksille soveltuvan ohjelmiston avulla voidaan muun muassa yhdistää 3D-aineistoja, esimerkiksi saman astian yksittäisten palojen digitointeja, tehdä automaattisia mittauksia astioista, viedä luetteloon standardoituja kuvia ja poikkileikkauksia



Kuva 27. Jo pelkkä tekstuurin riisuminen voi paljastaa yksityiskohtia löydön pinnasta, kuten kuvassa plombiin lyödyn leiman.

astioista ja visualisoida ja tutkia kohdetta esimerkiksi vinovalovarjostuksen avulla (Reuter et al. 2014).

Vinovalovarjostusta voidaan käyttää erityisesti huomaamattomien kaiverrusten tai naarmujen visualisointiin. Porter et al. (2016b) paljastavat yksityiskohtia pienen kivilaatan kaiverruksesta, samankaltainen esimerkki on myös Altain vuoristossa dokumentoitu, pahoin rapautunut kivipaasi, jonka pintaan tehdyt kaiverrukset erottuivat kokonaan vasta teksturoimattomassa 3D-digitoinnissa (Plets et al. 2012).

Mahdollisuus jakaa 3D-digitointeja verkon kautta on hyödyksi erityisesti silloin, kun luuaineiston tai esineiden tunnistamiseen tarvitaan kattava vertailukokoelma. Esimerkiksi arktisten eläinlajien luuaineiston 3D-digitoitu vertailukokoelma tarjoaa harvinaiset aineistot vapaasti tutkijoiden saataville (Betts et al. 2011).

Kokoelmatyössä

Arkeologisen kokeolman hallinnoinnissa 3D-digitoinnit mahdollistavat esineiden dokumentoinnin, ajallisten muutosten seurannan sekä osittaisen rekonstruoinnin. Esimerkiksi British Museumin kokoelmiin kuuluvan, kaiverretun norsunluulevyn kuntoa seurattiin konservoinnin jälkeen 3D-skannaamalla levy vuosittain, sillä levy on paikoin haljennut (Hess et al. 2015). Myös Saksi-Anhaltin osavaltion arkeologinen museo seurasi 3D-skannausten avulla puisten löytöjen kutistumista konservoinnin yhteydessä. Keskiaikaisesta, veden alle jääneestä kaivoksesta nostetut puiset löydöt skannattiin heti kaivausten yhteydessä sekä myöhemmin konservoinnin jälkeen. Näin saatiin tietoa konservoinnin vaikutuksista esineiden ulkomuotoon, ja toisaalta aineistoa verkkonäyttelyyn, sillä suuria puurakenteita ei voitu helposti liittää osaksi näyttelyä. (Schmidt-Reimann & Reuter 2016). Tampereen museoiden 3D-digitointihankkeessa tuotettiin 3D-skannaamalla kopio kumisesta, ajan saatossa tuhoutuvasta leikkikalusta (Koskinen 2019). Osin tuhoutuneita löytöjä voidaan ennallistaa niin sanotulla reverse engineering -menetelmällä, jossa löydön säilynyt osa 3D-digitoidaan ja digitaaliseen kopioon mallinnetaan puuttuva osa. Tämä voidaan lopuksi 3D-tulostaa ja liittää alkuperäiseen löytöön, kuten osin tuhoutuneen keraamisen kulhon tapauksessa (Fragkos et al. 2018).

Yleisötyössä

Laajan yleisön parissa 3D-digitointien avulla voidaan lisätä ja visualisoida tietoa esimerkiksi museo- tai verkkonäyttelyssä sekä edistää saavutettavuutta ja vuorovaikutusta kulttuuriperintöaineiston kanssa. Museoiden tuottamia verkkonäyttelyitä arkeologisesta tai historiallisesta aineistosta on lukuisia (ks. esimerkiksi Archaeo3D 2020; Institute of Archaeology of CAS 2020; Kuopion korttelimuseo 2020; Lira Artefact 2020; Livrustkammer 2020). Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointeja on saatavilla myös Sketchfab-palvelun kautta (Sketchfab 2020d). Erityisesti hankalasti saavutettava kulttuuriperintöaineisto voidaan tuoda laajan yleisön saataville 3D-digitointien avulla. Esimerkiksi Museovirasto on tuottanut vedenalaisista hylkykohteista 3D-digitointeja (Sketchfab 2020e).

3D-digitointimenetelmien kehittymisen myötä myös itse digitointiprosessi ja 3D-digitoitavan aineiston valinta on mahdollista jalkauttaa suurelle yleisölle (Ch'ng et al. 2019). Esimerkiksi Ikahuuk-hankkeessa Kanadan luoteisosan Inuvialuit -yhteisön jäsenet 3D-digitoivat yhteisön historiaan liittyviä arkeologisia löytöjä maantieteellisesti kaukana sijaitsevassa museossa, jotta yhteisön nuorille voitiin luontevasti esitellä heidän kulttuuriperintöään (Haukaas 2014). Scantheworld-sivusto kokoaa yhteen vapaaehtoisten harrastajien ja organisaatioiden

■ *Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi*

kulttuuriperintöaineistosta tekemiä 3D-digitointeja (MyMiniFactory 2020). Tuhoutuvan kulttuuriperinnön dokumentointiin tähtäävä Arc/K-organisaatio vastaanottaa vapaaehtoisten ottamia fotogrammetria-kuvasarjoja kulttuuriperintöaineistosta (Arc/K 2020).

Lähteet

Työpajat, esitelmät

Debenjak-Ijäs, A. 2019. Työpaja Suomen arkeologisen yhdistyksen järjestämällä arkeologipäivillä Lahdessa 21.–22.11.2019.

DeVet, K., Clark, J., Hardesty, J., Thomer, A., Blundell, J. 2018. *3D Metadata*. Esitelmä seminaarissa CS3DP-Forum 2, Ann Arbor, Michigan, 13.–15. 8. 2018. <<https://ir.uiowa.edu/cs3dp/forum2/presentations/6/>>. Luettu 30.7.2020.

Esitelmään on viitattu myös julkaisussa Flynn, T. 2019. What happens when you share 3D models online (in 3D)? Teoksessa Grayburn, J. Lischer-Katz, Z., Golubiewski-Davis, K., Ikeshoji-Orlati, V. (toim.). 2019. *3D/VR in the academic library: emerging practices and trends*. Council on Library and Information Resources, Arlington, VA.

Eklund, S. 2019. Työpaja Suomen arkeologisen yhdistyksen järjestämällä arkeologipäivillä Lahdessa 21.–22.11.2019.

Gniady, T. & Rogers, J. 2018. *3D Digitization for Research, Education, and Creativity*. Scholar's Commons 28.9.2018. Wells Library, Indiana University, Bloomington. <<https://scholarworks.iu.edu/dspace/handle/2022/22886>>. Luettu 3.8.2020.

Porter, S. T., Missal, K., Pawlowicz, L. 2016a. *A Comparison of Methods for Creating 3D Models of Obsidian Artifacts*. CAA 2016. 31.3.2016, Oslo, Norway. <https://www.researchgate.net/publication/299820517_A_Comparison_of_Methods_for_Creating_3D_Models_of_Obsidian_Artifacts>. Luettu 21.7.2020.

Rossi, V., Blundell, J., Wiedemeier, R. 2019. *The Smithsonian Open Source 3D Pipeline – from Preservation and Processing to Authoring and Delivery*. Esitelmä tapahtumassa 2+3D Photography Conference, Rijksmuseum Amsterdam, 8. –10.5.2019. <<https://2and3dmagazine.rijksmuseum.nl/2and3d-photography/presentations/>>. Luettu 29.7.2020.

Henkilökohtaiset tiedonannot

Eklund, S. & Malinen, I. 2020. Sähköpostikeskustelu Finna-hakupalveluun tulevaan 3D-digitointiominaisuuteen liittyvistä metatietosuosituksista 27.–28.7.2020.

Järvinen, I. 2019. Studiovierailu ja keskustelu fotogrammetriamenetelmistä ja -työtavoista Suomen Museoviraston valokuvaaja Ilari Järvisen kanssa 29.10.2019.

Karme, A. 2020. Keskustelu fotogrammetrian menetelmistä ja ohjelmista, erityisesti valokuvien kalibroinnista 4.2.2020 Teatime Research -yrityksen tiloissa.

Keränen, I. 2020. Sähköpostikeskustelu Teatterimuseon tanssipukujen 3D-digitointihankkeesta kokoelma-assistentti Inka Keräsen kanssa 7.5.2020–20.5.2020.

Koskinen, A. 2019. Puhelinkeskustelu Tampereen kaupungin museopalveluiden 3D-digitointihankkeesta Lumikki ja seitsemän kääpiötä -leikkikalun toisinnon tuottamiseksi konservattori Arja Koskinen kanssa 21.10.2019.

Tiisanoja, P. 2020. Sähköpostikeskustelu Finna-hakupalveluun tulevaan 3D-digitointiominaisuuteen liittyvistä tiedostovaatimuksista 17.2.2020 sekä 18.5.2020.

Waugner, H. 2020. Sähköpostikeskustelu 3D-digitointiharrastaja Harald Waugnerin kanssa hänen käyttämistään fotogrammetriamenetelmistä ja työprosessista 3D-digitointien tekstuurin parantamiseksi 22–29.6.2020.

Åsten, N. 2019. Puhelinkeskustelu projektiassistentti Nana Åstenin kanssa Lelumuseo Hevosenkengän kokoelmien 3D-digitointihankkeesta ja Åstenin havainnoista ja suosituksista fotogrammetriaprosessiin liittyen 30.10.2019.

Elektroniset lähteet

Agisoft. 2020. Online store. <<https://www.agisoft.com/buy/online-store/>>. Luettu 31.7.2020.

Agisoft. 2019. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5. <https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf>. Luettu 25.8.2020.

Alicevision. 2020. Meshroom: Open Source Photogrammetry Software. <<https://alicevision.org/#meshroom>>. Luettu 31.7.2020.

Arc/K. 2020. Welcome to Arc/K project. <<https://arck-project.org/>>. Luettu 25.8.2020.

- Archaeo3D. 2020. Welcome. <<https://archaeo3d.de/>>. Luettu 20.8.2020.
- Archaeology Data Service / Digital Antiquity. 2011a. Guides to good practice. <<https://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/Main>>. Luettu 29.7.2020.
- Archaeology Data Service / Digital Antiquity. 2011b. Project metadata. <https://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/CreateData_1-2>. Luettu 4.2.2020.
- Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke. 2020. Etusivu <<https://sites.utu.fi/ark3d/>>. Luettu 20.9.2020.
- Artec. 2020a. Choosing a suitable computer. <<https://artecgroup.zendesk.com/hc/en-us/articles/202408821-How-to-choose-a-suitable-computer-download-PDF>>. Luettu 3.8.2020.
- Artec. 2020b. Artec Space Spider. <<https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-spider>>. Luettu 3.8.2020.
- Artec. 2020c. Artec Leo. <<https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo>>. Luettu 3.8.2020.
- Barnes, A. & Niven, K. 2011. Close-Range Photogrammetry: A Guide to Good Practice. <https://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/Photogram_Toc>. Luettu 14.7.2020.
- Bischoff, R. 2019. Automatic background removal for photogrammetry. <<https://bischrob.github.io/Automatic-Background-Removal-for-Photogrammetry/>>. Luettu 25.8.2020
- Blundell, J., Fuhrig, L., Little, H., Pilsk, S., Rossi, V., Snyder, R., Stem, B., Sullivan, B., Tomerlin, M., Webbs, K. 2018. Smithsonian Institution 3D Metadata Overview, v. 0.6 - A product of the Smithsonian's Digitization Program Advisory Committee's 3D Subcommittee's Metadata Working Group. <<https://dpo.si.edu/sites/default/files/resources/Smithsonian%20Institution%203D%20Metadata%20Model%20-%20Overview%20Document%20v0.6.pdf>>. Luettu 6.5.2020.
- Campanacho, V. 2017. 3D Scanning Guidelines for Skeletal Remains with Artec Studio 11 at the University of Sheffield. <<https://sites.google.com/site/vanessacampanacho/resources>>. Luettu 19.8.2020.
- CapturingReality. 2020. Products. <<https://www.capturingreality.com/Products>>. Luettu 31.7.2020.
- CapturingReality. 2019a. OS and Hardware requirements. <<https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115001524071-OS-and-hardware-requirements>>. Luettu 3.8.2020.

CapturingReality. 2019b. Image masking. <<https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115001483691-Image-masking>>. Luettu 25.8.2020.

Carare Pro. 2020. About CARARE. <<https://pro.carare.eu/doku.php?id=start>>. Luettu 13.7.2020.

CHI. 2020a. Overview of CHI technologies. <<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Overview/>>. Luettu 29.7.2020.

CHI 2020b. Photogrammetry. <<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/>>. Luettu 25.8.2020.

CIDOC-CRMdig. 2016. Definition of the CRMdig - An Extension of CIDOC-CRM to support provenance metadata. <http://www.cidoc-crm.org/crmDIG/fm_releases>. Luettu 14.7.2020.

Clowder. 2020. STARC metadata schema and STARC repository. <<http://dchrepo.vi-seem.eu/spaces/5b57294ae4b084d63872d885>>. Luettu 13.7.2020.

Colmap. 2020. Colmap: About. <<https://github.com/colmap/colmap>>. Luettu 31.7.2020.

Digime. 2020. Etusivu. <<https://www.digime.fi/>>. Luettu 25.8.2020.

Digitalpreservation.fi. 2020. Kansalliset pitkäaikaissäilytyspalvelut. <<http://digitalpreservation.fi/>>. Luettu 15.7.2020.

Digitalpreservation.fi. 2019a. Sanasto. <<https://digitalpreservation.fi/specifications/sanasto>>. Luettu 15.7.2020.

Digitalpreservation.fi. 2019b. Aineistojen ja niiden metatietojen paketointi pitkäaikaissäilytykseen. <<http://digitalpreservation.fi/files/PAS-metatiedot-ja-aineiston-paketointi-1.7.2.pdf>>. Luettu 15.7.2020.

DPO. 2018. Smithsonian 3D Metadata Model. <<https://dpo.si.edu/blog/smithsonian-3d-metadata-model>>. Luettu 7.5.2020.

Europeana. 2020a. 3D Content in Europeana. <<https://pro.europeana.eu/project/3d-content-in-europeana>>. Luettu 7.5.2020.

Europeana. 2020b. Europeana Data Model. <<https://pro.europeana.eu/page/edm-documentation>>. Luettu 14.7.2020.

European commission. 2020. Basic principles and tips for 3D digitisation of cultural heritage. <<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/basic-principles-and-tips-3d-digitisation-cultural-heritage>>. Luettu 27.9.2020.

European commission. 2019. EU Member States sign up to cooperate on digitising cultural heritage. <<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/eu-member-states-sign-cooperate-digitising-cultural-heritage>>. Luettu 25.8.2020.

FAIRDATA. 2020. FAIR-periaatteet. <<https://www.fairdata.fi/tietoa-fairdatasta/fair-periaatteet/>> Luettu 13.7.2020.

Falkingham, P. 2019. Small object photogrammetry - how to take photos. <<https://peterfalkingham.com/2019/01/16/small-object-photogrammetry-how-to-take-photos/>>. Luettu 25.8.2020.

Fileformat.info. 2020. Wavefront OBJ fileformat summary. <<https://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm>>. Luettu 15.7.2020.

GitHub. 2020. Smithsonian Voyager. <<https://github.com/smithsonian/dpo-voyager>>. Luettu 3.8.2020.

GLAM 3D. 2020. GLAM 3D open access. <https://glam3d.org/set_goals.html>. Luettu 27.7.2020.

Google. 2020. Poly: uppoudu 3D -maailmaan. <https://poly.google.com/>. Luettu 21.9.2020.

Hamidi, H. 2020. Structured-light 3D scanner. <<https://www.opensourceimaging.org/project/structured-light-3d-scanner/>>. Luettu 27.8.2020.

Hexagon. 2020. SmartScan. <<https://www.hexagonmi.com/products/white-light-scanner-systems/aicon-smartscan>>. Luettu 31.7.2020.

Immonen, V. & Ratilainen, T. 2019. Teknologiaa, yhteistyötä ja tunteita: Arkeologisten löytöjen 3D-digitointi Turussa. Varsinais-Suomen kulttuuriperintöblogi, 26.8.2019. <<http://kulperi.blogspot.com/2019/08/teknologiaa-yhteistyota-ja-tunteita.html>>. Luettu 26.10.2020.

Inception. 2019. Project. <<https://www.inception-project.eu/en/project>>. Luettu 25.8.2020.

Institute of Archaeology of CAS. 2020. Archaeological 3D Virtual Museum. <<http://www.archaeo3d.com/en/home/>>. Luettu 20.8.2020.

Khronos. 2020. Collada Overview. <<https://www.khronos.org/collada/>>. Luettu 15.7.2020.

Khronos. 2019. GIFT overview. <<https://www.khronos.org/gltf/>>. Luettu 18.11.2019.

Kulttuurista perinnöksi. 2019. Kolmiulotteisia museoesineitä voi pian pyöritellä verkossa. <<https://www.kulttuuristaperinnoksi.fi/2019/kolmiulotteisia-museoesineita-voi-pian-pyoritella-verkossa>>. Luettu 25.8.2020.

Kunze, J., Littman, J., Madden, E., Scancella, J., Adams, C. 2018. The BagIt file packaging format. <<https://tools.ietf.org/html/rfc8493>>. Luettu 15.7.2020.

Kuopion korttelimuseo. 2020. Suutarin kengissä. <<https://kuopionkorttelimuseo.fi/suutarikengissa/>>. Luettu 20.8.2020.

Lelumuseo Hevosenkenkä. 2020. Lelumuseo Hevosenkengän ensimmäiset 3D-mallinnokset on nyt julkaistu. <<https://lelumuseohevosenkenka.fi/3d-mallinnos/>>. Luettu 25.8.2020.

Library of Congress. 2020. Polygon File Format (PLY) Family. <<https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000501.shtml>>. Luettu 19.10.2020.

Lira Artefact. 2020. Virtual 3D Museum “The ancient art of Siberia”. <<https://www.artefact.tsu.ru/virtualmuseum-en>>. Luettu 20.8.2020.

Livrustkammer. 2020. Explore the Museum in 3D. <<https://livrustkammaren.se/en/explore/explore-museum-3d>>. Luettu 20.8.2020.

London Charter. 2009. <<http://www.londoncharter.org/>>. Luettu 3.2.2020.

Marqués, N. F. 2016. Tutorial: Lighting in Photogrammetry. <<https://sketchfab.com/blogs/community/lighting-in-photogrammetry/>>. Luettu 25.8.2020.

McNutt, D. P. 2019. Object Photogrammetry for Beginners. <https://www.youtube.com/watch?v=NR4fvLu-D5c&list=PL_bZX3TPZF9d-BljPQguUKZptfwzahb7H>. Luettu 25.8.2020.

MeshLab. 2020. MeshLab. <<https://www.meshlab.net/>>. Luettu 31.7.2020.

Meshmixer. 2020. Autodesk Meshmixer: free software for making awesome stuff. <<http://www.meshmixer.com/>>. Luettu 17.8.2020.

MyMiniFactory. 2020. Scan the world. <<https://www.myminifactory.com/scantheworld/>>. Luettu 3.8.2020.

Orangemonkie. 2020. Foldio 360: A smart turntable to create 360 images. <<http://orangemonkie.com/foldio360/>>. Luettu 25.8.2020.

Payne, A. & Niven, K. 2011. Laser Scanning for Archaeology: A Guide to Good Practice. <https://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/LaserScan_Toc>. Luettu 14.7.2020.

PDF3D. 2020. What is 3D PDF. <<https://www.pdf3d.com/faq/what-is-3d-pdf-2/>>. Luettu 15.7.2020.

PhotoModeler Technologies. 2020. Powerful and Flexible Photogrammetry Software. <<https://www.photomodeler.com/>>. Luettu 26.10.2020.

Porter, S. 2015. SAManthropology. Tutorial: Making artefact models in Agisoft Photoscan. <<https://www.youtube.com/playlist?list=PLZzVwXTSDAJ238A0AJJIIxr9wKV9nioO5>>. Luettu 25.9.2019.

Regard3D. 2020. Welcome to the Home of Regard3D. <<https://www.regard3d.org/>>. Luettu 31.7.2020.

Riksantikvarieämbetet. 2019a. Guide for publishing 3D models. <<https://www.raa.se/in-english/outreach-and-exhibitions/guide-for-publishing-3d-models/>>. Luettu 27.7.2020.

Riksantikvarieämbetet. 2019b. Do it yourself or hiring external expertise. <<https://www.raa.se/in-english/outreach-and-exhibitions/guide-for-publishing-3d-models/do-it-yourself-or-hiring-external-expertise/>>. Luettu 31.7.2020.

Riksantikvarieämbetet. 2019c. Equipment and procedures for photogrammetry. <<https://www.raa.se/in-english/outreach-and-exhibitions/guide-for-publishing-3d-models/equipment-and-procedures-for-photogrammetry/>>. Luettu 25.8.2020.

Riksantikvarieämbetet. 2019d. Methods for creating digital 3D models. <<https://www.raa.se/in-english/outreach-and-exhibitions/guide-for-publishing-3d-models/methods-for-creating-digital-3d-models/>>. Luettu 3.8.2020.

Riksantikvarieämbetet. 2019e. Metadata – giving 3D models a context, searchability, and usability. <<https://www.raa.se/in-english/outreach-and-exhibitions/guide-for-publishing-3d-models/metadata-giving-3d-models-a-context-searchability-and-usability/>>. Luettu 14.7.2020.

Roiha, J. 2020. Digitaaliset aineistot arkeologisissa kenttätutkimuksissa. <<https://www.avoindata.fi/data/fi/dataset/digitaaliset-aineistot-arkeologisissa-kenttatutkimuksissa>>. Luettu 20.9.2020.

Seitsonen, O. 2018. Project overview: Lapland's Dark Heritage - Understanding the Cultural Legacy of Northern Finland's WWII German Materialities within Interdisciplinary

Perspectives (2014 -2018). Yhteenveto hankkeen blogisivustosta 2014–2018. <https://www.academia.edu/10672002/Project_overview_Laplands_Dark_Heritage_Understanding_the_Cultural_Legacy_of_Northern_Finlands_WWII_German_Materialities_within_Interdisciplinary_Perspectives_2014_2018_ (Accessed: 25 August 2020)>. Luettu 25.8.2020.

Share3D. 2020. Share3D. <<https://share3d.eu/>>. Luettu 3.8.2020.

Seville Principles. 2017. International Principles of Virtual Archaeology. <<http://sevilleprinciples.com/>>. Luettu 3.2.2020.

Siida. 2020. Saamelaismuseo tallentaa saamelaista kulttuuriperintöä Suomessa. <<https://siida.fi/saamelaismuseo/museokokoelmat/>>. Luettu 25.8.2020.

Sketchfab. 2020a. Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke. <<https://skfb.ly/6RSZ9>>. Luettu 29.7.2020.

Sketchfab. 2020b. Pohjoisen näyttelyhalli. <<https://skfb.ly/6SBuN>>. Luettu 30.7.2020.

Sketchfab. 2020c. Aboa Vetus & Ars Nova -museon kokoelmat. <<https://skfb.ly/6TPzB>>. Luettu 30.7.2020.

Sketchfab. 2020d. Newsfeed. <<https://sketchfab.com/feed>>. Luettu 3.8.2020.

Sketchfab. 2020e. Museovirasto Meriarkeologia. <<https://sketchfab.com/MuseovirastoMeriarkeologia>>. Luettu 20.8.2020.

Suomen perustuslaki 1999/731. Annettu Helsingissä 11.6.1999. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990731>>. Luettu 18.10.2020.

Thomson, C. 2020. Common 3D point cloud file formats & solving interoperability issues. <<https://info.vercator.com/blog/what-are-the-most-common-3d-point-cloud-file-formats-and-how-to-solve-interoperability-issues>>. Luettu 20.9.2020.

Tietoarkisto. 2020a. Aineistohallinnan käsikirja. <<https://www.fsd.tuni.fi/aineistohallinta/fi/>>. Luettu 13.7.2020.

Tietoarkisto. 2020b. Näin Tietoarkisto palvelee arkistoinnissa. <<https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/arkistointi/>>. Luettu 15.7.2020.

Tostevin, G., Škrdl, P., Monnier, G., Golubiewski-Davis, K., Porter, S. T. 2019. Lithic Collection from the Early Upper Paleolithic Site of Tvarožná X, Czech Republic. <<https://conservancy.umn.edu/handle/11299/202399>>. Luettu 4.8.2020.

Trafikki-museot. 2019. Mihin 3D-mallinnuksia voi ja kannattaa käyttää museoissa? <<https://trafikki.fi/mihin-3d-mallinnuksia-voi-ja-kannattaa-kayttaa-museoissa/>>. Luettu 29.7.2020.

Tutkimus-PAS-työryhmä. 2017. Tutkimusaineistojen tiedostomuodot ja pitkäaikaissäilytys kelpoisuus. Avoin tiede ja tutkimus -hanke. <<https://www.doria.fi/handle/10024/147760>>. Luettu 24.9.2020.

Urheilumuseo. 2020. 3D-esineet. <<https://www.urheilumuseo.fi/nayttely/3d-esineet/>>. Luettu 3.9.2020.

VisualSfM. 2020. VisualSfM: A Visual Structure from Motion System. <<http://ccwu.me/vsfm/index.html>>. Luettu 31.7.2020.

Wikimedia Commons. 2020. File types. <https://commons.wikimedia.org/wiki/Commons:File_types#Other_formats>. Luettu 21.9.2020.

Julkaisemattomat lähteet

Brunke, L. 2017. *Uncertainty in archaeological 3D reconstructions: A case study of monument 434 at the Via Appia near Rome*. MA Thesis, Department of Archaeology, University of Leiden.

Christie, H. R. 2019. *Pushing boundaries: Spectral imaging of archaeological small finds*. Doctoral dissertation. Glasgow School of Art, School of Simulation and Visualisation.

Haukaas, C. 2014. *New Opportunities in Digital Archaeology: The Use of Low-Cost Photogrammetry for 3D Documentation of Archaeological Objects from Banks Island, NWT*. MA Thesis, Department of Anthropology, The University of Western Ontario.

Järveläinen, R. 2016. *3D-mallin hyödyntäminen arkeologisessa tutkimuksessa. Case: Virtuaalinen Lahden kylä*. Opinnäytetyö Lahden ammattikorkeakoulun mediatekniikan alalla.

Kivioja, T. 2014. *Kyberarkeologisen museotyön haasteet ja mahdollisuudet: Tapausesimerkinä 'Keskisuomalaista elämää rautakaudella'-näyttelysuunnitelma*. Pro gradu -tutkielma Oulun yliopiston arkeologian oppiaineessa.

Kjellman, E. 2012. *From 2D to 3D - A photogrammetric revolution in archaeology?* MA Thesis, Department of Archaeology and Social Anthropology, University of Tromsø.

Kuusela, V. 2019. *3D-skannaus ja sen hyödyntäminen 3D-suunnittelussa*. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka.

Pekkarinen, H. 2020. *Museoesineestä virtuaaliseksi: 3D-digitoinnin kautta lisättyä todellisuutta hyödyntävään sovellukseen*. Elävä ympäristö -hankkeen loppuraportti. Kuopion kulttuurihistoriallinen museo.

Ruotsala, A.-H. 2016. *Digital Close-Range Photogrammetry – A Modern Method to Document Forensic Mass Graves*. Pro gradu -tutkielma Helsingin yliopiston arkeologian oppiaineessa.

Savolainen, J. 2019. *Vähimmäiskuvavaatimus: Esimerkkinä arkeologisten hautakaivausten digitaalinen dokumentointi ja 3D-mallinnus*. Pro gradu -tutkielma Helsingin yliopiston arkeologian oppiaineessa.

Julkaisut

Ahmed, N., Carter, M., Ferris, N. 2014. Sustainable archaeology through progressive assembly 3D digitization. *World Archaeology* 46 (1): 137–154. <https://doi.org/10.1080/00438243.2014.890911>.

Akca, D., Gruen, A., Alkis, Z., Demir, N., Breuckmann, B., Erduyan, I., Nadir, E. 2006. 3D modeling of the weary Herakles statue with a coded structured light system. *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology' IAPRS XXXVI* (5): 14–19.

Beraldin, J.-A., Picard, M., El-Hakim, S. F., Godin, G., Latouche, C., Valzano, V., Bandiera, A. 2002. Exploring a Byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3D model: combining range data and photogrammetry. *Proceedings of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, 1st to 2nd September 2002*. 159: 65–72.

Betts, M. W., Maschner, H., Schou, C. D., Schlader, R., Holmes, J., Clement, N., Smuin, M. 2011. Virtual zooarchaeology: building a web-based reference collection of northern vertebrates for archaeofaunal research and education. *Journal of archaeological science* 38(4): 755–762. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.021>.

Borg, C. E. & Cannataci, J. A. 2002. Thealasermetry: a hybrid approach to documentation of sites and artefacts. *Proceedings of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, 1st to 2nd September 2002*. 159: 93–104.

Brusaporci, S. 2017. The Importance of Being Honest: Issues of Transparency in Digital Visualization of Architectural Heritage. Teoksessa A. Ippolito (toim.). *Handbook of Research on Emerging Technologies for Architectural and Archaeological Heritage*: 66–92. DOI: 10.4018/978-1-5225-0675-1.

Ch'ng, E., Cai, S., Zhang, T. E., Leow, F.-T. 2019. Crowdsourcing 3D cultural heritage: best practice for mass photogrammetry. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development* 9 (1): 24–42. ISSN: 2044-1266.

Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R., Ruggeri, L. 2016. SFM technique and focus stacking for digital documentation of Archaeological artifacts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B5: 229–236. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-229-2016>.

D'Andrea, A. & Fernie, K. 2013. Carare 2.0: A Metadata Schema for 3D Cultural Objects. *Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress*: 137–143. ISBN 978-1-4799-3170-5.

Debenjak, A. 2015. 3D-mallintaminen osana arkeologista arkea? Digitaalisen fotogrammetrian käyttö arkeologisessa dokumentoinnissa ja tutkimuksessa. *Muinaistutkija* 1/2015: 24–34.

Decker, S. & Ford, J. 2017. Management of 3D Image Data. Teoksessa Errickson, D. & Thompson, T. (toim.). *Human remains: Another dimension. The Application of Imaging to the Study of Human Remains*: 185–191. Elsevier. ISBN 978-0-12-804602-9.

Doneus, M., Verhoeven, G., Fera, M., Briese, Ch., Kucera, M., Neubauer, W. 2011. From Deposit to Point Cloud – a Study of Low-Cost Computer Vision Approaches for the Straightforward Documentation of Archaeological Excavations. *Geoinformatics FCE CTU*, 6: 81–88. <https://doi.org/10.14311/gi.6.11>.

Eve, S. J. 2018. Losing our Senses: An Exploration of 3D Object Scanning. *Open Archaeology* 4(1): 114–122. <https://doi.org/10.1515/opar-2018-0007>.

Evin, A., Souter, T., Hulme-Beaman, A., Ameen, C., Allen, R., Viacava, P., Larson, G., Cucchi, T., Dobney, K. 2016. The use of close-range photogrammetry in zooarchaeology: Creating accurate 3D models of wolf crania to study dog domestication. *Journal of Archaeological Science: Reports* 9: 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.06.028>.

Flynn, T. 2019. What happens when you share 3D models online (in 3D)? Teoksessa Grayburn, J., Lischer-Katz, Z., Golubiewski-Davis, K., Ikeshoji-Orlati, V. (toim.). *3D/VR in the Academic Library: Emerging Practices and Trends*. CLIR pub 176: 73–86. ISBN 978-1-932326-60-4.

Forte, M., Lercari, N., Dell'Unto, N., Jonsson, K. 2015. Interpretation Process at Çatalhöyük using 3D. Teoksessa Hodder, I. & Marciniak, A. (toim.). *Assembling Çatalhöyük: Themes in Contemporary Archaeology*: 43–57. Routledge. ISBN 1910526002.

Forte, M. & Siliotti, A. 1997. *Virtual Archaeology: Re-Creating Ancient Worlds*. H. N. Abrams. ISBN 0500050856.

Fragkos, S., Tzimtzimis, E., Tzetzis, D., Dodun, O., Kyratsis, P. 2018. 3D laser scanning and digital restoration of an archaeological find. *MATEC Web of Conferences* 178 (03013): 1–6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817803013>.

Frischer, B., Niccolucci, F., Rya N. N., Andbarcelo, J. 2002. From CVR to CVRO: The past, present, and future of cultural virtual reality. Teoksessa Niccolucci, F. (toim.). *Proceedings of the International Symposium on Virtual Reality Archeology and Cultural Heritage (VAST'00)*. British Archaeological Reports 834: 7–18. ISBN 978-3-905674-18-7.

Gajski, D., Solter, A., Gasparovic, M. 2016. Applications of Macro Photogrammetry in Archaeology. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B5: 263–266. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-263-2016>.

Georgopoulos, A., Ioannidis, C., Valanis, A. 2010. Assessing the performance of a structured light scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVIII (5): 250–255.

Grayburn, J., Lischer-Katz, Z., Golubiewski-Davis, K., Ikeshoji-Orlati, V. 2019. *3D/VR in the Academic Library: Emerging Practices and Trends*. CLIR pub 176. Council on Library and Information Resources. ISBN 978-1-932326-60-4.

Grussenmeyer, P., Landes, T., Doneus, M., Lerma, J. L. 2016. Basics of Range-Based Modelling Techniques in Cultural Heritage 3D Recording. Teoksessa Stylianidis, E. & Remondino, F. (toim.). *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*: 305–368. Whittles Publishing. ISBN 978-184995-168-5.

Guidi, G., Gonizzi, S., Micoli, L. L. 2014. Image pre-processing for optimizing automated photogrammetry performances. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-5: 145–152. doi:10.5194/isprsannals-II-5-145-2014.

Gutiérrez-Heredia, L., D'Helft, C., Reynaud, E. G. 2015. Simple methods for interactive 3D modeling, measurements, and digital databases of coral skeletons. *Limnology and oceanography: Methods* 13(4): 178–183. <https://doi.org/10.1002/lom3.10017>.

Hess, M., MacDonald, L. W., Valach, J. 2018. Application of multi-modal 2D and 3D imaging and analytical techniques to document and examine coins on the example of two Roman silver denarii. *Heritage Science* 6 (5): 1–22. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0169-2>.

Hess, M., Korenberg, C., Ward, C., Robson, S., Entwistle, C. 2015. Use of 3D laser scanning for monitoring of dimensional stability of a Byzantine ivory panel. *Studies in Conservation Issue S1: Proceedings of the LACONA 10 Conference-Laser in Conservation of Artworks, Sharjah 2014* (60): 126–133. <https://doi.org/10.1179/0039363015Z.000000000217>.

Hupaniitty, O. 2012. *Tutkijoiden ääni ja sähköiset aineistot: selvitys muistiorganisaatioiden asiakkaitten digitoitujen aineistojen tarpeista ja saatavuudesta*. Svenska litteratursällskapet i Finland.

Immonen, V. & Malinen, I. 2020. Collections Development: 3D Imaging in Museums. Teoksessa Robbins, N., Thomas, S., Tuominen, M., Wessman, A. (toim.) *Museum Studies – Bridging Theory and Practice*. Helsinki: Helsinki University Press. Painossa.

Junnilainen, H., Koistinen, K., Latikka, J., Haggrén, H., Erving, A., Heiska, N. 2008. The cartographic documentation in the FJHP excavations. Teoksessa Fiema, Z. T. & Frösén, J. (toim.). *Petra - the mountain of Aaron. Volume 1: the church and the chapel*: 61–86. Societas Scientiarum Fennica. ISBN 9516534104.

Kalantari, M. & Nechifor, M. 2016. Accuracy and utility of the Structure Sensor for collecting 3D indoor information. *Geo-spatial Information Science*, 19(3): 1–8. <https://doi.org/10.1080/10095020.2016.1235817>.

Katz, D. & Friess, M. 2014. Technical note: 3D from standard digital photography of human crania - a preliminary assessment. *American Journal of Physical Anthropology*, 154(1): 152–158. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22468>.

Kersten, T. P., Przybilla, H.-J., Lindstaed, M., Tschirschwitz, F., Misgaiski-Hass, M. 2016. Comparative geometrical investigations of hand-held scanning systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5: 507–514. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B5-507-2016.

Khoshelham, K. & Elberink, S. O. 2012. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors*, 12 (2): 1437–1454. <https://doi.org/10.3390/s120201437>.

Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. 2017. Performance investigation of a handheld 3D scanner to define good practices for small artefact 3D modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W5: 427–434. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-427-2017.

Luhmann, T., Fraser, C., Maas, H.-G. 2016. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>.

- Magnani, M., Douglass, M., Porter, S. T. 2016. Closing the seams: resolving frequently encountered issues in photogrammetric modelling. *Antiquity*, 90 (354): 1654–1669. <https://doi.org/10.15184/aqy.2016.211>.
- Marziali, S. & Dionisio, G. 2017. Photogrammetry and Macro Photography. The Experience of the MUSINT II Project in the 3D Digitization of Small Archaeological Artifacts. *Studies in Digital Heritage*, 1 (2): 298–309. <https://doi.org/10.14434/sdh.v1i2.23250>.
- Maté-González, M. Á., Aramendi, J., González-Aguilera, D., Yravedra, J. 2017. Statistical Comparison between Low-Cost Methods for 3D Characterization of Cut-Marks on Bones. *Remote Sensing*, 9 (9) 873: 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs9090873>.
- Mathys, A., Brecko, J., Semal, P. 2013. Comparing 3D digitizing technologies: what are the differences? *2013 Digital Heritage International Congress*, vol. 1: 201–204. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743733>.
- Mattila, M. (toim.) 2018. Mahdollisuuksien museo: Opetus- ja kulttuuriministeriön museopoliittinen ohjelma 2030. *Opetus- ja kulttuuriministeriön julkaisuja 2018:11*. Opetus- ja kulttuuriministeriö. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-263-557-0>.
- Molloy, B. & Milić, M. 2018. Wonderful Things? A Consideration of 3D Modelling of Objects in Material Culture Research. *Open Archaeology*, 4(1): 97–113. <https://doi.org/10.1515/opar-2018-0006>.
- Moore, J., Rountrey, A., Kettler, H. S. 2019. CS3DP: Developing Agreement for 3D Standards and Practices Based on Community Needs and Value. Teoksessa Grayburn, J., Lischer-Katz, Z., Golubiewski-Davis, K., Ikeshoji-Orlati, V. (toim.) *3D/VR in the Academic Library: Emerging Practices and Trends*. CLIR pub 176: 114–121. ISBN 978-1-932326-60-4.
- Morris, C., Peatfield, A., O'Neill, B. 2018. “Figures in 3D”: Digital Perspectives on Cretan Bronze Age Figurines. *Open Archaeology* 2018 4(1): 50–61. <https://doi.org/10.1515/opar-2018-0003>.
- Neiß, M., Sholts, S. B., Wärländer, S. 2014. New applications of 3D modeling in artefact analysis: three case studies of Viking Age brooches. *Archaeological and Anthropological Sciences* 8 (4): 651–662. <https://doi.org/10.1007/s12520-014-0200-9>.
- Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F. 2014. Photogrammetry applied to Problematic artefacts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5* (5): 451–457. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-451-2014>.

Niven, K. & Richards, J. D. 2017. The Storage and Long-term preservation of 3D Data. Teoksessa Errickson, D. & Thompson, T. (toim.). *Human remains: Another dimension. The Application of Imaging to the Study of Human Remains*: 175–184. Elsevier. ISBN 978-0-12-804602-9.

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Beraldin, J.-A., Cournoyer, L., Reain, G. 2016. Experiments on calibrating tilt-shift lenses for close-range photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B5*: 99–105. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-99-2016>.

Ogleby, C. & Rivett, L. 1985. *Handbook of heritage photogrammetry*. Special Australian heritage publication series; no.4. Australian Government Publishing Service. Canberra. ISBN 0644038772.

Papadaki, A., Agrafiotis, P., Georgopoulos, A., Prignitz, S. 2015. Accurate 3D scanning of damaged ancient Greek inscriptions for revealing weathered letters. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W4*: 237–243. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-237-2015>.

Plets, G., Gheyle, W., Verhoeven, G., De Reu, J., Bourgeois, J., Verhegge, J. & Stichelbaut, B. 2012. Three-dimensional recording of archaeological remains in the Altai mountains. *Antiquity* 86 (333): 884–897. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00047980>.

Porter, S. T., Huber, N., Hoyer, C., Floss, H. 2016b. Portable and low-cost solutions to the imaging of Paleolithic art objects: A comparison of photogrammetry and reflectance transformation imaging. *Journal of Archaeological Science: Reports* 10: 859–863. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.07.013>.

Porter, S. T., Roussel, M., Soressi, M. 2016c. A Simple Photogrammetry Rig for the Reliable Creation of 3D Artifact Models in the Field: Lithic Examples from the Early Upper Paleolithic Sequence of Les Cottés (France). *Advances in Archaeological Practice* 4(1): 71–86. <https://doi.org/10.7183/2326-3768.4.1.71>.

Ravanelli, R., Nascetti, A., Di Rita, M., Nigro, L., Crespi M. 2017a. 3D modelling of archaeological small finds by a low-cost range camera: methodology and first results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-5/W1*: 589–592. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-589-2017>.

Ravanelli, R., Nascetti, A., Di Rita, M., Nigro, L., Montanari, D., Spagnoli, F. 2017b. Penguin 3.0 - Capturing small finds in 3D. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 17(2): 49–56. <https://doi.org/10.5281/zenodo.581720>.

Reilly, P. 1990. Towards a virtual archaeology. Teoksessa K. Lockyear, & S. Rahtz (toim.). *CAA90. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*. BAR International Series 565: 132–139. Tempus Reparatum. Oxford.

Reilly, P. 1989. Data Visualization in Archaeology. *IBM Systems Journal* 28 (4): 569–579.

Remondino, F. & El-Hakim, S. 2006. Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record*, 21(115): 269–291.

Reuter, T., Elburg, R., Innerhofer, F. 2014. 3D-Funddokumentation - Ein Anwendungsbericht aus dem Landesamt für Archäologie Sachsen. Teoksessa KONFERENZBAND EVA BERLIN 2014: Elektronische Medien & Kunst, Kultur und Historie. 21. *Berliner Veranstaltung der internationalen EVA-Serie: Electronic Media and Visual Arts*: 127–134. <https://doi.org/10.11588/arthistoricum.152.192>.

Reuter, T. 2014. Schnell und genau: 3D-scans der Bronzeamphoren von Seddin und Herzberg. Teoksessa Westendorf, D., Woidt, P., Schulze, E. (toim.). *Archäologie in Berlin und Brandenburg*. Konrad Theiss Verlag. ISBN 978-3-8062-3304-9.

Rourk, W. 2019. 3D Cultural Heritage Informatics: Applications to 3D Data Curation. Teoksessa Grayburn, J., Lischer-Katz, Z., Golubiewski-Davis, K., Ikeshoji-Orlati, V. (toim.). *3D/VR in the Academic Library: Emerging Practices and Trends*. CLIR pub 176: 24–38. ISBN 978-1-932326-60-4.

Santagati, C., Lo Turco, M., Bocconcinio, M.M., Donato, V., Galizia, M. 2017. 3D models for all: Low-cost acquisition through mobile devices in comparison with image based techniques. Potentialities and weaknesses in cultural heritage domain. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W8: 221–228. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-221-2017>.

Sapirstein, P. 2018. A high-precision photogrammetric recording system for small artifacts. *Journal of Cultural Heritage* 31: 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.10.011>.

Schmidt-Reimann, P. & Reuter, T. 2016. Conservation and 3D-documentation of waterlogged wood from medieval mining. Teoksessa *Condition 2015: Conservation and digitalization - Conference Proceedings*: 125–130. ISBN 978-83-64150-10-4.

Shott, M. & Trail, B. W. 2010. Exploring New Approaches to Lithic Analysis: Laser Scanning and Geometric Morphometrics. *Lithic Technology* 35(2): 195–220. www.jstor.org/stable/23273766.

Simon, K. M., Payne, A. M., Cole, K., Smallwood, S., Goodmaster, C., Limp, F. 2009. Close-Range 3D Laser Scanning and Virtual Museums: Beyond Wonder Chambers and Cabinets

of Curiosity? *Computer Applications to Archaeology 2009*, Williamsburg, Virginia, USA. March 22-26, 2009: 1–6.

Tolksdorf, J. F., Elburg, R., Reuter, T. 2017. Can 3D scanning of countermarks on Roman coins help to reconstruct the movement of Varus and his legions? *Journal of Archaeological Science: Reports* 11: 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.005>.

Tsiafaki, D. & Michailidou, N. 2015. Benefits and problems through the application of 3D technologies in archaeology: recording, visualisation, representation and reconstruction. *Scientific Culture* 1 (3): 37–45. <http://doi.org/10.5281/zenodo.18448>.

Vatanen, I. 2002. Deconstructing the (Re)Constructed: Issues in Conceptualising the Annotation of Archaeological Virtual Realities. Teoksessa Doerr, M. & Apostolis, S. (toim.). *The Digital Heritage of Archaeology. CAA 2002. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 30th CAA Conference, Heraklion, Crete, April 2002: 69–74*. ISBN 9602140860.

Verdiani, G., Formaglini, P., Giansanti, F., Giraudeau, S. 2018. Close-Up, Macro and Micro Photogrammetry and Image Perspective: A Comparative Studio on Different Lenses at Work with Small and Medium Size Objects. *Computer Reviews Journal* 2: 235–248. <https://purkh.com/index.php/tocomp/article/view/157>.

Verhoeven, G. 2016. *Basics of Photography for Cultural Heritage Imaging*. Teoksessa Stylianidis, E. & Remondino, F. (toim.). *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*. Whittles Publishing. <https://doi.org/10.1007/s41636-017-0055-x>.

Viinikkala, L. 2018. *Digitaalisia valheita vai historiallista tietoa? Aineellisen todellisuuden, kerronnan ja historiallisen tiedon suhte yhdistetyn todellisuuden teknologiaa hyödyntävissä menneisyyden esityksissä*. Turun yliopiston julkaisuja. Sarja C: Scripta lingua Fennica edita 463. ISBN ISBN:978-951-29-7524-2.

Virtanen, J.-P., Kurkela, M., Hyypä, H. 2019. The feasibility of using a low-cost depth camera for 3D scanning in mass customization. *Open Engineering* 9(1): 450–458. <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0056>.

Winkelbach, S., Molkenstruck, S., Wahl, F. M. 2006. Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach. Teoksessa Franke et al. (toim.) *AGM 2006, LNCS 4174. Pattern Recognition, 28th DAGM Symposium, Berlin, Germany, September 12–14, 2006, Proceedings: 718–728*. https://doi.org/10.1007/11861898_72.

Yanagi, H. & Chikatsu, H. 2010. 3D modeling of small objects using macro lens in digital very close range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII* (5): 617–622.

Zachar, J. & Jončić, N. 2017. 3D recording of sculptures and small objects. Teoksessa Zachar, J., Horňák, M., Novaković, P. (toim.). *3D Digital recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage*. CONPRA Series, Vol. 1. University of Ljubljana Press, Faculty of Arts. ISBN 978-961-237-898-1.

Metashape-ohje

Sisällysluettelo

1. Huomioita valokuvaukseen:.....	3
Kuvaustausta	3
Mittakaava	3
2. Ohjelman käyttöölyttäminen	4
3. Kuvien tuonti, järjestäminen ja maskaaminen	5
Kuvien tuonti.....	5
Kuvien laadun tarkistaminen	6
Maskaus	6
4. Align-työvaihe ja “batch processing”	9
Asetukset align-ikkunassa	9
5. Komponentin asettaminen mittakaavaan	10
6. Tiheän pistepilven laskeminen ja pistepilven siivoaminen	11
Asetukset “build dense cloud” -ikkunassa	12
Virhepisteiden siivoaminen pistepilvestä tai polygonimallista.....	12
7. Komponenttien ja kuvien yhdistäminen kontrollipisteiden avulla	13
Kontrollipisteiden merkitseminen	13
Komponenttien yhdistäminen	13
8. Polygonimallin laskeminen	15
“Build mesh” -ikkunan asetukset.....	15
Polygonimallin yksinkertaistaminen (tarvittaessa).....	15
9. Teksturointi	16
Asetukset texture-ikkunassa.....	16
10. Digitoinnin asettaminen origoon ja oikein päin.....	17
11. Digitoinnin vienti .OBJ:nä ja .glTF:nä.....	17
Lähteet:	18

Ohjeisiin liittyvää sanastoa

Komponentti: Kokonaisuus, johon kuuluvien valokuvien sijainnin suhteessa toisiinsa ohjelma tuntee. Metashapessa komponenttiin viitataan nimellä "Chunk". Metashapen komponentti ei ole aivan suoraan verrannollinen RealityCapture-ohjelman komponenttiin, sillä toisin kuin RealityCapturessa, Metashapen komponentti viittaa aina vain yhteen 3D-digitointiin – joko vain kuvien sijaintitietoihin ja harvaan pistepilveen, tai valmiiseen polygonimalliin.

Kontrollipiste: Valokuvaan tai suoraan 3D-digitointiin merkittävä piste, jonka avulla ohjelmaan voidaan tuoda koordinaattitietoja tai yhdistää useampia 3D-digitointeja toisiinsa. Metashape käyttää pisteistä Marker-nimitystä, RealityCapture-ohjelmassa pisteisiin viitataan nimellä "control points".

Kuvauspositio: Asento, jossa esine on kuvattu. Jos esine on ensin kuvattu oikein päin, käännetty sitten ylösalaisin ja kuvattu uudestaan, on kuvauspositioita kaksi.

Markkeri: Koodattu kuvio, jonka ohjelma tunnistaa automaattisesti. Paperille tulostetut markkerit voidaan asettaa kuvattavan kohteen viereen, ja kunhan niiden välinen etäisyys tunnetaan, voi 3D-digitoinnin asettaa markkereiden avulla oikeaan mittakaavaan.

Maskaus: Kuvan tietyn osan peittäminen, esimerkiksi taustan tai epäterävänä piirtyvän kohdan.

Debenjak-Iljäs, A. 2020. Metashape-ohje. Teoksessa Debenjak-Iljäs, A., Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi. Karhunhammas 20. Turku: Turun yliopiston arkeologian oppiaine. (CC BY-NC-ND 4.0.)

Päivitetty 27.8.2020.

1. Huomioita valokuvaukseen:

Kuvaustausta

Jos esine kuvataan niin, että sitä käännetään ja kuvataan useammassa asennossa samaan, paikoillaan pysyvään taustaan nähden, täytyy ohjelmaa estää tunnistamasta kuvaustaustan pisteitä. Näin kuvat yhdistyvät pelkästään itse kuvattavan esineen muodon perusteella. Taustan poistamiseen on useampia työtapoja, jotka kannattaa huomioida jo valokuvausvaiheessa:

- Tunnistamaton tausta: Jos tausta on yhtenäisen valkoinen tai musta, niin ettei siitä erotu yksityiskohtia, ei Metashape löydä taustasta erottuvia pikseliryhmiä, joiden pohjalta se voisi laskea taustan geometriaa. Esimerkiksi valkoinen, kevyesti ylivalotettu tausta toimii hyvin.
- Vahva kontrasti homogeeniseen taustaan: Tässä pyritään siihen, että tausta on mahdollisimman yhtenäinen (samannäköinen) koko alaltaan ja että se väriltään selkeästi erottuu kuvauskohteesta (esim. tumma/värikäs esine ja valkoinen tausta ja hieman ylivalotetut kuvat). Näin tausta saadaan maskattua pois mahdollisimman automatisoidusti.
- "Mask by tie points" -menetelmä: Tässä ideana on, että taustassa on selkeästi tunnistettavia piirteitä. Kohde kuvataan taustaa vasten, ja kustakin kameran asennosta käsin otetaan lopuksi yksi kuva pelkästä taustasta ilman kohdetta. Nämä kuvat maskataan, ja "mask by tie points" - ominaisuudella suljetaan pois kaikki taustasta tunnistetut pisteet, niin että ohjelma jättää ne huomiotta myös muissa kuvissa. Menetelmä ei kuitenkaan arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeen kokeiluissa toiminut tiheällä pistepilvellä. Jos tavoitteena on karkea 3D-digitointi niin menetelmä säästää kyllä aikaa ja vaivaa, mutta harvasta pistepilvestä laskettu digitointi ei ole kovin tarkka.

Mittakaava



Kuva 1. Vasemmalla tavallinen mittakaava kuvaustasolla, oikealla automaattisesti tunnistettava markkeri.

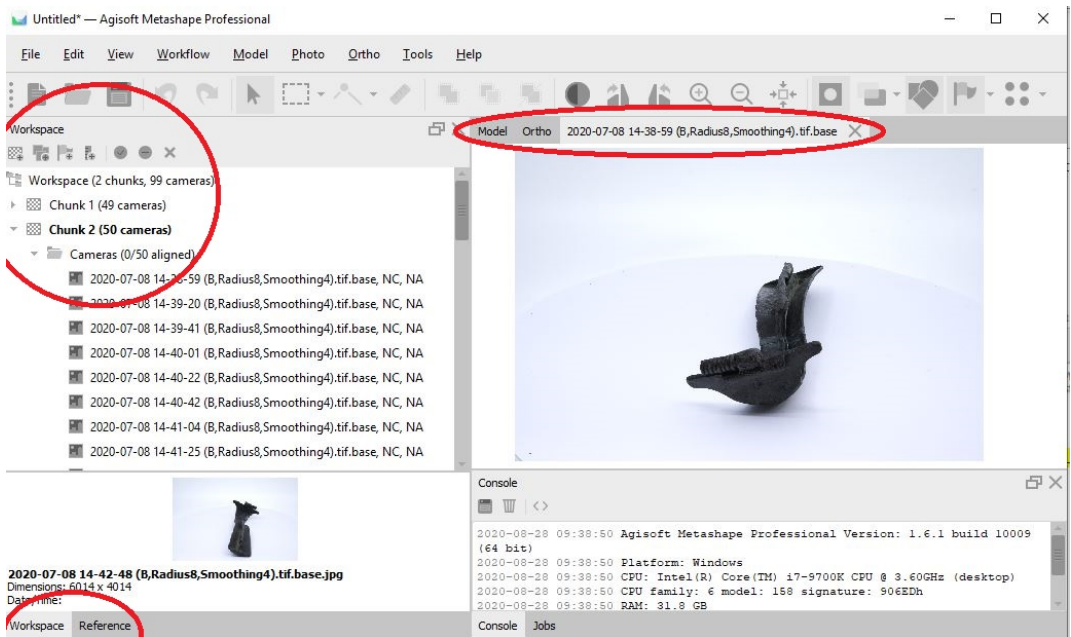
Jos kuvan tausta on valkoinen ja kuvat ovat kevyesti ylivalotettuja, ohjelma saattaa poistaa myös valkopohjaisen mittakaavan, vaikka siinä olisi mustia yksityiskohtia. Värillinen mittakaava toimii siksi paremmin. Riittää että mittakaava asetetaan mukaan yhteen esineen kuvausasettoon, lähtökohtaisesti siihen missä esine on "oikein päin".

Mittakaavan sijaan kuvausvaiheessa voidaan käyttää myös automaattisesti tunnistettavia markkereita, joiden väliset etäisyydet tai koordinaatit non-earth-koordinaatistossa tunnetaan. Markkerit asetetaan kuvattavan objektin ympärille kuvaustasolle.

2. Ohjelman käyttöliittymä

Metashapen käyttöliittymä koostuu erillisistä ikkunoista eri tietojen hallintaan. Ikkunoiden paikat ovat siirreltävisiä, joten ne voi asetella mielensä mukaan. Tässä ohjeessa ikkunat on jätetty vakiopaikoilleen. Jos jokin ikkuna puuttuu, saa sen esille vasemman ylälaidan "view"-valikon kautta.

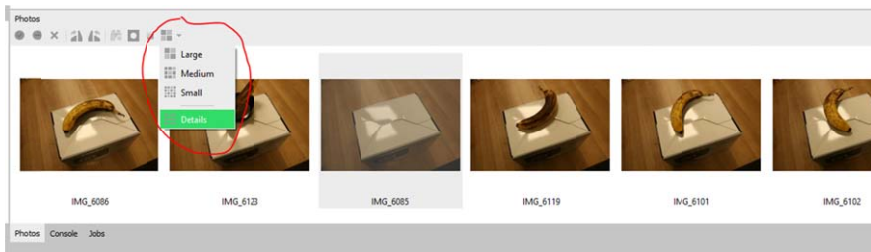
Työkalut ovat yläpalkissa. Vasemmalla laidalla on Workspace-ikkuna, jonka kautta hallinnoidaan projektiedostoon tuotuja valokuvia ja niistä laskettuja polygonimalleja sekä aineistoon lisättyjä kontrollipisteitä. Samassa ikkunassa, eri välilehdellä on Reference-ikkuna, jonka kautta hallinnoidaan mittakaavajanoja ja koordinaatteja eli digitoinnin mittakaavaan liittyviä asetuksia ja tietoja. Keskellä olevassa ikkunassa voi katsella valittuna olevaa 3D-digitointia (Model-välilehti) tai valokuvaa (kuvan nimellä merkitty välilehti).



Kuva 2. Metashapen käyttöliittymä.



Kuva 3. Metashapen yläpalkin kuvakkeiden selitykset.



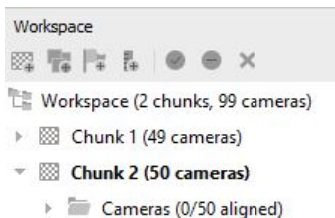
Kuva 4. Photos paneeli löytyy lähtökohtaisesti ohjelmaikkunan alalaidasta. Paneelissa näkyvät valokuvat pieninä kuvakkeina, mutta paneelin valikosta valitaan näkyville kuvien tiedot ("details"). Musta kuutio valkoisella pisteellä viittaa maskeihin, kuvakkeesta saa kuviin tehdyt maskit näkyville tai pois näkyvistä.

3. Kuvien tuonti, järjestäminen ja maskaaminen

Kuvien tuonti

Kuvia yhdistettäessä on vaihtoehtoina joko tuoda kaikki 3D-digitointiin liittyvät kuvat kerralla ohjelmaan yhtenä komponenttina ("Chunk") tai tuoda ja yhdistää kuvat ensin pienemmissä erissä, esimerkiksi kuvauspositio kerrallaan, ja lopuksi yhdistää nämä komponentit. Ensinnä mainittu työtapo sopii yksinkertaisille esineille, kun taas hankalammien muotoisten esineiden kuvat kannattaa yhdistää positio tai jopa kuvakehä kerrallaan.

Metashapessa voi samanaikaisesti käsitellä useampia komponentteja. Halutut kuvat voi siis – toisin kuin RealityCapturessa – tuoda samaan ohjelmatiedostoon, vasemman laidan ikkunaan joko yhtenä tai useampana komponenttina.



Kuva 5. Kaksi komponenttia erillisinä "Chunkseina".

Kuvien laadun tarkistaminen

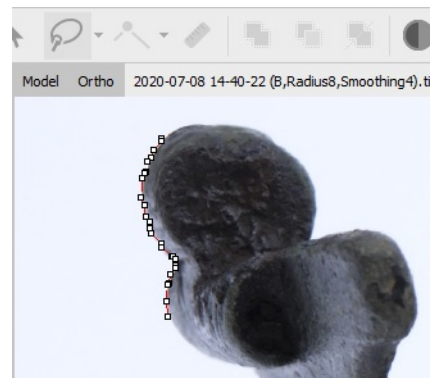
Parhaimman lopputuloksen saavuttamiseksi kuvien laatu voidaan tarkistaa Metashapen työkalulla ennen align-vaihetta ja sulkea siten pois heikkolaatuiset kuvat (ks. Metashape 2019: 22).

Maskaus

Metashape ei ole niin tehokas poistamaan kuvien taustaa, vaikka se olisi valkoinen. Taustan saattaa siksi joutua maskaamaan. Tämä onnistuu usealla eri työtavalla (ks. yllä työtapojen vaikutus valokuvauksprosessiin).

Maskaaminen tapahtuu valitsemalla Select-valikosta haluttu valintatyökalu. Suorakulmiovalinnan lisäksi tarjolla on esimerkiksi "Intelligent scissors", jolloin CTRL-näppäintä painamalla valintaviiva seuraa kuvassa näkyviä reunoja tai "Magic wand" -valinta, joka valitsee klikatun pisteen ympäriltä kuvassa näkyviin reunoihin rajautuvan alueen.

Jos maskaat kuvia vain teksturointivaihetta varten, voi osan kuvista maskata kokonaan pois, sillä tekstuuriin rakentamiseen ei tarvita niin paljon kuvia kuin itse pistepilven laskemiseen.



Kuva 6. Intelligent Scissors -valintatyökalu

"Mask by tie points" sekä "Import mask from background"

Menetelmässä maskataan parhaimmillaan vain yksi kuva kustakin kameran asennosta, nimittäin se, missä on pelkkä tausta ilman esinettä. Kuvat maskataan suoraan ylävalikon "rectangle selection" -työkalulla => oikeaklikkaus ja "add selection". Kuvia yhdistettäessä "Align photos" -asetusvalikon "Advanced"-kohdassa valitaan "Apply masks to tie points".

Samankaltainen menetelmä on "Import mask from background", jossa samoin maskataan yksi kuva pelkästä taustasta ilman esinettä, maski tallennetaan tietokoneelle ja tuodaan sitten sisään muihin kyseisen kuvausposition kuviin.

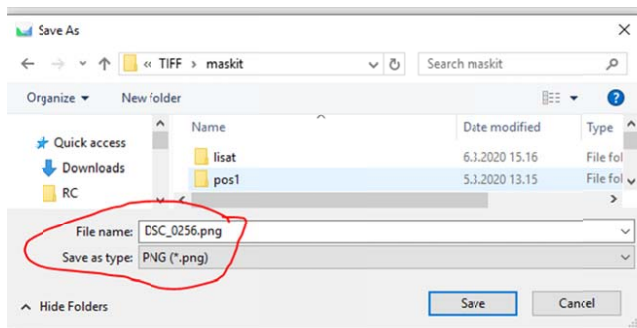
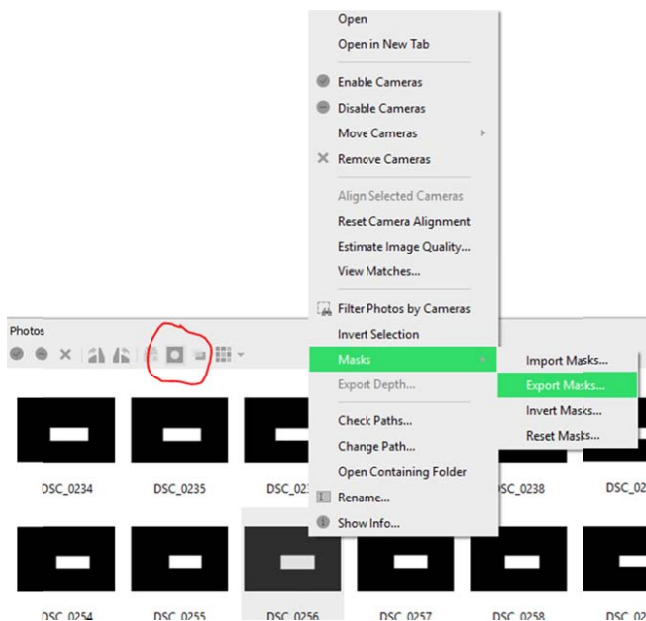
Kuvien maskaaminen manuaalisesti

Työvaihe on hidas, sillä yhden kuvan maskaaminen manuaalisesti kestää noin 1–2 minuuttia. Työtä voi kuitenkin nopeuttaa, jos esine on muodoltaan symmetrinen. Tällöin samaa maskia voidaan käyttää useammassa kuvassa. Esimerkiksi rannerenkaiden maskauksessa saman maskin voi parhaimmillaan ulottaa koko kuvakehän kuville, kun tarkoituksena on maskata pois kuvien epäterävät kohdat.

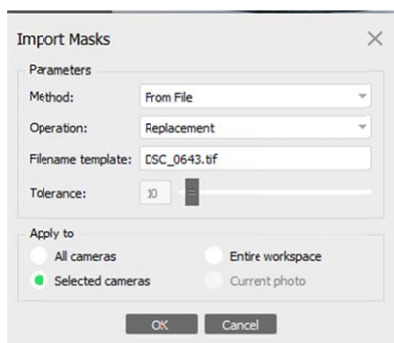


Kuva 7. Rannerenkaan terävien kohtien maskaus voidaan ulottaa kaikkiin kuvakehän kuviin.

1. Tee normaaliin tapaan maski kuvakehän ensimmäiselle kuvalle. Valitse kuva Photos pane -ikkunassa ja vie maski oikeaklikkauksella *masks => export mask => seuraavat asetukset: file type = image with alpha channel, file name template = {filename}.png ja selected images*. Nimeä kuva samalla tiedostonimellä kuin alkuperäinen kuva. Huomaa että tallennusvaiheessa oletustiedostomuodoksi saattaa vaihtua .jpg, vaihda se takaisin .png:ksi.
2. Valitse kuvakehän loput kuvat, joille maskia halutaan käyttää. Klikkaa hiiren oikealla ja valitse "Masks" -> "Import.." Avautuvaan ikkunaan syötetään edellisessä kohdassa ulos viedyn maskin nimi. Tarkista, että tiedostopääte on oikein, muuten ohjelma ei löydä maskia. Valitse "Apply to" kohtaan "Selected cameras". Klikkaa ok, minkä jälkeen avautuu ikkuna, jossa valitaan kansio jossa maski sijaitsee. Kun olet oikeassa kansiossa, valitse "Select Folder". Tämän jälkeen Metashape tuo maskin kaikille valituille kuville.



Kuva 8. Maskin vienti Metashapesta.



Kuva 9. Maskin tuonti Metashapeen.

Jotta maskien tuonti RealityCaptureen sujuu helposti, on kaikista RealityCaptureen tuoduista kuvista tehtävä maski. Maskaa siis myös kauttaaltaan terävästä kuvasta pieni nurkka, jossa kohdetta ei ole, ja tuo tämä maski sisään kaikkiin muihin kuviin, joita ei oikeasti tarvitsisi maskata.



Kuva 10. RealityCapture-ohjelmaa varten tehty maski kuvan vasemmassa alanurkassa.

4. Align-työvaihe ja “batch processing”

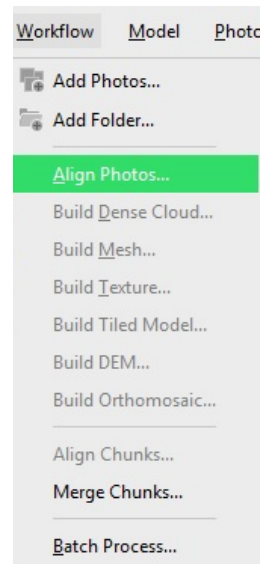
Align-vaiheessa kuvista lasketaan kameroiden sijainti ja muodostetaan harva pistepilvi kohteesta. Useamman komponentin tapauksessa tämä ja muut työvaiheet suoritetaan “Workflow”-kuvakkeen “Batch processing” -työkalun avulla kaikille komponenteille samanaikaisesti. “Batch processing” -ikkunassa valitse “add” ja lisää “job type” -kohdasta se työvaihe, jonka haluat suorittaa. **Muista, että ohjelma suorittaa kaikki työvaiheet, jotka näkyvät ikkunassa, eli poista työvaihe suorittamisen jälkeen, ennen kuin lisäät seuraavan.**

Asetukset align-ikkunassa

- Accuracy: määrittää digitoinnin laadun.
- Generic preselection: kyllä
- Key point limit: jos 0, niin tuottaa niin monta pistettä kuin mahdollista, osassa laatu saattaa olla aika heikko. Jos käy näin, voi koettaa rajata haluamaansa lukemaan. 3D-hankkeessa käytetty maksimissaan 60 000.
- Tie point limit: numero kertoo kutakin kuvaa koskevan tunnistettujen pisteiden maksimimäärän. Arvon ollessa nolla tie points -pisteitä ei rajata ollenkaan.

- Adaptive camera model fitting: lisää kameran kalibroinnin muuttujia, eli mahdollistaa että sisäisessä kalibroinnissa huomioidaan laajemmin eri muuttujia kuin yleiset Brownin 3. yhtälön muuttujat. Voi siis olla hyödyllinen, mutta myös heikentää tulosten toistettavuutta. Vakiona ei käytössä.
- Jos maskauksessa käytetään “mask by tie points” -menetelmää, valitaan Align-asetusten “Advanced”-kohdasta “Apply masks to tie points”. Tätä voidaan käyttää myös jos kaikki kuvat on maskattu, siitä ei ole haittaa.

Align-työvaiheen jälkeen tarkistetaan kameroiden sijainti ja harva pistepilvi. Kamerat saa näkyville ylälaidan kamera-kuvaketta painamalla. Mahdolliset virhepisteet voi poistaa pistepilvestä “Select”-työkalun avulla (ks. tarkemmin kohdasta 6). Eri komponenttien pistepilviä voit tarkastella tuplaklikkaamalla haluamaasi komponentin nimeä vasemman laidan “Workspace”-valikossa.



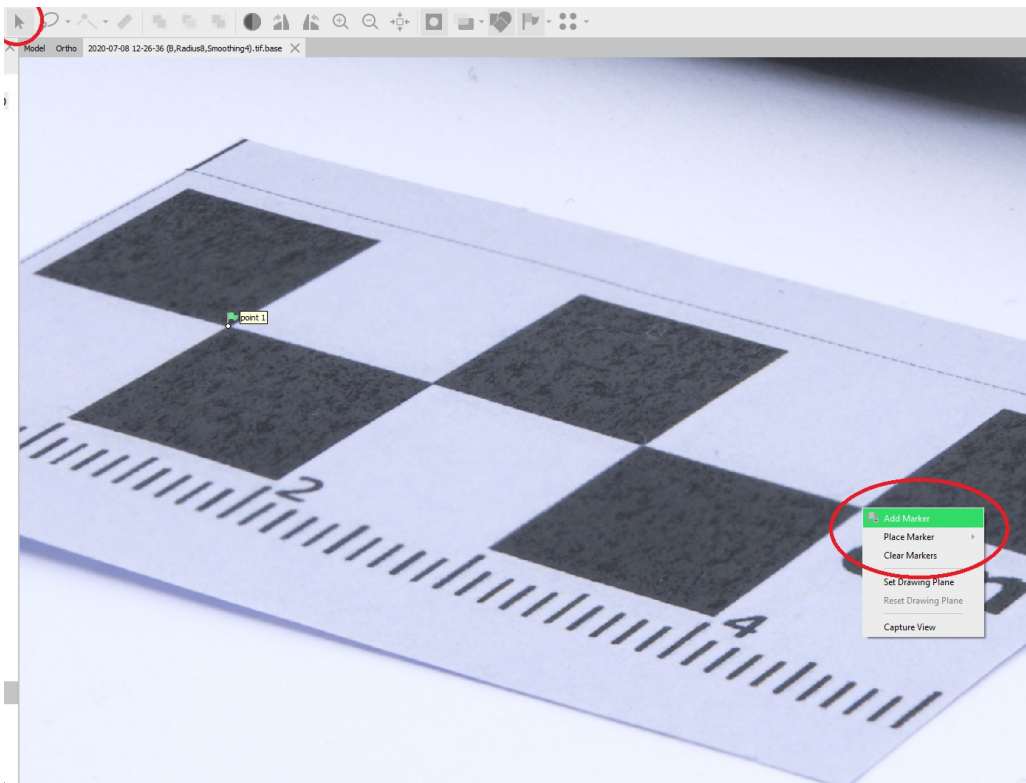
Kuva 11. Workflow-ikkuna

5. Komponentin asettaminen mittakaavaan

HUOM: 3D-digitointi kannattaa asettaa mittakaavaan vasta, kun kaikki komponentit on yhdistetty. Jos digitointi koostetaan useasta komponentista, laske näille ensin tiheä pistepilvi ja yhdistä komponentit, ja palaa sitten mittakaavan asettamiseen.

Luo komponentin kuvissa, pistepilvessä tai polygonimallissa näkyvään mittakaavaan kaksi kontrollipistettä (“marker”) kohtiin, joiden välinen etäisyys on tiedossa.

Vaihda vasemman laidan ikkunassa “Reference”-valikkoon. Näet siinä kaikki kontrollipisteet. Valitse äsken luomasi kaksi pistettä ja klikkaa oikealla => “Create scale bar”. Huomaat että pisteiden alle, “Scale bars” -kohtaan ilmestyy luomasi “skaala”. Valitse skaala ja tuplaklikkaa “Distance”-kohtaa niin että pääset kirjoittamaan siihen. Syötä kontrollipisteiden välinen etäisyys metreissä. Tämän jälkeen päivitä pistepilven sisäinen koordinaatisto “Reference”-ikkunan ylälaidassa olevasta päivityskuvakkeesta (kahden nuolen muodostama kehä). Skaalan tarkkuuden (accuracy) pitäisi tämän jälkeen korjaantua 1 mm paikkeille. Voit tarkistaa mittakaavaan asettamisen onnistumisen ylälaidan mittaustyökalun avulla.



Kuva 12. Kontrollipisteen (marker) lisääminen.

Kun komponentti on asetettu mittakaavaan, voi "Reference"-välilehdeltä tarkistaa 3D-digitoinnin virhearvon (reprojection error): vasemman laidan valikosta valitse "Reference"-välilehti. Kameroiden kohdalla skrollaa oikealle, kunnes näet kunkin kameran virheen (error) pikseleinä. Lukeman tulee olla alle 1 px (vrt. Zachar et al. 2017: 134).

6. Tiheän pistepilven laskeminen ja pistepilven siivoaminen

HUOM! Tarkista ennen tiheän pistepilven laskemista **3D-mallin ympärillä olevan "rajauslaatikon" (bounding box) koko**. Metashape ei tuota tiheää pistepilvettä niistä mallin osista, jotka jäävät laatikon ulkopuolelle. Sitä kannattaa siis tarvittaessa suurentaa ja kiertää ylälaidan kuvakkeen kautta.

Tiheän pistepilven laskeminen ei ole pakollinen työvaihe – polygonimallin voi laskea myös karkean pistepilven pohjalta. Tiheän pistepilven laskeminen kuitenkin nostaa huomattavasti 3D-digitoinnin resoluutiota.

Asetukset "build dense cloud" -ikkunassa

- Quality: määrittää digitoinnin laadun.
- Depth-filtering: "Mild" (vakio)
 - Jos malliin tulee paljon "kohinaa" eli ylimääräisiä virhepisteitä, kokeile "Moderate"-asetusta. Tämä saattaa kuitenkin karsia mallin pinnan syvyysvaihtelun pieniä yksityiskohtia.
- Reuse depth maps: ei
- Calculate point colors: kyllä

Virhepisteiden siivoaminen pistepilvestä tai polygonimallista

Usein malliin tulee virhepisteitä, esimerkiksi osia taustasta. Pistepilvi kannattaa siistiä niin, ettei siinä ole mitään ylimääräisiä osia taustasta, esineen jalustasta jne. Varo kuitenkin, ettet vahingossa poista mittakaavaa. Virhepisteet siivotaan pois ylävalikon "free-form select" -työkalulla. Valitse poistettavat pisteet ja paina delete.



Kuva 13. kuvaustaustasta laskettu valkoinen virhepisteiden rypäs vasarakirveen kärjessä.

Metashapen valintatyökalu valitsee kaikki pisteet valinnan sisäpuolelta, myös valittavien pisteiden "takana" olevat pisteet. Pisteiden poistamisen jälkeen kannattaa siksi aina tarkistaa, ettei seurauksena ole yllättäviä reikiä ja tarvittaessa perua toimenpide CTRL + Z -näppäinyhdistelmällä.



Kuvat 14–15. Esimerkissä valintatyökalulla valittiin valkoiset virhepisteet, mutta valinnassa on mukana myös niiden "takana" olevia vasarakirveen kummankin kyljen pisteitä. "Filter by selection" -työkalulla voit poistaa muut pistepilven osat kuin valittuna olevan alueen näkyvistä, mikä helpottaa 3D-digitoinnin työstämistä.

Hankalissa paikoissa voidaan edetä seuraavasti:

1. Käännä kohde niin, että näet hyvin sen kummatkin puolet.
2. "Free form selection" -työkalulla valitse se kohteen alue, jolla poistettavat pisteet ovat. Rajaa valinta huolellisesti kuten kuvassa.
3. Valitse "Tools"-valikosta "Dense cloud" => "Filter by selection". Näin näkyville jää ainoastaan valittu alue, josta voit normaalisti valita ja poistaa pisteitä.
4. Lopuksi valitse "Tools" => "Dense cloud" => "Reset filter", jolloin piilotetut pisteet tulevat taas näkyville.

Pisteitä kannattaa siivota harkiten, sillä työvaihe kestää kauan. Jos virhepisteitä on valtavasti, korjaukset voi tehdä maskaamalla kuvasarjan, kokeilemalla ”Depth filtering” -asetusten muuttamista tai ottamalla uusi, laadukkaampi kuvasarja.

7. Komponenttien ja kuvien yhdistäminen kontrollipisteiden avulla

Kontrollipisteiden merkitseminen

Metashapen kontrollipisteitä eli markkereita voi asettaa niin valokuviin kuin itse pistepilveen – yhteen valokuvaan tai pistepilveen asetettu kontrollipiste ilmestyy näkyville muihin samaan koordinaatistoon yhdistettyihin valokuvaan ja pistepilveen. Kontrollipisteet tunnistaa pienestä, värikoodatusta lipusta:

Vihreä: Käyttäjän hyväksymä tai lisäämä, varmasti oikeassa paikassa sijaitseva kontrollipiste.

Sininen: Metashape arvioi, että kohdassa sijaitsee kontrollipiste, ja huomioi kontrollipisteen laskutoimituksissaan. Sinisen lipun voi ”hyväksyä” vihreäksi klikkaamalla lippua.

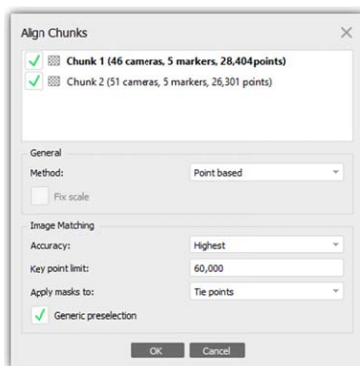
Valkoinen: Metashape arvioi, että kohdassa sijaitsee kontrollipiste, mutta arvio on niin epävarma, ettei pistettä huomioida ohjelman laskutoimituksissa.

Kontrollipisteitä luodaan klikkaamalla yksityiskohtaa oikealla ja valitsemalla ”add marker”. Jo olemassa olevan kontrollipisteen voit merkitä kuvaan valitsemalla ”place marker”.

Komponenttien yhdistäminen

Ennen komponenttien yhdistämistä ohjelmatiedostosta kannattaa tallentaa erillinen kopio.

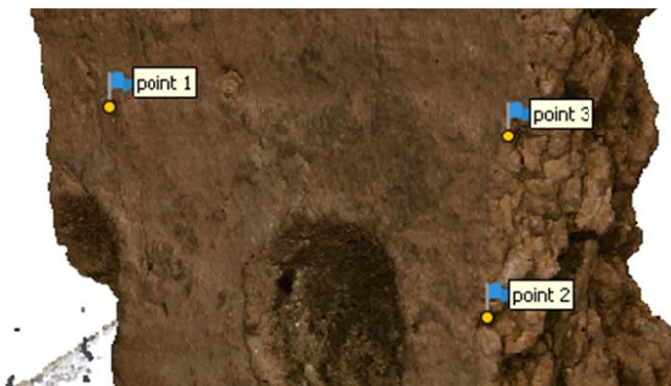
Erilliset komponentit – esimerkiksi kuvan keramiikankatkelman kaksi eri puolta – yhdistetään ”Align chunks” -työkalulla. Yhdistäminen voi onnistua automaattisesti, mutta usein se on tehtävä manuaalisesti.



Kuva 16 (edellinen sivu). Kahden komponentin automaattinen yhdistäminen pistepilven pisteiden perusteella.

Automatisoitu yhdistäminen ei aina toimi. Tässä tapauksessa komponentit yhdistetään manuaalisesti kontrollipisteiden avulla:

1. Metashape ei automaattisesti yhdistä toisiinsa eri komponentteihin samaan kohtaan tehtyjä kontrollipisteitä, joten pisteet on asetettava erikseen kuhunkin komponenttiin. Varmista, että samaan kohtaan asetetulla kontrollipisteellä on aina sama numero eri komponenteissa.
2. Etsi kohteesta helposti erottuva, selkeä yksityiskohta, joka näkyy kummassakin komponentissa. Yhteen komponenttiin asetetun kontrollipisteiden oikean sijainnin löytämiseksi toisesta komponentista kannattaa käyttää Windowsin Snipping tool -työkalua ja ottaa ruutukaappaus kontrollipisteiden sijainnista.
3. Kontrollipisteitä kannattaa asettaa vähintään kolme eri puolille esinettä. Vierekkäisistä, samalla tasolla tai viivalla olevista kontrollipisteistä ohjelma ei pysty niin hyvin laskemaan komponenttien kolmiulotteista sijaintia toisiinsa nähden.



Kuva 17. kontrollipisteitä pistepilven pinnalla.

4. Kun kontrollipisteitä on tarpeeksi kaikissa komponenteissa valitse "Align chunks" ja metodiksi "Marker based". Älä valitse "Fix scale" -kohtaa, sillä se ei korjaa, vaan "jäädyyttää" yksittäisten komponenttien sisäisen skaalan.
- Yhdistetyn pistepilven näet ylävalikon "Show aligned chunks" -kuvakkeesta. Huomaa että align-vaiheen päätteeksi pistepilvet ovat vielä erillisiä, ne on vain asetettu samaan sisäiseen koordinaatistoon. Tässä vaiheessa on vielä mahdollisuus siivota pois yksittäisten komponenttien pisteitä, esimerkiksi komponentin leikattuun "alalaitaan" (jossa esineen tuki on) jää yleensä huonolaatuisempia pisteitä, jotka kannattaa karsia pois. Varmista kuitenkin, ettei yhdistettyyn pistepilveen jää reikiä liiallisen siivoamisen seurauksena.
 - Kun pistepilvi on siivottu, tallenna tiedostosta kopio. Valitse sen jälkeen "Merge chunks" -työkalu "Workflow"-valikosta. Valitse yhdistettävät komponentit, "Merge dense clouds" sekä "Merge markers". Tämä työkalu luo kokonaan uuden, täysin yhdistetyn tiheän pistepilven – huomaat sen ilmestyvän vasemman laidan "Workspace"-valikkoon.

8. Polygonimallin laskeminen

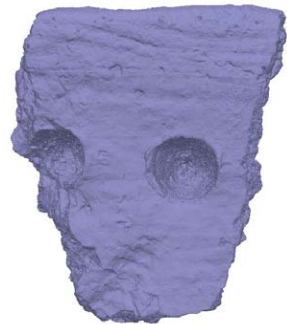
Työvaiheessa ohjelma muodostaa komponentin pistepilven pohjalta kohteen pintaa kuvaavan polygonimallin, "mesh". Varmista ensiksi workspace-valikosta, että valittuna on oikea, esimerkiksi useasta komponentista yhdistetty komponentti.

"Build mesh" -ikkunan asetukset

- Source data: dense cloud
- Surface type: arbitrary
- Depth maps quality: ultra high
- Face count: high. Tämä asetus vaikuttaa meshin resoluutioon. Yleensä pienestäkin esineestä tehdyssä digitoinnissa voi olla monta miljoonaa kolmiota ("facea"). Jos halutaan tuottaa suoraan huonoresoluutioisempi (tiedostokooltaan pienempi) digitointi, voidaan valita custom, ja alla olevaan "Custom face count" -kohtaan merkitä haluttu kolmioiden määrä (yleisesti kannattaa pitäytyä vähintään 500 000 kolmiossa).

Tarkastele valmista polygonimallia kriittisesti eri kuvakulmista. Varsinkin yhdistetyssä komponentissa eri komponenttien "rajat" voivat näkyä selkeinä harjanteina polygonimallin pinnassa. Tällöin komponenttien erillisiä tiheitä pistepilviä on siivottava huolellisemmin "align chunks" ja "merge chunks" -työvaiheiden välissä.

Jos polygonimallissa on pieniä reikiä, ne voi paikata "Models"-valikosta => "Mesh" => "Close holes". Paikkaustyökalu on kuitenkin karkea, ja sopii vain selkeärajaisille hyvin pienille (alle 1 mm) rei'ille. Merkitse reikien korjaaminen 3D-digitoinnin metatietoihin.



Kuva 18. polygonimalli

Polygonimallin yksinkertaistaminen (tarvittaessa)

Halutessasi voit yksinkertaistaa 3D-digitointia haluttuun kokoon, jos tiedoston koossa on rajoituksia. Esimerkiksi noin 500 000 polygonin malli on yleensä obj-muodossa noin 50 megatavun kokoinen tiedosto. Polygonimäärän lisäksi obj-muodossa tallennettavan 3D-digitoinnin tekstuurin muodostavan valokuvatiedoston tiedostomuoto vaikuttaa 3D-digitoinnin tiedostokokoon. Tarvetta yksinkertaistamiselle voi tulla esimerkiksi, jos lataat digitointeja verkon kautta katseltaviksi.

Muista aina tallentaa ensin alkuperäinen polygonimalli, ja tehdä kaikki muutokset tämän kopioon. Merkkää myös metatietoihin ylös paljonko polygoneja oli alkuperäisessä digitoinnissa, ja paljonko yksinkertaistetussa mallissa on.

Valitse ylälaidan valikosta Tools => Mesh => decimate mesh. Syötä "Target number of polygons" -kenttään haluttu yksinkertaistetun digitoinnin polygonien lukumäärä.

HUOM: polygonimallin rakenteen muuttaminen poistaa aiemman mallin pintaan mukautetun tekstuurikartan, joten tekstuurin joutuu laskettamaan tämän työvaiheen jälkeen uudestaan.

9. Teksturointi

Työvaiheessa luodaan väritys eli tekstuuri polygonimallin pintaan. Teksturointia ennen on useita "valmistelevia askeleita":

Kuvien laadun tarkistaminen

Jos et jo aiemmin ole tarkistanut kuvien laatua, kannattaa se tehdä tässä vaiheessa ja estää kaikkien laadultaan alle 0,5 olevien kuvien käyttö teksturointivaiheessa.

Epätasaisen valotuksen tai valkotasapainon korjaaminen

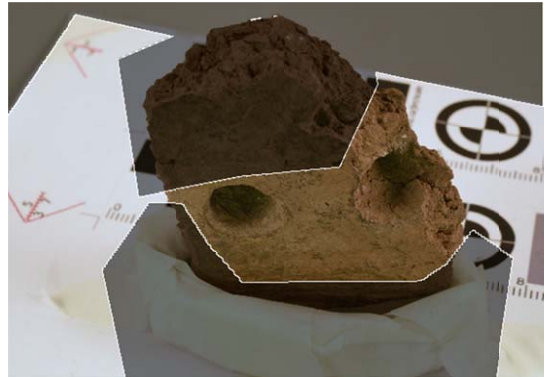
Jos kuvien valotus tai valkotasapaino vaihtelee, voi halutessaan käyttää "Calibrate colors" -työkalua "Tools"-valikosta.

Jalustan ja/tai epäterävän kohdan maskaaminen teksturointikuvista

Tekstuuri rakentuu valokuvien pohjalta, joten jos jossakin valokuvassa näkyy esimerkiksi esineen tukemiseen käytetty jalusta, käyttää ohjelma tätä myös teksturointivaiheessa. Kuvista on siksi maskattava pois kaikki kohdat, joissa jalusta tai muu asia peittää jonkin osan digitoitavasta esineestä.

Jos kuvia on hyvin paljon, maskauksen voi tehdä vain osalle kuvista ja estää loppujen kuvien käytön "Photos pane" -paneelissa. Tätä varten valitse estettävät kuvat, klikkaa oikealla ja valitse "Disable cameras".

HUOM ennen kuin muokkaat kuvien maskeja, kannattaa ne tallentaa. Valitse yksi kuva, oikeaklikkaa => "Masks" => "Export masks". Valitse ikkunassa "All cameras". Klikkaa ok niin pääset valitsemaan kansioon, johon maskit talletetaan.



Kuva 19. Maskeilla voit myös rajata kuvista epäterävät kohdat pois, kuten esimerkkikuvan keramiikankappaleessa.

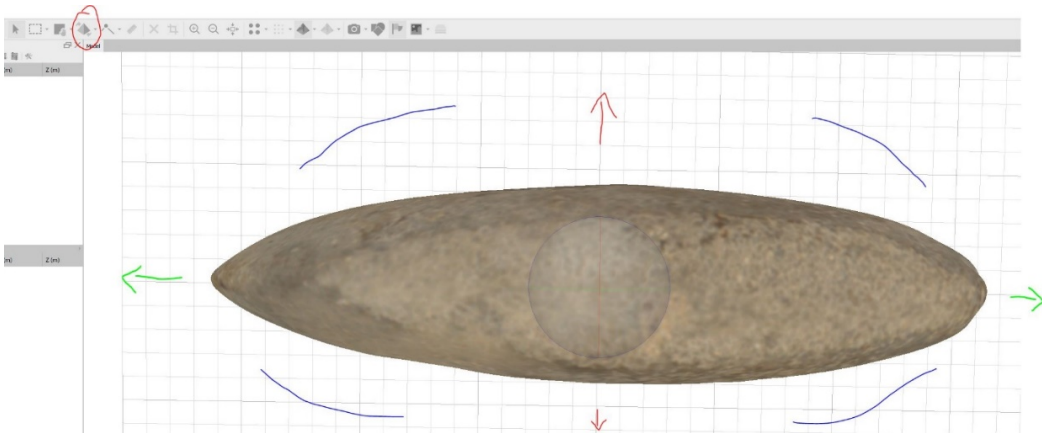
Asetukset texture-ikkunassa

- Mapping mode: generic
- Blending mode: mosaic
- Texture size / count: tuotettavan tekstuurin koko – mitä suurempi lukema, sen tarkempi tekstuuri, mutta myös suurempi tiedostokoko. Oletusasetus 8192 x 1 on hyvä yleisarvo. Jälkimmäinen luku viittaa tekstuurikarttojen määrään. Useampi tekstuurikartta hankaloittaa kuitenkin 3D-digitoinnin jälkikäsitteilyä toisessa ohjelmassa, joten pitkäaikaissäilytyksen kannalta kannattaa pitäytyä yhden kertoimessa.
- Enable hole filling: kyllä
- Enable ghosting filter: kyllä

10. Digitoinnin asettaminen origoon ja oikein päin

Sen jälkeen kun 3D-mallin asettaa origoon ja kääntää sen "oikein päin", on sen kääntely katseluohjelmassa helpompaa. Tämä jälkikäsitteily on helpompi tehdä esimerkiksi Blenderissä (ks. erilliset ohjeet), mutta tarvittaessa työvaiheen voi tehdä myös Metashapessa:

- Malli asetetaan origoon taustaruudukon avulla. Kohdasta "Model" => "Show/hide items" => "Show grid" saat taustaruudukon näkyville.
- Ylälaidan "Move object" -kuvakkeesta, kohdasta "rotate" pääset liikuttamaan mallia. Vedä se ruudukon keskellä näkyvän pienen X-merkin kohdalle, merkki kuvaa origoa.
- Käännä ruudukkoa niin, että se on "pystyssä". Pyöritä sen jälkeen mallia niin, että mallin "kylki" on itseesi päin (ks. kuva) ja "yläpuoli" näytön yläreunaa kohti. Voit lopuksi tarkistaa "Reset view" -kuvakkeesta, että malli on kääntynyt oikein päin suhteessa sisäiseen koordinaatistoon.



Kuva 20. 3D-mallin kääntäminen suhteessa taustaruudukkoon.

11. Digitoinnin vienti .OBJ:nä ja .glTF:nä

Valitse "file" => "export" => "export model". Valmiin 3D-digitoinnin voi viedä Metashapesta lukuisissa eri tiedostomuodoissa: .obj, .3Ds, .wrl, .dae, .ply, .x3D, .stl, .abc, .fbx, .dxf, .osgb, .glb, .u3d, .pdf, .kmz.

Lähteet:

Agisoft Forum. 2018. How to position object on zero point?

<<https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=9240.0>>. Luettu 26.10.2020.

Agisoft Support. 2020. Aligning turntable photos with background suppression from single mask in Agisoft

PhotoScan. <<https://www.agisoft.com/index.php?id=49>>. Ladattu 26.10.2020.

Metashape. 2019. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5.

<https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf>. Luettu. 24.10.2020.

Porter, S. 2015. Creating Artifact Models in Agisoft Photoscan Part 1.

<https://www.youtube.com/watch?v=qKWjPNIRK_I>. Luettu 26.10.2020.

Zachar, J. & Jončić, N. 2017. 3D RECORDING OF SCULPTURES AND SMALL OBJECTS. Teoksessa Zachar, J., Horňák, M.,

Novaković, P. (toim.). 3D Digital recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage. CONPRA Series, Vol.

1. University of Ljubljana Press, Faculty of Arts.

RealityCapture-ohje

Sisällysluettelo

1. Huomioita valokuvausvaiheeseen	2
2. Käyttöliittymä	2
3D-näkymässä liikkuminen	3
3. Kuvien tuonti ja yhdistäminen	3
4. Komponenttien yhdistäminen	4
5. Komponentin asettaminen mittakaavaan	7
6. Polygonimallin laskeminen ja muokkaaminen	7
7. Teksturointi	10
Maskien avulla teksturointi	10
8. 3D-digitoinnin vienti ohjelmasta	12
9. Väliaikaistiedostojen poistaminen	12
Lähteet	13

Ohjeisiin liittyvää sanastoa:

Komponentti: Kokonaisuus, johon kuuluvien valokuvien sijainnin suhteessa toisiinsa RealityCapture tuntee. Komponentti voi koostua pelkistä kuvien sijaintitiedoista, mutta komponenttiin voi kuulua myös yksi tai useampi polygonimalli.

Kontrollipiste: Tässä yhteydessä termillä viitataan "control points" -pisteisiin, joita RealityCapturessa voidaan asettaa valokuviin tai suoraan 3D-malliin. Metashape-ohjelmassa samoihin pisteisiin viitataan marker-nimityksellä.

Kuvauspositio: Asento, jossa esine on kuvattu. Jos esine on ensin kuvattu oikein päin, käännetty sitten ylösalaisin ja kuvattu uudestaan, on kuvauspositioita kaksi.

Markkeri: Koodattu kuvio, jonka ohjelma tunnistaa automaattisesti. Paperille tulostetut markkerit voidaan asettaa kuvattavan kohteen viereen, ja kunhan niiden välinen etäisyys tunnetaan, voi 3D-digitoinnin asettaa markkereiden avulla oikeaan mittakaavaan.

Maskaus: Kuvan tietyn osan peittäminen, esimerkiksi taustan tai epäterävän piirtyvän kohdan.

Viittaus: Debenjak-Ijäs, A. 2020. RealityCapture-ohje. Teoksessa Debenjak-Ijäs, A., Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi. Karhunhammas 20. Turku: Turun yliopiston arkeologian oppiaine. (CC BY-NC-ND 4.0.)

Päivitetty 27.8.2020.

1. Huomioita valokuvausvaiheeseen

RealityCapture poistaa hyvin tehokkaasti valkoisen taustan, varsinkin jos kuvat ovat kevyesti ylivalotettuja. Valitettavasti algoritmi poistaa myös valkopohjaisen mittakaavan, vaikka siinä olisi mustia yksityiskohtia. Värillinen mittakaava toimii ohjelmassa paremmin. Riittää että mittakaava asetetaan mukaan yhteen esineen kuvausasettoon, lähtökohtaisesti siihen missä esine on ”oikein päin”.

- Mittakaavan sijaan kuvausvaiheessa voidaan käyttää myös automaattisesti tunnistettavia kuvioita eli markkereita, joiden väliset etäisyydet tai koordinaatit non-earth-koordinaatistossa tunnetaan. Markkerit asetetaan kuvattavan objektin ympärille kuvaustasolle.

RealityCapturen markkeri-työkalu ei kuitenkaan ole kirjoitushetkellä saatavilla kaikissa lisenssivaihtoehdoissa.

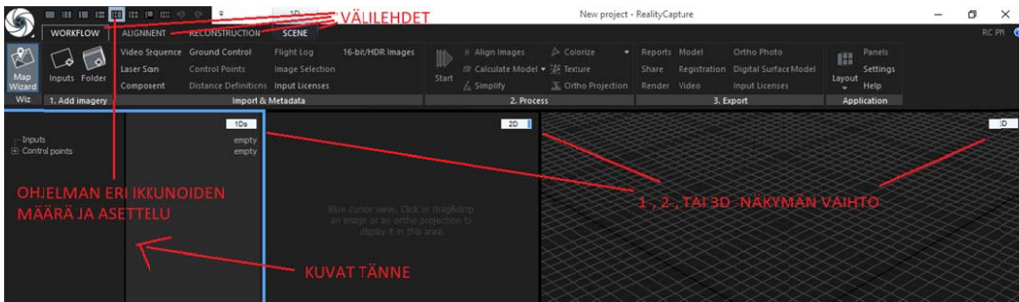


Kuva 1. Vasemmalla tavallinen mittakaava kuvaustasolla, oikealla automaattisesti tunnistettava markkeri.

2. Käyttöliittymä

Realitycapturen käyttöliittymä käsittää useamman välilehden, joiden välillä liikutaan ohjelma-ikkunan vasemman ylälaidan valikon avulla. *WORKFLOW*-välilehti sisältää aineiston tuontiin liittyvät työkalut, *ALIGNMENT*-välilehti kuvien yhdistämiseen ja mittakaavan asentamiseen liittyvät työkalut ja *RECONSTRUCTION*-välilehti polygonimallin tuottamiseen, teksturointiin ja muokkaamiseen liittyvät työkalut. *SCENE*-välilehdellä voi vaikuttaa kulloinkin valittuna olevan ikkunan sisältöön – jos valittuna on esimerkiksi valokuvia sisältävä ikkuna 2D-näkymässä, voi *SCENE*-välilehden kautta valita näkyvätkö ikkunassa rekisteröidyt, rekisteröimättömät vai kaikki valokuvat. Jos taas valittuna on 3D-ikkuna, voi *SCENE*-välilehdellä valita näkyvätkö 3D-digitointi pistepilvenä tai polygonimallina, näkyvätkö kameroiden sijainnit suhteessa 3D-digitointiin ja niin edespäin.

Vasemman ylälaidan symbolit viittaavat ohjelman ikkunoiden asetteluun. Lähtökohtaisesti vasemmanpuolimmainen ikkuna on 1D-näkymässä, eli ohjelmaan tuodut valokuvat, eri 3D-digitoinnit, kontrollipisteet ja muut komponentit näkyvät ikkunassa allekkain. Yksittäisiä valokuvia voi ”hinata” tarkasteltavaksi vasemman laidan ikkunasta esimerkiksi 2D-näkymässä olevaan ikkunaan. Muita ikkunoita voi valita esille haluamansa määrän, ja asettelua voi muuttaa kesken kaiken – esimerkiksi kontrollipisteiden asettelussa kuuden ikkunan näkymä on kätevä, mutta muussa käytössä riittää yksi iso 3D-ikkuna sekä kaksi 2D-ikkunaa. Kunkin ikkunan näkymää voi vaihtaa ikkunan oikean ylälaidan valkoisesta painikkeesta 1D-, 2D- ja 3D-näkymän välillä.



Kuva 2. RealityCapturen käyttöliittymä.

3D-näkymässä liikkuminen

3D-näkymää voi pyöritellä painamalla hiiren oikeaa näppäintä pohjaan, ja liikuttaa sivulta toiselle painamalla vasenta näppäintä pohjaan. Keskipistettä, jonka ympärillä 3D-näkymä pyörii, voi siirtää tuplaklikkaamalla vasemmalla hiiren näppäimellä haluttuun kohtaan.

Jos 3D-näkymässä onnistuu liikuttamaan digitoinnin näkökentän ulkopuolelle, auttavat seuraavat komennot:

R – siirtää 3D-näkymän alkuperäiseen asentoon

A – liikuttaa näkymää niin, että koko valittuna oleva komponentti näkyy

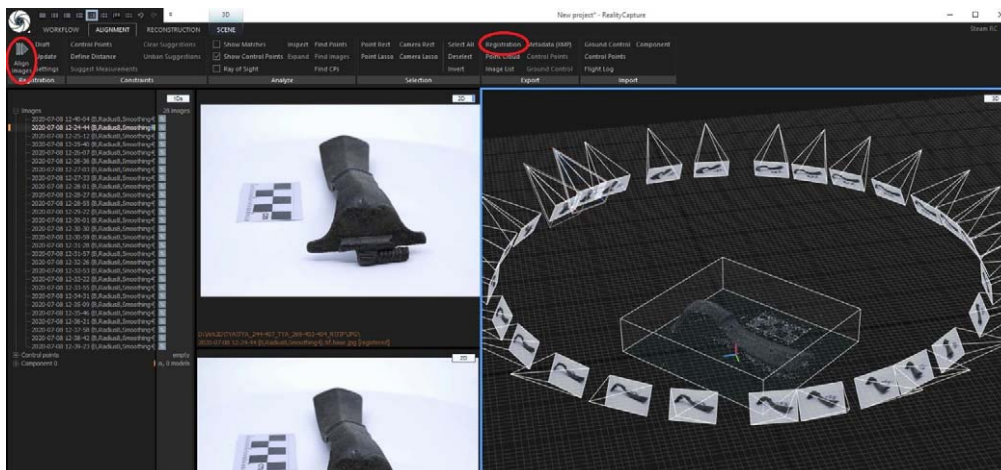
3. Kuvien tuonti ja yhdistäminen

Kuvien tuonti tapahtuu raahaamalla kuvat kansioista vasemman laidan "Inputs"-kohtaan.

Kuvia yhdistettäessä on vaihtoehtoina joko tuoda kaikki 3D-digitointiin liittyvät kuvat kerralla ohjelmaan tai tuoda ja yhdistää kuvat ensin pienemmissä erissä, esimerkiksi kuvauspositio kerrallaan, ja lopuksi yhdistää nämä komponentit. Ensinnä mainittu työtapo sopii yksinkertaisille esineille, kun taas hankalamman muotoisten esineiden kuvat kannattaa yhdistää positio tai jopa kuvakehä kerrallaan.

Kun halutut kuvat on tuotu sisään ohjelmaan, valitaan ALIGNMENT-välilehdeltä "Align images", jolloin ohjelma laskee kuvien sijainnin ja muodostaa harvan pistepilven. Yhdistetyistä kuvista koostuva komponentti näkyy vasemman laidan 1D-valikossa. Jos kaikki 3D-digitointiin liittyvät kuvat yhdistyvät kerralla, voi seuraavaksi siirtyä suoraan mittakaavan asettamiseen (kohta 5).

Joissain tapauksissa liian harva kuvasarja ei yhdisty yhdeksi vaan useammaksi komponentiksi, jotka on ensin yhdistettävä control points -työkalun avulla (kohta 4).



Kuva 3. Soljen ensimmäisen kuvausposition kuvien sijainti ja harva pistepilvi 3D-näkymässä.

Jos kuvat yhdistetään useammassa osassa, täytyy kunkin yhdistetyn kuvasarjan eli komponentin sijaintitiedot ensin viedä ohjelmasta. Pistepilvi ja kameroiden sijaintitiedot tallennetaan ylävalikon ALIGNMENT-välilehdeltä => Export => Registration => valitse tallennusmuodoksi "RealityCapture alignment component" ja nimeä tiedosto komponentin mukaan, esimerkiksi "Positio1". Tallenna myös itse projektitiedosto tavallisesti file => save.

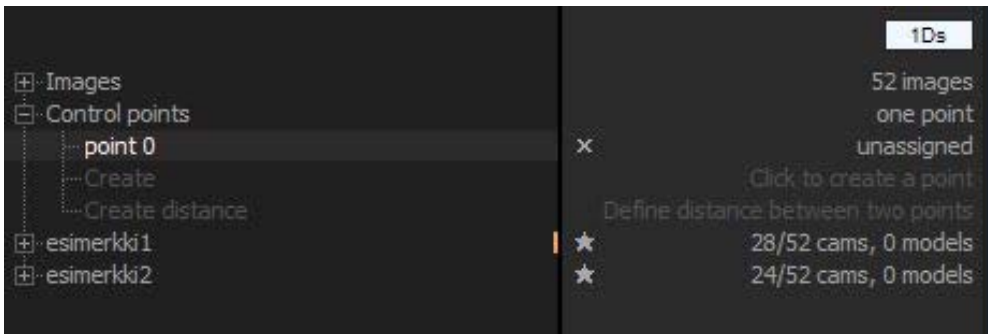
Sulje sitten ensimmäisen komponentin ohjelmätiedosto ja avaa uusi tyhjä ohjelmätiedosto. Vie sinne seuraavan komponentin kuvasarja ja käsittele kuten yllä. Tällä tavoin työestetään kaikki esineen eri asennoista otetut kuvasarjat erillisinä komponenteina.

4. Komponenttien yhdistäminen

Kun kaikki komponentit on erikseen käsitelty, yhdistetään lopuksi kunkin position kuvien sijaintitiedot (RealityCapture alignment component). Tallennetut komponentit tuodaan uuteen, tyhjiin RealityCapture -ohjelmätiedostoon .rcalign-tiedostomuodossa ALIGNMENT-välilehdessä => Import => Component.

Erilliset komponentit näkyvät nyt vasemman laidan 1D-näkymässä allekkain sillä nimellä, millä ne on tallennettu. Komponenttien kuvamäärissä näkyy aina komponentin kuvien osuus kaikkien komponenttien yhteenlasketusta kuvamäärästä, esim. 28/52 kuvaa.

Komponentit yhdistetään ALIGNMENT-välilehdessä => Registration => Align Images, tai painamalla F6-näppäintä. Valmis, yhdistetty pistepilvi ilmestyy samoin vasemman laidan 1D-näkymään nimellä "component0", ja sen kuvamäärän tulisi olla kaikkien yhdistettyjen komponenttien yhteenlaskettu kuvamäärä, esim. 52/52 kuvaa.



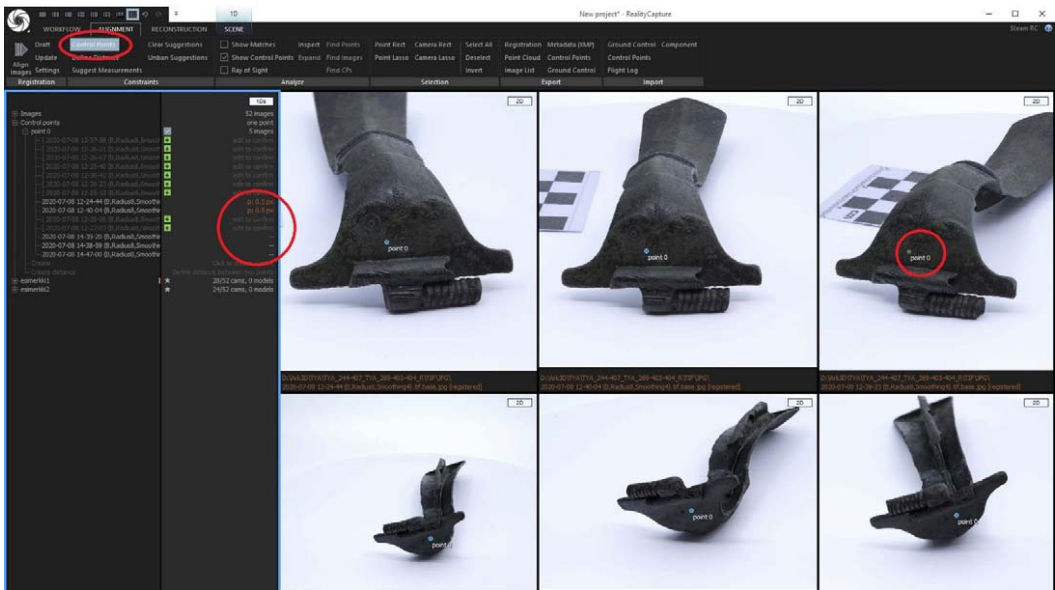
Kuva 4. komponentit “esimerkki1” ja “esimerkki2” vasemman laidan 1D-valikossa. Oranssi pieni merkki komponentin nimen perässä tarkoittaa, että kyseinen komponentti, tässä tapauksessa esimerkki1, on valittu aktiiviseksi.

Jos ohjelma ei löydä tarpeeksi yhtenäisiä pisteitä eri komponenttien välillä, näiden yhdistäminen yhdeksi ei onnistu. Tällöin uusia komponentteja voi syntyä useampia. Jos näin käy, tarkista minkälaisia komponentteja syntyi: muutaman kuvan komponentit voi jättää omaan arvoonsa, **jos kuvasarjassa on muuten riittävästi kuvia esineen kyseisestä kohdasta**. Isommat komponentit on hyvä yhdistää niin, että katsoo, mitä esineen kohtia komponenteissa on näkyvissä ja sijoittaa kontrollipisteet juuri näihin kohtiin. Tätä varten vaihda ohjelman eri ikkunoiden asettelu niin, että sinulla on vasemman laidan 1D-ikkunan lisäksi kuusi 2D-näkymässä olevaa ikkunaa. Ylälaidasta valitse ALIGNMENT-välilehti.

1. Tarkastele ensin yhdistettäviä komponentteja ja niiden valokuvia. Mitkä esineen kohdat näkyvät kummankin komponentin valokuvissa? Valokuvia voit tarkastella helposti vaihtamalla vasemman laidan ikkunan 2D-näkymään ja valitsemalla Scene-välilehdeltä rekisteröityneet kuvat näkyville, tällöin ohjelma näyttää kulloinkin valittuna olevan komponentin kuvat.
2. Avaa yhteisiä kohtia esittävät valokuvat “hinaamalla” tyhjiin 2D-ikkunoihin. Käteväksi huomattu tapa on pitää ylemmällä rivillä yhden, alemmalla toisen komponentin kuvia – näin kuvat eivät mene sekaisin.
3. Vaihda vasemman laidan valikko takaisin 1D-näkymään ja valitse Control points => Create. Valikkoon ilmestyy uusi kontrollipiste, jonka vieressä lukee “unassigned”, sillä sitä ei ole merkitty yhteenkään kuvaan.
4. Ylälaidasta valitse Control points -kuvake aktiiviseksi. Klikkaa vasemmalla kuvan yksityiskohdan kohdalle – pidä näppäin pohjassa, kunnes olet vetänyt pisteen tasan oikeaan kohtaan. Merkitse näin kontrollipiste esillä oleviin kuviin. Jos vaihdat välillä kuvia, kannattaa ylälaidan Control points -kuvake deaktivoida, jotta ei vahingossa luo uusia pisteitä.
5. Kontrollipiste kannattaa merkitä kohtaan, joka erottuu hyvin niin tarkoissa kuin sumeammassakin kuvissa. Kokemusten mukaan esimerkiksi valkoiset pienet pisteet tumman esineen pinnassa – tai toisinpäin – toimivat hyvin. Hyvän kontrollipisteen tunnistaa siitä, että kun pisteen on merkinnyt muutamaan kuvaan ohjelma nopeasti ehdottaa uusia kuvia.
6. Jokainen kontrollipiste on merkittävä useampaan kuvaan, jotta siitä on hyötyä komponenttien yhdistämisessä. Kun ohjelma pystyy laskemaan kontrollipisteen sijainnin kuviin tehtyjen merkintöjen perusteella, se ehdottaa vasemman laidan valikossa myös muita kuvia, joissa sama kohta esiintyy. Kuvat

kannattaa tarkistaa ennen niiden hyväksymistä vihreästä plusmerkistä, sillä aina ohjelman laskelmat eivät mene oikein.

7. Luo tällä tavoin pisteitä niin, että kukin kontrollipiste on merkitty mahdollisimman monen eri komponentin mahdollisimman moneen kuvaan. Pisteitä kannattaa luoda eri puolille kohdetta. Kahden komponentin yhdistäminen onnistuu usein jo kolmella kattavasti kummankin komponentin useampaan kuvaan merkityllä kontrollipisteellä.
8. Kun kontrollipisteitä on tarpeeksi, paina uudestaan vasemman yläkulman Align images -näppäintä. Jatka kontrollipisteiden merkitsemistä, kunnes saat komponentit yhdistettyä. Muista poistaa pieleen menneet komponentit heti, ettei vasemman laidan 1D-näkymä mene niistä ihan tukkoon.

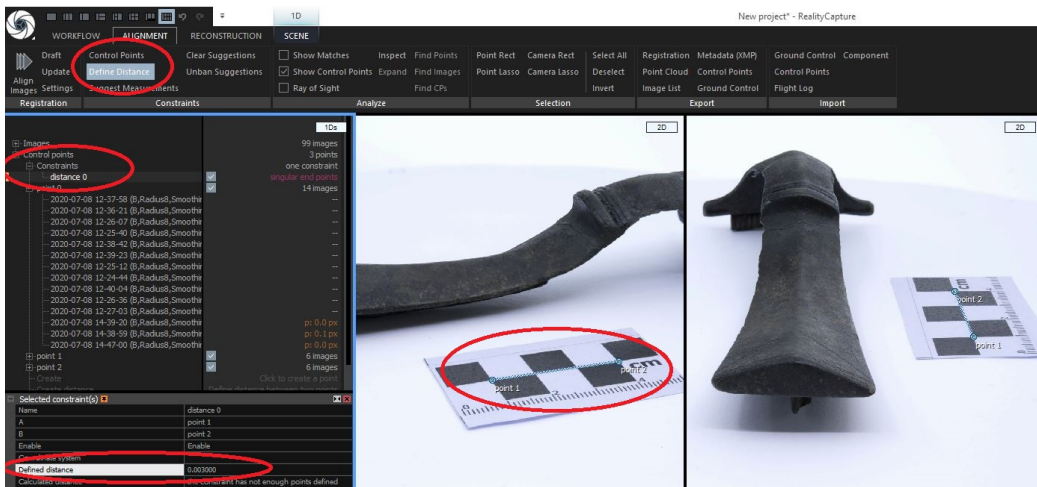


Kuva 5. Kontrollipisteiden merkitseminen kuviin. Merkitty kontrollipiste näkyy sinisenä pallona. Ylhäällä oikeanpuolimmaisena olevassa kuvassa oleva mustavalkoinen pallo on ohjelman laskema ehdotus kontrollipisteen sijainnista. Kuvat, joihin ohjelma ehdottaa kontrollipistettä näkyvät vasemmalla, merkittyinä vihreällä plus-painikkeella. Kuvien nimien vieressä olevassa sarakkeessa näkyy niiden virhearvo. Virhearvo on laskettu suhteessa kulloinkin valittuna olevan komponentin koordinaatistoon. Esimerkin kolme alinta kuvaa ovat toisesta komponentista, siksi niiden virhearvo ei näy.

5. Komponentin asettaminen mittakaavaan

Kun kaikki 3D-digitoinnin eri positiot on yhdistetty yhdeksi komponentiksi, asetetaan se mittakaavaan.

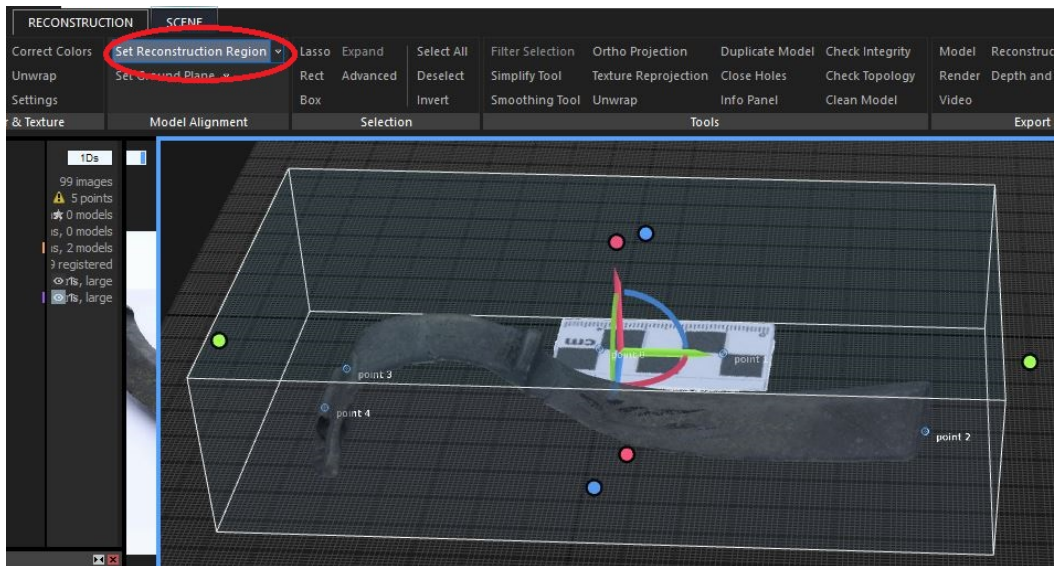
1. Valitse esille eri suunnista otettuja kuvia, joissa näkyy esineen vierelle asetettu mittakaava. Merkitse mittakaavaan kaksi kontrollipistettä helposti tunnistettaviin kohtiin, joiden etäisyyden tiedät. Myös nämä pisteet on merkittävä useampaan kuvaan.
2. Avaa kuva, jossa kumpikin piste näkyy selkeästi. Valitse ALIGNMENT-välilehdeltä "Define distance" -työkalu. Paina vasemmalla pohjaan ensimmäisen pisteen päällä ja raahaa jana toiseen pisteeseen saakka. Uusi mittakaavajana näkyy vasemman laidan "constrains"-kohdassa. Tuplaklikkaa janaa, jotta sen asetukset aukeavat vasempaan alakulmaan. Määritä janan pituus metreissä "defined distance" -kohtaan.
3. Klikkaa ALIGNMENT-välilehden vasemmassa ylälaidassa olevaa "update"-kohtaa, jolloin valittuna oleva komponentti (johon mittakaavajana on merkitty kontrollipisteiden väliin) päivittyy oikean kokoiseksi.
4. Tallenna varmuuskopio ennen seuraavaa työvaihetta.



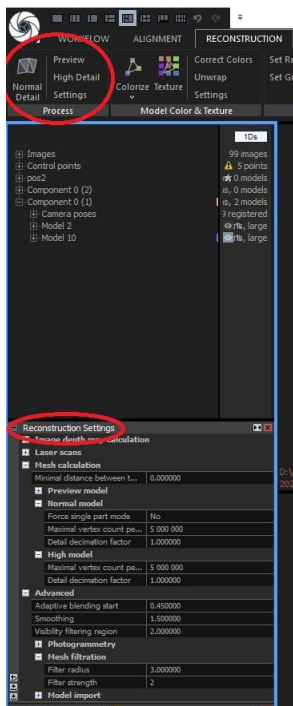
Kuva 6. mittakaavajanan asettaminen.

6. Polygonimallin laskeminen ja muokkaaminen

Ennen polygonimallin rakentamista täytyy yhdistetyn pistepilven ympärillä oleva rajauslaatikko rajata niin, että laatikon ulkopuolelle ei jää esineen tai esimerkiksi mittakaavan osia. Tämä käy RECONSTRUCTION-välilehden "set reconstruction region" -kuvakkeesta. Rajauslaatikko on myös ainoa tapa, jolla RealityCapturessa voi "leikata pois" ei-toivottuja pisteitä pistepilvestä ennen meshin luomista – Metashapen kaltainen pistepilven siivoaminen ei ole mahdollista.



Kuva 7. rajauslaatikon asettaminen.



Kun valittuna on oikea komponentti, ja rajauslaatikko on oikean muotoinen, valitse WORKFLOW-välilehti => calculate model.

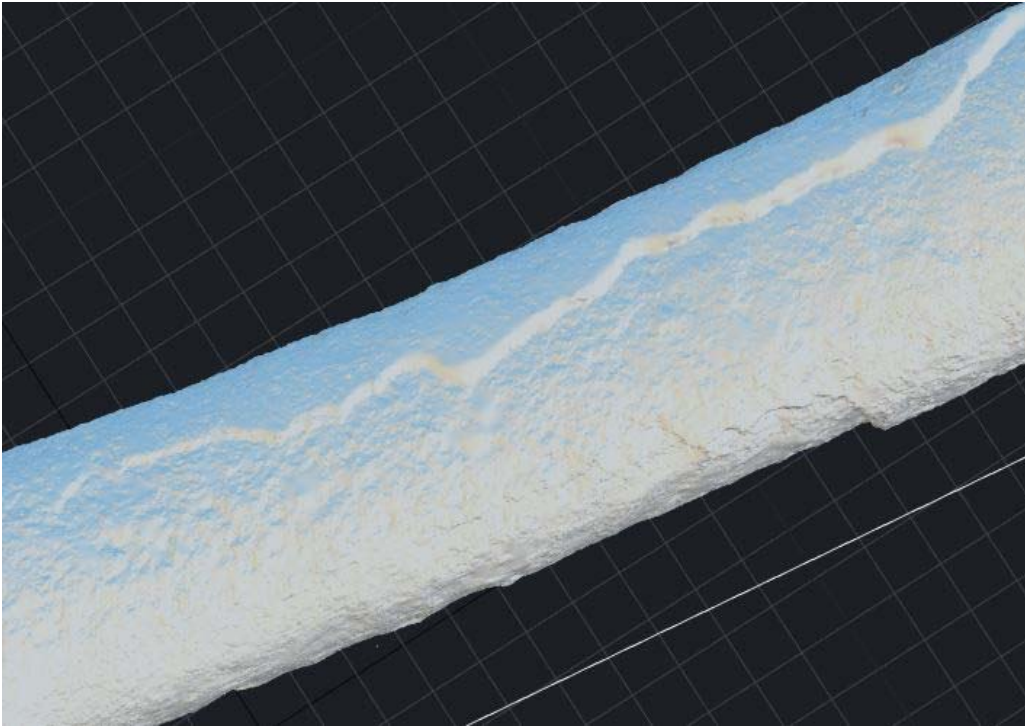
Draft on hyvin nopea, mutta tekee hyvin karkean luonnoksen. Sillä voi lähinnä tarkistaa, minkälaisia katvealueita malliin jää.

Normal detail tuottaa visualisointikäyttöön sopivan, yksinkertaisen mallin.

High quality tuottaa tarkan polygonimallin, jossa voi olla useampi miljoona polygonia.

Polygonimalli kannattaa lopuksi tarkistaa huolellisesti, ettei siinä ole esimerkiksi saumakohtia, jotka ovat syntyneet, kun eri komponentit eivät ole yhdistyneet kunnolla. Pienet virheet eivät erotu pistepilvestä, vaan vasta valmiista polygonimallista.

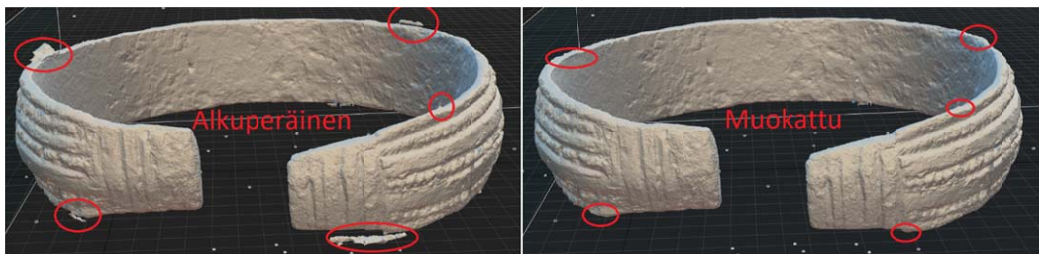
Kuva 8. Polygonimallin asetuksista voi muun muassa säätää polygonien maksimimäärää.



Kuva 9. kuvassa näkyvä harjanne on kahden komponentin huonosta yhdistymisestä syntynyt virhe.

Valmista polygonimallia voi muokata RealityCapturen omilla työkaluilla RECONSTRUCTION-välilehdessä.

- “Lasso”- työkalulla voi valita polygonimalliin kuulumattomat osat, ja poistaa ne sitten “filter selection” -työkalulla. Huomaa että joka “filteröinnin” päätteeksi ohjelma luo uuden mallin – vasemman laidan valikossa näkyy siis “model1”, “model2”, “model3” ja niin edespäin. Säästä ensimmäinen malli, jossa on ihan kaikki polygonit, sekä viimeisin, loppuunsa siivottu versio, ja poista kaikki välivaiheen versiot.
- Jos polygonimallissa on pieniä reikiä, ne voi täyttää “fill holes” -työkalulla. Täytetty reiän kohta saattaa olla hieman tökerön näköinen, voit silottaa sitä smooth-työkalulla.
- Polygonimallin pinnan editointi synnyttää aina uuden mallin. Poista taas välivaiheen versiot, ja säästä malli, jossa pintaa ei ole muokattu ollenkaan, sekä viimeisin malli, jossa reiät on paikattu ja siloiteltu. Ota sitten ruutukaappaus kummastakin mallista ja tallenna 3D-digitoinnin metatietojen yhteyteen. Kirjaa tekemäsi muokkaukset ja käytetyt työkalut myös sanallisesti metatietoihin.
- Polygonien määrää voi pienentää Simplify tool -työkalulla. Syötä vasempaan alalaitaan ilmestyvään Target triangle count -kenttään haluamasi polygonimäärä, johon polygonimalli pienennetään.
- Jos polygonimallin pinnassa on geometrisiä virheitä, voit tunnistaa ja poistaa ne “Check topology” ja “Clean model” -työkaluilla.

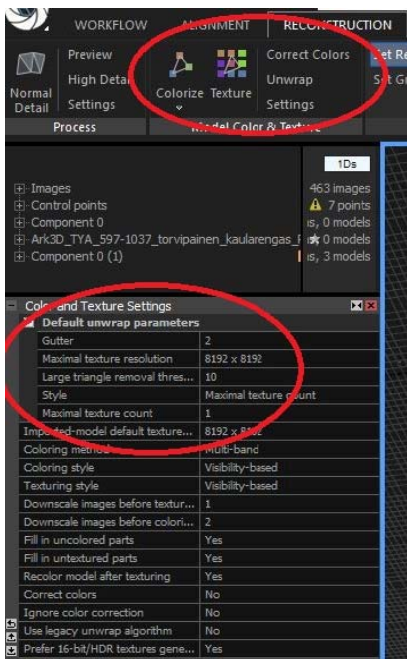


Kuva 10. rannerenkaan polygonimallin muokkausten dokumentointi.

7. Tekstuointi

Valmis polygonimalli voidaan värittää kahdella RECONSTRUCTION-välilehden työkalulla:

- Colorize-työkalulla itse polygoneille lasketaan väriarvo. Tämä väritys pysyy polygonien mukana ja on siten varmempi pitkäaikaissäilytyksen kannalta.
- Texture-työkalu luo visualisointitarkoitukseen sopivan, hyvinkin tarkan värityksen polygonimallin pinnalle.



Kuva 11. Tekstuuriasetuksissa voi valita esimerkiksi tekstuurin resoluution. Oletusasetus 8192 x 8192 on hyvä yleisarvo. "Maximal texture count" viittaa tekstuurikarttojen määrään. Useampi tekstuurikartta hankaloittaa kuitenkin 3D-digitoinnin jälkikäsitteilyä toisessa ohjelmassa, joten pitkäaikaissäilytyksen kannalta kannattaa pitäytyä yhden kertoimessa. Laadukkaan tekstuurin varmistamiseksi "Downscale images before texturing" -arvon on oltava 1, jolloin kuvanlaatua ei heikennetä teksturointiprosessin yhteydessä.

Maskien avulla teksturointi

RealityCapturessa ei voi maskata kuvia, mutta muualla tuotettuja maskeja voi tuoda sisään ohjelmaan. Maskeja voi tehdä esim. Adobe Lightroomissa tai Metashape-ohjelmassa, ja vaihtaa RealityCapturessa png-muotoiset, maskatut maskatut kuvat alkuperäisten tilalle teksturointivaiheessa.

Maskatut kuvat voi tuoda ohjelmaan kahdella tapaa. Kuvat voi vaihtaa alkuperäisten kuvien tilalle muuttamalla ohjelmatiedostossa

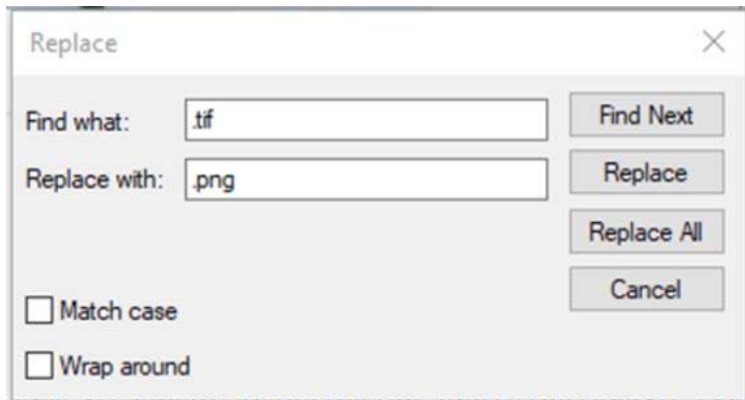
kuvien nimiä (ohjeet alla). Toinen, juuri kirjoitushetkellä julkaistu tapa on RealityCapturen uusi "Image Layer" - ominaisuus (CapturingReality Support 2020a).



Kuva 12. Maskattu kuva, jossa näkyville on jätetty vain rannerenkaan terävänä kuvattu osa.

Maskattujen kuvien tuominen ohjelmätiedostoa muuttamalla:

1. Vie maskatut kuvat sopivaan kansioon. Varmista että maskattuja kuvia on yhtä paljon kuin alkuperäisiä kuvia, ja että niiden tiedostonimet ovat samoja (esimerkiksi alkuperäinen kuva DSC_0123.tif sekä maskattu kuva DSC_0123.png).
2. Varmista että RealityCapture-työstäsi on varmuuskopio ja että työ ei ole paraikaa auki. Avaa sitten .rcproj-päätteinen RealityCapture-tiedosto Notepad-ohjelmalla. Muuta find & replace -työkalulla kuvien tiedostopääte .png:ksi. Tallenna Notepad-tiedosto ennen sulkemista. Huomaa, että ohjelmätiedoston nimessä olevat ääkköset korruptoivat .rcproj-tiedoston kun se tallennetaan Notepadin kautta – ääkkösiä ei kannata siksi käyttää tiedostonimessä ollenkaan.
3. Avaa muutettu projektitiedosto RealityCapturessa. Ohjelma pyytää korjaamaan muuttuneen kuvatiedostopolun. Navigoi kansioon, jossa maskatut kuvat ovat ja valitse RealityCapturen pyytämä kuva.



Kuva 13. tiedostopäätteen muuttaminen Notepadissa.

8. 3D-digitoinnin vienti ohjelmasta

Valmis 3D-digitointi viedään RECONSTRUCTION-välilehden Export => Model -kohdasta. Tiedoston voi viedä .obj-, .ply-, .xyz-, .abc-, .glb-, .ptx-, .las-, .partList-, .fbx- ja .dae-tiedostomuodoissa.

9. Väliaikaistiedostojen poistaminen

Realitycapture luo valtavasti väliaikaisia tiedostoja, jotka hyvin äkkiä täyttävät C-aseman. Ne kannattaa säännöllisesti poistaa. Tiedostot sijaitsevat C-aseman Temp-kansiossa olevassa RealityCapture-kansiossa, joka löytyy hakemalla windowsin omasta hausta kirjoittamalla %temp% tai esimerkiksi 3D-hankkeen tehokoneella osoitteesta "C:\Users\Andeij\AppData\Local\Temp\RealityCapture".

HUOM: Jos RealityCapture on auki, älä poista saman päivän tiedostoja, jottet sotke avoimna olevaa projektia.

Lähteet

CapturingReality Support. 2020a. How do I use Image Layers. < <https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/360013294800-How-do-I-use-Image-layers->>. Luettu 26.10.2020.

CapturingReality Support. 2020b. Working with Components: Merging components. <<https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115001569011-Working-with-Components-Merging-components>>. Luettu 26.10.2020.

CapturingReality Support. 2015a. Define Distance / Create distance? < <https://support.capturingreality.com/hc/en-us/community/posts/115000779991-Define-Distance-Create-distance->>. Luettu 26.10.2020.

CapturingReality Support. 2015b. Control points. <<https://support.capturingreality.com/hc/en-us/community/posts/115000777891-control-points>>. Luettu 26.10.2020.

CapturingReality Support. 2015c. Scale. <<https://support.capturingreality.com/hc/en-us/community/posts/115001356652-Scale>>. Luettu 26.10.2020.

Cheparev, A. 2016. Reality Capture - Converting Photos to 3D Models. <<https://www.youtube.com/watch?v=uxote2ZUj2o>>. Luettu 26.10.2020.

Valokuvausohje fotogrammetrista 3D-digitointia varten

Näissä ohjeissa selostetaan kuvausprosessi fotogrammetriassa käytettävien esinekuvien tuottamiseksi Turun yliopiston arkeologian oppiaineen (tästä eteenpäin ”oppiaineen”) kalustolla.

Tavoitteena on syvyyserävyydeltään tasainen, tarkka ja kohinaton kuva, jonka värit vastaavat todellisuutta. Kuvan taustan tulee olla mahdollisimman yksivärinen, joko valkoinen tai musta, ellei tarkoituksena ole käyttää taustan väritystä hyödyksi kuvan taustan poistamisessa maskeilla. Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihankkeessa valkoinen, hieman ylivalotettu tausta on toiminut hyvin.



Sisällysluettelo

1. Tarvittava kalusto	2
2. Kuvausvalmistelut	3
3. Kuvaaminen	8
Lähteet	10

Sanasto

Positio: Tietty asento, jossa löytö kuvataan. Jos esimerkiksi kivikirves kuvataan ensin ”oikein päin”, käännetään ympäri ja kuvataan sitten ”väärin päin”, on kivikirves kuvattu kahdessa positiossa.

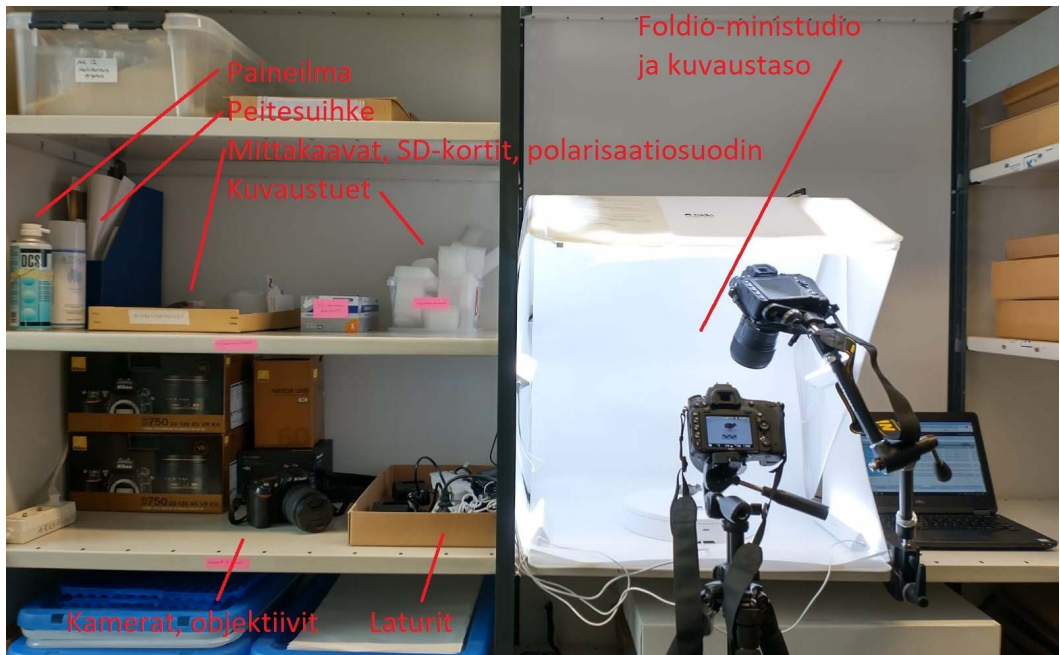
Kuvakehä: Löydön ympäriltä esimerkiksi 15 asteen välein tasaisesti tietyltä korkeudelta otettu kuvasarja.

Viittaus: Debenjak-Ijäs, A. & Tolvi, A. 2020. Valokuvausohje fotogrammetrista 3D-digitointia varten. Teoksessa Debenjak-Ijäs, A., Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi. Karhunhammas 20. Turku: Turun yliopiston arkeologian oppiaine. (CC BY-NC-ND 4.0.)

Päivitetty 2.9.2020.

1. Tarvittava kalusto

- Kamera ja objektiivi, mielellään kiinteällä polttovälillä. Zoom-objektiivi kannattaa "lukita" haluttuun polttoväliin esimerkiksi teippaamalla. Tarkimmat tulokset saa ns. normaaliobjektiivilla, jonka polttoväli on lähellä 50 mm täysikenoisella kameralla. Toisaalta esimerkiksi Cultural Heritage Imaging suosittelee aloittamaan fotogrammetrisen valokuvaamisen hieman lyhyemmällä, laajemman kuvakulman antavalla objektiivilla, jolloin kuvien päällekkäisyys on helpompi varmistaa (CHI 2020). Oppiaineen kalustosta sopiva setti on Nikon D750 + Nikkor 60 mm micro.
- Pyöröpolarisaatiosuodin, jos löytö on hyvin kiiltäväpintainen.
- Kameran jalusta.
- Valotelletta ja taustakangas. Oppiaineen kalustosta Foldio-ministudio.
- Studiovalot, värilämpötila 5 500 kelviniä, oppiaineen kalustosta Foldion ledivalot.
- Pyörivä kuvaustaso, oppiaineen kalustosta Foldio 360.
- Foldio-studiota käytettäessä: kännykkä, jossa bluetooth-yhteys ja Foldio 360 -sovellus.
- Värillinen mittakaava (esim. RealityCapture poistaa valkoisen mittakaavan, mutta pinkki on todettu toimivaksi).
- Valkoisia tukia hankalanmuotoisille esineille. Oppiaineen kuvausvälineissä on mm. valkoisia vaahtomuovin paloja sekä valkoiseksi maalattuja viemäriputken päitä.



Kuva 1. Turun yliopiston arkeologian oppiaineen ministudio.



Kuva 2. Pistokkeiden ja akkulateureiden sijainti. Kameran akku ladataan aina kuvauksen päätteeksi, sillä etenkin "Live view" -näkyvä kuluttaa akun nopeasti loppuun. Irrota pistokkeet kuvauksen päätteeksi, kun kameran akut on ladattu.



Kuvat 3–4. Oppiaineen väri-/harmaakortti ja pyöröpolarisaatio-suodin.

2. Kuvausvalmistelut

1. Täytä metatietolomakkeeseen seuraavat kuvattavan löydön tiedot (tai sovelta metatiedot omaan projektiisi sopiviksi):

- Kuvattavan esineen mitat, elleivät ne näy jo luettelotiedoissa
- Kuvauspäivä
- Kuka kuvaa, olosuhteet, välineet (kamera, objektiivi ja esim. jos käytetään polarisaatio-suodinta)

2. Laita Foldio-studion valot päälle kiinnittämällä pistokkeet.

Asettele valot sopivaan asentoon. Valoissa ja Foldio-teltassa on magneettikiinnikkeet, joilla valot voi kiinnittää tai asettaa esimerkiksi teltan etuosaan pystyasentoon. Valo kannattaa suunnata kohti teltan seiniä, jotta se heijastuu siitä tasaisesti. Tarvittaessa korota esinettä alustasta valkoisella tuella, ettei sen alle jää tummia varjoja.

Varmista samalla, että myös Foldio-kuvaustasossa on virta päällä, eli kuvaustasossa vilkkuu valo johdon kohdalla.



Kuva 5. Esine valmiina kuvattaviksi ensimmäisessä positiossa.

3. Aseta löytö ja värillinen mittakaava kuvaustasolle niin, että löytö on "oikein päin". Jos löytö on kuvaustasolle liian suuri, on kuvaustason alla olevalla hyllyllä olevassa laatikossa suurempi lisälevy, joka asetetaan Foldio-tason päälle. Muista tällöin asettaa pieni heijastuslevy (peili) kuvaustason eteen, kohtaan, jossa johto liitetään kuvaustasoon. Peili on tarpeen, jotta infrapunasäde voidaan heijastaa kameroita kohti suurikokoisen lisälevyn alta.

4. Aseta kamera jalustalle ministudion eteen ja kohdistu kohti löytöä. Halutessasi voit käyttää kahta Nikon D750 -kameraa samanaikaisesti. Toinen kamera kiinnitetään Manfrotton "Magic Arm" -jalustaan, joka kiinnitetään hyllylevyyn, jolla kuvausteltoa sijaitsee. Käyttäessäsi Manfrotton jalustaa ole tarkkana, ettet käännä kameraa oikeaan asentoon objektiivia vääntämällä, vaan aina pelkästä rungosta kiinni pitäen. Foldio-kuvaustaso etäohjaa kameroita infrapunavalolla, joten kunhan kuvaustason ja kameroiden välillä ei ole esteitä, voi Foldio-sovellukseen liittää haluamansa määrän infrapuna-etäohjauksella toimivia kameroita.



Kuva 6. Kuvaaminen kahdella kameralla.



1. Kuvien katselu
2. Menu-valikko
3. WB-painike (valkotasapaino)
4. Kuvan suurennos
5. Kuvan pienennys/ISO-painike
6. Suljinajan säätö
7. OK-painike
8. Live view -painike, josta saa livekuvan päälle ja pois
9. Suljinaika
10. Aukon koko
11. ISO-lukema

Kuvat 7–8. Nikon D750 -kameran asetukset.

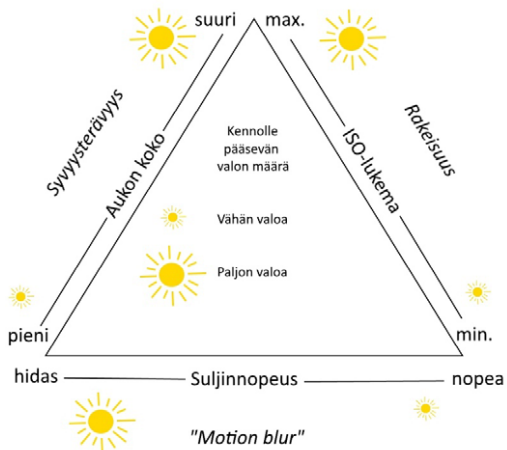
5. Säädä kameran asetukset kohdilleen.

- Vaihda kamera manuaaliasetuksille (M) ja manuaalitarkennukselle.
- Aukon koko: f/18– f/11 riippuen esineen koosta. F/16 on yleensä toiminut hyvin.
 - Säädetään rullasta kameran etupuolelta.

- ISO 100: Paina painike (5.) pohjaan ja säädä asetus rullalla (6.). Valittu asetus näkyy näkyy live näkymän alalaidassa (kohta 11.).
- Suljinaika: Kokeile kunnes löydät suljinajan, joka valottaa riittävästi. Oppiaineen kalustolla toimii yleensä 1/5 sekunti. Asetusta säädetään rullalla (6.) ja valittu asetus näkyy näytöllä (kohdassa 9).
- Valkotasapaino: 5 500 kelviniä.
 - Paina WB-painiketta (3.) pohjassa. Valittu valkotasapaino ilmestyy näytön alalaitaan keltaisina numeroina. OK-painikkeen (7.) vasemmalla ja oikealla puolella olevilla nuolinäppäimillä voit valita säädetäänkö tuhansia, satoja, kymmeniä vai ykkösiä. Valittu luku vilkkuu näytöllä. OK-painikkeen yläpuolella olevaa nuolta painamalla voit nostaa lukua ja alapuolella olevalla nuolella taas laskea.
- Tallennusmuotona RAW (Nikonin oma RAW-formaatti on .NEF) ja resoluutio niin korkea kuin mahdollista.
 - Avaa valikko Menu-painikkeesta (2.). Selaa nuolinäppäimillä (7.) "Photo shooting menun" kohdalle (toinen ylhäältä). Valitse painamalla OK. Selaa "Image quality" -kohtaan, paina OK ja valitse "NEF (RAW) + JPEG fine" tai pelkkä "NEF (RAW)".
- Kaukolaukaisin päällä => kameran pystyy laukaisemaan Foldio-sovelluksella.
 - Selaa "Photo shooting menua" alaspäin ja etsi "Remote control mode (ML-L3)". Valitse siihen Quick-response remote.
 - HUOM: Kaukolaukaisin menee itsestään pois päältä, jos kameran sammuttaa välillä, tai sitä ei hetkeen käytetä.

6. Yhdistä kännykän Foldio-sovellus kuvaustasoon ja kameraan.

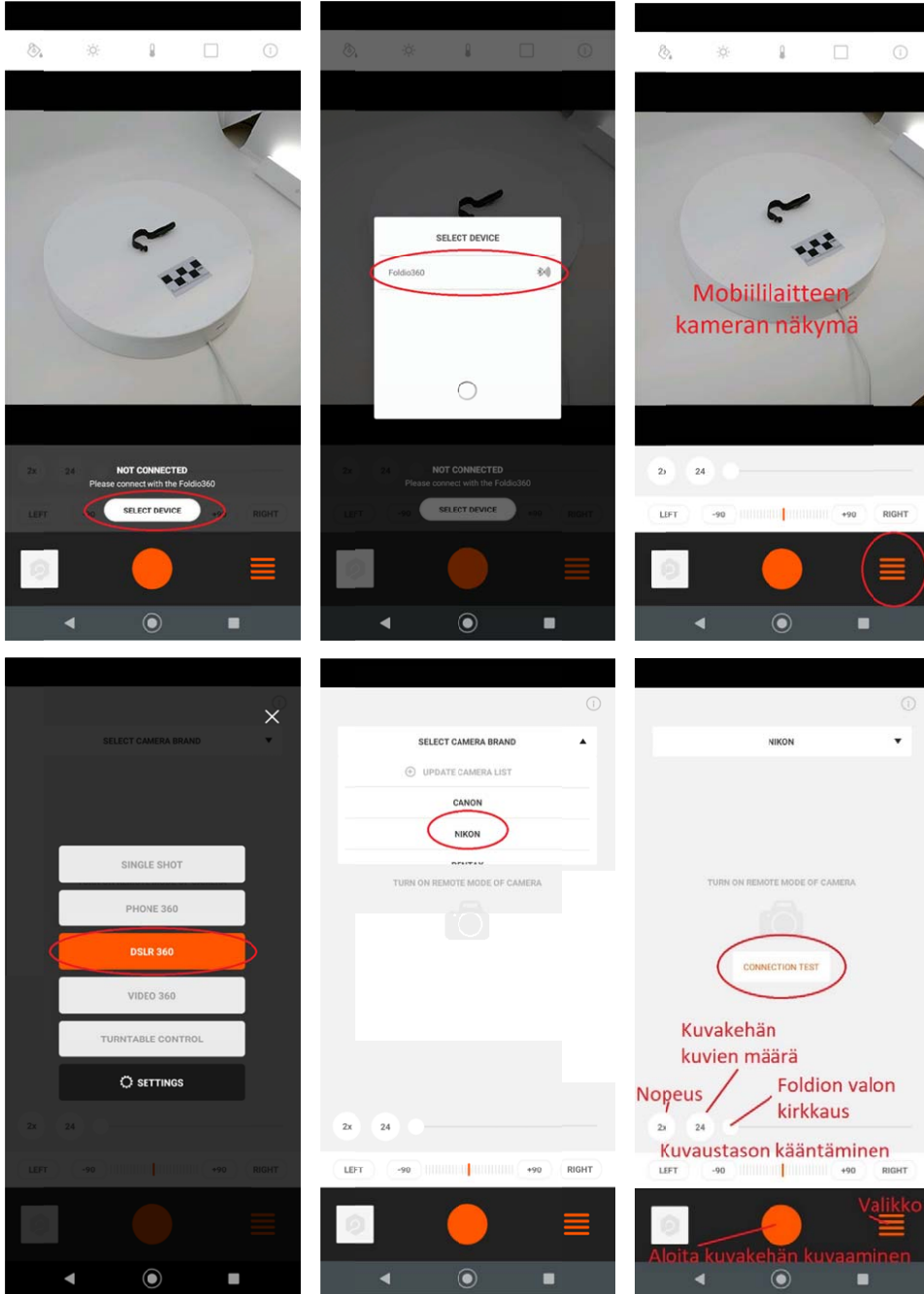
- Laita kännykän GPS ja bluetooth päälle ja avaa Foldio 360 -sovellus.
 - Kohdasta "select device" valitse Foldio 360 -kuvaustaso.
- Lähtökohtaisesti Foldio-sovellus käyttää mobiililaitteen omaa kameraa. Järjestelmäkameran etäohjaus on asetettava oikean alakulman valikon kautta valitsemalla "DSLR 360".
- Valitse järjestelmäkameran merkki, oppiaineen kaluston kanssa "Nikon".
- "Connection test" -kohdasta voit ottaa yksittäisen testikuvan. Jos kuvaus ei onnistu, varmista että kameran etäohjaus on päällä ja yhdistä uudestaan kameraan.
- Voit säätää kuvaustason pyörimisnopeutta (polarisaatio-suojin kanssa kuvatessa kannattaa valita 1 tai 2, sillä silloin on käytettävä hyvin pitkää suljinaikaa), kuvakehän kuvien lukumäärää (24, 36 tai 48 kuvaa) ja kuvaustason takavalon kirkkautta. Kuvakehää voi pyörittää myötä- ja vastapäivään sopivaan aloitusasentoon.



7. Aseta kameran live view päälle ja pyöritä Foldio-kuvaustaso kerran ympäri nähdäksesi, että löytö mahtuu kuvaan koko kierroksen ajan.

8. Ota testikuva ja varmista että kuvan tarkennus ja valkotasapaino ovat kohdillaan, eikä kuvassa näy heijastuksia. Jos löytö on kiiltävä, aseta polarisaatio-suojin kameraan ja muuta suljinaikaa pidemmäksi (1/3 sekunti toimii yleensä hyvin).

Kuva 9. Kuvan kirkkauteen ja terävyyteen vaikuttavat asetukset



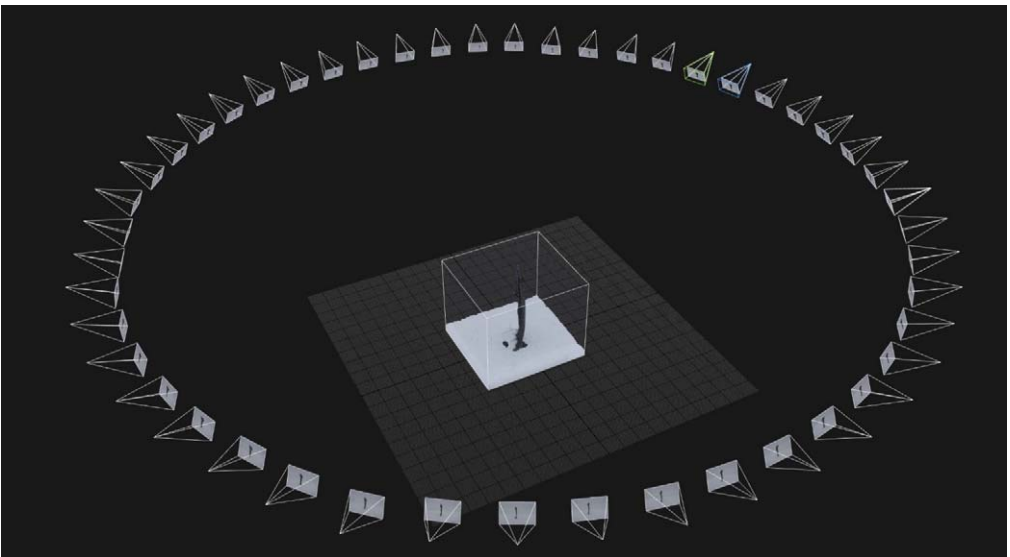
Kuva 10 (edellisellä sivulla). Foldio 360 -sovellus.

3. Kuvaaminen

1. Älä muuta kamerasta muita asetuksia kuin suljinaikaa kesken kuvauksen. Polttovälin ja aukon koon täytyy pysyä samana koko kuvausprosessin ajan, jotta kuvat ovat fotogrammetria-ohjelmassa vertailukelpoisia keskenään.
2. Kuva esine mittakaavan kanssa noin 10 asteen välein (Foldio-sovelluksen 36 kuvan kuvakehä) ensin lähes vaakatasosta, sitten yläviistosta ja lopulta lähes päältä (ainakin 3 kuvakehää, tarvittaessa enemmän). Hankalista paikoista voi ottaa myös yksityiskohtaisempia kuvasarjoja.

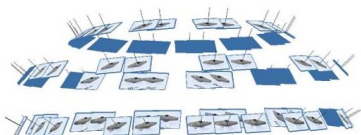


Kuva 11. Litteä löytö kannattaa kuvata ensin yhdeltä puolelta, sitten toiselta ja lopuksi pystysuorassa.



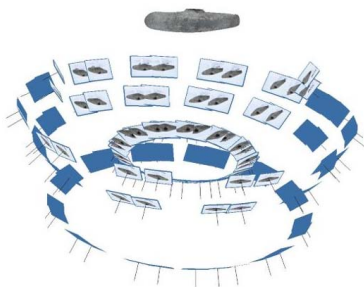
Kuva 12 (edellisellä sivulla). Mitä vähemmän esineessä on laajoja yhtenäisiä alueita, jotka näkyvät useammassa positiossa, sitä tiheämmällä välillä kuvat kannattaa ottaa. Kuvan levymäisen kirjan soljen paksuus on vain muutama millimetri, joten pystysuunnassa otettu kuvakehä otettiin 48 kuvalla.

3. Lopuksi ennen esineen kääntämistä ota vielä kuva omasta kädestä tms. helposti erotettavasta asiasta, jotta pystyt myöhemmin erottamaan esineen eri asentojen kuvasarjat selkeästi toisistaan.
4. Poista mittakaava, käännä esine seuraavaan asentoon ja kuvaa samoin kuin yllä. Lopuksi kuvaa oma käsi eri esineen asentojen erottamiseksi toisistaan. Toista kunnes esine on kuvattu joka puolelta. Esimerkkikuvassa on kahdelta puolelta kuvattu vasarakirves, mutta hankalamman muotoisia esineitä kannattaa kuvata niin monesta eri asennosta kuin mahdollista.



5. Kuvauksen jälkeen sammuta kamera, aseta linssinsuojus takaisin paikoilleen koskematta linssiin ja laita akut latautumaan, sillä "Live view" -näkyvä käyttää paljon virtaa.

6. Ota kamerasta SD-kortti kuvien purkamista varten. Pura kuvat heti ja palauta tyhjä SD-kortti takaisin hyllyyn kuvausstudion viereen.



Valokuvat voi muuntaa .jpg- tai .tif-muotoon esimerkiksi RAWtherapee-ohjelmassa. Samalla kuvien valkotasapainoa ja kirkkautta voi tarvittaessa säätää. Arkeologisten löytöjen 3D-digitointihanke on tuottanut ohjelmasta erilliset käyttöohjeet. Pitkäaikaissäilytystä varten .NEF-kuvatiedostot kannattaa muuntaa Adoben Digital Negative eli .dng-tiedostomuotoon.

Kuva 13. Vasarakirves on kuvattu kahdessa positiossa: päältä on otettu kolme kuvakehää ja alta neljä.

Lähteet

Benoit, B. 2016. The poor man's guide to Photogrammetry. <<https://bertrand-benoit.com/blog/the-poor-mans-guide-to-photogrammetry/>>. Luettu 25.9.2019.

CHI. 2020. Photogrammetry. <<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/>>. Luettu 25.8.2020.

Deep3D. 2019. Aligning The Images – Why Things Go Wrong. <<http://deep3d.co.uk/2019/03/08/aligning-the-images-why-things-go-wrong/>>. Ladattu 25.9.2019.

Lievendag, N. 2019. 3D scan expert. Automate photogrammetry with this smart turntable. <<https://3dscanexpert.com/review-foldio360-3d-scanning-photogrammetry/>>. Ladattu 25.9.2019.

Metashape. 2019. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5. <https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf>. Luettu. 24.10.2020.

Porter, S. 2015. Creating Artifact Models in Agisoft Photoscan Part 1. <https://www.youtube.com/watch?v=qKWjPNIRK_I>. Luettu 26.10.2020.

RAWtherapee-ohje valokuvien jälkikäsittelyyn

Sisältö:

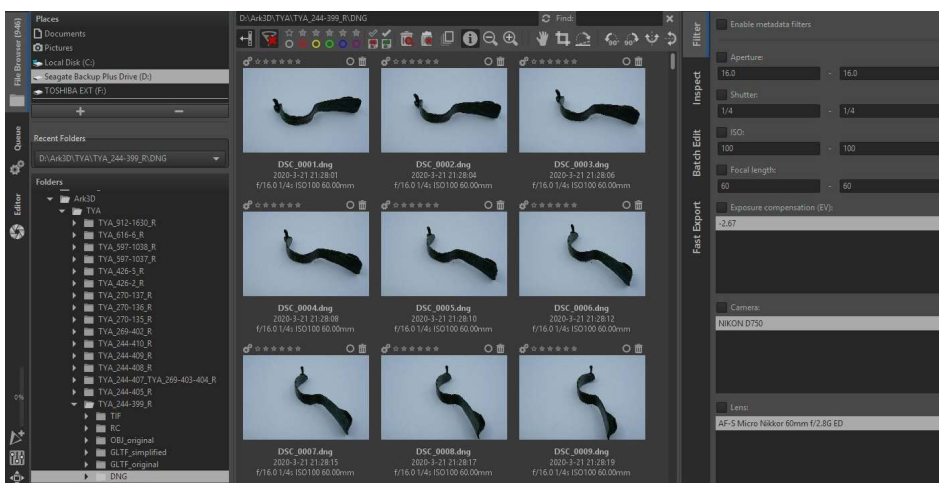
Näissä ohjeissa käydään läpi, kuinka fotogrammetrista 3D-digitointia varten otetun kuvasarjan valkotasapaino ja kirkkaus korjataan sopivaksi, ja kuinka kuvasarja muunnetaan toiseen tiedostomuotoon RAWtherapee-ohjelmalla. Ilmaisohjelman saa ladattua osoitteesta: <https://rawtherapee.com/>.

Viittaus: Debenjak-Ijäs, A. 2020. RAWtherapee-ohje valokuvien jälkikäsittelyyn. Teoksessa Debenjak-Ijäs, A., Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi. Karhunhammas 20. Turku: Turun yliopiston arkeologian oppiaine. (CC BY-NC-ND 4.0.)

Päivitetty 27.8.2020.

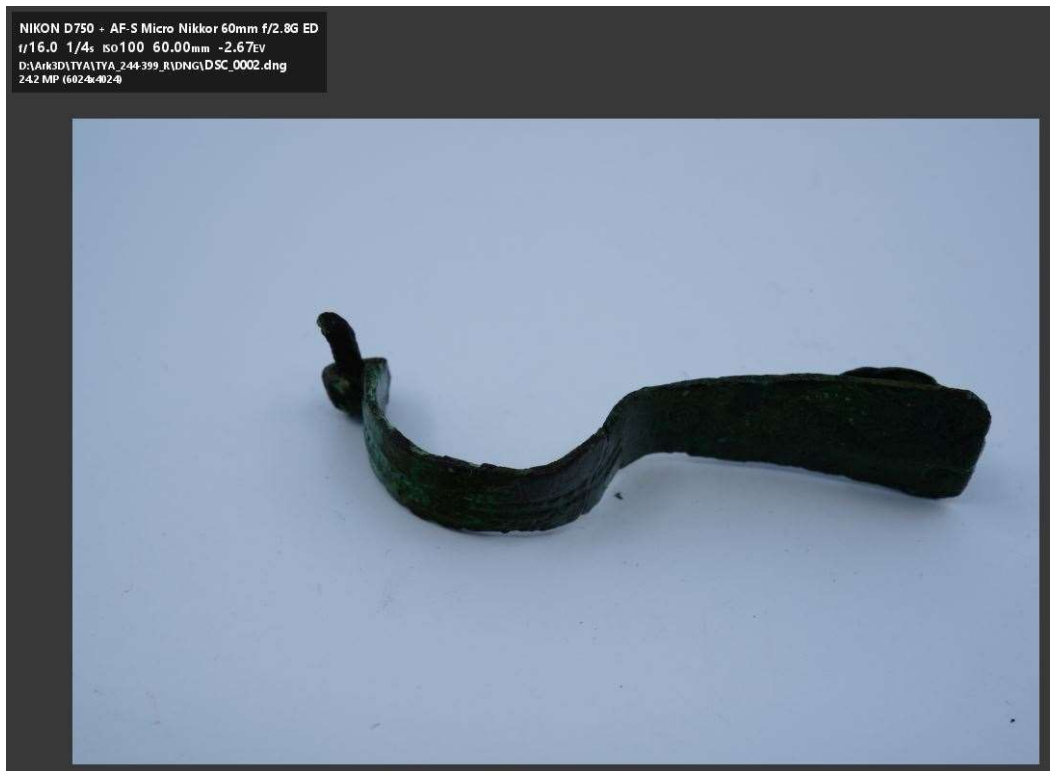
Valokuvien tuonti ja avaaminen

1. Avaa RAWtherapee-ohjelma. Etsi vasemman laidan tiedostovalikosta kansio, jossa muokattavat kuvat sijaitsevat. Kansiota tuplaklikkaamalla RAW-muotoiset kuvat latautuvat ohjelmaan.
2. RAWtherapeessa tehdyt muokkaukset eivät muokkaa suoraan alkuperäisiä valokuvatiedostoja, vaan valokuvatiedostojen viereen kansioon ilmestyy ohjelman oma .pp3-tiedosto, johon RAWtherapee tallentaa tiedot kuvaan tehdyistä muokkauksista.
3. Ohjelmassa on vasemmalla kolme eri ikkunaa: *Editor*, jossa muokataan yksittäistä kuvaa, *Queue* eli jono, jonka avulla muokatut kuvat viedään ohjelmasta sekä *File browser*, jossa hallinnoidaan kaikkia valitussa kansiossa sijaitsevia kuvia. Ikkunoiden välillä voi navigoida vasemman laidan paneelin avulla. Yksittäistä kuvaa oikeaklikkaamalla kuva aukeaa Editor-ikkunassa.



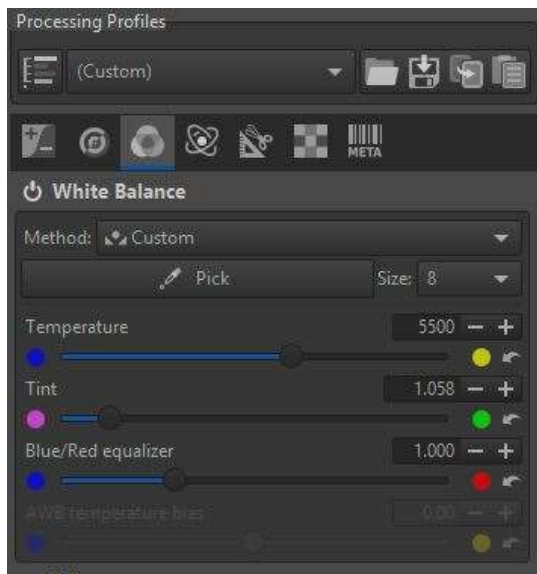
Kuva 1. File browser -ikkuna, vasemmalla valittu kansio.

Valkotasapainon korjaaminen

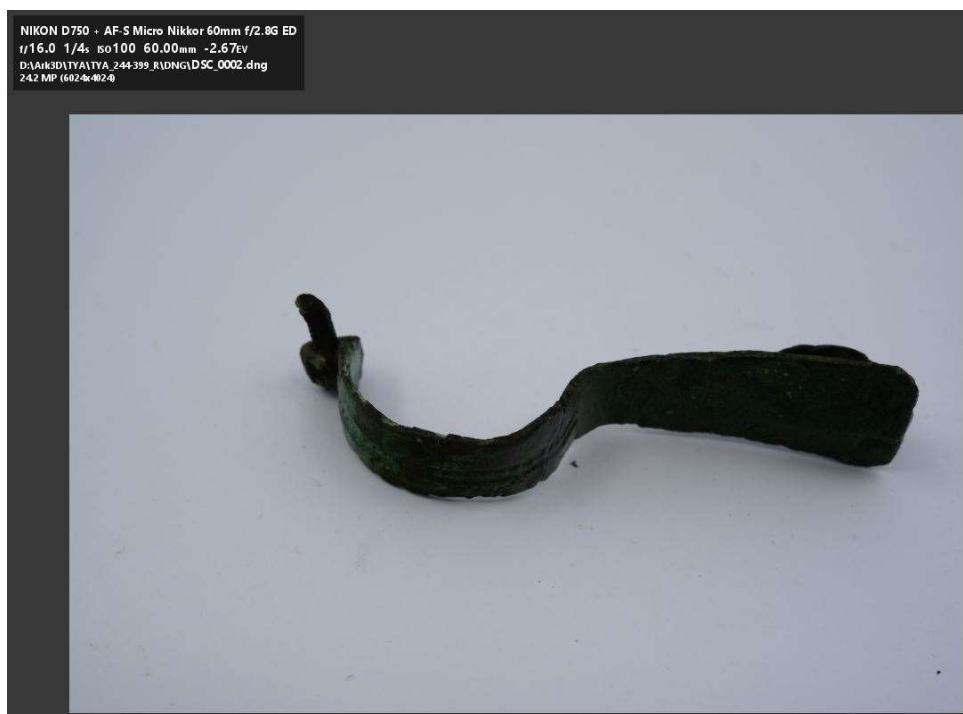


Kuva 2. 3D-digitointia varten otettu kuvasarja rautakautisesta soljesta. Kiiltävä solki on kuvattu pyöröpolarisaatio-suodinta käyttäen heijastusten estämiseksi. Suodin kuitenkin tummentaa kuvaa huomattavasti.

1. Avaa käsiteltävä kuva oikeaklikkaamalla Editor-ikkunaan. Valkotasapainon korjaamiseen voit käyttää joko väri-/harmaakortista otettua kuvaa tai muuta kuvaa, jossa näkyy puhtaan valkoinen pinta.
2. Oikean laidan "Processing profiles" -työkaluissa valitse color-välilehti ja heti ylhäältä "Pick"-pipettityökalu.
3. Klikkaa pipettityökalulla kuvassa olevaa kohtaa, jossa on valkoista materiaalia tai harmaakortin valkoista ruutua. Ohjelma korjaa automaattisesti kuvan valkotasapainon.
4. Jos tunnet valonlähteen väriämpötilan, voit syöttää sen suoraan oikean ylälaidan "Temperature"-kenttään.



Kuva 3. Color-välilehti ja valkotasapainoon liittyvät työkalut.

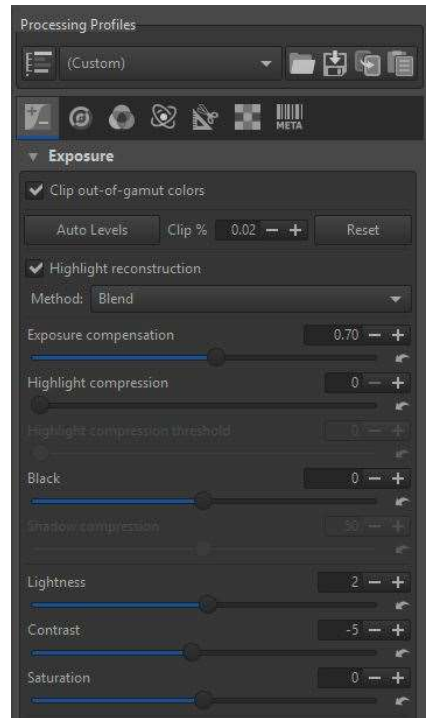
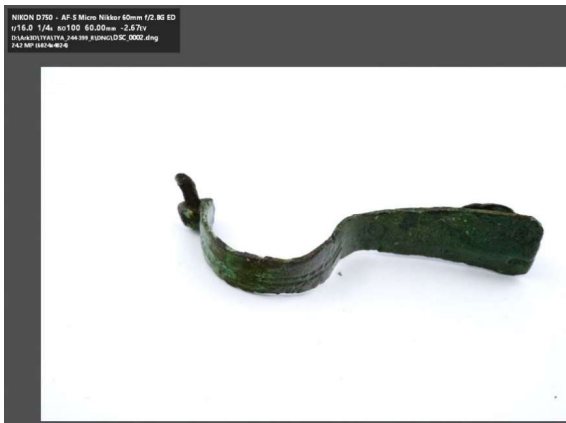


Kuva 4. Korjattu valkotasapaino.

Valotuksen korjaaminen

Avaa kuva ja siirry vasemman laidan valikosta “Exposure”-välilehdelle. “Exposure compensation” -työkalua maltillisesti säätämällä voidaan tuoda esille kuvan yksityiskohtia jos kuva on yli- tai alivalottunut. Muita hyödyllisiä työkaluja ovat “Lightness” ja “Contrast”.

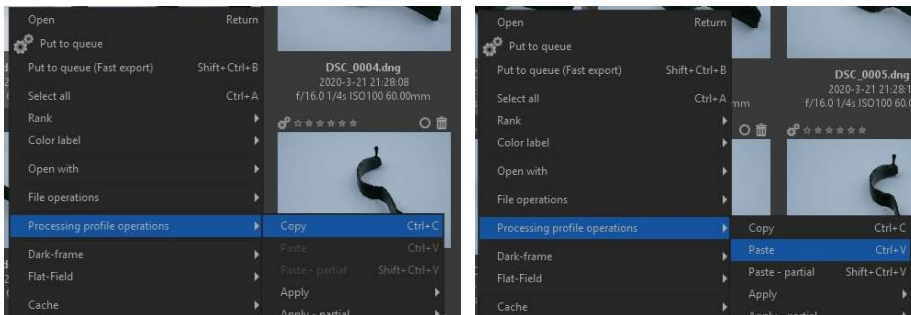
Kuva 5. kuvan valotukseen liittyvät työkalut.



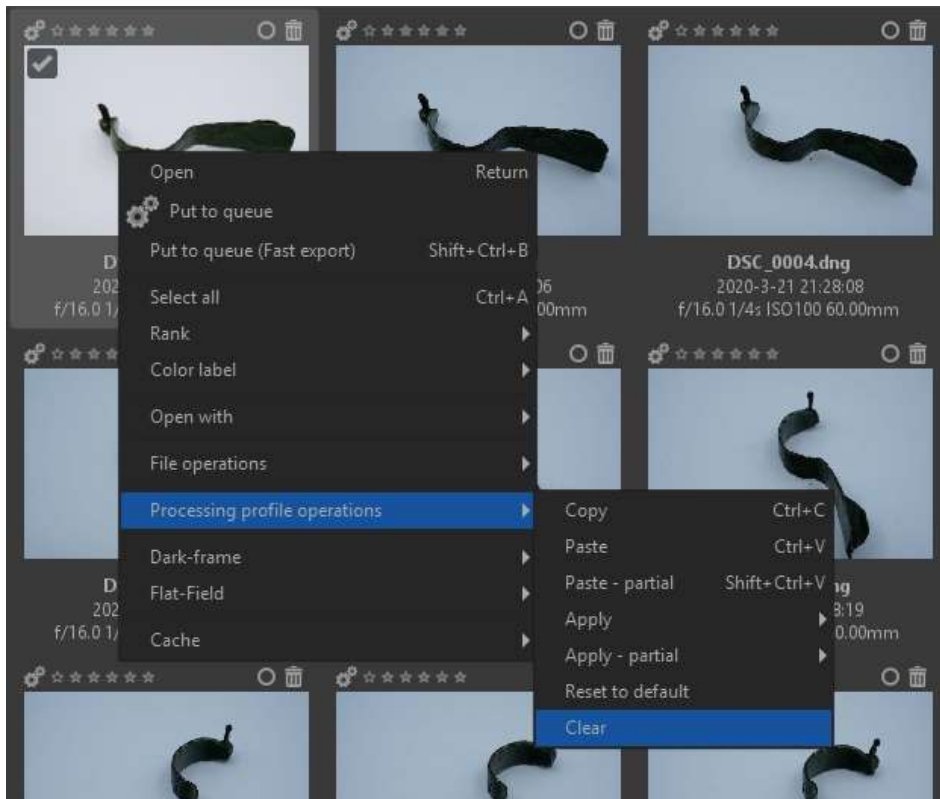
Kuva 6. Valmis, jälkikäsitelty kuva.

Usean kuvan käsittely kerralla

Jos käsiteltäviä kuvia on paljon, mutta kuvat on otettu samoin asetuksin ja samoissa valaistusolosuhteissa, voi yhden kuvan asetukset kopioida muihin kuviin. Valitse yksi kuva ja tee haluamasi korjaukset. Sen jälkeen vaihda File browser -ikkunaan ja oikeaklikkaa kuvaa, jonka olet jo korjannut. Valitse “Profile processing operations” => “copy”. Valitse sitten kaikki muut kuva ja oikeaklikkaa, valitse “profile processing operations” => “paste”. Työvaiheen jälkeen kannattaa tarkistaa, että kuvien korjaus on onnistunut.



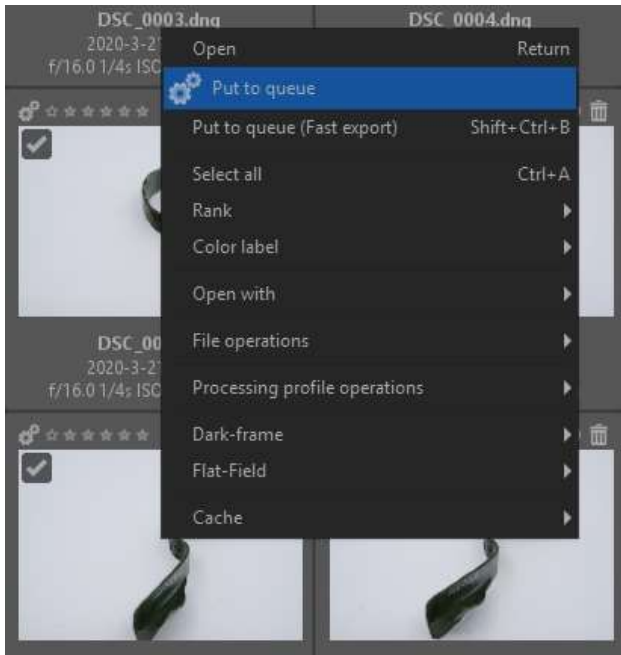
Kuva 7 (edellinen sivu). Kuvan muokkausten kopiointi ja liittäminen uuteen kuvaan.



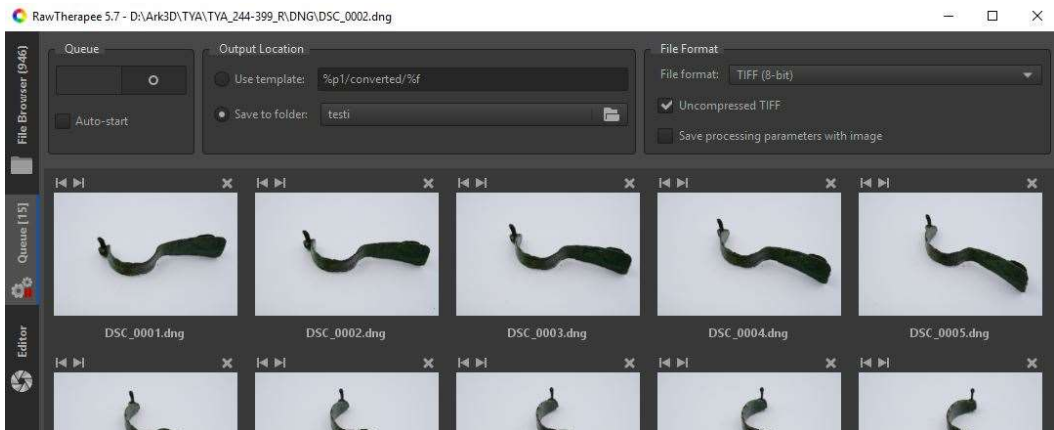
Kuva 8. Kuvaan kohdistuvat muokkaukset voi poistaa valitsemalla “profile processing operations” => “clear”.

Tallentaminen ja vieminen

Kun kuva on käsitelty, voi sen tallentaa vasemman alalaidan tallennuskuvakkeesta. Muista valita oikea tallennuskansio. Tiedostomuodon voi valita käyttötarkoituksen tai arkistointitohjeiden mukaan (.jpg tai .tiff). Jos tallennat tiedoston .jpg:nä, muista valita 100 % laatu. Jos haluat tallentaa useamman kuvan, kannattaa se tehdä jono-toiminnon kautta.



Kuva 9. Käsitellyt kuvat voi viedä "jonoon" valitsemalla halutut kuvat, oikeaklikkaamalla ja valitsemalla "put to queue". "Fast export" -valinnan kautta viedyt kuvat ovat heikkolaatuisia, joten työkalua ei kannata käyttää.



Kuva 10: Queue-ikkunassa näkyvät vientijonossa olevat kuvat. Kuvien yhteenlaskettu lukumäärä näkyy vasemmassa laidassa ikkunan nimen perässä. Ylälaidan valikosta voi valita tallennettavan tiedostomuodon ja tallennuskansion, sekä haluaako tallentaa kuviin tehdyt muokkaukset erillisinä tiedostoina kuvien mukana. Vasemman ylälaidan "on/off"-painikkeesta valitaan "on" (nappi muuttuu siniseksi), jolloin käsiteltävät kuvat vähenevät jonosta.

Liite 5

Lähde	Vertailun aihe	Vertailtavat menetelmät
Evin et al. 2016	Viisi suden kalloa	Digitaalinen fotogrammetria (Canon EOS 30D + 24–105 mm zoom-objektiivi, VisualSFM-ohjelma). Vertailumallit tuotettiin rakennevaloskannerilla (Breuckmann StereoScan).
Gutiérrez-Heredia et al. 2015	Korallinäytteet	Digitaalinen fotogrammetria (Canon 40D + 100 mm. makro-objektiivi, Autodesk 123D Catch sekä Meshmixer-ohjelmat), laserskanneri (NextEngine) sekä CT-skanneri (Siemens Somatom Sensation 4). Vertailumallit tuotettiin manuaalisesti geometrisilla mittauksilla (2015: 180).
Katz & Friess 2014	Neljä ihmisen kalloa	Digitaalinen fotogrammetria (Nikon D5000, Agisoft Photoscan -ohjelma). Vertailumallit tuotettiin rakennevaloskannerilla (Breuckmann SmartScan).
Kersten et al. 2016	Kuusi erimuotoista koekappaletta	Digitaalinen fotogrammetria (Nikon D800 sekä Galaxy Note 1 -älypuhelin, Agisoft Photoscan -ohjelma), kolme rakennevaloskanneria (Dot Product DPI-7 ja Phi.3D-ohjelma, Artec Spider sekä Mantis Vision F5), neljä infrapunavaloon perustuvaa syvyyskameraa (Kinect v1 ja Kinect v2, Structure Sensor, Google tango). Vertailumallit tuotettiin rakennevaloskannereilla (ATOS I 2M sekä Breuckmann SmartScan).

Vertailtavat muuttujat Yhteenveto tuloksista

Tarkkuus, tekstuurin laatu	Tarkkuus: eri menetelmillä tuotetut 3D-digitoinnit poikkesivat toisistaan hyvin vähän. Viiden kallon 3D-digitoinneista fotogrammetrialla tuotetut poikkesivat rakennevaloskannerilla tuotetuista keskimäärin 0,04–0,17 mm, vaihteluvälin ollessa 0,49–0,61 mm. Menetelmien välisiä eroavaisuuksia havaittiin kolmessa kallossa. Tekstuurin laatu: fotogrammetrialla tuotettu tekstuuri oli yksityiskohtaisempi kuin rakennevaloskannerilla tuotetussa 3D-digitoinnissa.
Tarkkuus, tekstuurin laatu, prosessin kesto	Tarkkuus: CT-skannaus oli menetelmistä tarkin (keskiarvo 0,97mm, poikkeama $\pm 0,10$). Toiseksi tarkin oli fotogrammetria (keskiarvo 1,16mm, poikkeama $\pm 0,25$) kun taas laseriin perustuvalla 3D-skannerilla tuotettu 3D-digitointi oli malleista epätarkin (keskiarvo 1,17mm, poikkeama $\pm 0,28$). (:184). Tekstuuri: digitaalinen fotogrammetria tuotti menetelmistä yksityiskohtaisimman tekstuurin. Prosessin kesto: Nopein digitointimenetelmä oli CT-skannaus, 50–70 min. kokonaiskestollaan. Laserskanneri ja digitaalinen fotogrammetria osoittautuivat huomattavasti hitaammiksi, ensimmäisen kestäessä 125–505 min. ja jälkimmäisen 105–485 min.
Tarkkuus, prosessin kesto	Tarkkuus: fotogrammetrialla tuotetut mallit poikkesivat hieman rakennevaloskannerilla tuotetuista, mutta vaihtelu oli niin pientä että menetelmä saavuttaa hyvin osteometrisessä analyysissä vaaditun 1–2 mm tarkkuuden. Prosessin kesto: rakennevaloskanneri osoittautui kokonaisuutena nopeammaksi, mutta fotogrammetrian kokonaiskestosta iso osa oli passiivista lasketusaikaa. Itse kuvaus-/skannausvaihe oli fotogrammetriassa nopeampi, kestäen 10–20 minuuttia rakennevaloskannerin 45 minuutin sijaan.
Tarkkuus	Tarkkuus: Nikon D800 -järjestelmäkameralla tuotetut 3D-digitoinnit poikkesivat 0,07–0,22 mm. keskiarvolla ja 0,9–0,21 vaihteluvälillä vähiten vertailumalleista, sen sijaan älypuhelimien kameran kuvista tuotettu 3D-digitointi oli epätarkka ja täynnä katveita. Artec Spider ja Mantis sijoittuivat vertailun välimaastoon -1,5 mm ja 0,72 mm keskimääräisillä poikkeamilla sekä 1,60 ja 1,33 mm vaihteluvälillä. Syvyyskameroilla tuotettujen 3D-digitoinnit poikkesivat testikappaleista keskimäärin vain vähän, -0,24 – -2,68 mm, mutta poikkeaman vaihteluväli oli suuri, jopa 4,28 mm.

Lähde	Vertailun aihe	Vertailtavat menetelmät
Lachat et al. 2017	Kaksi- ja kolmiulotteinen koekappale	Kädessä pidettävä laserskanneri (FARO Freestyle 3D X). Vertailumalli tuotettiin digitaalisella fotogrammetrialla (kolme samanaikaisesti käytettävää kameraa: Canon EOS 5D Mark II sekä kaksi Canon EOS 5D SR 50:sta + kaikissa 28 mm objektiivi, Agisoft Photoscan -ohjelma).
Máte-González et al. 2017	Työstöjäljet luuaineistossa	Digitaalinen fotogrammetria (Canon EOS 700D + 60 mm makro-objektiivi, avoimen lähdekoodin GRAPHOS-ohjelma) ja rakennevaloskanneri (DAVID SLS-2).
Mathys et al. 2013	Ihmisen kallo	Digitaalinen fotogrammetria (Canon 600D + 50 mm makro-objektiivi, kaupallinen Agisoft Photoscan -ohjelma), CT-skanneri (Siemens Sensation 64) ja kaksi laserskanneria (NextEngine sekä FARO ScanArm). Lisäksi tuotettiin RTI-kuva kohteen yksityiskohdasta. Vertailumalli tuotettiin rakennevaloskannerilla (Mephisto EX-Pro).

Vertailtavat muuttujat Yhteenveto tuloksista

Tarkkuus suhteessa vertailumalliin, skannausetäisyyteen ja -kulmaan, kohteen väritykseen ja skannauksen kesto. Lisäksi skannauksen toistettavuus.

Tarkkuus: FARO Freestylellä tehdyt 3D-digitoinnit poikkesivat vertailumallista keskimäärin 1–2 mm, suurimman poikkeaman ollessa 12–17 mm. Kuvausetäisyyden kasvaessa skannatun pistepilven pisteiden tarkkuus väheni – noin 1 mm tarkkuus 0,5–1 metrin käyttöetäisyydellä vastaa kuitenkin valmistajan antamia lukuarvoja. Skannauskulman vaikutus tarkkuuteen oli vaihteleva: 1–2 metrin kuvausetäisyydellä tarkkuus parani kulman kasvaessa, kun taas 3 metrin kuvausetäisyydellä tarkkuus ensin laski, mutta parani 36 asteen kulman jälkeen. Kohteen väritys ei vaikuttanut skannauksen tarkkuuteen, mutta resoluutio, eli pistepilven pisteiden määrä, laski huomattavasti mustaa kohdetta skannatessa. Myös menetelmän toistettavuus vaihteli: kun samaa kohdetta skannattiin 25 kertaa on syntyneiden pistepilvien välillä keskimäärin 3 mm ero, suurimman eron ollessa 5 mm.

Tarkkuus, prosessin kesto

Tarkkuus: vertailtujen menetelmien tarkkuuden välillä ei ollut mainittavia eroja (2017: 9–11). Prosessin kesto: rakennevaloskannerilla 3D-digitointi osoittautui huomattavasti nopeammaksi.

Tarkkuus, tekstuuriin laatu, prosessin kesto

Tarkkuus: Laserskanneri NextEnginellä tehty 3D-digitointi poikkesi keskiarvoltaan eniten vertailumallista (0,15 mm poikkeama). Fotogrammetrialla tuotetun 3D-digitointi poikkesi vertailumallista keskiarvoltaan vähiten, vain 0,05 mm, mutta poikkeaman maksimi oli 0,82 mm. FARO ScanArm sijoittui menetelmänä välimaastoon, poikkeaman keskiarvon ollessa 0,06 mm ja maksimin 0,64 mm. Tekstuuri: CT-skannaus ja FARO ScanArm eivät tallenna tekstuuria. 3D-digitointimenetelmistä fotogrammetria tuotti terävimmän ja realistisimman tekstuuriin. RTI-kuvauksella tuotettu kuva kuitenkin esittää pinnan muodot ja yksityiskohdat kaikkein tarkimmin, vaikkakin ilman väriarvoja. Prosessin kesto: NextEngine oli menetelmistä hitain 405 min. kestollaan, ja manuaalisen työn määrä oli yli 3/4 kokonaiskestosta. FARO ScanArm oli menetelmistä nopein 40 minuutin kestollaan, mutta manuaalista työtä oli liki puolet kokonaiskestosta, 20 min. Mephisto EX-Pro oli toiseksi nopein 110 min kokonaiskestolla, josta 10 min manuaalista työtä. Fotogrammetrinen 3D-digitointi oli kestoltaan menetelmien keskimaastossa: 270 min kokonaiskesto, josta 40 min manuaalista työtä (2013: 202–204).

Lähde	Vertailun aihe	Vertailtavat menetelmät
Papadaki et al. 2015	Kivilaattaan kaiverrettu teksti	Digitaalinen fotogrammetria (Canon EOS-1Ds Mark III, Agisoft Photoscan) sekä rakennevaloskanneri (SL2).
Santagati et al. 2017	Yhdeksän muodoltaan ja materiaaliltaan vaihtelevaa näyttelyesineitä	Digitaalinen fotogrammetria (Sony Xperia XZ1 -älypuhelimella otetut valokuvat, 3D Creator -sovellus sekä Agisoft Photoscan -ohjelma). Vertailumalli tuotettiin digitaalisella fotogrammetrialla (Canon EOS 1200D -järjestelmäkameralla otetut valokuvat, Agisoft Photoscan -ohjelma).
Virtanen et al. 2019	Suksen siteen osa	Mobiililaitteeseen liitettävä syvyyskamera (Structure Sensor). Vertailumalli tuotettiin digitaalisella fotogrammetrialla (Nikon D810 60 mm. makro-objektiivi, kaupallinen Agisoft Photoscan -ohjelma)

Vertailtavat muuttujat Yhteenveto tuloksista

Visualisointi	Visualisointi: teksturoimattomia 3D-digitointeja vertaillessa rakennevaloskannerilla saatiin marmorisiin kaiverretut kreikkalaiset kirjaimet näkyville paremmin kuin digitaalisella fotogrammetrialla. Myös fotogrammetrialla tuotetussa 3D-digitoinnissa saatiin kirjaimet visualisoitua helpommin kuin paljaalla silmällä fyysisestä kivitaulusta.
Tarkkuus, prosessin kesto, helppokäyttöisyys	Tarkkuus: 3D Creator -ohjelmalla saadut mallit eivät olleet yhtä tarkkoja kuin Agisoftilla tehdyt mallit, mutta 3D Creator -sovelluksella tuotetuissa malleissa oli yllättävän hyvälaatuinen tekstuuri, joka mahdollisti yksityiskohtien näyttämisen vaikka ne eivät olisikaan tallentuneet 3D-digitoinnin polygoniverkkoon (2017: 226–227). Prosessin kesto: julkaisu ei kerro 3D Creator -sovelluksen 3D-digitointiprosessin kestoa. Sony Xperia -älypuhelimella otettujen valokuvien prosessointi Agisoft Photoscan -ohjelmassa kesti kaikissa 3D-digitoinneissa huomattavasti vähemmän kuin järjestelmäkameralla otettujen valokuvien prosessointi. Helppokäyttöisyys: Hintaansa nähden 3D Creator -ohjelman kaltainen mobiilisovellus nähtiin julkaisussa yllättävän hyvänä. Vaikka malleja ei voisikaan käyttää tutkimustarkoituksiin ja tarkkuus on heikompi kuin Agisoft Photoscanilla, nähtiin eduksi, että mallien kuvaaminen ja prosessointi kävi sovelluksessa erittäin helposti ja nopeasti. Eduksi esitettiin myös tiedostojen helppo talteenotto ja pieni koko. 3D-digitointien yksinkertaiseen valmistamiseen, näyttämiseen ja jakamiseen 3D-Creator nähtiin hyvänä vaihtoehtona (2017: 227–228).
Tarkkuus	Tarkkuus: Structure Sensor -syvyyskameralla tuotettu 3D-digitointi poikkesi fotogrammetrialla tuotetusta vertailumallista keskimäärin 0.92 mm, vaihteluvälin ollessa enimmillään 2.64 mm. Suurimmat poikkeamat sijoittuvat digitoidun esineen kulmiin. (2019: 454–455).

Blender-ohje 3D-digitoinnin jälkikäsittelyyn

Sisällysluettelo

1. Objektin tuonti Blenderiin, origoon siirtäminen ja skaalaus:	2
Blenderin avaaminen	2
3D-mallin tuonti Blenderiin.....	2
3D-mallin asettaminen origoon ja oikein päin sekä skaalan tarkistaminen	3
3D-mallin koko	5
2. Objekt mode ja edit mode	5
Edit moden tasot, sivut ja pisteet	5
3. 3D-digitoinnin pinnan muokkaaminen <i>Object modessa</i>	6
Sculpting-ikkunan työkalut	6
Pinnan muokkaaminen Boolean-operaattorin avulla.....	7
Polygoniverkon yksinkertaistaminen Decimate-työkalulla.....	10
Koko polygoniverkon silottaminen <i>Smooth</i> -työkalulla	11
4. 3D-digitoinnin pinnan muokkaaminen Edit modessa	12
Polygonien valitseminen	12
Kolmioverkon virheiden korjaaminen.....	13
Polygonien poistaminen	13
Kolmioverkon ryhmittely	13
Reikien paikkaaminen	13
5. Tekstuuri ja sen muokkaaminen	15
.obj-muotoisen tiedoston tekstuurin tuominen Blenderiin.....	15
Virheellisen tekstuurin korjaaminen maalaamalla	17
Tekstuurikartan uudelleenasettaminen.....	18
Uusien pintojen värittäminen halutulla tekstuurilla.....	20
6. Born digital -mittakaavan yhdistäminen 3D-digitointiin.....	21
7. Tiedoston vienti Blenderistä	23
Lähteet	24

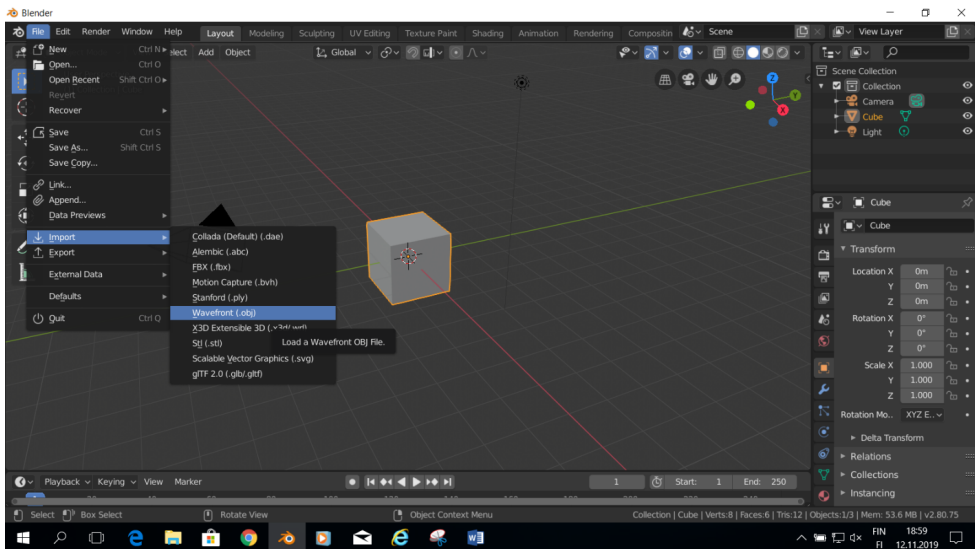
Debenjak-Ijäs, A. & Tolvi, A. 2020. Blender-ohje 3D-digitoinnin jälkikäsittelyyn. Teoksessa Debenjak-Ijäs, A., Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi. Karhunhammas 20. Turku: Turun yliopiston arkeologian oppiaine. (CC BY-NC-ND 4.0.)

Päivitetty 20.7.2020

1. Objektin tuonti Blenderiin, origoon siirtäminen ja skaalaus:

Blenderin avaaminen

1. Asenna Blender-ilmaishjelma (Blender 2020).
2. Avaa Blender ja valitse "general" näkymä.
3. Aloitusnäkyssä on automaattisesti mukana kuutio, joka näkyy "Cube"-nimisenä objektina oikean ylälaidan layer-näkymässä. Poista kuutio valitsemalla se hiiren vasemmalla näppäimellä ja painamalla delete-näppäintä.

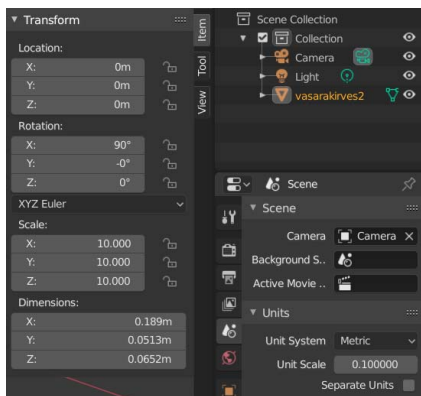
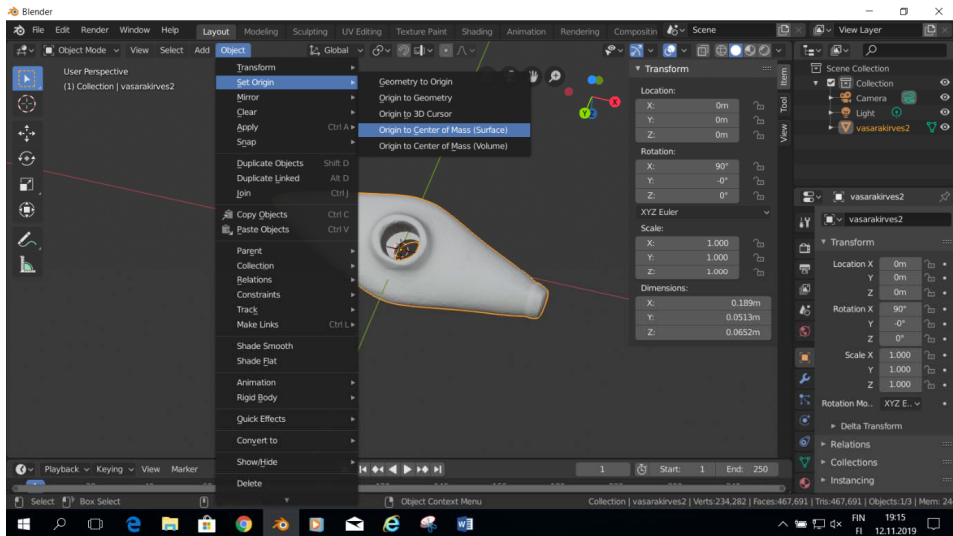


3D-mallin tuonti Blenderiin

1. Tuo muokattava malli Blenderiin valitsemalla file => import => (valitse käyttämäsi tiedostomuoto).
 - Jos tarkoituksena on muokata objektin pintaa (mesh) tai tekstuuria, tuo se sisään .obj-muodossa. Varmista ennen tuontia että .obj-tiedostoon liittyvät tekstuuritiedosto ja .mtl-tiedosto ovat kaikki samassa kansiossa!
 - Varsinkin isokokoinen 3D-malli ei lataudu hetkessä, vaan Blenderissä näkyy latauskuvake tai jopa "Not responding" -ilmoitus. Hitaalla koneella lataus voi kestää monta kymmentä minuuttia, joten kannattaa odottaa maltillisesti.
2. View => frame all -komennosta ikkunassa näkyy sisään tuotu objekti sekä automaattisesti tiedostossa olevat kamera ja valo. Objekti on todennäköisesti hyvin pieni suhteessa Blenderin metriseen skaalaan, joten se näkyy ihan pikkuruisena oranssina pisteenä.

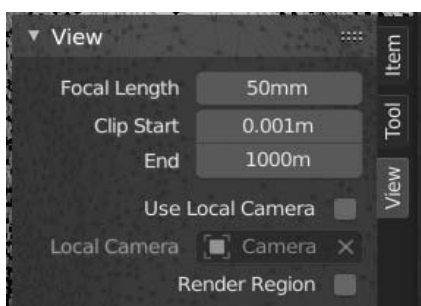
3D-mallin asettaminen origoon ja oikein päin sekä skaalan tarkistaminen

1. Nämä työvaiheet suoritetaan kaikki ylälaidan Layout-ikkunassa. Vasemmalta ruutuvalintatyökalulla valitse pelkkä objekti, ja samasta *view*-valikosta *frame selected*.

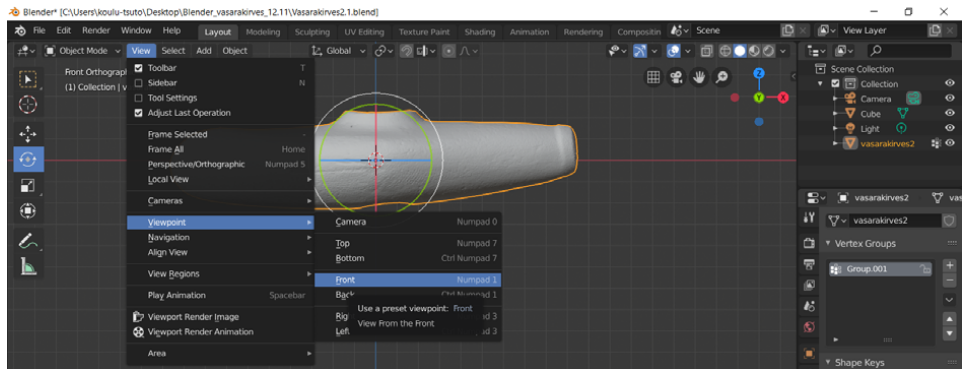


2. Siirretään objekti origoon: Ylälaidan *object*-valikosta valitse *set origin* => *origin to center of mass*. Objektin keskelle ilmestyy pieni oranssi piste, joka kuvaa objektin keskipistettä (suhteessa tähän objekti pyörii, skaalataan, liikutetaan jne.).

3. Paina N-näppäintä, jolloin oikeaan laitaan ilmestyy objektia koskeva *Transform*-ikkuna. Item-välilehdellä muuta *location*-arvot origoon (0;0;0). Jos objekti katoaa näköpiiristä, löydät sen taas *view selected*-työkalulla.



4. Huomaat että objekti katoaa näkyvistä, kun zoomaat oikein lähelle. Tämän asetuksen voit muuttaa valitsemalla oikean laidan *Transform*-ikkunasta *View*-välilehden ja muuttamalla *Clip start* -lukeman mahdollisimman pieneksi. N-näppäimestä painamalla saat *Transform*-ikkunan taas piiloon, jos se on tiellä.

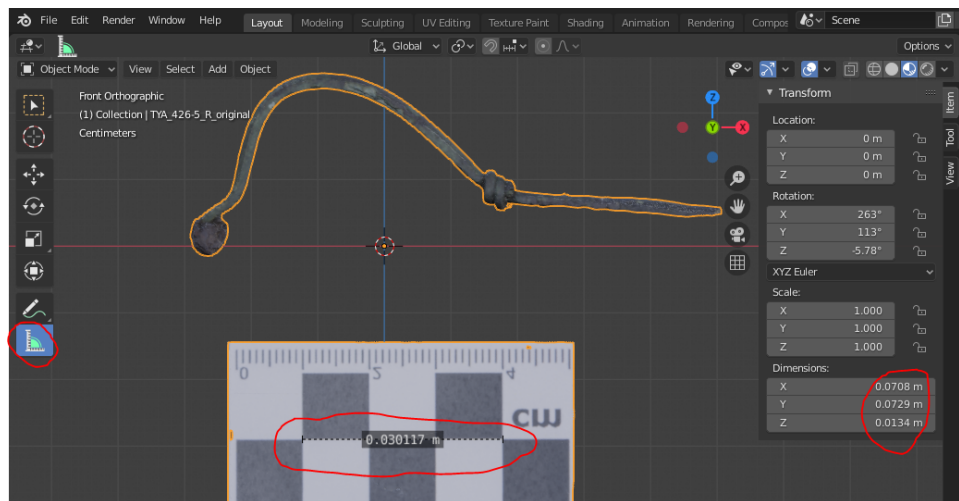


5. Objekti on helpompi muokata ja tarkastella, kun se ei ole aivan "vinossa" koordinaatiston akseliin nähden.

Jos näin on, suorista objekti seuraavasti. Valitse objekti ja *view*-valikosta *viewpoint* => *front*. Jos objekti katoaa näkyvistä, muista *frame selected*. Sitten vasemman reunan *rotate*-työkalun avulla kierrä objekti suoraksi. Tarvittaessa valitse *viewpoint* => *top* tai *right*, jotta saat suoristettua objektin kaikkiin akseliin nähden. Voit liikkua eri kuvakulmien välillä myös klikkaamalla oikean yläkulman koordinaatistoakselien kuvakkeiden päissä olevia värikkäitä X-,Y- ja Z-palloja.

6. Tarkista että objekti on oikeassa mittakaavassa.

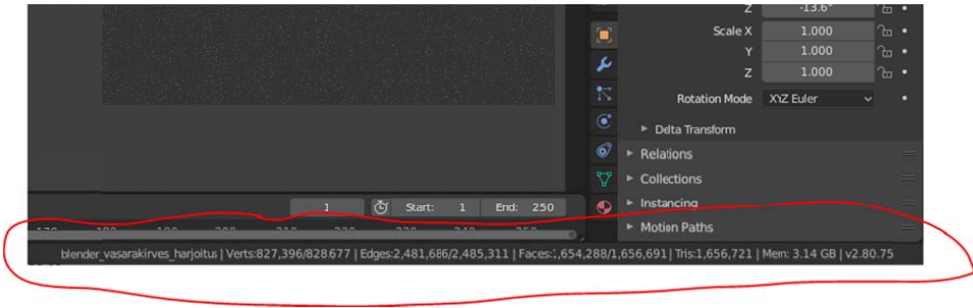
Valitse vasemmalta työkaluvalikosta *Measure*-mittaustyökalu ja klikkaa sillä haluamasi mittajanan päätepisteitä. Jotta mittapisteet jäävät kolmiulotteisessa näkymässä samaan tasoon kannattaa mittaukset tehdä kohtisuoraan olevassa *Viewpoint* -näkymässä: *Top*, *Front*, *Right* jne.



3D-malli on *Front*-näkyvässä. *Measure*-työkalun lisäksi mittakaavan oikeellisuus varmistuu karkeasti myös oikean laidan *Transform*-ikkunassa näkyvästä esineen koosta.

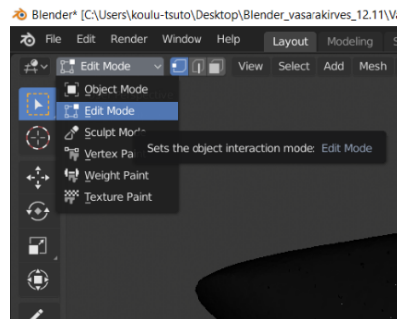
3D-mallin koko

Valitun alueen tai koko kohteen polygonimäärä selviää Blender-ikkunan oikeasta alalaidasta. Ensimmäisenä ovat valittuna olevan alueen tiedot, sitten koko kohteen tiedot. Huomaa että jos olet tuonut Blenderiin useamman objektin (esimerkiksi erillinen 3D-malli ja digitaalinen mittakaava), niin näkyvässä on niiden yhteenlaskettu koko, ellei deaktivoi toista 3D-malleista oikean laidan *View Layerissa* silmä-kuvakkeesta. Suljettu silmä = deaktivoitu 3D-malli, avonainen silmä = aktiivinen 3D-malli.



2. Objekt mode ja edit mode

Vasemmasta yläkulmasta voit nähdä, oletko *object modessa* vai *edit modessa*. *Object modessa* liikuttelet ja skaalaat kokonaista objektia, *edit modessa* voit muokata kulloinkin valittuna olevan 3D-mallin polygoniverkkoa (*mesh*) manuaalisesti. Vaihdetaan tässä kohtaa edit modeen ja tarkastellaan polygoniverkon osia.



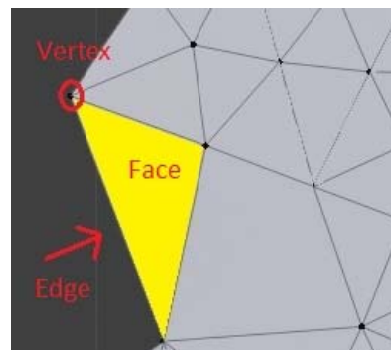
Edit moden tasot, sivut ja pisteet

Polygonimalli koostuu monikulmion tasoista (yleensä kolmioita) sekä niiden kulmapisteistä ja pisteiden välisistä sivuista. Tässä ohjeessa sekä Blenderissä näihin rakennesosiin viitataan seuraavasti:

Piste = Vertex

Sivu = Edge

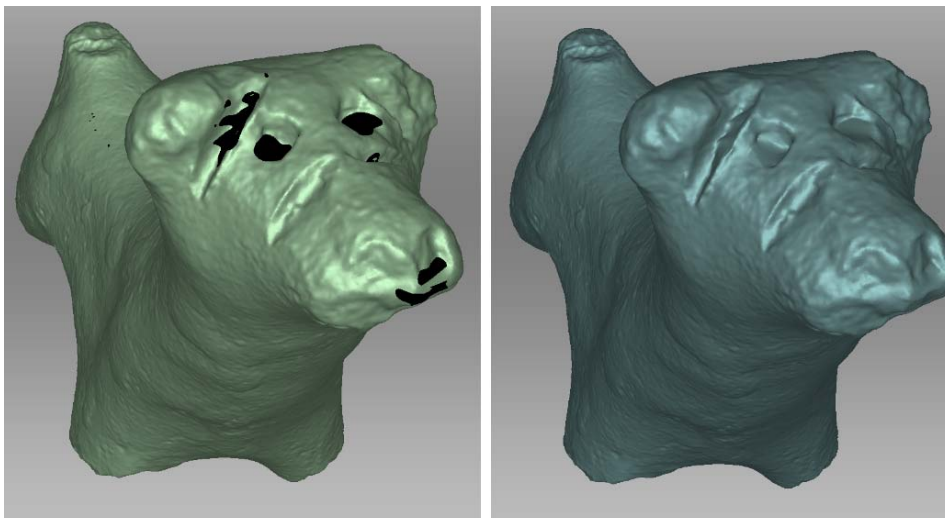
Taso = Face



3. 3D-digitoinnin pinnan muokkaaminen *Object modessa*

Lähtökohtaisesti on yleensä helpompi poistaa tai korjata digitoinnin pinnan häiriöt alkuperäisessä mallinnusohjelmassa (esim. Artec Studio, Agisoft Metashape jne.). Jos tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, voidaan käyttää Blenderiä. Blenderissä voit muokata polygoniverkkoa joko yksittäisten polygonien tasolla *Edit modessa*, tai ohjelman pinnanmuokkaustyökaluilla *Object moden Sculpting*-ikkunassa.

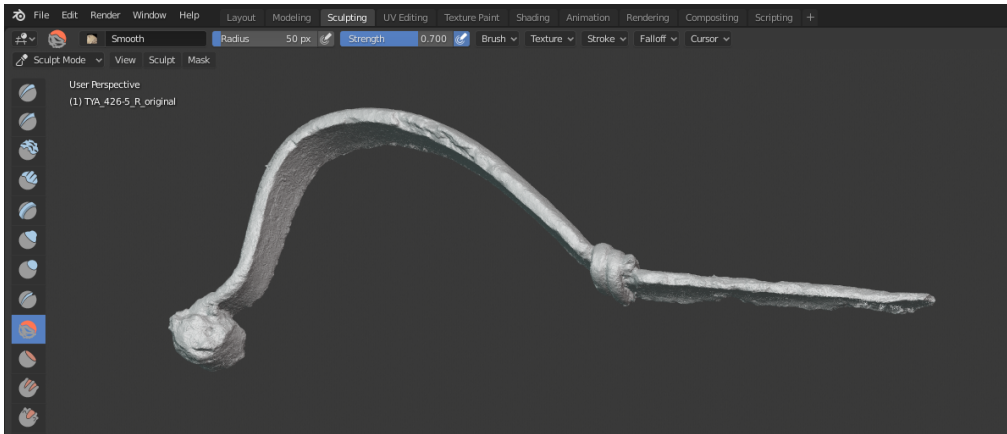
Huomaa, että digitoinnin pinnan muokkaaminen vaikuttaa sen jatkokäyttömahdollisuuksiin. Pidä siis tallessa alkuperäinen, muokkaamaton versio ja tee korjaukset erilliseen kopioon. Digitoinnin metatietoihin on aina kirjattava digitoinnin pintaan tehdyt muutokset, lisäksi muutokset on hyvä tallentaa ”ennen ja jälkeen” -tyyppiseen kuvasarjaan:



Artec Studioissa tehdyt korjaukset 3D-skannatun digitoinnin katvealueiden täyttämiseksi.

Sculpting-ikkunan työkalut

Blenderin ylälaidan *Sculpting*-ikkunassa on erilaisia polygoniverkon pinnan muokkaamiseen tarkoitettuja työkaluja. Työkalun kokoa ja tehoa voi muuttaa niin, että työkalu vaikuttaa vain haluttuun kohtaan ja halutulla voimakkuudella. 3D-digitointien muokkaamisessa hyödyllisimpiä ovat *Smooth* (pinnan silottamiseen), *Flatten* (töröttävien virhepolygonien poistamiseen) sekä *Grab* (pyöreiden muotojen rekonstruoimiseen esimerkiksi täytettyjen reikien kohdalle)



Sculpting-ikkunan Smooth-työkalu valittuna. Ylälaudassa työkalun koon ja tehon valinnat.

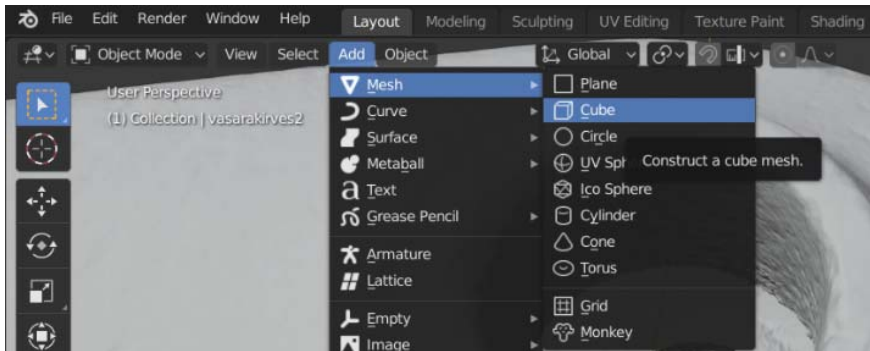


Edit moden Fill-työkalulla täytetty reikä ennen ja jälkeen pinnan silottamisen Smooth-työkalulla.

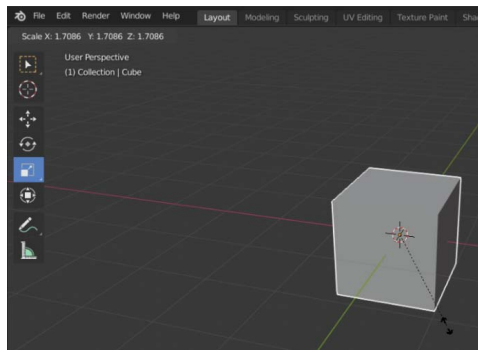
Pinnan muokkaaminen Boolean-operaattorin avulla

Jos 3D-mallissa on hankalia, rikkonaisia pintoja esimerkiksi paikattavan reiän reunalla, on alue helpompi siistiä Boolean-operaattorilla. Esimerkkitapauksessa vasarakirveen 3D-digitoinnista poistetaan huonosti mallintuneet kirveen reiän sisäpinnan jäänteet ennen born digital -sisäpinnan lisäämistä. Boolean-operaattoreista löydät lisätietoja Blenderin manuaalista (Blender 2.90 Manual 2020).

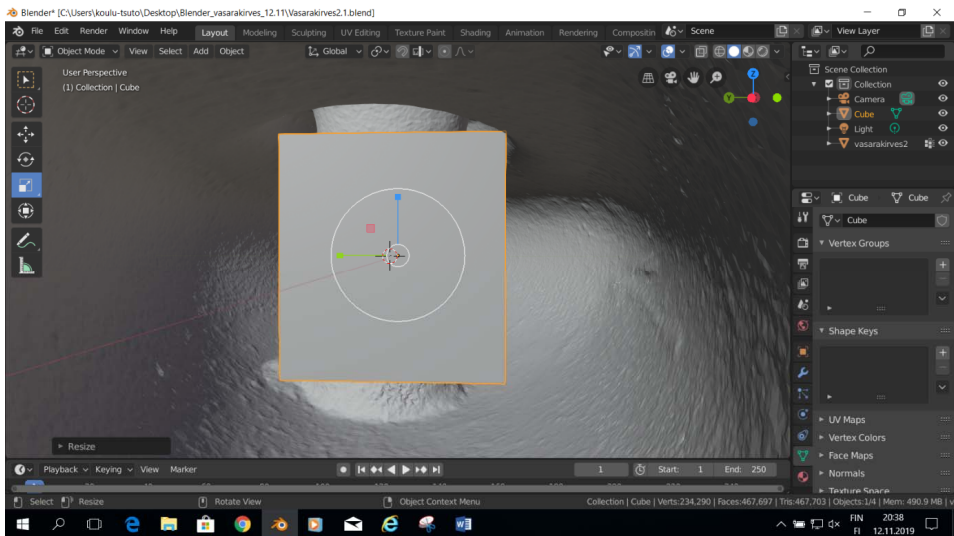
1. Object modessa paina **ALT+A** jotta työn alla oleva 3D-malli ei varmasti ole valittuna. Luo uusi kuutio kohdasta **Add => mesh => cube**.
2. Syntynyt kuutio on todennäköisesti reilusti isompi kuin 3D-malli, joten skrollaa reippaasti kauemmas nähdäksesi sen. Valitse kuutio ja skaalaa se vasemman laidan **scale**-työkalun avulla suunnilleen 3D-mallin kokoiseksi.



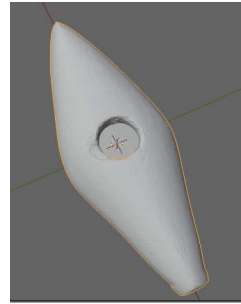
3. Kuution pintojen avulla leikataan haluttu kohta 3D-mallin polygoniverkosta pois, niin että jäljelle jää siisti, tasainen reuna jolloin "paikkaaminen" on helpompaa. Riippuu siis 3D-mallista, miten kuutio kannattaa asettaa. Nyrkkisääntönä muista, että kaikki osat 3D-mallin polygoniverkkoa, jotka jäävät kuution **sisäpuolelle**, leikkaantuvat pois.



Esimerkkinä on vasarakirveen seinän sisäpinnan siivoaminen.

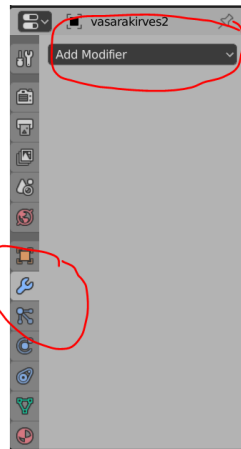


4. Tavoitteena on asettaa kuutio kirveen sisälle niin, että sen ylä- ja alapinta leikkaavat kirveen reiän sisäpinnat siististi poikki, mutta kuutio ei saa leikata kirveen ulkopintaa (ettei siihen tule reikiä). Kuutio asetellaan paikoilleen *object modessa* vasemman laidan *scale*-, *rotate*- ja *move*-työkalujen avulla. Näkymää voi muuttaa oikean yläkulman navigointi- koordinaattinuolien avulla sekä kämmen-kuvakkeella vetämällä.

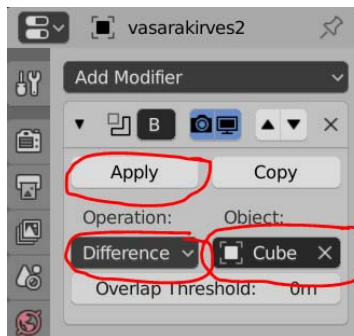


5. *ALT + A* -näppäinyhdistelmällä deaktivoidaan kaikki valinnat. Klikkaamalla kohdetta valitaan se, jolloin kohteen ympärille tulee oranssit "ääriiviivat".

6. Oikean laidan työkaluista valitaan kiintoavaimen kuvake => *Add modifier*. Avautuvan valikon *Generate*-sarakeesta valitaan *Boolean*.

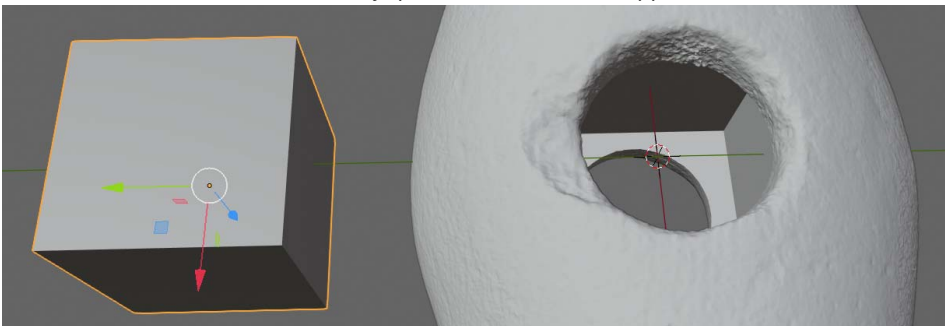


7. Avautuvassa *boolean modifier* -valikossa valitaan *Operation*-kohdasta ensin *Difference*-operaattori. Operaattori poistaa valitusta objektista kaiken mikä jää kohdeobjektin (*target*) sisäpuolelle. Valitaan kohdeobjektiksi kuutio klikkaamalla *object*-kohtaa.

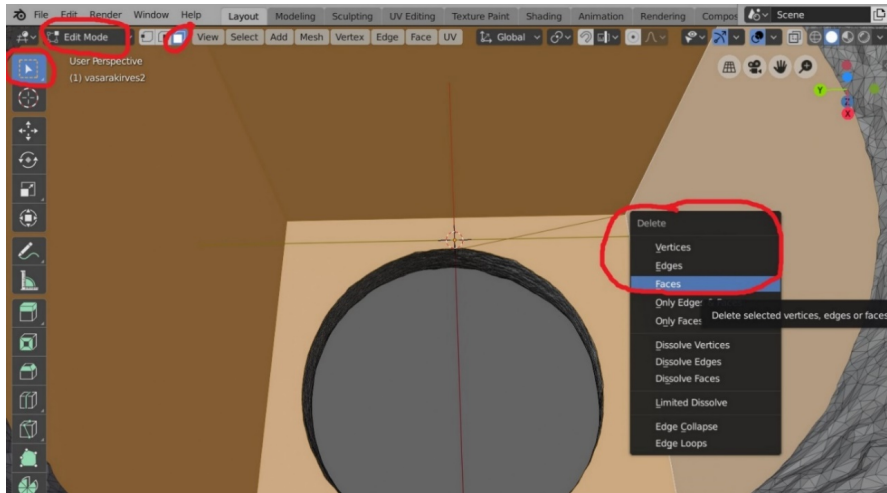


Vasta sitten klikataan *apply* ja suoritetaan toiminto, jolloin kaikki kuution sisäpuolelle jääneet osat vasarakirveen reiän sisäpinnasta katoavat, ja jäljelle jäävät siistit, tasaiset reunat.

8. Skrollataan ulospäin ja valitaan kuutio. Siirretään vasemman laidan *move*-toiminnolla kuutio kauemmaksi vasarakirveestä ja poistetaan se *delete*-näppäimellä.



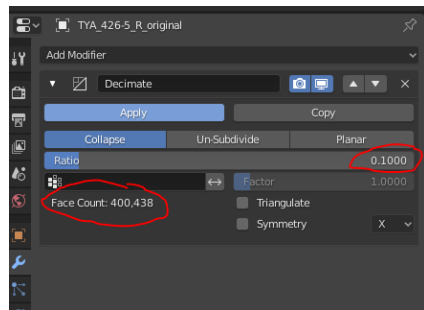
9. Vasarakirveen sisälle jäävät kuution muotoiset pinnat. Vaihdetaan siis vasemmasta ylälaidasta *edit modeen*, valitaan *select*-työkalu ja *face select* (tason valinta) -toiminto. Skrollataan lähelle kirveen reikää ja valitaan kuutionmuotoiset tasot painamalla pohjaan *SHIFT*-näppäintä ja sitten *DEL/delete* -näppäintä => *faces*. Poistetaan kaikki kuution tasot kuvakulmaa kääntelemällä.



Polygoniverkon yksinkertaistaminen Decimate-työkalulla

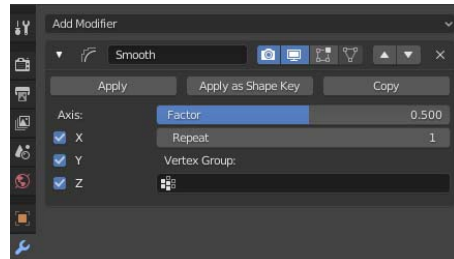
Sujuvaa selainpohjaista katselua ja jakamista varten 3D-mallin tulee olla tarpeeksi yksinkertainen, joten polygonien määrän tulee olla noin alle 500 000. Polygoniverkko voidaan yksinkertaistaa Decimate-työkalulla.

1. *Object modessa* valitse 3D-malli.
2. Oikeassa laidassa valitse *Modifier properties* => *Add modifier* => *Decimate*.
3. Avautuvassa ikkunassa valitse *Ratio*-kohtaan haluttu suhde, jolla polygoniverkkoa yksinkertaistetaan. 1 = polygonien määrä alussa, 0 = ei yhtään polygonia jäljellä. Esimerkiksi 10 000 000 polygonin mallin yksinkertaistamiseksi 500 000 polygoniin valitaan *Ratio* = 0.05. Syötettyäsi lukema *Ratio*-kohtaan Blender laskee tulevan polygonimäärän. Työvaihe voi olla hyvin hidas. Valmis arvio ilmestyy kohtaan *Face count*.
4. Hyväksy muutos *Apply*-kohtaa klikkaamalla – tämäkin työvaihe voi kestää pitkään.

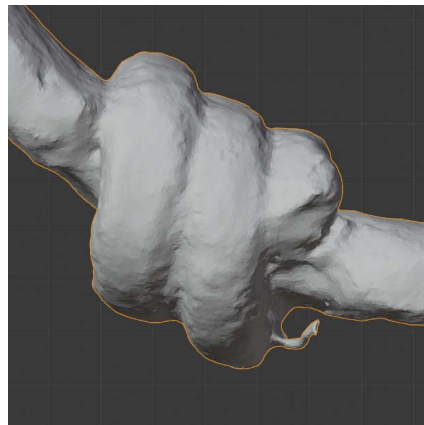
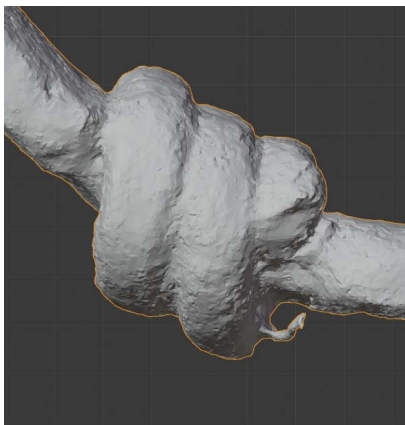


Koko polygoniverkon silottaminen *Smooth*-työkalulla

Decimate-työkalulla yksinkertaistetun 3D-mallin pinta on läheltä tarkasteltuna hyvin kulmikas. Epäaitoa vaikutelmaa voi vähentää 3D-mallin silottamisella. Toimenpide on perusteltu, sillä yksinkertaistettu 3D-digitointi sopii muutenkin vain visualisointiin, jolloin sen muokkaaminen ei estä alkuperäisen 3D-digitoinnin käyttöä tutkimustarkoitukseen.



1. *Object modessa* valitse 3D-malli.
2. Oikeassa laidassa valitse *Modifier properties* => *Add modifier* => *Smooth*.
3. *Factor*-kohdassa voit valita siloittamisen tehon, *Repeat*-kohdassa sen, kuinka monta kertaa työvaihe toistetaan. Onnistuneita tuloksia on saatu asetuksilla *Factor* = 0.5 ja *Repeat* = 3.
4. Muutokset näkee tarkastelemalla polygoniverkkoa teksturoimattomana, ja ne hyväksytään klikkaamalla *Apply*.



Yksinkertaistettu 3D-digitointi ennen ja jälkeen silottamisen.

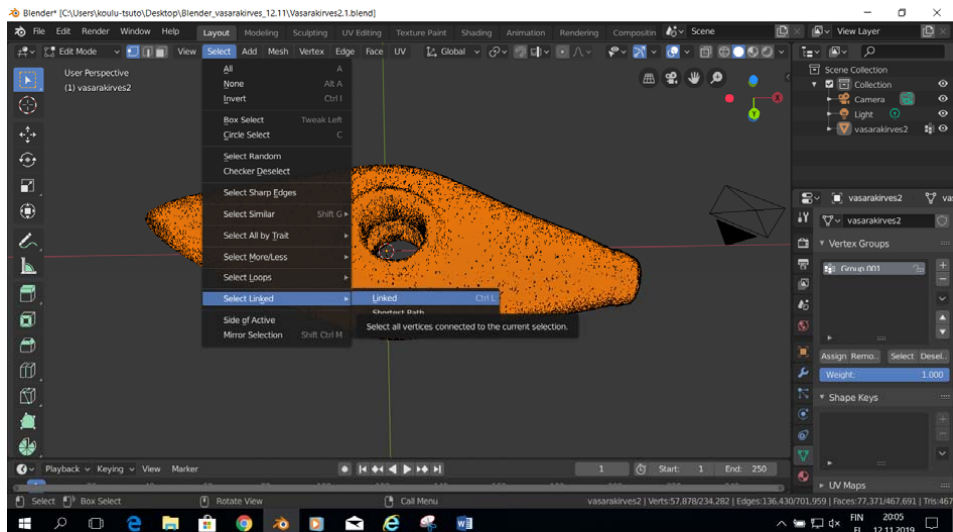
4. 3D-digitoinnin pinnan muokkaaminen Edit modessa

Lähtökohtaisesti on yleensä helpompi poistaa tai korjata digitoinnin pinnan häiriöt alkuperäisessä mallinnusohjelmassa (esim. Artec Studio, Agisoft Metashape jne.). Jos tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, voidaan käyttää Blenderiä. Blenderissä voit muokata polygoniverkkoa joko yksittäisten polygonien tasolla *Edit modessa*, tai ohjelman pinnanmuokkaustyökaluilla *Objekt moden Sculpting*-ikkunassa.

Polygonien valitseminen

Edit modessa voit valita kolmioverkosta yksittäisiä polygoneja. Tyypillinen työvaihe on esimerkiksi alkuperäisen mittakaavan poistaminen 3D-digitoinnista ennen digitaalisen mittakaavan lisäämistä. Vasemman laidan suorakulmiovalinnalla voit valita kaikki suorakulmion sisälle jäävät näkyvät polygonit.

Etenkin fotogrammetrialla tuotettujen 3D-digitointien kolmioverkko, *mesh*, on hyvin yksityiskohtainen, jolloin tietyn alueen valitsemalla ei välttämättä saa valittua kaikkia 3D-malliin kuuluvia polygoneja. Varmistaaksesi kaikkien toisiinsa sidoksissa olevien polygonien valinnan, valitse yläpalkin *Select*-ikkunasta *Select linked => Linked*. Toinen vaihtoehto on zoomata valittava alue mahdollisimman suureksi ennen valitsemista.



Select-valikosta löytyy myös *Circle select*, jolla on helpompi valita tarkasti vain haluamansa osat tietystä polygoniverkosta. Valintaympyrän kokoa voit muuttaa yläaidan asetuksista. Huomaa että ollessasi *Circle select* -näkyvässä siitä on ensin poistettava Esc-näppäintä painamalla ennen kuin voit tehdä toimenpiteitä valituille polygoneille.

Kolmioverkon virheiden korjaaminen

Polygonien poistaminen

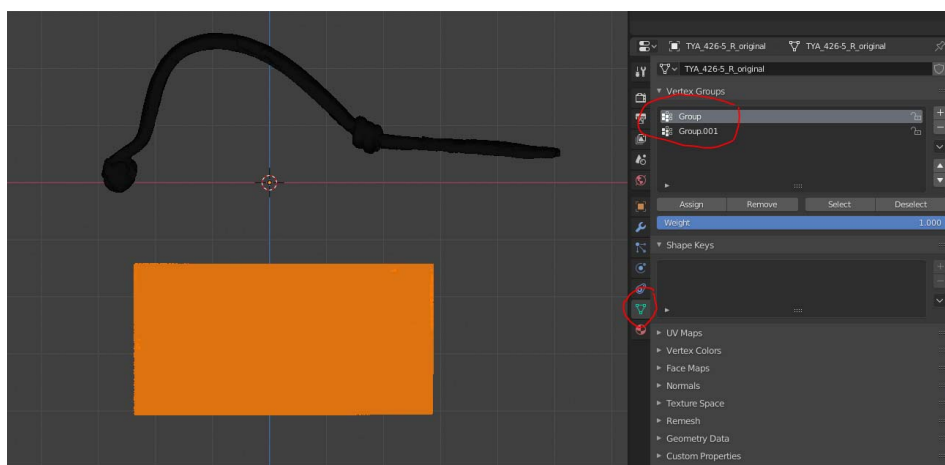
Valitut polygonit voit poistaa *Edit modessa* painamalla delete-näppäintä. Blender varmistaa haluatko poistaa, vertexit, edget vai facet. Vertexit poistamalla saat tehokkaimmin poistettua koko polygoniverkon, sillä edget ja facet on sidottu vertexeihin.

Kolmioverkon ryhmittely

Jos kolmioverkkoa muokataan voimakkaasti tai siihen luodaan uusia kolmioita esimerkiksi reikien paikkaamiseksi, on hyvä koota alkuperäiseen malliin kuuluvat kolmiot omaksi ryhmäkseen ennen muokkauksia.

Oikean laidan *Context*-valikon *Vertex Groups* -kohdassa luo plus-näppäimellä uusi ryhmä. Valitse sitten valintatyökalulla koko objekti (ylälaidan *select*-valikosta valitse *Select linked => Linked*, jolloin myös ne kolmiot jotka eivät ole nyt näkyvillä tulevat valituksi). *Vertex groups* -kohdasta valitse *Assign*.

Voit testata, onnistuiko ryhmän luominen klikkaamalla työskentelyikkunaa ja painat *ALT + A*, jolloin mitään ei ole valittuna. Valitse sitten *Vertex groups* -kohdasta luomasi ryhmä aktiiviseksi ja paina kohdan omaa *select* -nappia. Koko meshin pitäisi nyt tulla taas valituksi.



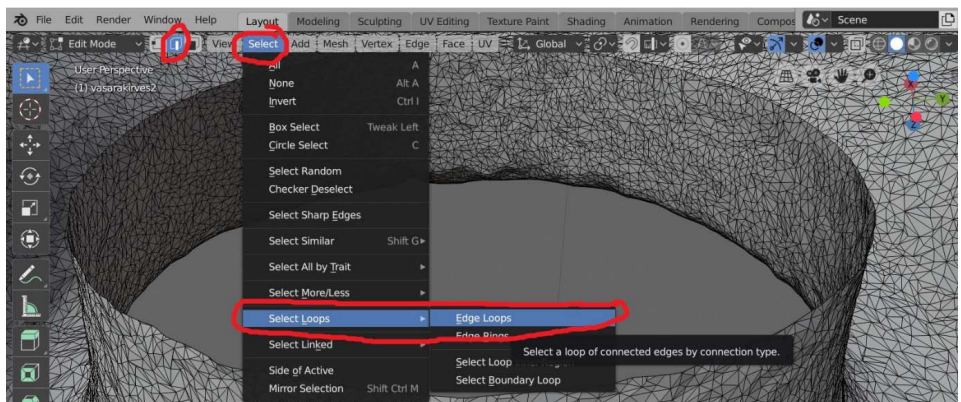
Kuvassa soljen 3D-malli sekä siihen liittyvä digitoitu mittakaava on ryhmitelty omiksi *Vertex groups*iksi.

Reikien paikkaaminen

Reikien paikkaaminen tapahtuu valitsemalla reikää ympäröivät reunat (*edges*) ja muodostamalla niiden väliin uuden tason/tasoja *Fill*-työkalulla.

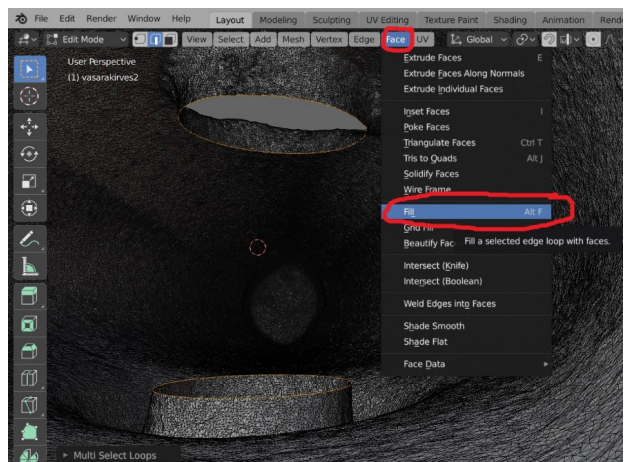
Ennen reiän täyttämistä reiän reunojen on hyvä olla yksinkertaiset, sileät. Esimerkkitapauksessa täytettävänä on vasarakirveen reiän sisäpinta, jonka huonosti mallintuneet jäänteet on jo poistettu *Object modessa Boolean*-operaattorilla (ks. ohjeet yltä).

1. Luodaan reiän reunalle *edge loop* eli yhtenäinen valittujen "reunojen" ketju reiän sisäpinnan leikkaukseen. Vaihdetaan tätä varten *face select* -toiminnosta *edge select* -toimintoon ja valitaan leikkauspintaan rajautuvan kolmion reuna (eli yksi niistä reunoista johon kolmioverkko "loppuu" reiän kohdalla). Vasemman ylälaidan select-kohdasta valitaan *select loops* => *edge loops* jolloin ohjelma valitsee kaikki leikkauspinnan reunat eli reunaan syntyy oranssinväriinen kehä.



Vasarakirveen kohdalla toistetaan sama reiän toiselle leikkauspinnalle pitäen pohjassa SHIFT-näppäintä, jolloin kummassakin leikkauspinnassa näkyy oranssi kehä.

2. Ylälaidan *Face*-valikosta valitaan *Fill*-toiminto, jolloin kahden valitun kehän väli täyttyy uusilla tasoilla.
3. Tasot ovat kätevästi valittuina ilmestyessään, joten ryhmitellään ne heti omaksi *vertex groupiksi* (ks. ohjeet yllä). Kun ryhmittely on onnistunut, voi *vertex groupeja* valita oikean laidan *vertex*-työkalun *select/deselect*-työkaluilla.

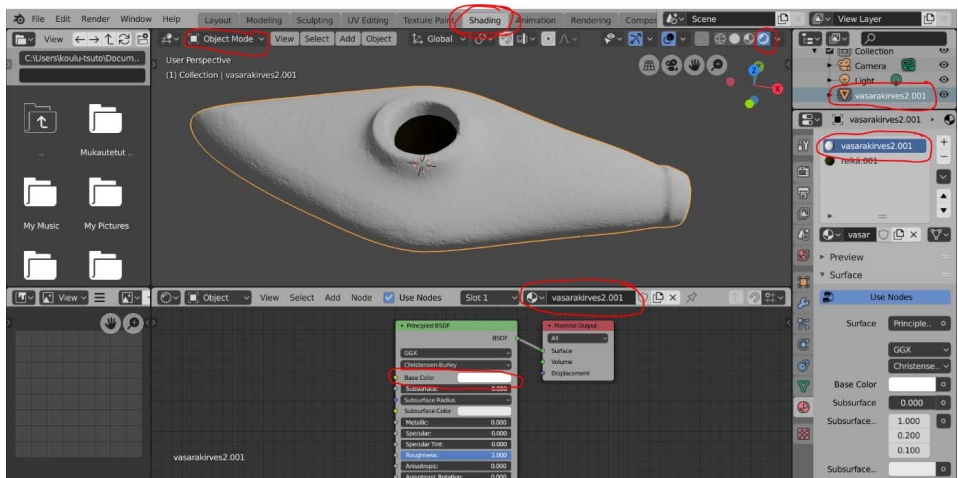
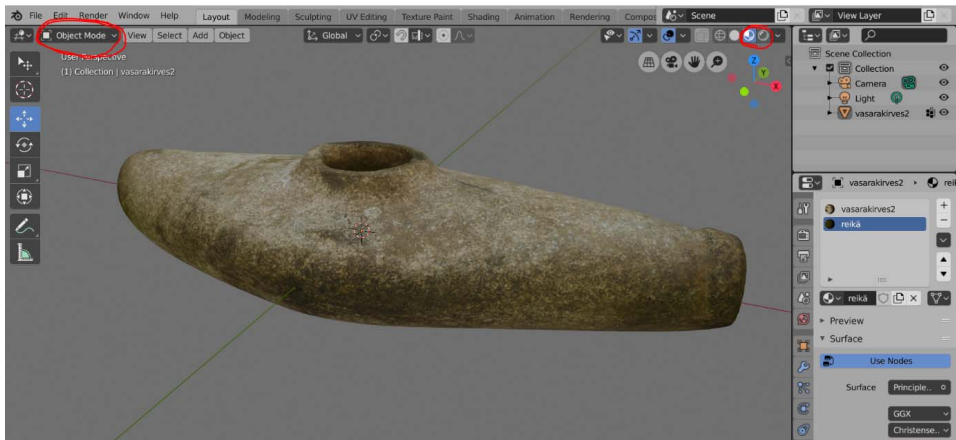


5. Tekstuuri ja sen muokkaaminen

.obj-muotoisen tiedoston tekstuurin tuominen Blenderiin

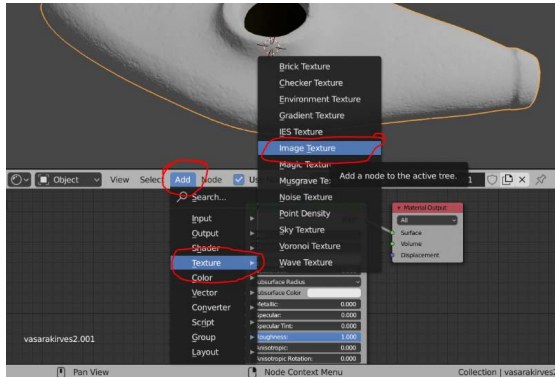
1. Kun Blenderiin tuodaan .obj-muotoista tiedostoa, on itse .obj-tiedostoon liittyvän tekstuuritiedoston (esim. .jpg-muodossa) sekä näitä yhdistävän .MTL-tiedoston oltava samassa kansiossa (huom: tekstuuritiedosto ei näy kansiossa, kun tuot .obj-tiedoston sisään, vaikka se on siellä). Yleensä Blender osaa itse yhdistää oikeassa kansiossa olevan tekstuurikuvan itse 3D-malliin.

Tekstuuri näkyy, kun valitset *Object modessa* oikeasta ylälaidasta *Viewport shading* -pallon. Samalla avautuu myös oikean laidan työkaluvalikon *Materials*-kohta, jossa näet, minkälaisista materiaaleista tekstური rakentuu. Esimerkiksi vasarakirveessä on erikseen tekstური itse kirveelle ja jälkikäteen lisätulle reiän sisäpinnalle.

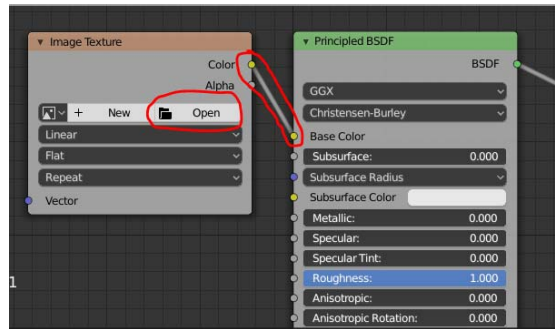


1. Jos tekstuuria ei näy, tarkista että tekstuuritiedosto on "liitetty" oikein malliin. Tarkista että valittuna on oikeasta yläkulmasta kohteen tiedosto (eikä esimerkiksi kamera tai valo), ja vaihda ylälaidan valikosta *Shading*-välillehteen, jossa näet tarkemmin, miten mallin tekstuuri rakentuu. Esimerkkikuvassa huomataan, että oikean laidan *Materials*-kohdassa alalaidan näkymässä tekstuurin väri on valkoinen.

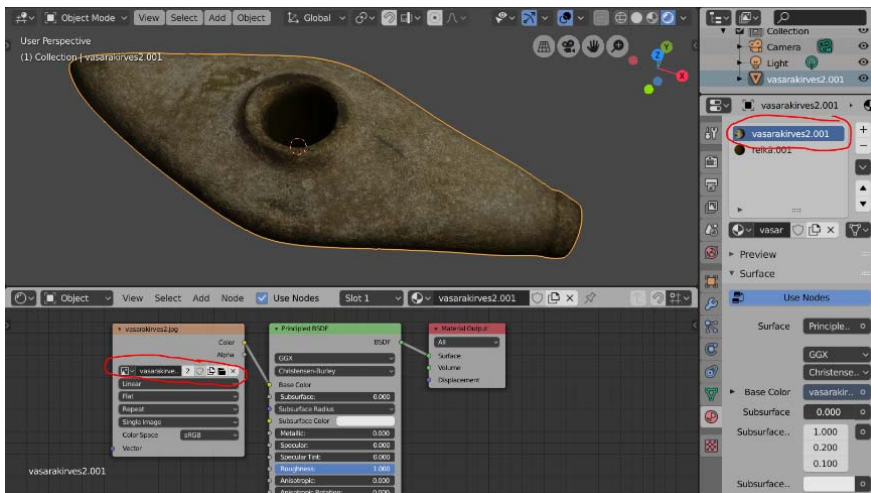
2. Lisätään kuvatekstuuri alalaidan kohdasta *Add* => *Texture* => *Image texture*.



3. "Pudota" ilmestynyt laatikko jonnekin *Principled BSDF* -laatikon viereen, ja kytke keltaisista palluroista toisiinsa *Image Texture* -laatikon *Color*-kohta ja *Principled BSDF* -laatikon *Base Color* -kohta. *Image Texture* -laatikon kohdasta *Open* etsi .obj-tiedostoon liittyvä kuvatekstuuri ja valitse *Open image*.



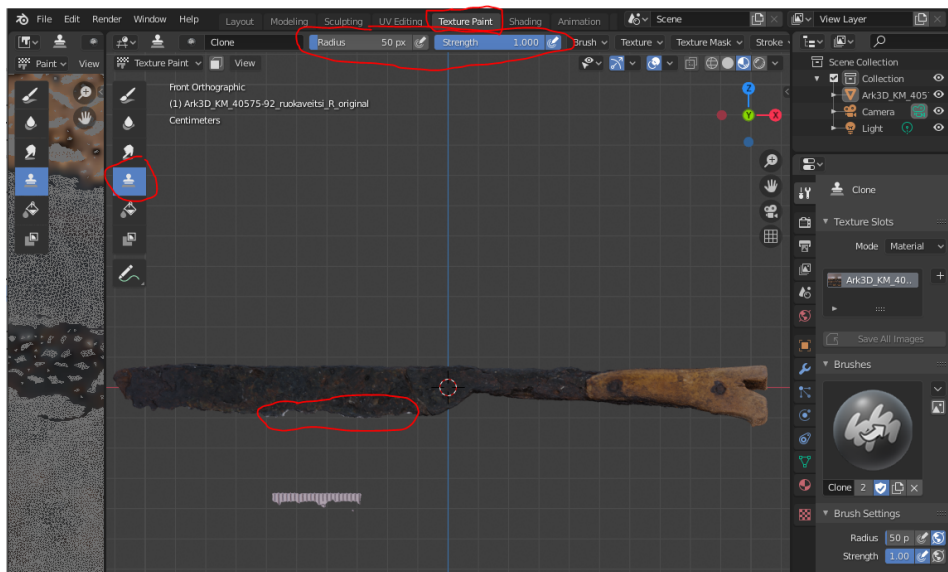
4. Malli näkyy nyt teksturoituna ja tekstuuritiedosto näkyy niin oikean laidan *materials*-kohdassa kuin alalaidan ikkunassa.



Virheellisen tekstuurin korjaaminen maalaamalla

Pienet tekstuurivirheet voi korjata Blenderin ylälaidasta löytyvän Texture paint -välilehden työkaluilla. Clone Stamp -työkalu kopioi valitusta, puna-valkoisen renkaan sisälle jäävästä alueesta valkoisen renkaan sisälle jäävälle alueelle. Ylälaidan Radius- ja Strength-kohdista voi säätää kohderenkaan kokoa sekä värityksen peittävyttä (1 = täysi peittävyys, 0 = täysin läpinäkyvä). Esimerkissä korjataan kuvaustaustan värityksestä pöytäveitsen terään jääneet valkoiset viivat.

Huom: Jos tekstuuri on mittavia virheitä, on kannattavampaa palata työstämään alkuperäistä 3D-digitointia, sillä tekstuurin muokkaaminen vaikuttaa 3D-digitoinnin uudelleenkäytettävyyteen. Muokkaukset tulee mainita 3D-digitoinnin metatiedoissa sekä tallentaa ”ennen ja jälkeen” -tyyppisellä kuvasarjalla.



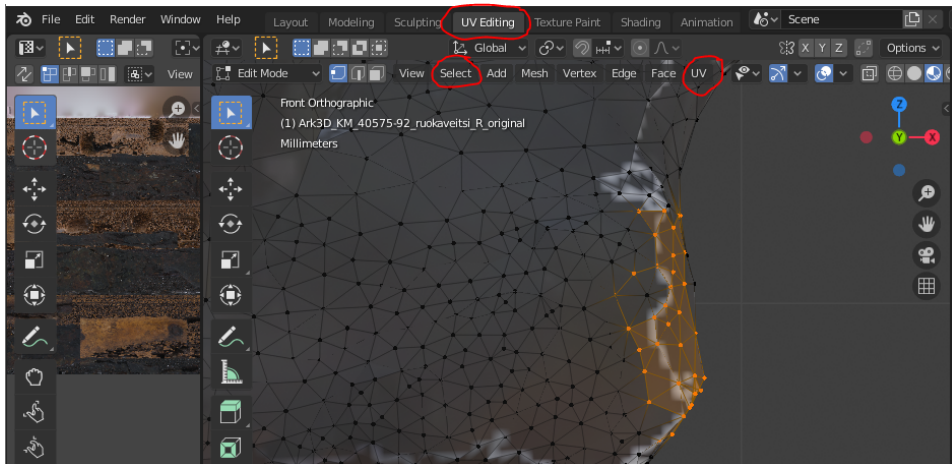
Lähikuvassa tekstuuri kopioituu punavalkoisen renkaan kohdalta valkoiselle alueelle.

Korjatun tekstuurin kohdalla saattaa jäädä valkoisia saumoja – ne eivät kuitenkaan yleensä näy katseluohjelmassa.

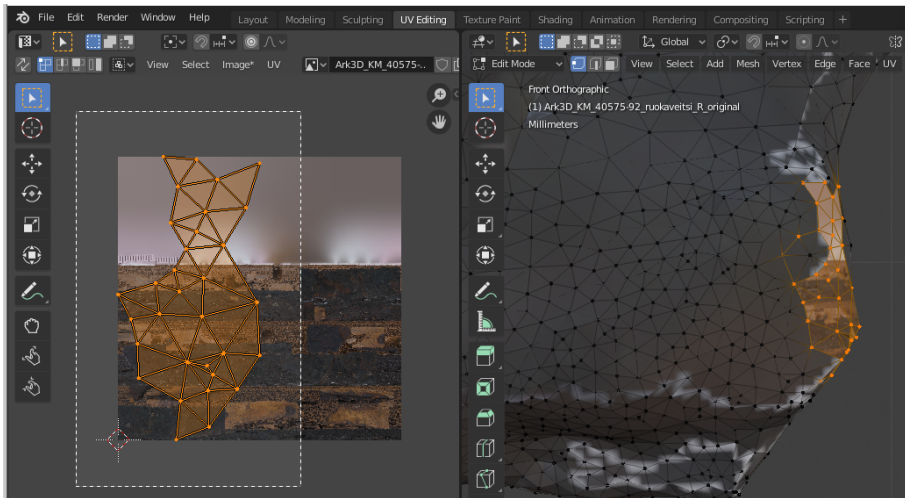


Tekstuurikartan uudelleenasettaminen

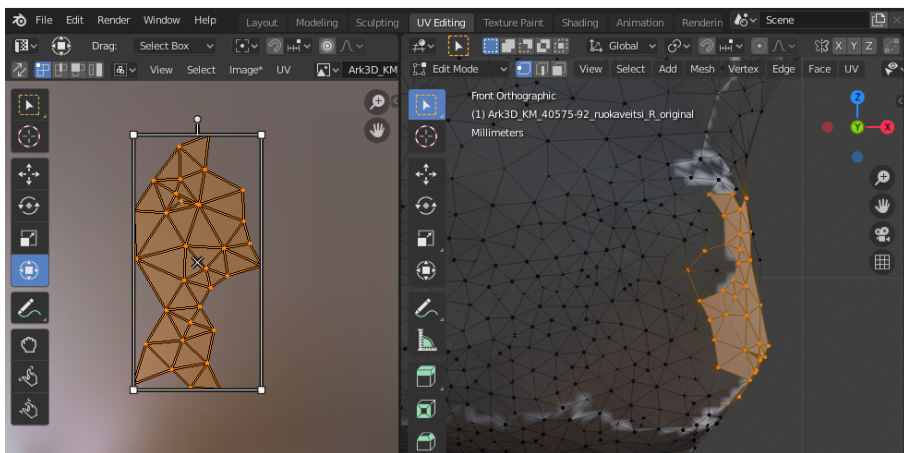
Joskus 3D-digitoinnin tekstuuriin voi syntyä huonosti värittyneitä polygoneja, joiden maalaaminen ei onnistu Texture paint -työkalulla. Tällöin kyseisten polygonien asettaminen uuteen kohtaan tekstuurikartalla voi ratkaista ongelman. Esimerkissä korjataan tekstuuriin jääneen valkoisen viivan polygonit.



1. Siirry ylälaidan valikosta UV editing -välilehdellä ja zoomaa lähelle, jotta korjattavat polygonit näkyvät kunnolla (3D-digitointi saattaa ensin näyttää teksturoimattomalta, kunnes lähelle zoomatessa tekstuuri alkaa erottumaan polygonien kulmapisteiden ja reunojen alta).
2. Valitse korjattavat polygonit. Tarkkaan valitsemiseen Select-valikosta löytyvä Circle select -työkalu on hyvä. Huomaa että Circle select -näkömästä pitää poistua Esc-näppäintä painamalla.
3. Ylälaidalta valitse UV-valikko => Unwrap, jolloin valitsemasi polygonit näkyvät vasemman puolen tekstuurikartassa, yleensä hyvin suuruuskokoisina.
4. Valitse polygonit valintaikkunalla. Etenkin heikkotehoisemmalla koneella kannattaa valita vain osa polygoneista kerralla. Valinnan jälkeen voit siirtää ja skaalata polygoneja tekstuurikartan päällä.



Vaihtoehtoina on siirtää polygonit kohtaan, jossa on sopivan värinen tausta jo valmiiksi, tai tekstuurikartan sellaiseen kohtaan, jossa ei ole 3D-mallin tekstuuria lainkaan. Jälkimmäisessä tapauksessa polygonien päälle voi maalata sopivan värin ilman, että myös jokin toinen kohta 3D-digitoinnissa värityy samalla. Esimerkissä polygonit siirretään tekstuurikartan ylälaidan vaaleanpuna-harmaalle alueelle, joka ei ole osa 3D-digitoinnin tekstuuria.

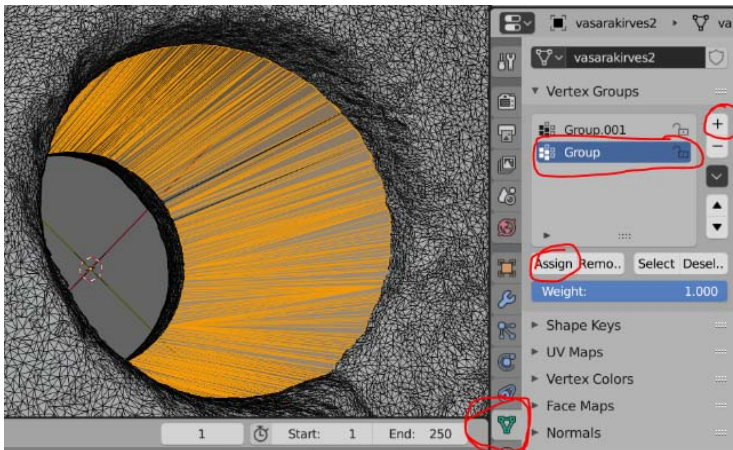


5. Valitut polygonit on nyt tekstuurikartalla siirretty "yli jääneelle" vaaleanpunaiselle alueelle, jonka värittäminen toisella värillä ei sotke muuta 3D-digitoinnin tekstuuria. Kolmioiden päälle voi nyt maalata Texture paint -välilehden työkaluilla.

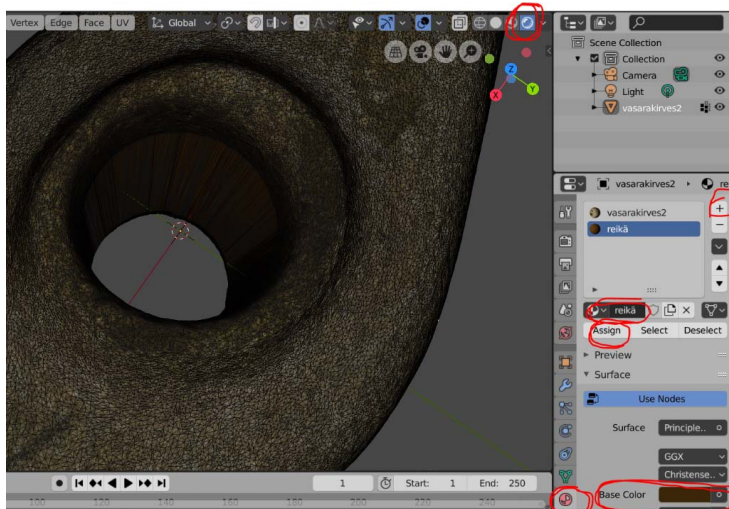
Uusien pintojen värittäminen halutulla tekstuurilla

Esimerkiksi paikatus reiän kohdalla uusille pinoille voidaan luoda täysin uusi tekstuuri. Esimerkkinä on vasarakirveen reiän sisäpintaan luotu uusi pinta.

4. Valitse Edit modessa teksturoitava pinta klikkaamalla pinnan Vertex groupia (ks. yllä). Värittämistä varten vaihda oikean ylälaidan valikossa *viewport shading* -näkömään, jolloin kirveen tekstuuri näkyy myös.

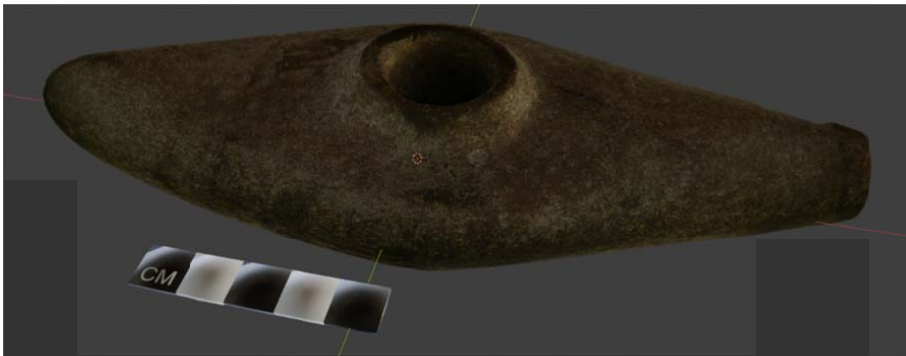


5. Reiän sisäpintaan luodaan uusi tekstuuri, joka selkeästi erottaa keinotekoisesti luodun pinnan alkuperäisestä, digitoidusta pinnasta. Tätä varten vaihdetaan oikean laidan työkaluvalikossa *Material*-valikkoon ja lisätään uusi materiaali, joka nimetään sopivalla tavalla. Valitsemalla *assign* sidotaan uusi materiaalitekstuuri valittuna olleisiin reiän sisäpinnan tasoihin. *Base color* -kohdasta voidaan säätää sopiva väritys. Väritystä on helpompi katsoa object modessa, johon voi vaihtaa tässä kohtaa.



6. Born digital -mittakaavan yhdistäminen 3D-digitointiin

Skannerilla tuotetussa 3D-digitoinnissa ei tarvitse skannaushetkellä olla mittakaavaa ollenkaan mukana, sillä skanneri asettaa digitoinnin itsenäisesti oikeaan mittakaavaan. Fotogrammetriamallien kuvissa näkyvä mittakaava taas usein näkyy huonosti lopullisessa 3D-digitoinnissa, sillä mittakaavan tasainen, mustavalkoinen pinta ei sovi hyvin fotogrammetriaan. Siksi voi olla tarpeen liittää 3D-digitointiin selkeä, hyvin erottuva digitaalinen mittakaava.

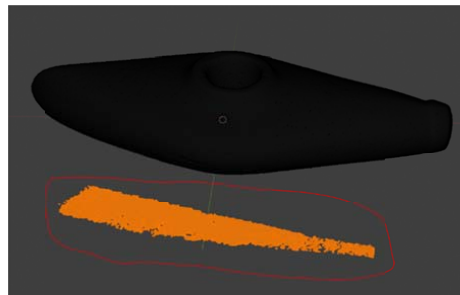


Kivikirves ja siihen yhdistetty mittakaava.

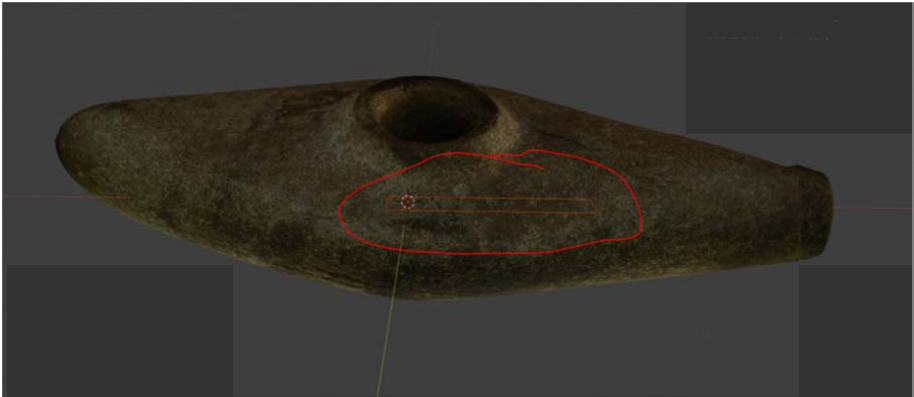
1. Avaa uusi Blender-työ ja poista kuutio keskeltä. Tuo sisään 3D-digitointi, johon haluat yhdistää mittakaavan, ja vie se origoon. **Tarkista tässä vaiheessa esim. mittaustyökalulla, että 3D-digitointi on Blenderissä oikeassa mittakaavassa (eli esim. 20 cm pitkä kivikirves ei ole 20 m pitkä).** Jos digitoinnissa on jäljellä esimerkiksi fotogrammetrialla mallinnetun mittakaavan osia, ne kannattaa ensin poistaa.
2. Siirry Objekt modesta edit modeen. Valitse poistettava osa kohdetta ja paina CTRL + L (Linked), jotta Blender valitsee kaikki valittuihin osiin linkitetyt vertexit. Paina delete-näppäintä, jolloin Blender kysyy, mitä haluat poistaa. Tässä tapauksessa poistamme vertexit eli pisteet, joihin polygonien sivut (edges) ja tasot (faces) on liitetty.

Etenkin fotogrammetriamalleissa kaikki vertexit eivät välttämättä ole yhteydessä toisiinsa, jolloin hajanaisia pisteitä saattaa jäädä delete-toiminnon jälkeenkin jäljelle. Toista siis valinta => CTRL + L => delete, kunnes kaikki pisteet on poistettu.

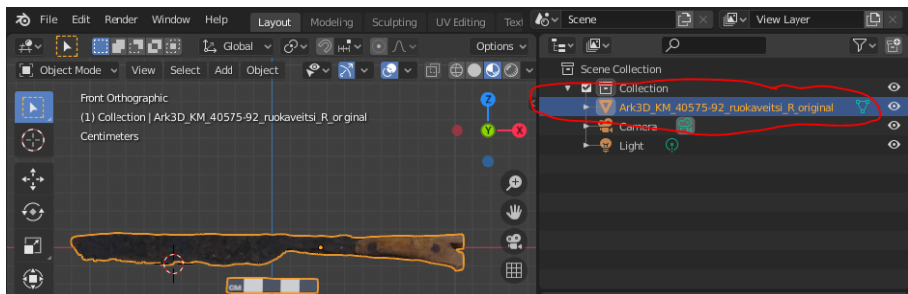
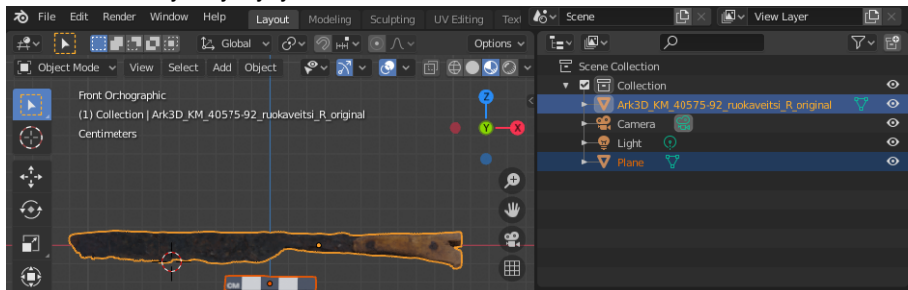
3. Siirry takaisin Object modeen ja tuo sisään born digital -mittakaava OBJ-muodossa. 3D-kurssin mittakaava on asetettu origoon, joten se saattaa ilmestyä



origoon asetetun kohteen sisälle, kuten alla olevassa kuvassa. Hilaa move-työkalulla mittakaava kohteen viereen, ja käännä se oikein päin (niin että kohteessa on kokoelmanumero oikein päin ja mittakaavan teksti on samoin päin).



4. Liitä mittakaava ja kohde yhdeksi objektiksi valitsemalla kummatkin ja painamalla CTRL + J (Join). Nyt kun klikkaat mittakaavaa, myös kohteen pitäisi tulla valituksi. Huomaat, että oikean ylälaidan Scene collection -näkyssä plane-objekti katoaa ja vain kohteen objekti jää jäljelle.



Pöytäveitsen ja mittakaavan yhdistäminen yhteen tiedostoon.

7. Tiedoston vienti Blenderistä

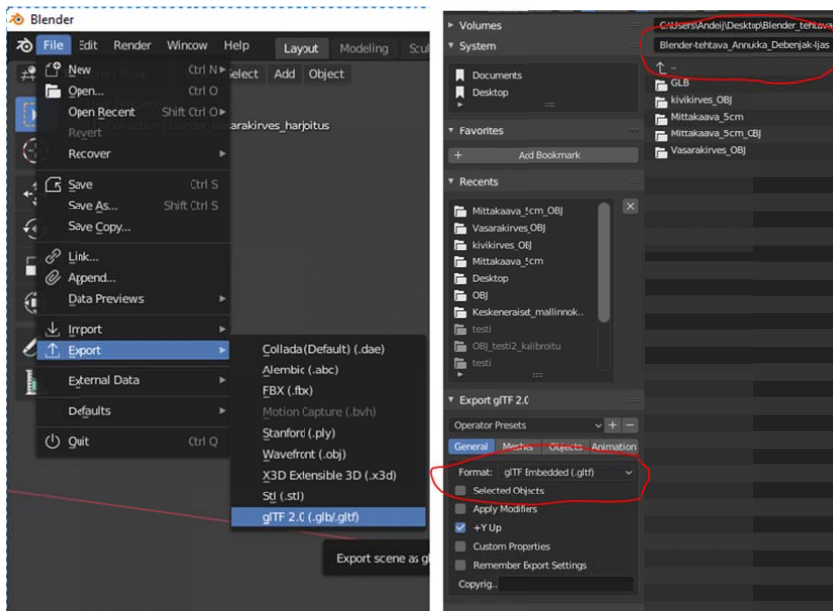
Vienti .obj:nä

Tallentaaksesi Blenderissä muokkaamasi polygonimallin kokonaan uutena .obj-tiedostona, valitse File => export => obj. Kun skrollaat tallennusnäkyvän vasemmassa laidassa asetuksia alaspäin, pääset kohtaan "path mode". Valitse copy, jotta myös Blender vie myös uuden tekstuurin samaan kansioon tallentamasi obj:n kanssa. Vie obj-tiedosto oikean yläkulman painikkeesta.

Vienti glTF:nä

Tekijöiden kokemusten mukaan kahden .obj-muotoisen tiedoston yhdistäminen yhdeksi tekstuuritiedostoksi ei onnistu, eivätkä kaikki katseluohjelmat osaa ladata useampia tekstuuritiedostoja niin, että tekstuuriin saisi näkyville.

Tästä syystä tiedostot, joihin on liitetty digitaalinen mittakaava kannattaa viedä glTF embedded-muodossa, joka yhdistää tekstuurit samaan tiedostoon muun polygonimallin kanssa. glTF-muotoiseen tiedostoon voi yhdistää suoraan myös tiedon tiedoston käyttöoikeuksista.



.obj:n ja glTF:n lisäksi tiedostoja voi viedä Blenderistä .dae-, .abc-, .x3d- ja .stl-muodoissa.

Kiitokset

KuM Marko Backman on osaamisellaan merkittävästi edistänyt Blender-ohjeen syntymistä.

Lähteet

Blender. 2020. Open source 3D creation. Free to use for any purpose, forever.
<<https://www.blender.org/>>. Luettu 27.10.2020.

Blender 2.90 Manual. 2020. Boolean Modifier.
<<https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/generate/booleans.html>>. Luettu 27.10.2020.

Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanke 2019–2020 Turun yliopiston arkeologian oppiaine

Tässä teoksessa esitellyt 3D-digitoinnit tehtiin osana Turun yliopiston arkeologian oppiaineen, Aboa Vetus et Ars Nova-museon sekä Turun museokeskuksen yhteistä, vuosina 2019–2020 toteutettua arkeologisten kokoelmien 3D-digitointihanketta.

Hankkeen tavoitteena oli tutkia ja testata tieteelliseen käyttöön soveltuvien 3D-digitointien tuottamista arkeologisesta löytöaineistosta. Hanketta johti prof. Visa Immonen, ja projektitutkijana toimi FM Annukka Debenjak-Iljäs.

Digitoitavaksi valittiin arkeologian oppiaineen kokoelmista rautakautisia löytöjä: solkia, rannerenkaita ja kaularenkaita. 3D-digitoinnit toteutettiin kevään ja kesän 2020 aikana arkeologian oppiaineen tiloissa fotogrammetrian menetelmin.



Kuva: 3D-digitoinnissa käytetty kuvauskalusto.

Tallennus ja julkaisu

Valmiista 3D-digitoinneista talletettiin alkuperäinen versio .glTF- ja .obj-muodossa, lisäksi talletettiin myöhempää Finna-yhteensopivuutta ajatellen yksinkertaistettu esikatseluversio .glTF-muodossa. 3D-digitointien lisäksi tallennettiin 3D-digitointiohjelma *RealityCapture*n tiedosto, käytetyt valokuvat .tif- ja .dng-muodossa sekä .png-muotoiset valokuvat, jos niitä oli hyödynnetty digitoinnin värikykseen.

Arkeologian oppiaineen löydöistä tehdyt 3D-digitoinnit ja niihin liittyvät aineistot talletettiin Turun yliopiston HKTL-arkistoon. Tiedot 3D-digitoinneista ovat julkisesti saatavilla Turun yliopiston internet-sivuilta HKTL-arkiston mediapankin kautta. Lisäksi 3D-digitointien yksinkertaistetut versiot julkaistiin verkossa Turun museokeskuksen tilillä *Sketchfab*-palvelussa.

3D-digitoinnit ovat avoimessa käytössä CC BY-NC-SA 4.0 -lisenssillä.

Hakusanat: arkeologia, 3D, digitointi, rautakausi, solki, rannerengas, kaularengas

Työkuvaus

Ennen digitointiprosessia löydön perustiedot kirjattiin metatietolomakkeeseen, ja aineiston hallinnoimiseksi luotiin löytökohtainen ID, joka rakentuu seuraavasti:

Projektitunnus_Kokoelmatunnus_Kokoelmanumero_Löytötyyppi_Digitointimenetelmä.

Esimerkiksi: Ark3D_TYA_244-384_rannerengas_R.

R viittaa 3D-digitointiohjelma RealityCaptureen, sillä hankkeessa käytettiin myös muita 3D-digitointitapoja muiden yhteistyökumppaneiden aineistoihin. Kaikki löydön 3D-digitointiin liittyvät tiedostot lukuun ottamatta yksittäisiä valokuvatiedostoja nimettiin tällä löytökohtaisella ID:llä.

Löydöt kuvattiin Foldio 360 -ministudiossa pyörivällä kuvaustasolla kahdesta neljään asennossa. Kustakin asennosta otettiin kolmesta neljään kuvakehää eri korkeuksilta. Geometrisesti monimutkaisista löydöistä otettiin lisäksi yksityiskohtakuvia. Kuvaamiseen käytettiin Nikon D750 -kameraa ja Nikkor 60 mm micro -objektiivia. Kiiltäväpintaisille löydöille käytettiin lisäksi pyöröpolarisaatiosuodinta. Yhdessä kuvauspositioista löydön viereen asetettiin paperinen mittakaava, jotta 3D-digitointi voitiin tuoda metriseen kordinaatistoon.

RAWtherapee-ohjelmassa .nef-tiedostomuodossa otetut kuvat muunnettiin .tif-muotoisiksi. Samalla pyöröpolarisaatiosuotimella otettujen kuvien kirkkautta nostettiin ja valkotasapainoa korjattiin. Pitkäaikaissäilytystä varten .nef-muotoiset kuvat muunnettiin *Adobe DNG converter* -ohjelmassa .dng-muotoon.

3D-digitointiin käytettiin *RealityCapture*-ohjelmaa. Kuvat tuotiin .tif-muodossa sisään ohjelmaan ja kuvissa näkyvään värilliseen mittakaavajanaan merkittiin *control points* ja *define distance* -työkaluilla mittakaavajana, jonka avulla 3D-digitointi sidottiin metriseen skaalaan. Kuvat yhdistettiin *align*-toiminnolla, ja pistepilvestä laskettiin polygoniverkko *Reconstruction* -> *high detail* -toiminnolla. Joissain tapauksissa polygoniverkkoon tehtiin muutoksia:

1. Jos digitoinnin pintaan yhdistyi myös osia kuvissa näkyvästä taustasta. Tällöin ylimääräiset osat siivottiin pois *lasso*- ja *filter selection* -työkaluilla. Syntyneet reiät paikattiin *close holes* -työkalulla ja reiän paikkauksesta syntynyt epätasainen pinta silotettiin *smoothing*-työkalulla.
2. Jos polygoniverkon koko oli reilusti yli 12 000 000 polygonia niin polygonien määrä laskettiin 12 000 000:een *simplify tool* -työkalulla (type = absolute, target triangle count = 12 000 000).

Pintaan tehdyt muutokset tallennettiin .tif-muotoiseen ”ennen ja jälkeen” -kuvasarjaan, joka arkistoitiin 3D-digitoinnin mukana. 3D-digitointi väritettiin *colorize*-toiminnolla sekä *texture*-toiminnolla 8192 x 8192 resoluutiolla. Joissain tapauksissa digitoinnin väritys oli paikoin epätarkka tai sumea. Tällöin .tif-muotoisista valokuvista rajattiin pois epäterävät alueet *Metashape*-ohjelman *mask*-työkalulla. Maskatut kuvat vietiin Metashapesta .png -muodossa ja

tuotiin sisälle RealityCaptureen muuttamalla RealityCapturen tiedostoon merkitty kuvaformaatti .tif-muodosta .png-muotoon *Notepad*-ohjelmassa (open with Notepad => find & replace). Tällöin 3D-digitointi väritettiin .png-muotoisten kuvien pohjalta.

Valmis, väritetty 3D-digitointi vietiin RealityCapturesta .obj-muodossa. Viedyssä digitoinnissa näkyi löydön lisäksi kuvausvaiheessa löydön viereen asetettu paperinen mittakaava. Digitoinnista riippuen mittakaavan laatu vaihteli, joissain tapauksissa siitä saatiin digitoitua vain osa tai ei mittakaavaa ollenkaan.

Jälkikäsittelyvaiheessa .obj-muotoinen 3D-digitointi tuotiin sisään *Blender*-ohjelmaan.

1. 3D-digitointi asetettiin Blenderissä origoon ja käännettiin oikein päin, niin että sen visuaalinen tarkastelu on helpompaa. Samalla tarkistettiin *measure*-työkalulla, että digitointi on oikeassa mittakaavassa.
2. Tarvittaessa 3D-digitoinnin väritystä korjattiin *Texture paint* -valikon *clone*-työkalulla. Tällaisia korjauksia tehtiin tilanteissa, joissa kapean löydön reunaan syntyi teksturointivaiheessa valkoisesta kuvaustaustasta kevyt, valkoinen viiva. Väritykseen tehdyt muutokset tallennettiin .tif-muotoiseen ennen ja jälkeen -kuvasarjaan, joka arkistoiitiin 3D-digitoinnin mukana.
3. 3D-digitointi vietiin alkuperäisessä koossaan Blenderistä .obj-muodossa. Tiedostot nimettiin 3D-digitoinnin ID:llä sekä _original-tekstillä.
4. Jos digitointiin kuuluva mittakaava oli mallintunut huonosti tai ei ollenkaan, lisättiin digitointiin Blenderissä digitaalinen 5 cm pituinen mittakaavajana ennen 3D-digitoinnin viemistä Blenderistä .glTF-muodossa.
5. 3D-digitointi vietiin alkuperäisessä koossaan Blenderistä .glTF-muodossa. Tiedosto nimettiin 3D-digitoinnin ID:llä sekä _original-tekstillä.
6. 3D-digitoinnin polygonimäärä (ilman mittakaavajanaa) kirjattiin metatietoihin. Yksinkertaistettu 3D-digitointi tuotettiin Blenderin mesh decimate -työkalulla. Jos yksinkertaistetun digitoinnin pinta jäi keinotekoisen epätasaiseksi, se silotettiin *smoothing*-työkalulla. Yksinkertaistetun 3D-digitoinnin polygonimäärä kirjattiin metatietoihin.
7. Jos 3D-digitoinnissa ei vielä ollut digitaalista 5 cm mittakaavajanaa mukana, lisättiin se viimeistään tässä vaiheessa digitoinnin yhteyteen.
8. Yksinkertaistettu 3D-digitointi vietiin Blenderistä .glTF-muodossa. Tiedosto nimettiin 3D-digitoinnin ID:llä sekä _simplified-tekstillä.

TYA_244-390_R Rannerengas

Paimio, Spurila, (Kalmisto A) 1984

Löytölaji

Rannerengas

Kokoelmanumero

TYA 244:390

Materiaali

Pronssi

Säilytyspaikka

Turun yliopiston arkeologian oppiaine

Mitat (cm)

6.4x6.1x1.5

Löytöpaikka

Paimio

Hakusanat

Rannerengas; Rautakausi; Esihistoria; Pronssi

Löytöpaikan Muinaisjännöstunnus

577010020



3D-digitointiprosessi

Käytetty kalusto	Nikon D750 + Nikkor 60 mm micro	
Kalibrointi	Ei	
Esikäsittely	Rawtherapee: tiedostomuodon muunto NEF => TIF	
Käsittely	RealityCapture: 1. Align. 2. Build reconstruction (high). 3. Polygonimäärän rajoitus simplify tool -työkalulla (type = absolute, target triangle count = 12 000 000). 4. Colorize, texture (teksturointivaiheessa käytetty .tif-kuvista tuotettuja .png-muotoisia maskeja, resoluutio 8192x8192). 5. Export OBJ.	
Jälkikäsittely	Blender: 1. Import OBJ. 2. Asettaminen origoon ja oikein päin. 3. Tekstuurin korjaus. 4. Export OBJ_original. 5. Digitaalisen mittakaavan liittäminen 3D-malliin. 6. Export GLTF_original GLTF embedded -muodossa. 7. Yksinkertaistetun mallin laskettaminen mesh decimate -työkalulla. 8. Export GLTF_simplified GLTF embedded -muodossa.	
Pvm	6.3.2020	Kuvaus A. Debenjak-ljäs. Foldio 360-ministudio, 5500 kelvin studiovalot, valkoinen tausta. Kuvattu jalustalla, f/16, sp 1/5s. ISO 100.
Kuvia / skannauksia	518	
Alkuperäisen 3D-digitoinnin polygonimäärä		11990948
Yksinkertaistetun 3D-digitoinnin polygonimäärä		394760
3D-digitoinnin pinnan käsittely	Ei	
3D-digitoinnin pinnan silotus	Ei	
Tekstuurin muokkaus	Blender: tekstuurin muokkaus Texture paint -valikon clone-työkalulla.	
Muut huomiot		

Tiedostolistaus

Alakansio

DNG	DSC_1627.dng – DCS_2179.dng, välistä poistettu yksi kuva.
TIF	Jaoteltuna alakansioihin DSC_1627.tif – DSC_2179.tif, välistä poistettu yksi kuva.
PNG	DSC_1627.png – DSC_2179.png, välistä poistettu yksi kuva.
GLTF_original	TYA_244-390_R_original.gltf
GLTF_simplified	TYA_244-390_R_simplified.gltf
OBJ_original	TYA_244-390_R_original.mtl, TYA_244-390_R_original.obj, TYA_244-390_R_original.tif
RC	TYA_244-390_R_VALMIS.rcproj + tiedostokansio
Työvaihekuvia	TYA_244-390_tekstuurin_muokkaus.tif



Tämä teos on laaja tietopaketti arkeologisten kokoelmien 3D-digitoinnista. Se kattaa digitointiprosessin suunnittelun, digitointimenetelmän valinnan ja digitoinnin toteutuksen sekä 3D-aineiston tallentamisen ja jakamisen. Myös 3D-digitointiin liittyvät tieteelliset ja eettiset käytännöt esitellään.

Turun yliopiston arkeologian oppiaineen, Turun museokeskuksen ja Aboa Vetus & Ars Nova -museon yhteishanke vuosina 2019–2020 keskittyi esinekokoelmien 3D-digitointiin. Tämä kirja on hankkeen tulos, ja se tuo 3D-digitointimenetelmät arkeologisen tutkimuksen, opetuksen, konservoinnin ja yleisötyön käyttöön helposti ymmärrettävässä muodossa.



Arkeologia
Turun yliopisto