

KATSAUS

Nikolai Paukkonen

Kännykkä, pilvi ja tekoäly? Fotogrammetria- ja NeRF- ohjelmistojen vertailua arkeologien tarpeisiin

Johdanto

Digitaalisesta 3D-fotogrammetriasta on tullut arkinen osa suomalais-ta kenttäärkeologiaa 2010- ja 2020-luvuilla. Tyypillisesti menetelmää käytetään ottamalla kuvasarja digitaalijärjestelmäkameralla, georeferoimalla se käyttäen erilaisia tähyksiä tai muita tunnettuja pisteitä, ja prosessoimalla se graafisen käyttöliittymän ohjelmistoilla, tyypillisimmin Agisoftin Metashapella (Paukkonen 2024). Lopputuloksen perusteella voidaan tehdä esimerkiksi kaksiulotteisia ortokuvia, poikkileikkauksia ja muita visualisointeja tutkituista kohteista, puhumattakaan erilaisista kolmiulotteisuutta hyödyntävistä analyyseistä. Menetelmäs-tä on tullut vuosien saatossa helppokäyttöinen ja edullinen vaihtoehto erilaisten arkeologisesti kiinnostavien ilmiöiden mittausdokumentointiin ja esittelyyn. Suomalaisessa arkeologiassa ensimmäisiä askeleita 3D-fotogrammetrian parissa otettiin jo 1990-luvun lopulla ja 2000-luvulla (esim. Koistinen 2000; Heiska 2008), ja 2010-luvun kuluessa menetelmä alkoi vakiintua osaksi kenttäärkeologien tavanomaisia dokumentointimenetelmiä (esim. Haggrén et al. 2014; Saipio 2014; Lehtonen & Aalto 2015; Debenjak 2015). Meriarkeologiassa siitä on tullut jopa joh-tava keino dokumentoida hylkyjä (Marila & Ilves 2021: 345).

Yksi 3D-fotogrammetrian käytön hidasteista on ollut sen vaatima laskentateho. Mallin automaattisessa prosessoinnissa saattaa tietokoneen ominaisuuksista riippuen kestää tunteja, minkä lisäksi georeferointi vaatii käyttäjän työpanosta. 5G-teknologian yleistyttyä ja älypu-

helinten kameroiden kehittymisen myötä mobiililaitteilla tehtävä ja pilvipalvelussa prosessoitava fotogrammetria on alkanut muuttua vartenotettavaksi vaihtoehdoksi perinteiselle työskentelytavalle. Tässä katsauksessa tarkastelenkin menetelmän tarkkuutta ja luotettavuutta verrattuna järjestelmäkameralla kuvattuihin ja kotitietokoneella prosessoituihin malleihin.

Applen iPhone Pro -sarjan puhelimissa on ollut jo joitakin vuosia LiDAR-sensori, jota on voitu käyttää 3D-mallien tuottamiseen mobiilisti, ja jota on hyödynnetty myös arkeologisissa yhteyksissä. Kyseiset puhelinmallit maksoivat kuitenkin vuonna 2024 toista tuhatta euroa, eivätkä ne hinnastaan huolimatta ole täysin luotettavia (Halvardsson 2023; Paukkonen 2023). Niiden sijaan tarkastelen nyt fotogrammetriaan perustuvia ohjelmistoja, jotka toimivat myös edullisemmissä Android-puhelimissa. Puhelimen kameran on oltava riittävän laadukas, mutta esimerkiksi tässä kokeilussa käytetty vuoden 2022 Honor 70 -puhelin on suhteellisen edullinen ja silti riittävän hyvälaatuinen.

Eri ohjelmistojen vertailu ja niiden tuotosten osoittaminen riittävän tarkoiksi useisiin arkeologisen mittausdokumentoinnin tarpeisiin voisi saada useammat kenttätöiden tekijät kokeilemaan näitä lähestymistapoja. Tehokas ja kattava 3D-mittausaineistojen saaminen suomalaisen arkeologiyhteisön saataville esimerkiksi julkisen verkkopalvelun kautta on yhä toteutumaton tavoite, mutta näillä ohjelmistoilla tuotettuja malleja voi käyttää avuksi myös perinteisten PDF-muotoisten raporttien tuottamiseen.

Tutkimuskohteeksi ja esimerkkitapaukseksi valikoitui Helsingin Kulosaaren pronssikautinen röykkiö (91010020), joka sijaitsee Kulosaaren puistotien ja metroradan välissä, lähellä metroaseman pysäköintialuetta (ETRS-TM35FIN P: 6674090 I: 389339, 13.00 m mpy) (kuva 1). Ensimmäisen kerran kohde on inventoitu jo 1930-luvulla, jolloin sen todettiin olleen vahingoittunut ryöstökaivamisen seurauksena. Vieressä sijainneesta kaivetusta ja poistetusta suuremmasta röykkiöstä löytyi hiiltä ja palanutta luuta (Cleve 1931: 1–2). Kohde valittiin kokeilua varten kolmesta syystä: ensinnäkin pronssikautiset röykkiöt ovat erinomaisia kohteita havainnollistamaan fotogrammetrian hyötyjä dokumentoinnissa, sillä yksittäiset kivet erottuvat 3D-mallissa hyvin ja mallin toteuttaminen on huomattavasti nopeampaa kuin käsin piirtäminen tai takymetrimittaus. Toiseksi röykkiö on poikkeuksellinen Helsingin pronssikau-

tisten röykkiöiden joukossa sikäli, että sitä ei ole poistettu tai kaivettu – useimmat muut Helsingin säilyneistä pronssikautisista röykkiöistä ovat rekonstruoidussa asussa (Lehtosalu 1962: 81–83; Maaranen 2012: 1–2). Niinpä nyt tehdyllä mittausdokumentoinnilla voi olla arvoa myös mahdollisia jatkotutkimuksia varten. Kolmanneksi röykkiökohteet ovat geometrisesti melko monimutkaisia kohteita, joten jos sellainen voidaan mallintaa oikeellisesti fotogrammetrian avulla, voidaan olettaa menetelmän toimivan myös yksinkertaisemmissa kohteissa. Poikkeuksen tälle muodostavat tasaiset ja yksiväriset pinnat tai muuten yksitoikkoiset kohteet, joihin 3D-fotogrammetria ei sovellu kovin hyvin.

Menetelmät

Laitteisto ja ohjelmistot

Mittauksissa käytettiin Canon EOS-850D -järjestelmäkameraa (julkaistu 2020). Kamerassa on 22,3 × 14,9 mm CMOS-kenno (noin 24,1 tehollista megapikseliä) ja ISO-herkkyysalue 100–25600 (Canon Finland 2024).



Kuva 1. Helsingin Kulosaaren pronssikautinen röykkiö kuvattuna lounaasta. Taustalla Kulosaaren puistotie. Etualalla valkoinen ja suorakulmainen 100 x 100 mm fotogrammetriaan soveltuva tähyskulma. Kuva: N. Paukkonen.

Käytössä ollut objektiivinen oli Canon EF-S 18–55 mm IS STM, joskin kaikki kuvat otettiin lukitulla 18 mm polttovälillä kalibroinnin säilymiseksi. Canon EOS-850D on vuoden 2024 markkinoilla oleviin kameroihin verrattuna melko edullinen tavallisille kuluttajille tarkoitettu kamera, mutta silti riittävän kestävä ja laadukas arkeologisen 3D-fotogrammetrian tarpeisiin.

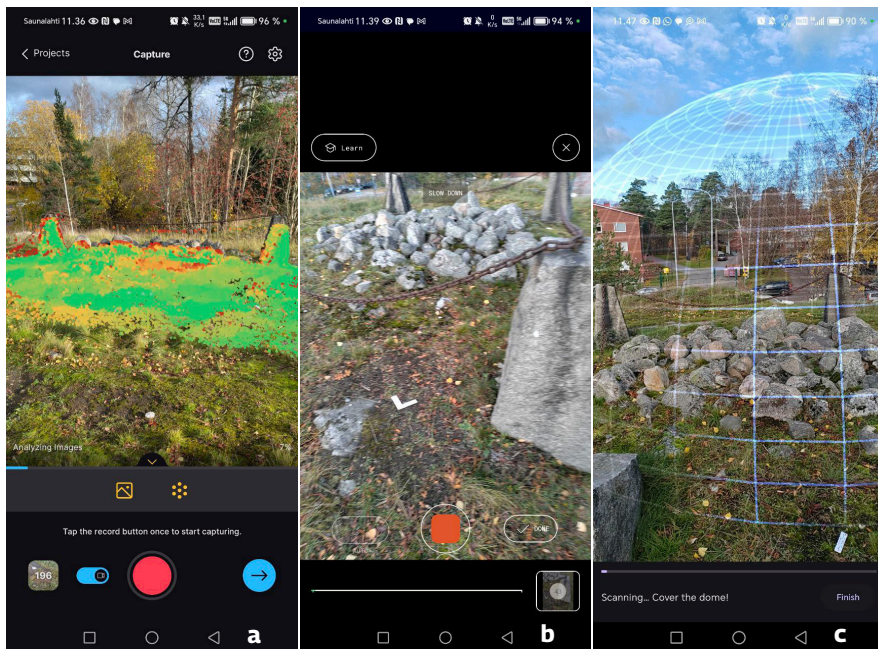
Järjestelmäkameralla otettujen kuvien lisäksi testissä kokeiltiin kolmea erilaista mobiilipohjaista fotogrammetriasovellusta. Kaikkien kohdalla käytetyssä Honor 70 -matkapuhelimessa on oikeastaan kolmoiskamera, mutta fotogrammetriaan käyttökelpoisin on sen 54 megapikselin pääkamera Sony IMX800 1/1.49" sensorilla ja f/1.9 aukolla (polttoväli 27 mm ekvivalentti) (Honor 2020). Puhelin on melko tavallinen Android-laite, ja se julkaistiin jo vuonna 2022.

Agisoftin Metashape (ja sen aiempi versio Photoscan) on ollut suosittu fotogrammetriaohjelmisto suomalaisessa arkeologiassa ainakin viimeisten kymmenen vuoden ajan (Paukkonen 2024: 8; esimerkki varhaisesta käytöstä Hakamäki et al. 2013). Ohjelmalla on selkeä graafinen käyttöliittymä, sitä on käytetty yliopistojen opetuksessa ja siitä on saatavilla ilmainen kokeiluversio, joten sen suosiolle on selkeät syyt (Debenjak-Ijäs 2021: 29). Agisoft on venäläinen yritys, joten Ukrainassa käytävän kansainvälisen oikeuden vastaisen sodan ja siitä seuranneiden sanktioiden vuoksi sen lisensoinnissa ja maksuissa saattaa kuitenkin ilmetä häiriöitä.

Kaupallisten ohjelmien joukossa alkujaan slovakialaisen Capturing Realityn kehittämä RealityCapture on varteenotettava kilpailija Metashapelle, ja se on viime vuosina yleistynyt myös suomalaisten arkeologien parissa (Paukkonen 2024: 7–8). RealityCapture tarjoaa helppokäyttöisen – joskin Metashapesta merkittävästi eroavan – graafisen käyttöliittymän, tukee erilaisia georeferointimenetelmiä ja tarjoaa yhteensopivuuden myös esimerkiksi laserkeilausaineistojen kanssa. Vuodesta 2024 ohjelma on kaiken lisäksi ollut saatavilla ilmaislisenssillä esimerkiksi opiskelijoille, harrastajille ja alle 1 miljoonan dollarin liikevaihdon yrityksille (Porter 2024). Haittapuolena voidaan nähdä riippuvaisuus Epic Gamesista, joka on ohjelmiston nykyinen omistaja – RealityCapturen käyttö edellyttää Epic Gamesin erillisen portaalin asentamista, eikä RealityCapture toimi aina luotettavasti ilman Internet-yhteyttä, vaikka laskenta sinänsä tapahtuukin paikallisesti. Lisäksi RealityCapturen

laskentateho nojaa CUDA-ohjelmointirajapintaan (Compute Unified Device Architecture) perustuviin näytönohjaimiin, joten se vaatii Nvidia-yrityksen valmistaman näytönohjaimen toimiakseen kunnolla.

RealityScan on RealityCapturen mobiiliversio. Se julkaistiin vuonna 2022 ensin iOS-laitteille, minkä jälkeen se tuli saataville myös Android-alustalle (Epic Games 2022). Applikaatio tarjoaa ohjatun skannauksen vaihtoehdon: käyttäjä liikuttaa kameraa ympäri dokumentoitavan kohteen, ja ohjelma ottaa kuvat automaattisesti (kuva 2). Laskenta tapahtuu Capturing Realityn pilvipalvelussa, ja ihanneolosuhteissa ohjelma näyttää jo kuvaushetkellä palautetta siitä, miltä alueilta kuvia on tarpeeksi ja mistä niitä tarvitaan lisää. Valmiin mallin voi joko viedä ulos tekstuureineen OBJ-muotoisena 3D-tiedostona, tai sitten sen voi ladata suoraan SketchFab-palveluun, jossa on mahdollista jakaa ja kat-



Kuva 2. Eri mobiiliapplikaatioiden käyttöliittymiä, jotka näyttävät kuvaamisen etenemisen hyödyntäen lisätyn todellisuuden teknologiaa, a) RealityScan alkaa piirtää alustavaa pistepilvettä ruudulle. Väritykset ilmaisevat, missä kuvat kattavat jo riittävän osan kohteesta ja missä pitäisi kuvata lisää, b) Polycam ilmoittaa kuvan yläreunassa, mikäli käyttäjä liikkuu liian nopeasti, mutta ei muuten kerro prosessin vaiheesta, c) Luma AI:n ohjatun kuvaamisen tilassa käyttäjä piirtää aluksi ruudulla kohteen päälle kupolin, joka värjäytyy sitä mukaa kun kuvaaminen etenee. Kuvat: N. Paukkonen.

sella 3D-malleja suoraan Internet-selaimessa. Toimiakseen RealityScan vaatii periaatteessa hyvän Internet-yhteyden, kuten muutkin tässä tutkimuksessa kokeillut mobiiliapplikaatiot. Periaatteessa kaikissa tässä vertailuissa ohjelmistoissa on mahdollista joko lähettää kuvattu aineisto jälkikäteen tai kuvata malli ilman Internet-yhteyttä ja ladata aineisto palvelimelle myöhemmin, mutta käyttö on tällöin epävarmempaa eivätkä esimerkiksi Luma AI:n tai RealityScanin ohjatut toiminnot ole silloin käytössä.

Yhdysvaltalainen Polycam on toinen sekä Androidille että iOS:lle saatavilla oleva 3D-skannaamiseen erikoistunut ohjelma. Siinä on myös tuki iPhonen ja iPadin Pro-mallien LiDAR-sensorille, ja tätä lähestymistapaa onkin tutkittu kulttuuriperintöalan tarkoituksiin jo aiemmin sillä lopputuloksella, että järjestelmäkameralla ja tietokoneella tehty ”perinteinen” fotogrammetria tuotti geometrisesti oikeellisempia malleja kuin Polycam (Vlachos et al. 2022: 8–9). Polycam tarjoaa saman tyyppisen ohjatun kuvaustilan kuin RealityScan, ja myös prosessointi tapahtuu samaan tapaan pilvipalvelussa. RealityScaniin verrattuna siinä on kuitenkin huomattavasti enemmän toimintoja, joskin ilmaisversio tarjoaa pelkästään OBJ-muotoisen ulosviennin. Maksullinen versio tukee useita muita verkko- ja pistepilviformaatteja ja mahdollistaa rajattoman mallintamisen.

Myöskin yhdysvaltalaisaustainen Luma AI edustaa uutta lähestymistapaa valokuvaperusteiseen mittausdokumentointiin. Se käyttää vuonna 2020 Nvidian näytönohjaimille kehitettyä neuraalista säteilykenttämallia (Neural Radiance Field [NeRF]; Mildenhall et al. 2020), joka täydentää perinteistä fotogrammetriaa tekoälyn generoimilla kuvilla (Palestini et al. 2024: 472–75) ja visualisoi lopputuloksen pistepilvien tai verkkojen sijaan niin kutsutuilla kolmiulotteisilla Gaussin roiskejakaumilla (3D Gaussian splat) (Wu et al. 2024). Menetelmä on erityisen hyvä visualisoinnin kannalta, sillä lopulliset kuvannukset ovat erittäin näyttäviä perinteiseen digitaaliseen fotogrammetriaan verrattuna. Erityisen hyvin NeRF kuvaa läpinäkyviä, kiiltäviä tai epävakaita pintoja (kuten puiden lehtiä), joiden kohdalla tavallinen digitaalifotogrammetria on ollut perinteisesti huono lähestymistapa (Gainz 2024: 2; Kocsis & Takáč 2024; Palestini et al. 2024: 474–475).

Tekoälyn generoima data osana mittauksia saattaa herättää epäilyksiä luotettavuudesta, mutta mikäli perusteena oleva kuvasarja tai video

on otettu kattavasti, ei lopullisen geometrian pitäisi poiketa todellisuu-
desta. Luma AI:lla on ainakin toistaiseksi tarjolla ilmaislisenssi, jolla
tehtyjä malleja voi myös tallentaa GLB- ja OBJ-muodoissa. Ohjelma toi-
mii sekä Android- että Apple-laitteilla, mutta kaikki laskenta tapahtuu
Luma Labsin servereillä. Kuvatun datan siirtäminen palvelimille vaatii
hyvän internetyhteyden, mutta Luma AI mahdollistaa myös aiemmin
kuvatun videotiedoston lähettämisen – niinpä yhteyden ei tarvitse olla
kunnossa kuvaushetkellä.

NeRF-menetelmän ja fotogrammetrian yhdistäminen on alan vii-
meisimpiä mullistuksia, ja kehitystyö on nopeaa. Lopullisia vastauk-
sia menetelmän käyttökelpoisuudesta arkeologian kannalta ei ole vielä
saatavilla, mutta useat tutkijat ovat suhtautuneet NeRFiin toiveikkaasti
(esim. Croce et al. 2023: 453; Vandenabeele et al. 2023: 1604; Croce et al.
2024: 16–17).

Vertailumenetelmä

Eri ohjelmistojen ja laitteiden tarkkuuden vertailu edellyttää systemaati-
tista lähestymistapaa. Tarkkuus jaetaan yleensä luonnontieteissä ja ti-
lastotieteessä ulkoiseen tarkkuuteen (accuracy) ja sisäiseen tarkkuuteen
(precision). Sisäisesti tarkoissa tuloksissa saman kohteen toistuvat mit-
taukset antavat aina lähes saman tuloksen. Esimerkiksi samalla mene-
telmällä tuotetuissa 3D-malleissa kuvatun kiven leveys voisi olla joka
mittauksessa lähes sama, jolloin mittaus olisi sisäisesti tarkka. Ulkoi-
sesti tarkat mittaukset puolestaan vastaavat mitattavan suureen todellista
arvoa – esimerkiksi edellisessä esimerkissä mainitun kiven leveys voisi
todellisuudessa olla jotakin aivan muuta kuin mitä mittaukset väittävät,
vaikka ne olisivatkin keskenään samanlaisia – tällöin mittaus olisi
ulkoisesti epätarkka (esim. Grubbs 1973; Prenesti & Gosmaro 2015).
Tässä koeasetelmassa ollaan kiinnostuneita ensisijaisesti eri menetel-
mien ulkoisesta tarkkuudesta eli käytännössä siitä, vastaavatko mallin
omassa koordinaatistossa tehtävät mittaukset oikean maailman etäi-
syyksiä, muotoja ja koordinaatteja.

Yksi vaihtoehto tutkia erilaisten 3D-mallien ulkoista tarkkuutta on
verrata niitä tunnetusti tarkkaan malliin. Esimerkiksi laadukkaalla la-
serkeilaimella mitattua pistepilveä on voitu käyttää tällaisena standar-
dina, jota vasten fotogrammetrisesti tuotettujen mallien tarkkuutta voi-

daan arvioida erilaisten työkalujen avulla (esim. Paukkonen 2023). Tässä katsauksessa päätin kuitenkin käyttää yksinkertaisempaa menetelmää, jonka tuloksia on helppo arvioida, vaikka ei olisikaan erikoistunut mittausteknologiaan tai fotogrammetriaan. Käytössäni oli muovisia tähyskulmia, joissa olevien tähyypisteiden välinen etäisyys oli tunnettu ja joita voitiin käyttää mittauksen perustana. Kolmea tähystä ja niiden välisiä etäisyyksiä käytettiin kiintopisteinä mallien prosessointivaiheessa, kun taas loput tähyskulmat jätettiin rekisteröimättä. Vertaamalla lopputuloksena olevista malleista otettuja digitaalisia mittauksia tunnettuihin tähysten etäisyyksiin (100 mm) voitiin arvioida mallien ulkoista mittatarkkuutta.

Näiden tunnettujen etäisyyksien lisäksi oli hyödyllistä vertailla eri malleissa esiintyviä pidempiä etäisyyksiä. Tämä toteutettiin mittaamalla valmiista malleista useampien tähyskulmien välisiä etäisyyksiä. Koska näin mitatut janat kulkivat kaikki epätasaisen röykkiön lävitse, ei tarkkaa todellisen maailman etäisyyttä ollut mahdollista mitata. Kuitenkin näin saatuja mittoja vertaamalla on mahdollista havainnoida eri ohjelmistoilla toteutettujen mallien sisäistä geometrista tarkkuutta. Jos esimerkiksi kaikissa malleissa mitatut 100 mm tähyvälit pysyisivät muutaman millin virhemarginaalissa, mutta tähyskulmien väliset erot olisivat useita senttejä, olisi mallin tarkkuuteen syytä suhtautua kriittisesti.

Mobiiliohjelmistoista yksikään ei tue tähysten käyttöä sellaisenaan. Ne toteuttavat oletettavasti kamerakalibraation automaattisesti, mutta yksikään käytetyistä mobiiliohjelmistoista ei salli kalibrointitietojen tarkastelua. Mallit prosessoitiin ensin ilman tähyksiä ja vietiin sitten CloudCompare-ohjelmistoon, jossa ne pakotettiin Align-työkalulla tähyksien mukaiseen mittakaavaan (CloudCompare [GPL Software] 2024). Tämän jälkeen mallien geometrista oikeellisuutta oli mahdollista vertailla keskenään ja suhteessa tunnettuihin mittoihin.

Tulokset

Aineisto kuvattiin 30.10.2024 noin klo 11–12 päivällä. Sää oli puolipilvinen, mikä takasi melko hyvät valaistusolosuhteet kuvaamiselle. Kohde oli kuvaamisen kannalta siistissä kunnossa lukuun ottamatta yhtä sen

ympärille asetetuista kivitolpista, joka oli kaadettu maahan. Esimerkiksi kasvillisuuden määrä ei haitannut kuvaamista. 20-bittiset mittakaavatähykset aseteltiin tasaisesti kohteen ympärille. Näistä lounaisinta käytettiin koko mallin asettamiseksi mittakaavaan, ja loput jätettiin kuvaan tarkkuuden arviointia varten. Järjestelmäkamerakuvia otettiin 119 kappaletta noin kuuden minuutin aikana. RealityScanilla kuvattiin ohjatussa kuvaustilassa 196 kuvaa noin viiden minuutin aikana. Polycamilla kuvattiin 201 kuvaa noin kolmessa minuutissa. Luma AI puolestaan kuvaa aineistonsa videomuodossa. Kuvatun videon pituus oli 2 minuuttia 30 sekuntia. Järjestelmäkameran JPG-muotoisten kuvien koko oli noin 15 MB, RealiytyScanin käyttämät .HEIF-muotoiset kuvat noin 1,2–1,5 MB ja Polycamin JPG-kuvat 1,3–1,5 MB. Luma AI:n videon koko oli 325 MB. Näin ollen kunkin mobiiliohjelmiston täytyi kyetä siirtämään yhteensä noin 200–300 MB edestä dataa mallin prosessointia varten.

Mobiiliapplikaatioilla kuvattujen mallien prosessointi vei aikaa vaihtelevasti. Kaikissa applikaatioissa valittiin parhaat mahdolliset laatuasetukset. RealityScan oli valmis ja katsottavissa jo noin puolen tunnin kuluttua kuvien ottamisesta. Polycamin mallissa kesti hieman pidempään, koska kuvien lataaminen palvelimelle näytti katkeavan, mikäli ohjelma ei ollut aktiivisesti auki puhelimessa. Malli oli kuitenkin ladattavissa ja katsottavissa jo noin tunnin kuluttua kuvien ottamisesta. Luma AI sen sijaan ilmoitti videota ladattaessa palvelimensä olevan kapasiteettinsa rajoilla. Aineisto siirtyi palvelimille muutamissa minuuteissa, mutta malli pysyi jonotustilassa useita vuorokausia. Aiempina kokeilukertoina Luma AI on kuitenkin tuottanut parin minuutin videoiden perusteella mallin noin parissa tunnissa. Kaikissa kolmessa applikaatiossa on se merkittävä puute, että ne eivät tarjoa mahdollisuutta printata prosessointiraporttia, joka kertoisi tarkasti käsittelyyn käytetyn ajan tai esimerkiksi lopputuloksen pikselitarkkuuden. Kuten Luma AI:n tapaus osoittaa, prosessointiajat pilvipalvelussa saattavat myös vaihdella palvelimen sen hetkisen käyttöasteen mukaan.

Kaikkien mittausten tulokset olivat erinomaisia, kun vertailtiin mallista mitattujen 100 mm tähyisten välisiä etäisyyksiä (taulukko 1). Keskimäärin mitatut etäisyydet eroavat todellisista mitoista vain muutamia millijä. Tämäkin ero johtunee osittain CloudComparessa klikatuista mittapisteistä – ruudulla näkyvästä tähyksestä kun on vaikea ottaa ai-

van tarkkaa keskikohtaa. Näin ollen näyttää selvältä, että testin ohjelmilla mitattujen mallien geometrinen tarkkuus on erittäin hyvä arkeologian vaatimuksia ajatellen.

Taulukko 1. 3D-malleista CloudComparaessa tehdyt mittaukset tähyksisteiden etäisyyksistä metreinä. Mittakaavatähyksistä tiedettiin etukäteen niiden todellinen pituus (ground truth), joka oli 100 mm. Luma AI:n kohdalla mallin raja-alue epäonnistui niin, että kaikkia pisteitä ei voitu mitata.

Ohjelmisto	1	2	3	4	5	6	7	Keski-arvo	Keskihajonta
Metashape	0,101	0,1	0,1	0,101	0,101	0,100	0,101	0,101	0,001
RealityCapture	0,101	0,099	0,093	0,100	0,102	0,100		0,099	0,003
RealityScan	0,102	0,102	0,100	0,096	0,101	0,101	0,102	0,100	0,002
Polycam	0,101	0,100	0,101	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,001
Luma AI	0,107	0,103	0,105					0,105	0,002

Kuitenkin vertailemalla kokonaisten tähyksikulmien välisiä pidempiä etäisyyksiä huomataan, että mallien välillä on useiden senttimetrien eroja (taulukko 2). Metashapen ja RealityCapturen mitat ovat varsin lähellä toisiaan – mittauksissa on eroa korkeintaan 6 mm – mutta mobiiliohjelmistoilla tehdyissä 3D-malleissa etäisyydet eroavatkin useita senttejä keskenään. Esimerkiksi mittauksessa 8 Polycam-mallista mitattu etäisyys on 2,735 m, kun taas Luma AI:n mallissa etäisyys on 2,753 m, eroa on siis noin 2 cm. Mittauksessa 12 eroa on jo 4,6 cm. Virheen suuruus kasvaa etäisyyden kasvaessa. Tämän kokoisen mittavirheen kanssa mobiilisovelluksia ei voida suositella käytettäväksi muiden kuin aivan pienten alueiden dokumentointiin, jos siihenkään. Jos oletetaan Metashapella ja RealityCapturella tehtyjen mallien olevan lähimpänä todellisia etäisyyksiä, näyttäisi Luma AI tuottavan malleja, joiden tarkkuus on kaikkein lähimpänä niitä. Keskihajonta on joka tapauksessa parin senttimetrin luokkaa, mikä saattaa tehdä lopputuloksesta liian epätarkan joihinkin arkeologisiin sovellutuksiin.

Taulukko 2. 3D-malleista CloudComparaessa tehdyt mittaukset tähyksulmien välisistä etäisyyksistä. Sarakkeet esittävät kahden tähyksen välistä mittausta metreissä. Etäisyyksistä ei ole saatavilla todellista maastossa tehtyä mittausta, mutta keskihajontaa tarkastelemalla voi havaita, että mallien välillä on selkeitä eroja, ja että erot kertautuvat etäisyyksien kasvaessa.

	8	9	10	11	12
Metashape	2,717	2,912	2,866	5,001	5,010
RealityCapture	2,720	2,910	2,872	5,002	5,008
RealityScan	2,753	2,95	2,908	5,085	5,093
Polycam	2,735	2,929	2,886	5,039	5,046
Luma AI	2,712	2,901	2,863	4,998	5,008
Keskihajonta	0,014	0,016	0,016	0,034	0,035
Mobiiliohjelmistojen keskihajonta	0,009	0,011	0,011	0,023	0,023

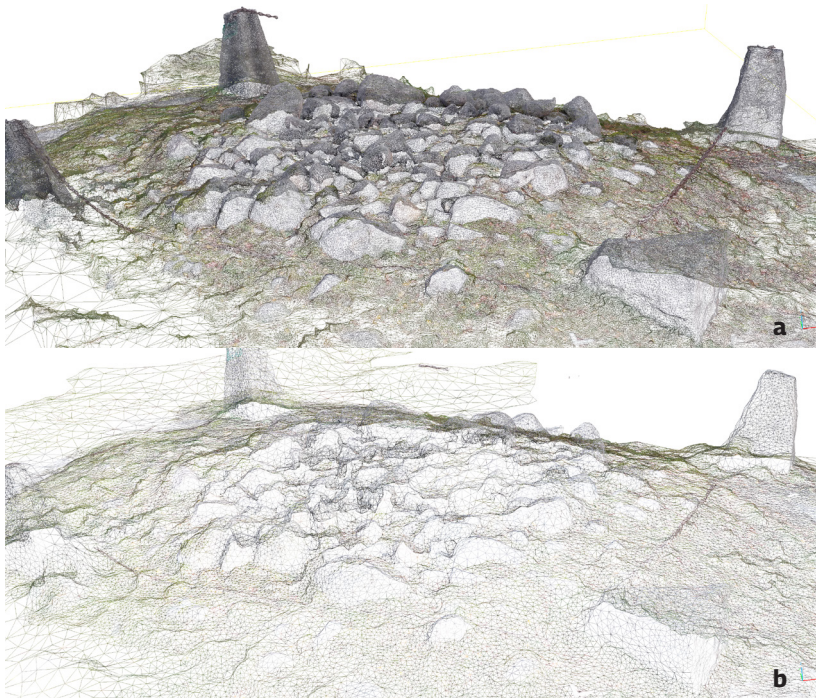
Taulukossa 2 havaittavia virheitä voidaan selittää muutamalla tekijällä. Ensinnäkin mallien pakottaminen mittakaavaan yksittäisen tähyksulman perusteella voi aiheuttaa sen, että pienet eroavaisuudet tähysten merkitsemisessä kumuloituvat, kun siirrytään tarkastelemaan suurempia etäisyyksiä. Toiseksi fotogrammetriaohjelmistot suosivat automaattikassaan selkeästi erottuvia ja selkeän muotoisia kohteita (esim. Westoby et al. 2012: 302–303; Luhmann et al. 2023: 473–474). Huolimatta siitä, että tähyksiä ei erikseen käyttäjän toimesta tunnistettu, olisivat ohjelmistot siis osanneet tarttua hyvin tunnistettaviin tähyksiin ja mallintaa ne tarkasti, mutta onnistuneet huonommin niitä ympäröivien epämääräisempien alueiden kohdalla. Jokaisen nyt testatun ohjelmiston koodi on suljettua eikä kaikkia käytössä olevia algoritmeja ole julkistettu, joten varmuutta tästä ei ole. Näiden seikkojen lisäksi synnä lienee kuitenkin se, että mobiiliohjelmistot eivät ylipäänsä ole vielä riittävän hyviä tuottaakseen tarkkoja lopputuloksia.

Mallien vertailu paljastaa lisäksi eroavaisuuksia yksityiskohtaisuudessa niin tekstuuriin kuin muodonkin suhteen. Polygonien määrässä mallien välillä onkin suurta vaihtelua (taulukko 3). Metashapea ja RealityCapturea lukuun ottamatta jokainen ohjelmisto käytti omaa kuvasarjaansa, joten mallit eivät kata aivan samaa aluetta. Siitä huolimatta polygonien määrän mittakaavaerot ovat selkeät, ja niissä voidaan huo-

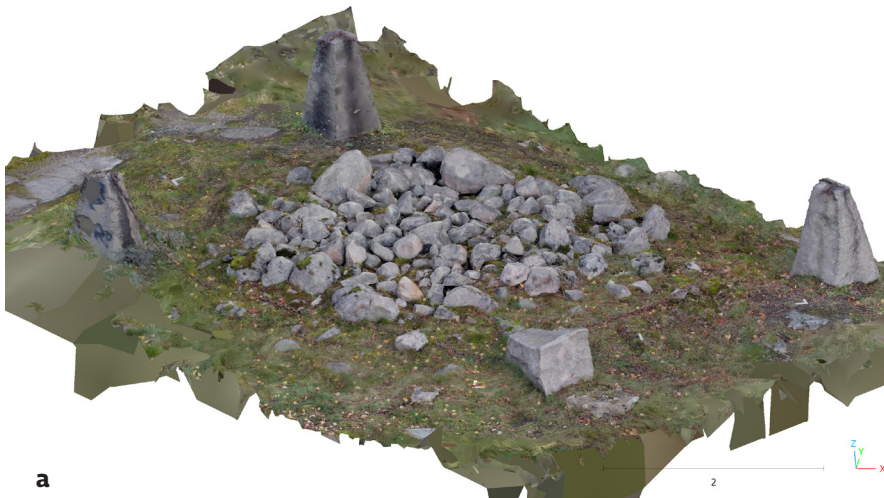
mata mobiilivaihtoehtojen suuri ero perinteisiin PC-fotogrammetriaohjelmistoihin nähden. Polycam rajoittaa polygonejaan selvästi keinotekoisesti, sillä luku on tasan 250 000, ja kokeiltaessa matalammilla asetuksilla tulokseksi saatiin tasan 100 000 polygonia. Silmämääräisesti arvioituna kaikki mallit näyttävät kuitenkin järkevilä, ja niitä voidaan käyttää esimerkiksi kenttätöiden dokumentoinnin tarpeisiin (kuvat 3 ja 4).

Taulukko 3: Polygonien määrät eri malleissa. Mitä enemmän polygoneja, sitä yksityiskohtaisempi malli. Lukua voidaan ajatella 3D-mallin resoluutiona.

Ohjelmisto	Polygonien määrä
Metashape	12 801 705
RealityCapture	13 624 102
RealityScan	1 000 060
Polycam	250 000
Luma AI	999 175



Kuva 3. Värjättyjä verkkomalleja lounaasta katsottuna CloudComparaessa. a) RealityScan, b) Polycam. Kuvat: N. Paukkonen.



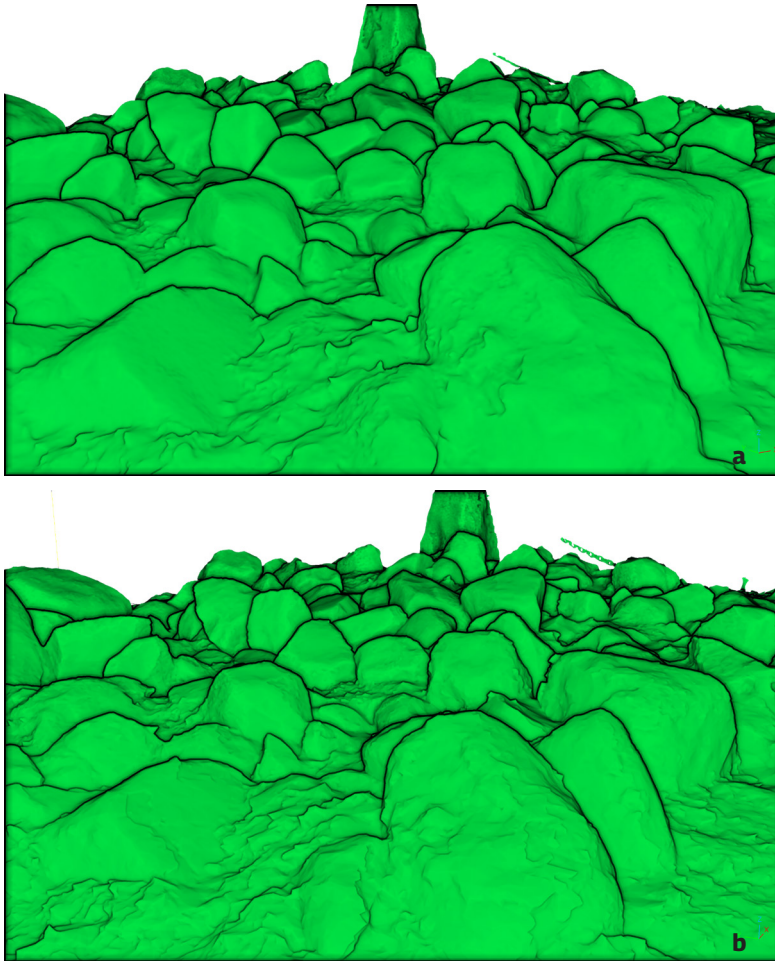
a



b

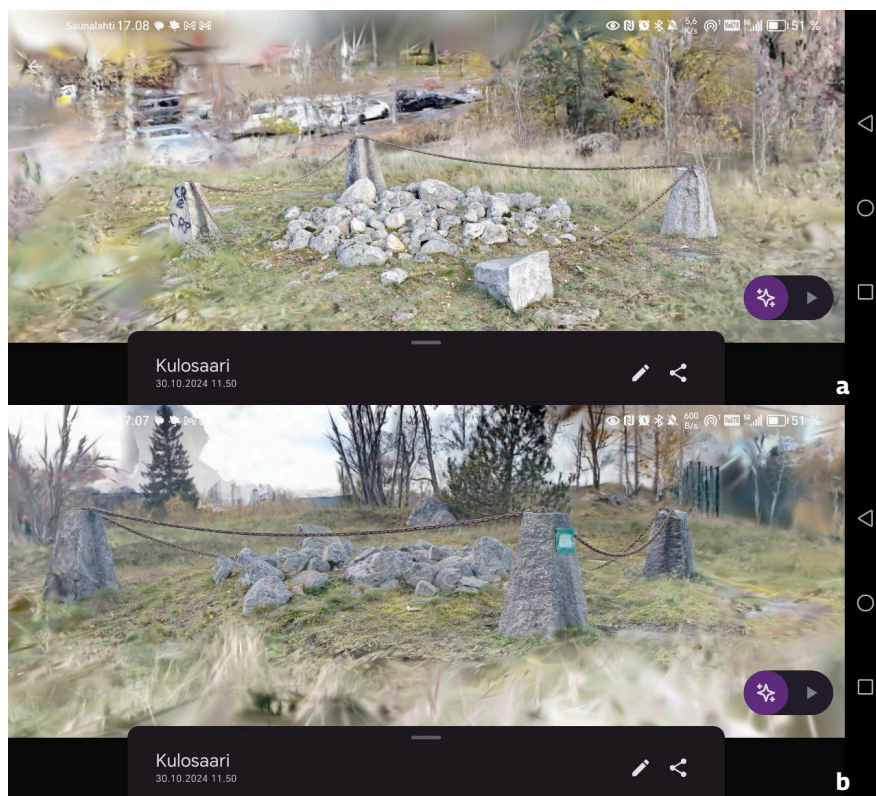
Kuva 4. Malleja tekstuurin kanssa. a) RealityScan, b) Polycam. Kuvat: N. Paukkonen.

Vaikka mallien geometriat olisivat sinänsä oikeellisia, eivät kaikkein pienimmät yksityiskohdat kuitenkaan välttämättä erotu, jos polygoneja tai pisteitä on liian vähän. Tämä on syytä ottaa huomioon käyttötarkoituksia arvioitaessa. Tässä suhteessa Metashape ja RealityCapture vievät yhä voiton nyt kokeilluista mobiiliapplikaatioista, sillä niissä on moninkertaisesti enemmän polygoneja kuin esimerkiksi Polycamissa. Toisaalta polygonien määrän mielekkyydellään on rajansa. Esimerkiksi RealityCapturen ja RealityScanin välillä ei silmämääräisesti ole merkittävää eroa, vaikka RealityCapturen mallissa niitä on yli kymmenkertaisesti enemmän (kuva 5).



Kuva 5. Lähikuvia teksturoidottomista 3D-malleista CloudCompassessa. a) RealityCapture, b) RealityScan. Kuvat: N. Paukkonen.

Luma AI:n tuottama OBJ-muotoinen 3D-malli ei erotu edukseen suhteessa muiden applikaatioiden tuloksiin, joskin lopputulos on joka tapauksessa laadultaan käyttökelpoinen, ja muista mobiilimalleista poiketen se piirsi myös kohdetta ympäröivän ketjun. Luma AI:n etu on kuitenkin ennen kaikkea NeRF-teknologian tuottamassa visualisoinnissa, joka ilmenee esimerkiksi kolmiulotteisena piirtyvänä ympäröivänä kasvillisuutena ja jopa taustan rakennuksilla ja ajoneuvoilla, jotka ovat kymmenien metrien päässä kuvauspaikalta (kuva 6). Valitettavasti NeRF-perustaisten mallien tiedostoformaattien käsittely on toistaiseksi hankalaa ja monimutkaista: nytkin käsittely ja mittaukset tehtiin muuntamalla tiedosto tavalliseksi OBJ-tiedostoksi, joten käytännössä



Kuva 6. Kuvakaappaus röykkiön 3D-mallista Luma AI:n omassa ohjelmassa. Menetelmä tuotti myös kohtalaisen hienolta näyttävän taustamaiseman, vaikka aineisto kuvattiin samalla tavalla kuin muiden ohjelmien kohdalla. Keskiössä olevan röykkiön geometrian oikeellisuus ei poikkea muista mobiililaitteilla toteutetuista malleista. a) Kuva lounaasta, b) kuva koillisesta. Kuvat: N. Paukkonen.

3D-Gaussin roiskejakaumia hyväksikäyttävillä malleilla on arvoa vain nimenomaan visualisoinnin kannalta. Esimerkiksi dynaamiselta näyttäviä valon heijastuksia erilaisilla pinnoilla voi esitellä tekemällä pyörähdysvideoita kohteiden ympäri. Tämän ominaisuuden käyttöarvo mitausdokumentoinnin kannalta ei kuitenkaan ole merkittävä.

Johtopäätökset

Yleisesti voidaan sanoa, että mobiiliapplikoiden luotettavuus ja tarkkuus ovat vain osittain riittäviä arkeologisiin kenttätyötarkoituksiin. Tarkastelemalla pelkkiä tähyskulmien sisäisiä mittoja näyttäisi siltä, että niiden tuottamien mallien geometria säilyy enimmäkseen oikeellisenä, ja Luma AI:ta lukuun ottamatta ne myös tuottavat lopullisen mallin niin nopeasti, että sen onnistuminen voidaan tarkastaa vielä saman työpäivän aikana kentällä. Kuitenkin kun tarkastellaan useampien tähyskulmien välisiä etäisyysmittauksia, voidaan mallien välillä havaita melkoisia eroja, jotka viittaavat siihen, että mallit poikkeavat toisistaan geometrisesti. Lisäksi polygoneja ja tekstuureja tarkastelemalla voidaan nähdä huomattavia eroja yksityiskohtien erottuvuudessa, mikä on syytä ottaa huomioon käyttökohdetta suunniteltaessa. Pronssikautisen röykkiön kaltaisen ilmiön keskeiset ominaisuudet tallentuivat kaikilla menetelmillä riittävän hyvin, kunhan kuvaaminen tehdään oikein ja kattavasti.

Eräs kasvava pilvipalvelujen ja tekoälyn käyttöön liittyvä huoli on niiden ekologinen jalanjälki (De Vries 2023; Li et al. 2023). Molemmat kuluttavat runsaasti sekä sähköä että vettä (jota käytetään konosalien jäähtytykseen). Arkeologia on verrattain pieni sektori ja muutamien satojen megatavujen kokoiset aineistot mitättömän kokoisia muiden kaupallisten käyttäjien joukossa, mutta siitä huolimatta on syytä nostaa myös esiin kysymys siitä, onko arkeologisten kenttätyömenetelmien tehokkuuden ja helppokäyttöisyyden paraneminen lisääntyvän luonnonvarojen kuluttamisen arvoista.

Toinen erityisesti pilvipalveluita käyttävien palveluiden ongelma liittyy tietoturvaan ja tietosuojaan. Kun kuva-aineistot prosessoidaan pilvessä, tarkoittaa se myös sitä, että data siirtyy palveluntarjoajan haltuun – fyysisesti siis esimerkiksi Yhdysvaltoihin, Kiinaan tai Venäjälle. Jotkin

arkeologiset tutkimuskohteet voivat olla arkaluontoisia tai salattavia. Esimerkiksi puolustushallinnon alueilla tehtävän tutkimuksen tai hau-
tausten kohdalla on syytä olla tarkkana.

Joka tapauksessa vuonna 2024 saatavilla olevat 3D-fotogrammetria-aplikaatiot toimivat kohtalaisen hyvin tavallisella Android-matkapuhelimella, kunhan vain Internet-yhteys on kunnollinen. Muutamista haittapuolista huolimatta onkin odotettavaa, että fotogrammetrisesti mitattu digitaalinen 3D-mittausaineisto tulee yleistymään entisestään. Luma AI:n käyttämä NeRF-teknologia vaikuttaa myös lupaavalta, mutta toistaiseksi applikaatio on liian epävarma toiminnassaan ja NeRF-aineistojen jatkokäsittely on hankalaa.

Nikolai Paukkonen on arkeologian väitöskirjatutkija Helsingin yliopistossa. Hänen väitöskirjansa aiheena on fotogrammetrian ja laserkeilauksen arviointi arkeologisen kenttätöiden menetelminä. Digitaalisten mittausmenetelmien lisäksi hän tutkii muun muassa tekoälyn käyttöä arkeologiassa, kaukokartoitusta, antiikin Kreikan arkeologiaa ja roomalaisten vesihuoltoa. <https://orcid.org/0000-0002-4072-9379>.

Bibliografia

- Canon Finland 2024. *Tekniset tiedot ja ominaisuudet – EOS 850D – Canon Oy*. Canon Finland. <https://www.canon.fi/cameras/eos-850d/specifications/> (Luettu 1.11.2024).
- Cleve, N. 1931. *Undersökning Av Gravrösen Invid Hertonsboulevarden*. Kaivausraportti, Muinaistieteellinen toimikunta, Helsinki.
- CloudCompare 2024. *CloudCompare*. <http://www.cloudcompare.org/> (Luettu 5.11.2024)
- Croce, V., Billi, D., Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L. & Véron, P. 2024. Comparative Assessment of Neural Radiance Fields and Photogrammetry in Digital Heritage: Impact of Varying Image Conditions on 3D Reconstruction. *Remote Sensing* 16(2): 301. <https://doi.org/10.3390/rs16020301>
- Croce, V., Caroti, G., De Luca, L., Piemonte, A. & Véron, P. 2023. Neural Radiance Fields (NeRF): Review and Potential Applications to Digital Cultural Heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-M-2-2023*: 453–460. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-453-2023>
- De Vries, A. 2023. The Growing Energy Footprint of Artificial Intelligence. *Joule* 7(10): 2191–2194. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>

- Debenjak, A. 2015. 3D-mallintaminen osana arkeologista arkea? Digitaalisen fotogrammetrian käyttö arkeologisessa dokumentoinnissa ja tutkimuksessa. *Muinaistutkija* 1/2015: 24–34.
- Debenjak-Ijäs, A. 2021. *Arkeologisten kokoelmien 3D-digitointi*. Karhunhammas 20. Turku: Arkeologia Turun yliopisto.
- Epic Games 2022. Epic Games Releases Free RealityScan iOS App for 3D Scanning. <https://www.epicgames.com/site/en-US/news/epic-games-releases-free-reality-scan-ios-app-for-3d-scanning> (Luettu 5.11.2024)
- Gainz, C. 2024. AI-Based NeRFs Scanning for Virtual Production. *ScienceOPEN.com*. <https://doi.org/10.14236/ewic/EVA2024.73>
- Grubbs, F. 1973. Errors of Measurement, Precision, Accuracy and the Statistical Comparison of Measuring Instruments. *Technometrics* 15, 1: 53–66. <https://doi.org/10.1080/00401706.1973.10489010>
- Haggrén, G., Knuutinen, T., Holappa, M. & Terävä, E. 2014. RAASEPORI Raaseporin linna. Koekaivauskertomus 2014. Kaivauskertomus, Museovirasto, Helsinki.
- Hakamäki, V., Hakonen, A., Moilanen, M., & Kuusela, J.-M. 2013. Pohjoissuomalainen miekkalöytö viiden vuosikymmenen takaa. *Artefactum* 2. Helsinki: Artefacta. Luettavissa <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/176916/Artefactum2.html?sequence=1>
- Halvardsson, A. 2023. Back Pocket Archaeology: An Analysis of Smartphone 3D Technology for Archaeological Field Survey in Sweden. Master Thesis, Stockholm University.
- Heiska, N. 2008. Marcus Lucretiuksen talon mittausdokumentointi. P. Castrén (toim.) *Domus Pompeiana – Talo Pompejissa: 175–180* Helsinki: Otava.
- Honor 2020. HONOR 70 Full Specification | HONOR MY. <https://www.honor.com/my/phones/honor-70/spec/> (Luettu 5.11.2024)
- Kocsis, G. & Takáč, O. 2024. Photogrammetry Through the Luma AI Application and the Possibilities of Its Use in Education. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches* 8(5): 43–51.
- Koistinen, K. 2000. 3D Documentation for Archaeology during Finnish Jabal Harûn Project. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*: 33, Part B5: 440–445.
- Lehtonen, H. & Aalto, I. 2015. Turku II/1/3. Rettigin tontti/Aboa Vetus -museon alue. Suuren kivitalon kellarin K94:9 arkeologinen kaivaus 2015. Kaivauskertomus, Museovirasto, Helsinki.
- Lehtosalo, V. 1962. Helsingin Pitäjän Kiinteät Muinaisjäännökset. Inventointiraportti, Museovirasto, Helsinki.
- Li, P., Yang, J., Islam, M. & Ren, S. 2023. Making AI Less ‘Thirsty’: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models. *arXiv.Org*. <https://arxiv.org/abs/2304.03271v3>. (Luettu 30.10.2024)
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. 2023. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 4th edition*. Berliini: De Gruyter.
- Maaranen, P. 2012. Maastokäynti / Helsinki Pronssikautiset Rökkiöt. Tarkastusraportti, Museovirasto, Helsinki.
- Marila, M. & Ilves, K. 2021. Maritime Archaeology in Finland: History and Future Tasks. *Journal of Maritime Archaeology* 16(3): 333–351. <https://doi.org/10.1007/s11457-021-09303-2>

- Mildenhall, B., Srinivasan, P.P., Tancik, M., Barron, J.T., Ramamoorthi, R. & Ng, R. 2020. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. A. Vedaldi, H. Bischof, T. Brox & J.-M. Frahm (toim.) *Computer Vision – ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science* 12346. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8_24
- Palestini, C., Meschini, A., Perticarini, M. & Basso, A. 2024. Neural Networks as an Alternative to Photogrammetry. Using Instant NeRF and Volumetric Rendering. A. Giordano, M. Russo & R. Spallone (toim.) *Beyond Digital Representation*: 471–482. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction. Switzerland: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36155-5_30
- Paukkonen, N. 2023. Towards a Mobile 3D Documentation Solution. Video-Based Photogrammetry and iPhone 12 Pro as Fieldwork Documentation Tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology* 6(1): 143–154. <https://doi.org/10.5334/jcaa.135>
- Paukkonen, N. 2024. Ten Years of Photogrammetry and LiDAR: Digital 3D Documentation in Finnish Archaeology between 2013–2022. *Fennoscandia archaeologica* XLI: 56–69. <https://doi.org/10.61258/fa.142220>
- Porter, J. 2024. Epic Details New Unreal Engine Pricing Plan for Non-Game Developers. *The Verge*. <https://www.theverge.com/2024/3/12/24098279/epic-unreal-engine-pricing-plan-non-game-developers-twinmotion-realitycapture> (Luettu 11.5.2024)
- Prenești, E. & Gosmaro, F. 2015. Trueness, Precision and Accuracy: A Critical Overview of the Concepts as Well as Proposals for Revision. *Accreditation and Quality Assurance* 20(1): 33–40. <https://doi.org/10.1007/s00769-014-1093-0>
- Saipio, J. 2014. Mikkeli (Ristiina) Kitulansuo C. Lapinraunion tutkimuskaivaus 29.9.–10.10.2014. Kaivauskertomus, Museovirasto, Helsinki.
- Vandenabeele, L., Häcki, M. & Pfister, M. 2023. Crowd-Sourced Surveying for Building Archaeology: The Potential of Structure from Motion (SfM) and Neural Radiance Fields (NeRF). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLVIII-M-2–2023:1599–1605. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1599-2023>
- Vlachos, A., Polyzoou, A. & Economides, A. 2022. Photogrammetry with LiDAR iPad Pro. *Proceedings of EDULEARN 2022, 14th International Conference on Education and New Learning Technologies, Palma de Mallorca, Spain, 4–6 July. IATED*: 9555–9563. <https://doi.org/10.21125/edulearn.2022.2308>
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M. & Reynolds, J. 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wu, T., Yuan, Y., Zhang, L., Yang, J., Cao, Y., Yan, L. & Gao, L. 2024. Recent Advances in 3D Gaussian Splatting. *Computational Visual Media* 10(4): 613–642. <https://doi.org/10.1007/s41095-024-0436-y>