

KATSAUS SYVYYSKAMERAPOHJASEEN 3D-SISÄTILAMALLINNUKSEEN

Matias Ingman^a, Matti Vaaja^a, Juho-Pekka Virtanen^b, Matti Kurkela^a, Marika Ahlavo^a, Hannu Hyypä^{a,c}

^a Aalto-yliopisto, Rakennetun ympäristön laitos, Aalto-yliopisto

^b Maanmittauslaitos, Paikkatietokeskus FGI

^c Metropolia Ammattikorkeakoulu, Kiinteistö- ja rakennusala

Tiivistelmä: Matterportin prosessointijärjestelmä luo 3D-malleja automaattisesti vaatimatta käyttäjältään paljoa asetuksia tai teknisiä taitoja. Koska järjestelmä on yhteensopiva usean eri laitetypin kanssa, suoritettiin laitevertailu käyttämällä Matterport Pro2 3D-syvyyskameraa, Ricoh Theta V -panoraamakameraa ja Leica BLK360 -laserkeilainta, jonka aineistoa prosessoitiin myös Leican omalla prosessointijärjestelmällä. Laitteilla kerättiin aineistoa kahdesta eri tilasta, ja molemmista saatiin tuloksena tuotettua kaikilla laitteilla pistepilvi ja kolmioverkkomalli, joita vertailtiin geometrisesti ja visuaalisesti. Kaikilla laitteilla saatiin tiloista kattava aineisto; BLK360 oli tarkin, erityisesti Leican prosessoinnilla, Matterport hieman oli heikompi, mutta visuaalisesti hyvä, ja Theta V:n tulokset olivat kuluttajakäyttöön sopivalla tasolla, joskin tarkkuus oli muita laitteita alempi. Matterportin prosessointijärjestelmällä todettiin saavan erityisesti tilojen suunnitteluun sopivia tuloksia, ja koska automaattiseen sisätilamallinnukseen käytettäviä laitteita on entistä helpommin saatavilla ja Matterportin prosessointi tarjoaa mallinnusprosessin automaattisesti, voi automaattisen 3D-sisätilamallinnuksen potentiaalin käyttäjämäärä kasvaa huomattavasti.

JULKAISTU

28.12.2021

AVAINSANAT

Sisätilamalli, 3D-malli, syvyyskamera, laserkeilain, panoraamakamera

I. JOHDANTO

Sisätilojen automaattinen 3D-mallinnus on kasvanut viime vuosien aikana, ja myös kuluttajamarkkinoille on suunnattu automaattista mallinnusta hyödyntäviä laitteita ja ohjelmia (Pulcrano ym., 2019; Kersten ym., 2016). Tämä paitsi helpottaa 3D-mallien tuottamista, myös tuo tekniikan suuren käyttäjämäärän ulottuville, mikä puolestaan lisää potentiaalista 3D-mallien määrää ja niiden laajamittaista käyttöä.

Perinteisesti tarkkaa 3D-mittadataa on kerätty laserkeilaimella, jolla voidaan kerätä tilasta tarkkaa pistepilvidataa, mutta keilaimet ovat usein kalliita (Lercari, 2016), edellyttävät osaamista mittaussasemien sijaintien tehokkaaseen suunnitteluun, ja vaativat aikaa niin datojen keräyksen kuin prosessointiin (Lehtola ym., 2017). Laserkeilaimissa on tarjolla edullisempia vaihtoehtoja, kuten kevyt ja helppokäyttöinen Leica BLK360-laserkeilain (Shults ym., 2019), mutta myös nämä suuntautuvat ammattilaiskäyttöön. Huomattavasti edullisemman ja kuluttajakäyttöön sopivan vaihtoehdon tarjoavat panoraamakamerat, jotka ottavat 360-asteen näkymän laitteen ympäriltä, ja vaativat vain pienen määrän kuvia tilan kattamiseen (Barazzetti ym., 2018). Panoraamakameroita on käytetty sisätilan automaattiseen mallintamiseen, jossa 3D-malli luodaan fotogrammetrisesti vastinpisteitä kuvista etsimällä; tuloksen geometrinen tarkkuus on laserkeilainta heikompi, mutta kameran kalibrointi ja optimoitu projektio parantavat mallin laatua (Barazzetti ym., 2017). Kamerapohjaista mallinnusta käyttämällä saa tuloksena kolmioverkkomallin tekstuureineen, ja koska markkinoilla on lukuisia eri kuvanlaadun ja hintaluokan panoraamakameroita, on niillä suuri käyttäjäpotentiaali (Barazzetti ym., 2018). Etäisyyttä mittaavien laserkeilainten ja kuvapohjaisen mallinnuksen lisäksi käytetään syvyyskameroita, tarkemmin RGB-D-kameroita, jotka sekä mittaavat etäisyyksiä joko strukturoidun valon tai säteen kulkeman ajan periaatteella että ottavat kuvia saadakseen malliin tekstuurit. Syvyyskamerat ovat laserkeilaimia edullisempia ja kevyempiä, joskin niiden kantama on lyhyempi, ja geometrinen tarkkuus heikompi (Altuntas ym., 2016). Koska syvyyskamerat keräävät geometrista tietoa itse, ne eivät ole vastinpisteistä riippuvaisia kuten kuvapohjainen mallinnus, ja laitteen kamera antaa mallille tekstuurit, toisin kuin laserkeilaimen tuottamassa pistepilvessä (Henry ym., 2012).

Vaikka 3D-datan keruuseen käytetyt laitteet ovat entistä edullisempia ja helppokäyttöisempiä, tulee niillä kerätty data kuitenkin prosessoida, jotta valmiin 3D-mallin saa käyttöönsä. Mallin voi valmistaa käsin, mutta prosessi vaatii aikaa, työtä ja asiantuntemusta (Fassi ym., 2011), mistä syystä automaattista 3D-mallinnusta on käsitelty laajasti tutkimuksessa jo useita vuosia (Endres ym., 2013; Pulcrano ym., 2019)

Tässä artikkelissa keskitytään yhdysvaltalaisen Matterportin (MP) pilviprosessointipalveluun, jolla voidaan saada käyttövalmiita 3D-malleja käyttämällä dataa useista eri lähteistä; Matterportin omasta Pro2 3D-syvyyskamerasta, Leican BLK360 -laserkeilaimesta, useasta panoraamakamerasta sekä puhelinkameroista (Matterport, 2021a). Yhtenäinen pilvipalvelu mahdollistaa laitteiden toimivuuden vertailun automaattisella prosessoinnilla, ja koska BLK360:n dataa voi prosessoida myös Leican omalla Register360-ohjelmalla, voidaan verrata saman datan prosessointituloksia Matterportin ja Leican järjestelmällä. Vertailu tuo esille eri laitteiden sekä Matterportin prosessointijärjestelmän hyödyt ja heikkoudet, minkä perusteella voidaan arvioida automaattisen sisätilamallinnuksen laajamittaisen käytön mahdollisuuksia.

2. KOEMENETELMÄ

2.1 MATTERPORTIN PROSESSOINTIJÄRJESTELMÄ

Matterportin pilvipalvelu käsittelee automaattisesti sille annetun datan kolmiulotteiseksi kolmioverkkomalliksi ja värilliseksi pistepilveksi. Lisäksi mittaus- tai kuvausasemien välillä voi liikkua selainpohjaisessa näkymässä, jokaiselta kuvausasemalta otettuja panoraamakuvia tarkastellen. (Matterport, 2021a). Selaimen lisäksi mallia ja panoraamakuvia voi tarkastella VR:ssä (Lehtola ym., 2017).

Alun perin ainoastaan Matterportin omien Pro ja Pro2 3D-syvyyskameroiden kanssa yhteensopiva järjestelmä laajentui tammikuussa 2019 tukemaan sekä BLK360-laserkeilainta että panoraamakameroita (Matterport, 2021b). Koska panoraamakamerat eivät syvyyskameroista ja laserkeilaimista poiketen kerää geometristä dataa, käyttää Matterportin prosessointijärjestelmä Cortex-nimistä tekoälyä (Matterport, 2021b), joka käyttää Matterportilla aikaisemmin prosessoitua aineistoa pohjana ennustaakseen tilan mitat kuvien keskinäisen etäisyyden ja kuvakulman muutoksen perusteella (Gausebeck ym., 2019).

Toukokuussa 2020 Matterport julkaisi prosessointijärjestelmänsä tuen puhelimille ja tableteille, joilla käyttäjä pystyy keräämään kuvadataa suoraan puhelimen kamerasta haluamassaan paikassa ja kuvaamalla kameralla yhden kierroksen ympärilleen. Kuvausasemia voi olla useita, jolloin tilassa voi liikkua kuvausasemalta toiseen samalla tavalla kuin muiden laitteiden datalla toteutetussa selainpohjaisessa näkymässä (Matterport, 2021c). Syvyyskameroita tai laserkeilainta käytettäessä geometrinen data on suoraan saatavilla, mutta laitteiden kameroista saatavat kuvat käytetään jälkiprosessoinnissa panoraamakuvan luomiseen ja kolmioverkkomallin teksturointiin (Chang ym., 2017). Käytetystä laitteesta riippumatta käyttäjä voi tarkastella prosessoitua 3D-mallia ja siirtyä katsomaan panoraamakuvia samassa näkymässä (Bell ym., 2018). Matterportin prosessointijärjestelmän helppokäyttöisyys ja nopeus tekevät siitä potentiaalisesti suurelle käyttäjämäärälle sopivan vaihtoehdon luoda 3D-malleja (Pulcrano ym., 2019), mutta järjestelmä on täysin automaattinen, eikä prosessoinnin parametreja tai yksittäistä skannausta tai kuvaa voi muokata (Gupta ja Li, 2017).

2.2 LAITEVERTAILUUN KÄYTETYT LAITTEET

Matterport Pro2 3D-syvyyskamera käyttää kolmea strukturoidun infrapunavalon sensoria ja kolmea värikameraa, asetettuina kolmeen eri kulmaan kohdistuvaan riviin. Yhden skannauksen aikana laite pyörii akselinsa ympäri, keräten dataa kuudesta eri suunnasta (Pulcrano ym., 2019). Valmistajan mukaan laitteen kantama on 4,5 m (Matterport, 2020e), joskin suositeltu etäisyys asemien välillä on 2,5 m sisätiloissa ja 1 m ulkotiloissa (Pulcrano ym., 2019). Laite on suunniteltu sisäkäyttöön, ja vaikka sen käyttöä ulkotiloissa on onnistuneesti tutkittu (Popescu ym., 2019; Gärdin ja Jimenez, 2018), häiritsee auringonvalo huomattavasti laitteen käyttämää infrapunavaloa (Matterport, 2020f; Langmann ym., 2013).

Ricoh Theta V -panoraamakamera on kahden linssin kamera, jonka suurin kuvaresoluutio on 5376 x 2688 px. Linssit sijaitsevat kamerasen vastakkaisilla puolilla, mistä syystä kamerasen sivuilla on pieni heikosti katettava alue. Yli 10 cm päässä kamerasta sijaitsevat esineet näkyvät kuvissa niiden kulmasta kamerasen linssihin riippumatta (Ricoh, 2021). Kameraa voi ohjata joko laitteesta tai mobiililaitteen avulla (Feurstein ym., 2018); Matterportin prosessointijärjestelmän kanssa käytetään ainoastaan mobiilisovellusta (Chen ym., 2019). Matterportin prosessointijärjestelmä tukee Theta V:n lisäksi myös Insta ONE X – ja Ricoh Theta Z1 360 -kameroita (Matterport, 2021c).

Leica BLK360 -laserkeilain toimii lasersäteen kulkeman ajan periaatteella, eli on pulssikeilain (Ogawa ja Hori, 2019). Valmistajan mukaan laitteen kantama on 60 m ja suurin mahdollinen pistekeräysmäärä 360 000 pistettä sekunnissa. Laitteen tarkkuus on 6 mm 10 metrin etäisyydellä keilaimesta ja 8 mm 20 metrin etäisyydellä keilaimesta (Leica, 2021a); kokeiden perusteella nämä arvot on todettu pitävän paikkansa (Shults ym., 2019; Blaskow ym., 2018). BLK360:n mittadataa voi prosessoida Leican omalla Register360-ohjelmalla (León-Robles ym., 2019), Autodesk ReCap Pro -ohjelmalla (de Lima ym., 2018), tai

Matterportin prosessointijärjestelmällä (Chen ym., 2019). Tässä artikkelissa käytetään Matterportin prosessointijärjestelmää ja Register360-ohjelmaa; jälkimmäistä käytetään oletusasetuksilla, jotta saadaan Matterportin automaattisen prosessorin kanssa vertailukelpoinen tulos.

Leica RTC360 -laserkeilainta käytetään laitevertailussa referenssikeilaimena, sillä sen tuottama aineisto on vertailtavia laitteita tiheämpää ja tarkempaa. Valmistajan mukaan laite kerää parhaimmillaan kaksi miljoonaa pistettä sekunnissa 130 metrin kantamalla ja 2,9 millimetrin tarkkuudella 20 metrin etäisyydellä (Leica, 2021b). Keilaimen data prosessoidaan Leica Register360:llä, samalla tavalla kuin BLK360-keilaukset.

Matterportin prosessointijärjestelmä tukee myös suoraan puhelimen kamerasta saatavia kuvia. Järjestelmä rakentaa kuvista muiden laitteiden tavoin panoraamakuvapohjaisen esityksen huoneesta, jossa käyttäjä voi siirtyä panoraamakuvasta toiseen. Lisäksi selaimessa voi tarkastella kolmioverkkomallia ja mitata siinä etäisyyksiä. Prosessointijärjestelmä ei kuitenkaan tue kamerapohjaisen 3D-mallin tai pistepilven lataamista (Matterport, 2020e), mistä syystä puhelimien käyttöä ei tässä artikkelissa käsitellä laajasti. Myöskään panoraamakameroiden kuvien perusteella luotuja 3D-malleja tai pistepilviä ei nykyhetkellä voi ladata, mutta koska se on aineistojen prosessoinnin aikaan ollut mahdollista, käsitellään tässä artikkelissa niiden geometristä tarkkuutta, ja käytetään Ricoh Theta V:n aineistoa esimerkkinä kuvapohjaisesta mallista. Kuvassa 1 esitetään laitevertailussa käytetyt laitteet.



Kuva 1. Laitevertailuun käytetyt laitteet. Ylärivissä vasemmalta Matterport Pro2 3D, Ricoh Theta V, Leica BLK360 ja Leica RTC360.

2.3 LAITEVERTAILUN KOEASETELMA JA TOTEUTUS

Laitevertailussa tutkitut laitteet olivat Matterport Pro2 3D, Ricoh Theta V ja Leica BLK360, joiden keräämä data prosessoitiin Matterportin prosessointijärjestelmällä. Tuloksena saatiin jokaisesta laitteesta kolmioverkkomalli ja pistepilvi. Lisäksi BLK360:n data prosessoitiin myös Register360:lla, jolla saatiin pistepilvi; samalla tavalla tuotettiin RTC360-referenssipistepilvi. Kaikki vertailtujen laitteiden dataan perustuvat kolmioverkkomallit ja pistepilvet rekisteröitiin suhteessa referenssipistepilveen CloudCompare 2.10.2 -ohjelmassa; ensin karkealla manuaalisella rekisteröinnillä, minkä jälkeen käytettiin iteratiivista lähimmän pisteen menetelmää (Iterative Closest Point, ICP) tarkkaan rekisteröintiin. Tällöin voitiin verrata laitteiden geometristä tarkkuutta suhteessa referenssipistepilveen. Lisäksi arvioitiin

laitteista saatavien 3D-mallien ja pistepilvien visuaalinen ilme, sillä monissa tapauksissa 3D-malleja käytetään nimenomaan visualisointiin, jolloin tarkka geometria on toissijaista.

Vertailu suoritettiin kahdessa tilassa (Kuva 2.), Aalto-yliopiston Konetekniikan laitoksen tiloissa sijaitsevassa 101-neuvotteluhuoneessa ja Hanasaaren ruotsalais-suomalaisen kulttuurikeskuksen Tetra-salissa. Tilat ovat keskenään erilaisia; huone 101 on 69 m² kokoinen suorakaiteen muotoinen neuvotteluhuone, josta avautuu ikkuna yhteen suuntaan. Tetra-sali on 173,5 m² kokoinen epäsäännöllisen kuusikulmion muotoinen konferenssitila, jonka epätavallinen muoto ja suuri koko tekevät siitä haasteellisen tilan. Lisäksi seinillä kulkee kauttaaltaan verhot, jonka muodot eivät vastaa suoraa seinää.



Kuva 2. Laittevertailussa käytetyt koetilat; vasemmalla neuvotteluhuone 101, oikealla Hanasaaren Tetra-sali.

Jokaista tilaa kohden varattiin yhden päivän aikana aikaa kaikille laitteille, jotta mittausolosuhteet olisivat mahdollisimman samanlaiset laitteiden välillä. Tetra-salissa ei ole ikkunoita, mutta huone 101:ssä on ikkunat yhteen suuntaan, ja suora auringonvalo voi häiritä Matterport Pro2 3D:n toimintaa. Mittausten aikana huoneeseen ei suuntautunut suoraa auringonvaloa; päivänvalon tuoman epätasaisen valaistuksen vaikutuksia visuaaliseen tulokseen käsitellään luvussa 3. Taulukoissa 1 ja 2 esitetään aineiston keräyksen ja prosessoinnin kulku; mallinnusprosessiin käytetty aika vaikuttaa laitteiden yleiseen käytettävyyteen. Matterport Pro2 3D:llä ja Theta V:llä ei ole käyttäjän asettamia asetuksia, BLK360:n ja RTC360:n asetukset esitellään taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1: Aineiston keräyksen ja prosessoinnin kuvaus huone 101:n mittauksessa.

Laite	Skannaus- tai kuvausasetemien lukumäärä	Aika aineiston keräämiseen	Aika aineiston prosessointiin
Matterport Pro2 3D	15	22 min	55 min
Ricoh Theta V	33	35 min	118 min
Leica BLK360 Matala resoluutio, HDR 3	18	105 min	55 min Matterport 70 min Leica
Leica RTC360 Keskiresoluutio	7	30 min	18 min

Taulukko 2: Aineiston keräyksen ja prosessoinnin kuvaus Tetra-salin mittauksessa.

Laite	Skannaus- tai kuvausasettien lukumäärä	Aika aineiston keräämiseen	Aika aineiston prosessointiin
Matterport Pro2 3D	44	52 min	170 min
Ricoh Theta V	104	58 min	647 min
Leica BLK360 Keskiarvo, HDR 3	18	110 min	298 min Matterport 115 min Leica
Leica RTC360 Keskiarvo	9	42 min	35 min

Aineistojen vertailu suoritettiin CloudCompare 2.10.2 -ohjelmassa vertaamalla etäisyyksiä pistepilvistä referenssipistepilveen (Cloud-to-Cloud, C2C) ja kolmioverkkomalleista referenssipistepilveen (Cloud-to-Mesh, C2M). C2C-vertailuun käytettiin neliöfunktioita, sillä se pystyy ottamaan huomioon kaarevat pinnat; C2M-vertailuun CloudCompare tarjoaa vain euklidisen etäisyyden laskentaa pistepilvestä lähimpään kolmioverkolla sijaitsevaan pisteeseen (CloudCompare, 2020). Etäisyysvertailun lisäksi tutkittiin pistepilvien tiheyttä mahdollisten artefaktien tai virheiden löytämiseksi, sillä ne voivat vaikuttaa pistepilven tai siihen perustuvan 3D-mallin käyttökelpoisuuteen. Tiheys määriteltiin CloudComparessa laskemalla pisteiden määrän 25 mm säteen sisällä. Geometrian lisäksi myös tulosten visuaalisella tarkkuudella on merkitystä niiden käytön kannalta, mistä syystä verrattiin eri laitteilla saatavia tuloksia myös kvalitatiivisesti, erityisesti huomioiden tilassa sijaitsevien esineiden rekonstruktion suhteen.

3. LAITEVERTAILUN TULOKSET

Laitevertailu suoritettiin kahdella eri tavalla. Ensin arvioitiin tuloksina saatavien kolmioverkkomallien ja pistepilvien geometriaa kvantitatiivisesti etäisyysvertailujen ja pistetiheyksien perusteella, minkä jälkeen analysoitiin tulosten visuaalista ilmettä kvalitatiivisesti värien, tekstuurien, ja geometrian perusteella. Näin saatiin kokonaisvaltainen kuva laitteen toiminnasta ja potentiaalisista käyttökohteista, sekä kunkin laitteen edut ja heikkoudet.

3.1 ETÄISYYSVERTAILU

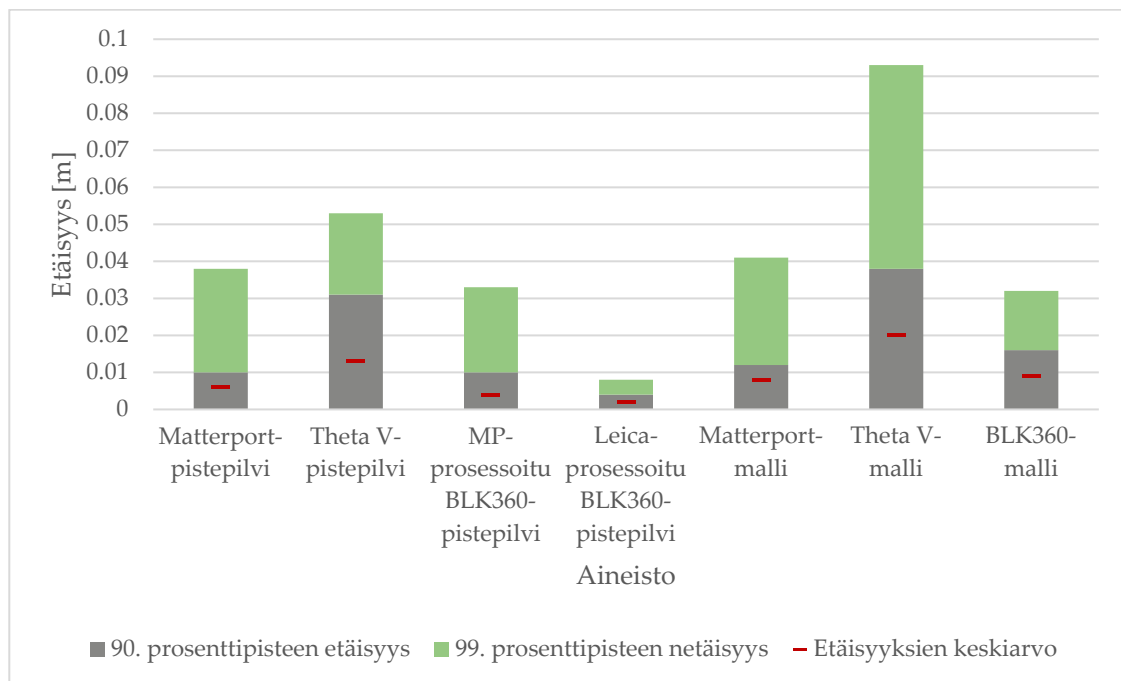
Kaikki etäisyydet laskettiin suhteessa RTC360-referenssipistepilveen. Geometrian tarkkuuden arvioimiseksi laskettiin useita arvoja; etäisyyksien keskiarvo voi antaa yleiskuvan laitteen tarkkuudesta, mutta pienikin määrä hajapisteitä voi vaikuttaa keskiarvoon huomattavasti. Tästä syystä laskettiin myös 90. ja 99. prosenttipisteen etäisyydet, jolloin yksi kymmenes- ja sadasosa kaikista pisteistä referenssipistepilvessä asettuu näitä arvoja suuremmille etäisyyksille käsiteltävästä pistepilvistä tai kolmioverkkomalleista. Jos 90. prosenttipisteen etäisyys on suuri, löytyy tuloksesta huomattavasti hajapisteitä tai suurempia virheitä; pieni 99. prosenttipisteen etäisyys puolestaan näyttää laitteen yleisen geometrisen tarkkuuden olevan hyvä. Etäisyydet laskettiin sekä huoneen seinägeometrialle, jossa mallista tai pistepilvestä on poistettu kaikki huoneessa olevat esineet, että yksityiskohtaiselle geometrialle

käyttämällä pientä testialuetta huoneesta esineineen. Kuva 3 näyttää yleiskuvan huoneista ja yksityiskohtaisen testialueen sijainnin.



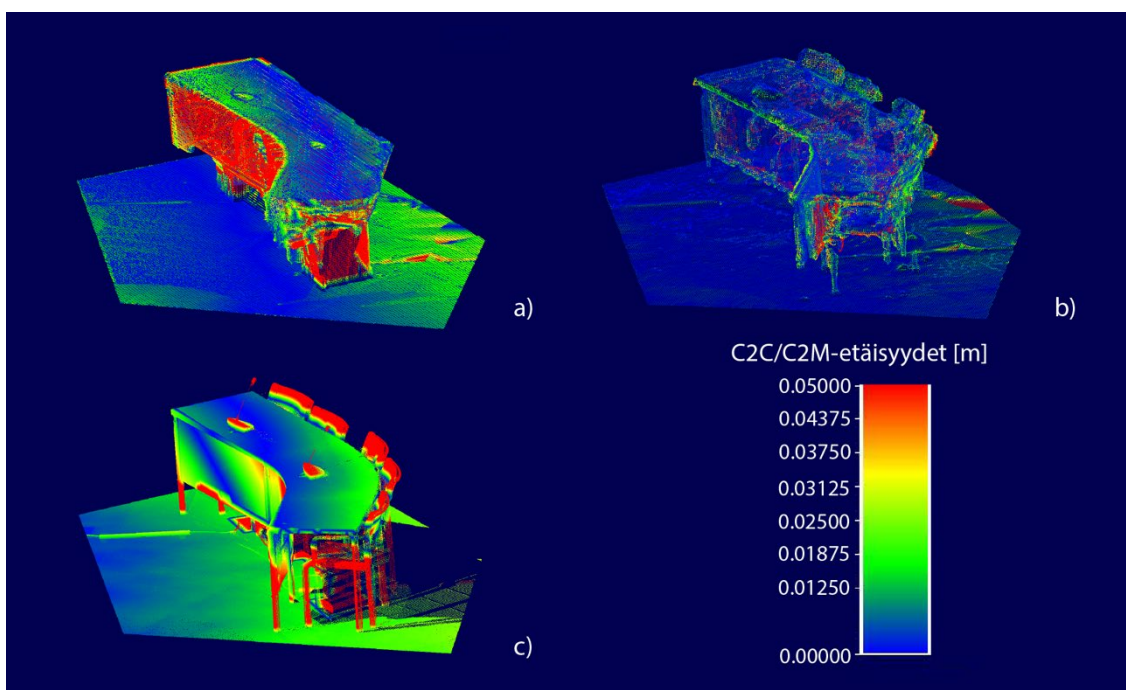
Kuva 3. Huone 101 (vasemmalla) ja Tetra-sali (oikealla), pienet testialueet merkitty punaisella.

Kuvassa 4 esitetään huone 101:n seinägeometrian tulokset etäisyysmittauksista. Tällöin nähdään selvästi, että Leican prosessointijärjestelmällä prosessoitu RTC360-pistepilvi on testiaineistoista tarkin, joskin Matterport (MP)-prosessoidun RTC360-aineiston ero Matterport-kameran aineistoon on suhteellisen pieni. Theta V:n tulokset ovat selvästi heikoimmat sekä pistepilvien että kolmioverkkojen joukosta, mutta ero on erityisen suuri kolmioverkkomalleissa.



Kuva 4. Huone 101:n seinägeometrian etäisyysmittausten tulokset.

Kuvassa 4 esitellyt tarkkuudet seinägeometriasta indikoivat vertailtujen laitteiden kykenevän mallintamaan tilan kokonaisuudessaan, sillä suuret virheet näkyisivät huomattavan suurina etäisyysarvoina. Tilan mallinnusta käsitellään laajemmin luvussa 3.2. Pienemmillä, yksityiskohtaisemmillä testialueilla pienet esineet ja huonekalut luovat laitteille haasteellisen ympäristön. Kuvassa 5 nähdään Tetra-salin testialueesta Matterport- ja Theta V-pistepilvet sekä etäisyydet Theta V-kolmioverkkomallista referenssipisteelle projisoituna. Matterport-pistepilvessä laite on pystynyt käsittelemään suurinta osaa huonekaluista, joskin tuolien muoto on epäsäännöllinen. Theta V-pistepilvessä tuoleja ei näy, ja pöydän geometriasta löytyy lähinnä pinnat. Myös pöydällä olevat mikrofonit telineineen ovat poissa. Theta V-mallissa näkyy samat puutteet, joskin pöydän etupuoli on asettunut lähemmäksi referenssipistepilveä kuin Theta V-pistepilvessä. Koska etäisyydet projisoidaan referenssipistepilveen, nähdään suuren etäisyyden alueena ne yksityiskohdat, joita Theta V ei ole kyennyt mallintamaan.



Kuva 5. Tetra-salin testialueen etäisyyksiä: (a) Theta V:n ja (b) Matterportin C2C-etäisyydet, (c) Theta V:n C2M-etäisyydet.

Laitteiden välillä on selviä eroja niin tilan seinien kuin yksityiskohtien mallinnuksessa. BLK360:ta ja Matterportia käyttäen on mahdollista luoda melko tarkka malli tilasta, siinä missä Theta V:llä on merkittäviä puutteita etenkin pienissä yksityiskohdissa. BLK360:n tarkkuus on korkeampi kuin Leican kuin Matterportin prosessoinnilla samaa dataa prosessoitaessa, joten Matterportin prosessointi heikentää tuloksen tarkkuutta. Se kuitenkin tarjoaa helposti tarkasteltavan mallin verkkoympäristössä, ja sama keilausdata voidaan prosessoida eri prosessointijärjestelmillä.

3.2 PISTETIHEYYS

Pistetiheyden merkitys Matterport-prosessoidussa aineistossa tuloksen laadun suhteen on suuri, sillä prosessointijärjestelmä rajoittaa pistepilvien ja mallien piste- ja kolmiomäärää, siten antaen suureen tilaan heikomman tarkkuuden (Virtanen ym., 2018). Taulukko 3 esittelee piste- ja kolmiomäärät molemmista

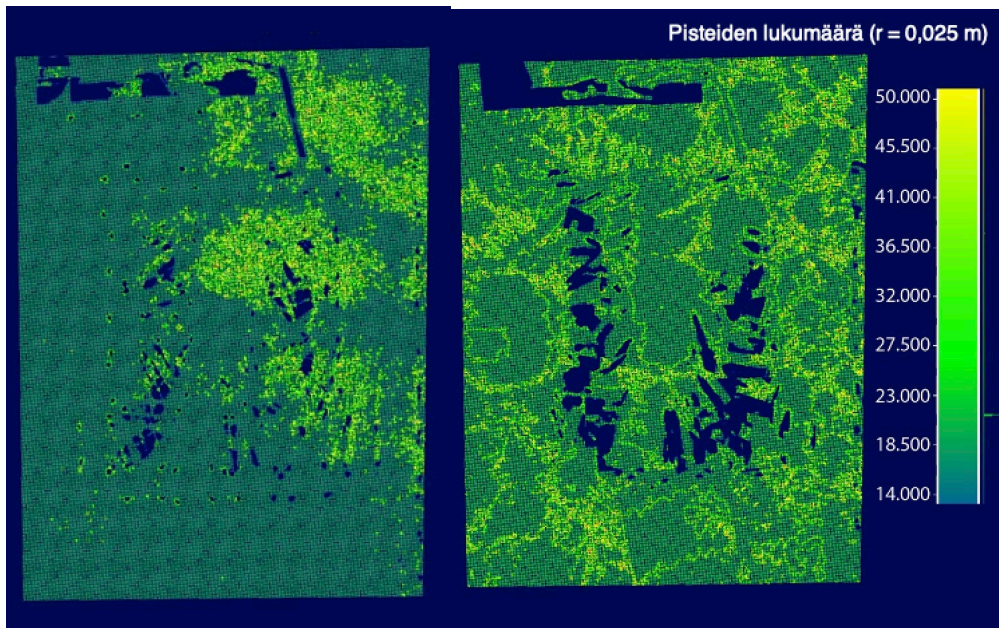
testikohteista; ne antavat suurpiirteisen kuvan pistepilven ja mallin kattamien yksityiskohtien määrästä, joskin pienen alueen pistetiheyttä analysoimalla saadaan tarkempi kuva prosessoinnin onnistumisesta.

Taulukko 3. Laitevertailun aineistojen piste- tai kolmiomäärät.

Huone 101:n aineisto	Piste- tai kolmiomäärä	Tetra-salin aineisto	Piste- tai kolmiomäärä
Matterport Pro2 3D-pistepilvi	3 242 736	<i>Matterport Pro2 3D-pistepilvi</i>	<i>8 165 597</i>
Ricoh Theta V-pistepilvi	2 835 404	<i>Ricoh Theta V-pistepilvi</i>	<i>6 627 988</i>
MP-prosessoitu BLK360-pistepilvi	3 210 683	<i>MP-prosessoitu BLK360-pistepilvi</i>	<i>9 522 744</i>
Leica-prosessoitu BLK360-pistepilvi	23 826 220	<i>Leica-prosessoitu BLK360-pistepilvi</i>	<i>207 128 818</i>
Matterport Pro2 3D-kolmioverkkomalli	322 850	<i>Matterport Pro2 3D-kolmioverkkomalli</i>	<i>395 035</i>
Ricoh Theta V-kolmioverkkomalli	1 199 757	<i>Ricoh Theta V-kolmioverkkomalli</i>	<i>1 489 642</i>
BLK360-kolmioverkkomalli	343 693	<i>BLK360-kolmioverkkomalli</i>	<i>301 355</i>

Kuten taulukosta 3 ilmenee, ovat Tetra-salin pistepilvien pistemäärät suurempia kuin huone 101:n. Tämä on odotettu tulos, sillä tilojen koot eroavat huomattavasti toisistaan, joskin ero Leica-prosessoitujen pistepilvien välillä on selvästi suurempi. Mallien kolmiomäärät ovat kuitenkin samankaltaisia tilojen kokoerosta huolimatta, ja Tetra-salin BLK360-malli sisältää jopa vähemmän kolmioita kuin pienemmän huone 101:n malli. Jos suurempi tila mallinnetaan pienemmällä kolmiomäärällä, voi tuloksen laatu kärsiä. Suurempi kolmioiden määrä ei kuitenkaan automaattisesti tarkoita tarkempaa tulosta, sillä Theta V:n kolmiomäärät ovat useita kertoja muita malleja suurempia, mutta kuten kuvassa 4 esitetään, on niiden geometrinen tarkkuus muita aineistoja selkeästi heikompi. Matterport-prosessointi myös harventaa BLK360:n dataa merkittävästi, mikä tulee ottaa huomioon prosessointimenetelmää valittaessa.

Koska pisteiden määrä on rajallinen, käyttää Matterport-prosessointi oletuksena tiettyä pistetiheyttä, ja luo siihen tiheämpää kuviota, jos prosessointi havaitsee rakenteen, johon tarvitaan enemmän pisteitä. Tästä käytännöstä voi syntyä kahdenlaisia ongelmia; joko prosessoinnissa ei käytetä tiheämpiä pisteitä tietyn rakenteen mukaan saamiseen, tai käytetään turhaan tiheämpiä pisteitä paikoissa, joissa rakenteita ei ole, mikä myös luo malliin rosoista pintaa ja vaikuttaa sen visuaaliseen ilmeeseen. Kuvassa 6 esitellään pistetiheys huone 101:n lattiasta Matterportin ja Matterport-prosessoidun BLK360:n pistepilviaineistosta; lattia on todellisuudessa tasainen, sileä pinta ilman merkittäviä piirteitä.

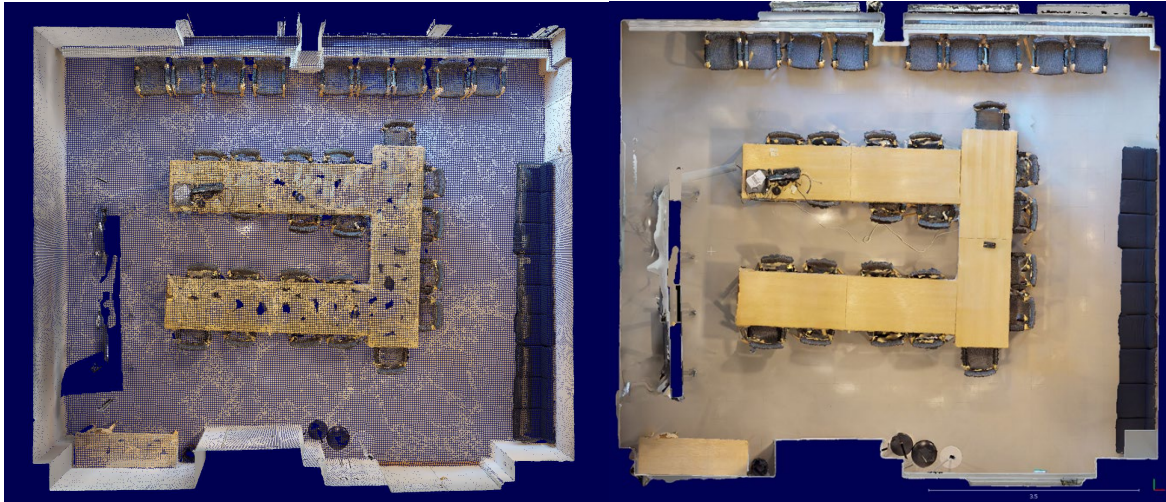


Kuva 6. Huone 101:n lattian pistetiheys Matterportin (vasemmalla) ja MP-prosessoidun BLK360:n (oikealla) aineistosta.

Kuvassa 6 BLK360:n aineistosta löytyy kauttaaltaan artefakteja, jotka juontuvat prosessoinnin virheellisestä tulkinnasta lattian rakenteesta. Myös Matterport-aineistossa on artefakteja, joskin keskitetympin. Nämä artefaktit näkyvät rosoisena pintana, mutta verrattuna Theta V:n tuloksiin, joita kuvassa 5 nähdään, voi rosoinen lattiapinta olla hyväksyttävämpi tulos kuin monien rakenteiden kokonaan katoaminen mallista.

3.3 TULOSTEN VISUAALINEN VERTAILU

Kuluttajatasen 3D-mallinnuksessa geometristä tarkkuutta tärkeämpää voi olla mallin visuaalisuus. Tarkkuutensa puolesta laitevertailussa käytetyt laitteet eivät sovellu esimerkiksi mittatarkkaan rakennuskäyttöön, mutta esimerkiksi sisustussuunnitteluun niiden tarkkuus on usein riittävä. Tilan ulkonäköön voi helposti tutustua selainpohjaisessa näkymässä panoraamakuvasta toiseen liikkumalla, mutta myös mallia tai pistepilveä halutaan voida näyttää sellaisenaan. Siksi suoritetaan kvalitatiivinen arviointi prosessoinnin visuaalisen puolen onnistumisesta. Kuvassa 7 vertaillaan Matterport-pistepilven ja -mallin visuaalista ulkonäköä; ne perustuvat samaan dataan, joten ne muistuttavat toisiaan, mutta pistepilvissä on joitain aukkoja etenkin pöydässä ja kuvassa vasemmalla olevassa näytössä, jonka takana on pistepilvessä aukko, joka mallissa on umpeutunut. Pöydän tuolien geometria on molemmissa tapauksissa epätäydellinen, mutta tuolit ovat selvästi havaittavissa aineistosta.



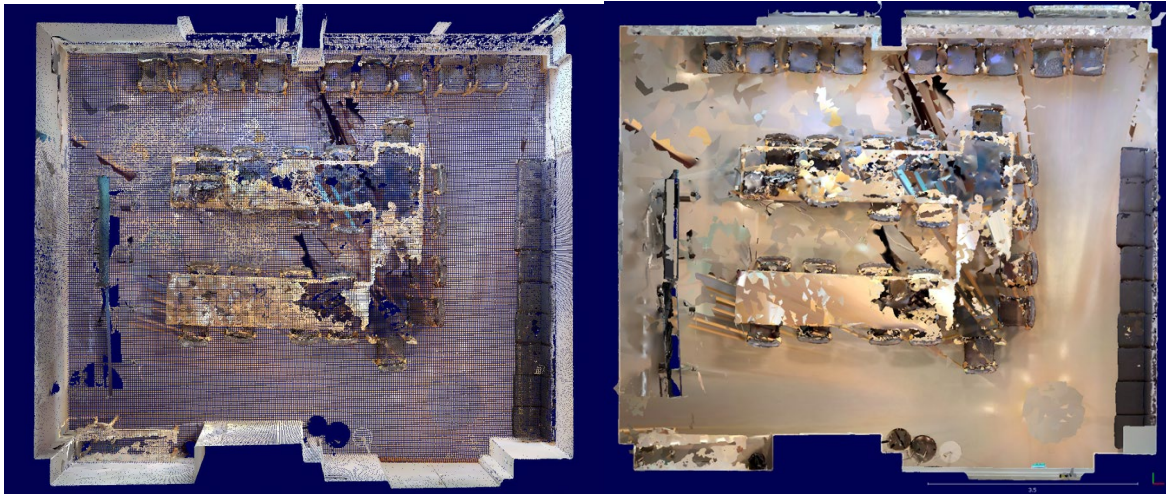
Kuva 7. Matterport-pistepilvi (vasemmalla) ja Matterport-kolmiomalli (oikealla) huone 101:stä..

Kuvassa 8 näytetään Theta V-pistepilvi ja -malli Tetra-salista. Molemmista näkyy laitteen onnistuneen melko hyvin tilan yleisen geometrian mallintamisessa, joskin todellisuuden suorat linjat ovat mallissa jokseenkin hataria. Pöytien takana on kuvausajana ollut tuoleja, mutta niitä ei kummastakaan aineistosta juuri näy. Tilasta on kuitenkin saatu ehjä, yhtenäinen malli, vaikka se on kokonsa ja vaihtelevan sisältönsä vuoksi haastava niin panoraamakuvaukselle kuin prosessointijärjestelmälle.



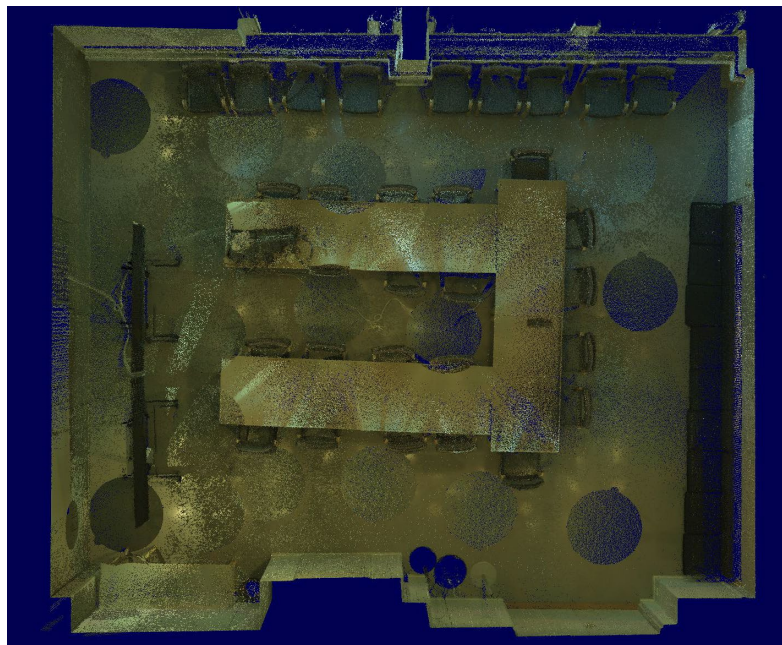
Kuva 8. Theta V-pistepilvi (vasemmalla) ja Theta V-kolmiomalli (oikealla) Tetra-salista.

Kuvassa 9 esitellään Matterport-prosessoitu BLK360-aineisto huone 101:stä. Pöydässä näkyy selviä aukkoja, jotka ovat olemassa myös kolmioverkkomallissa. Lisäksi tekstuurit ovat etenkin kuvien yläosassa epätasaisia, ja lattiassa näkyy kuvio, jota todellisuudessa ei ole. Geometrisesti BLK360-aineisto on Matterportia tarkempaa, kuten kuvassa 4 nähdään, mutta kvalitatiivisesti arvioiden BLK360:n aineistossa on merkittäviä puutteita niin geometrian kuin tekstuurien suhteen.



Kuva 9. Matterport-prosessoitu BLK360-pistepilvi (vasemmalla) ja -kolmiomalli (oikealla) huone 101:stä.

Kuvassa 10 on Leica-prosessoitu pistepilvi huone 101:stä. Leican prosessoinnilla saadaan vain pistepilvi, mutta se on suoraan verrannollinen Matterport-prosessoituun BLK360-pistepilveen. Värit ovat pistepilvessä johdonmukaisesti vääristyneet, mikä saattaa johtua BLK360:n valitsemasta harmaan sävystä kuvien balanssin säätämiseksi; tässä tapauksessa valittu harmaan sävy sisältäisi sinistä. Käyttäjä voi muokata kuvia Register360:ssa, mutta tämä tulee tehdä jokaista keilausta kohti. Pistepilven geometria on tarkkaa; Matterport-prosessoinnissa havaittavia aukkoja ei Leica-prosessoidussa pistepilvessä ole, ja myös pöytää ympäröivät tuolit näkyvät selvästi. Keilausasemat näkyvät pistepilvessä matalamman pistetiheyden alueina, mutta kuten kuvasta 4 nähdään, on Leica-prosessoidun pistepilven tarkkuus korkea.



Kuva 10. Leica-prosessoitu BLK360-pistepilvi huone 101:stä.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

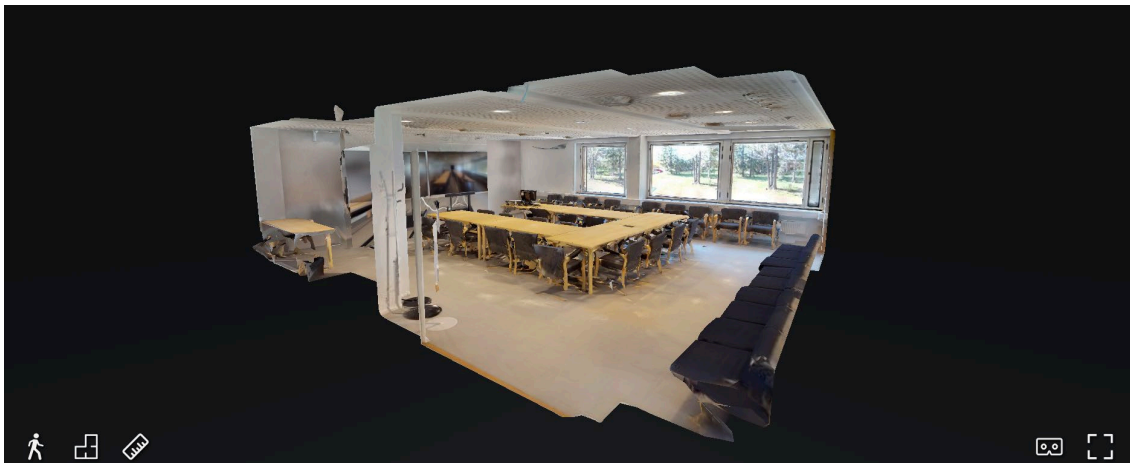
Automaattinen 3D-sisätilamallinnus tarjoaa suurelle potentiaaliselle käyttäjäkunnalle mahdollisuuden tehdä 3D-malleja itse, mikä myös lisää 3D-mallien käyttömahdollisuuksia. Tässä artikkelissa vertailtiin kolmea Matterportin prosessointijärjestelmän kanssa yhteensopivaa laitetta (Matterport Pro2 3D-syvyyskamera, Ricoh Theta V -panoraamakamera, Leica BLK360 -laserkeilain), ja analysoitiin niiden tuloksia sekä geometrisen että visuaalisen tarkkuuden kannalta. Lisäksi vertailtiin BLK360:n suhteen Matterportin ja Leican prosessointijärjestelmän tuottamien tulosten välisiä eroja.

Laitevertailussa havaittiin, että kaikilla laitteilla saatiin selvästi oikeaa tilaa vastaava 3D-malli, joskin mallien tarkkuuksissa oli eroa. Matterport ja BLK360 olivat samalla tasolla, kun jälkimmäisestä käytettiin Matterportin prosessointijärjestelmää, siinä missä BLK360:n tulokset olivat selvästi parempia Leican prosessointijärjestelmää käytettäessä. Matterportin prosessointijärjestelmän etu BLK360:ta käytettäessä on lähinnä selainpohjainen näkymä; pistepilvissä ja malleissa oli puutteita, joita Leica-prosessoiduissa pistepilvissä ei ollut. Samaa dataa voi kuitenkin käyttää molemmissa järjestelmissä, joten yhden järjestelmän käyttö ei sulje pois toista. Theta V:llä oli heikoin geometrinen tarkkuus, ja sen pistepilvissä ja malleissa oli puutteita, mutta laitteella sai kokonaiskuvan tilasta, ja se on kuluttajatasen laitteena edullinen valinta.

Matterport on laitevertailun suorittamisen jälkeen lopettanut tukensa panoraamakuvien 3D-mallien lataamiselle, jolloin tarjolla on vain mallien tarkastelu selainpohjaisessa järjestelmässä; käyttäjä voi mitata niissä etäisyyksiä, mutta ei ladata niitä omaan käyttöön. Lisäksi saatavilla on näkymä, jossa siirrytään panoraamakuvasta toiseen; tämä on mahdollista myös virtuaalitodellisuudessa. Palvelun muuttuminen heikentää panoraamakameroiden käytettävyyttä, mutta Matterport on lisännyt järjestelmään tuen puhelimille ja tableteille, joten käyttäjä voi tuottaa selainpohjaisen 3D-näkymän ilman mitään lisälaitteita. Koska lisälaitteita ei tarvita, kuka tahansa yhteensopivan puhelimen omistava henkilö voi saada haluamastaan tilasta 3D-näkymän ilman teknistä asiantuntemusta, mikä kasvattaa potentiaalista käyttäjäkuntaa. Kuvapohjainen näkymä esitellään kuvassa 10 ja 3D-näkymä kuvassa 11. 3D-näkymässä mallia voi tarkastella eri suunnista, ja järjestelmä poistaa automaattisesti seinän tai katon tilapäisesti näkyvistä, jotta mallin sisälle näkee.



Kuva 10. Näkymä Matterportin selainpohjaisesta esityksestä; lattiassa näkyvät ympyrät näyttävät panoraamakuvien paikan, ja kyseiseltä pisteeltä otettua panoraamakuvaa voi tarkastella valitsemalla ympyrän.



Kuva 11. 3D-näkymä Matterportin selainpohjaisesta esityksestä Matterport Pro2 3D-syvyyskameralla tehdystä 3D-mallista.

Automaattisen 3D-sisätilamallinnuksen potentiaali on huomattava, kun potentiaalinen käyttäjämäärä kasvaa ja 3D-mallinnus yleistyy. Tarkkaan mittaukseen tarvitaan edelleen ammattilaistason laitteita ja prosessointijärjestelmiä, mutta kuluttajatasen visualisointiin ja suunnitteluun automaattinen 3D-sisätilamallinnus on varteenotettava vaihtoehto.

5. LÄHTEET

- Altuntas, C., Yildiz, F. & Scaioni, M. (2016) Laser Scanning and Data Integration for Three-Dimensional Digital Recording of Complex Historical Structures: The Case of Mevlana Museum. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5, 18. <https://doi.org/10.3390/ijgi5020018>
- Barazzetti, L., Previtali, M. & Roncoroni, F. (2017) 3D modeling with the Samsung Gear 360. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, s. 85-90. <http://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-85-2017>
- Barazzetti, L., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2018) Can we use low-cost 360 degree cameras to create accurate 3D models? *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, s. 69-75. <http://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-69-2018>
- Bell, M.T., Gausebeck, D.A., Coombe, G.W., Ford, D., Brown, W.J. & Matterport Inc. (2018) Selecting Two-Dimensional Imagery Data for Display within a Three-Dimensional Model. U.S. Patent 10,163,261.
- Blaskow, R. Lindstaedt, M., Schneider, D. & Kersten, T. (2018) Untersuchungen zum Genauigkeitspotential des terrestrischen Laserscanners Leica BLK360. Teoksessa T. Luhmann & C. Schumacher (toim.): *Proceedings of the Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik-Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018*, s. 284–295. Berliini: VDE-Verlag.
- Chang, A., Dai, A., Funkhouser, T., Halber, M., Niessner, M., Savva, M., Song, S., Zeng, A. & Zhang, Y. (2018) Matterport 3D: Learning from RGB-D data in indoor environments. Teoksessa *Proceedings of the International Conference on 3D Vision (3DV)*, s. 667–676. <https://doi.org/10.1109/3DV.2017.00081>
- Chen, L., Kim, K., Gu, J., Furukawa, Y. & Kautz, J. (2019) PlaneRCNN: 3D plane detection and reconstruction from a single image. Teoksessa *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, CA, USA, 16–20 June 2019*, s. 4450–4459. <http://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00458>
- CloudCompare. (2020) CloudCompare v2.6.1 – User manual. [Viitattu 14.12.2021] <https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>
- de Lima, R., Sykora, T., De Meyer, M., Willems, H. & Vergauwen, M. (2018) On Combining Epigraphy, TLS, Photogrammetry, and Interactive Media for Heritage Documentation: The Case Study of Djehutihotep's Tomb in Dayr al-Barsha. Teoksessa R. Sablatnig & M. Wimmer (toim.): *Proceedings of the EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. The Eurographics Association. <http://doi.org/10.2312/gch.20181367>
- Endres, F., Hess, J., Sturm, J., Cremers, D. & Burgard, W. (2013) 3-D mapping with an RGB-D camera. *IEEE Transactions on Robotics*, 30, s. 177–187. <http://doi.org/10.1109/TRO.2013.2279412>

- Fassi, F., Achille, C. & Fregonese, L. (2011) Surveying and modeling the main spire of Milan Cathedral using multiple data sources. *Photogrammetric record*, 26, s. 462–487. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00658.x>
- Gausebeck, D.A. & Matterport Inc. (2019) Employing Three-Dimensional (3D) Data Predicted from Two-Dimensional (2D) Images Using Neural Networks for 3D Modeling Applications and Other Applications. U.S. Patent Application 16/141,630.
- Gupta, T. & Li, H. (2017) Indoor mapping for smart cities—An affordable approach: Using Kinect Sensor and ZED stereo camera. Teoksessa *Proceedings of the 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, s. 1–8.
- Gärdin, D.C. & Jimenez, A. (2018) Optical Methods for 3D-Reconstruction of Railway Bridges. Infrared Scanning, Close Range Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. Diplomityö, Luulajan teknillinen yliopisto.
- Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X., Fox, D. (2012) RGB-D mapping: Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. *International Journal of Robotics Research*, 2012, 31, s. 647–663. <http://doi.org/10.1177/0278364911434148>
- Lehtola, V.V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kaijaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M.T., Virtanen, J.-P., ym. (2017) Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods. *Remote Sensing*, 9, s. 796. <https://doi.org/10.3390/rs9080796>
- Leica. (2021a) BLK360 Product Specifications. [Viitattu 14.12.2021] https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_blk360_specsheets_en.ashx
- Leica. (2021b) Leica RTC360 3D Reality Capture Solution. [Viitattu 14.12.2021] <https://leicageosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>
- León-Robles, C.A.; Reinoso-Gordo, J.F. & González-Quñones, J.J. (2019) Heritage Building Information Modeling(H-BIM) Applied to A Stone Bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8, 121. <http://doi.org/10.3390/ijgi8030121>
- Lercari, N. (2016) Terrestrial laser scanning in the age of sensing. Teoksessa M. Forte & S. Campana (toim.): *Digital Methods and Remote Sensing in Archaeology*, s. 3-33. Springer: Cham, Sveitsi.
- Kersten, T., Przybilla, H., Lindstaedt, M., Tschirschwitz, F. & Misgaiski-Hass, M. (2016) Comparative geometrical investigations of hand-held scanning systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI*, 507–514. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-507-2016>
- Matterport. (2021a) 3D Cameras and iPhone Capture App. [Viitattu 14.12.2021] <https://matterport.com/cameras>
- Matterport. (2021b) Cortex AI. [Viitattu 14.12.2021] <https://matterport.com/cortex-ai>

Matterport. (2021c) 3D Camera App for iPhone. [Viitattu 14.12.2021] <https://matterport.com/3d-camera-app-iphone>

Ogawa, T. & Hori, Y. (2019) Comparison with accuracy of terrestrial laser scanner by using point cloud aligned with shape matching and best fitting methods. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2*, s. 535–541. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-535-2019>

Popescu, C., Täljsten, B., Blanksvärd, T. & Elfgrén, L. (2019) 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15, s. 912–924. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1594315>

Pulcrano, M., Scandurra, S., Minin, G., di Luggo, A. (2019) 3D cameras acquisitions for the documentation of cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII*, 639–646. <http://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1059-2019>

Ricoh. (2021) Product | RICOH THETA V. [Viitattu 14.12.2021] <https://theta360.com/en/about/theta/v.html>

Shults, R.; Levin, E.; Habibi, R.; Shenoy, S.; Honcheruk, O.; Hart, T.; An, Z. (2019) Capability of Matterport 3d Camera for Industrial Archaeology Sites Inventory. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII*, s. 1059–1064. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1059-2019>

Virtanen, J.P., Kurkela, M., Turppa, T., Vaaja, M.T., Julin, A., Kukko, A., Hyypä, J., Ahlavo, M., von Numers, J.E., Haggrén, H., ym. (2018) Depth camera indoor mapping for 3D virtual radio play. *Photogrammetric Record*, 33, s. 171–195. <https://doi.org/10.1111/phor.12239>