

Digipurku – Digitaaliset ratkaisut rakennusten purkamisessa -hanke

R1.3a Robotisoitu keilaus

Narayan Panthi

Zhongcheng Ma

Hämeen ammattikorkeakoulu

24.3.2025



Tiivistelmä

Kaikki rakentamisessa käytetyt elementit kattavan rakennustietomallinnuksen (BIM) tietokannan luominen tarjoaa arvokkaan työkalun rakennus- ja purkutöiden eri vaiheiden arviointiin. Tietomallin laaja soveltaminen on osoittautunut tehokkaaksi tavaksi helpottaa lukuisia analyyseja ja tehostaa purkuprosessia. Kiertotalouden edistämisen kannalta ratkaisevana aloitteena olemassa olevien rakenteiden rakennustietomallinnus on ensiarvoisen tärkeää. Tässä raportissa ehdotetaan olemassa olevan rakenteen rakennustietomallinnukseen suoraviivaista lähestymistapaa, jossa käytetään niin sanottua stop-and-go-menetelmää ja luodaan kolmiulotteinen pistepilvi sisäympäristöstä keilaamalla tila mobiilirobotin avulla. Tämä mukautettu menetelmä hyödyntää optimointialgoritmia, joka lyhentää keilaukseen kuluva-aikaa ja työtä ja siten varmistaa mallintamisen aikatehokkuuden sekä tukee kestäviä käytäntöjä rakennetussa ympäristössä.



Sisällysluettelo

1. Johdanto	4
2. Kirjallisuuskatsaus.....	4
3. Tutkimusmenetelmät.....	5
Vaihe 1: Käyttöruudukkokartta	6
Vaihe 2: Keilauspisteiden luominen	7
Vaihe 3: Luo pistepilvi.....	8
Trimble X7 -keilain	8
Keilausasetukset	8
Vaihe 4: Jälkikäsittely ja CAD-mallinnus.....	10
4. Tulokset	10
5. Lopuksi	12
Viitteet.....	12



1. Johdanto

3D-keilausteknologian käyttöönotto on mullistanut rakennusten rakennetietojen taltioinnin ja analysoinnin, ja sen avulla voidaan luoda tietokanta rakennuksesta (Frías et al., 2019). Käyttämällä 3D-keilausta ammattilaiset voivat luoda erittäin tarkkoja kolmiulotteisia pistepilviä olemassa olevista rakennuksista. Tämä tarjoaa yksityiskohtaisen digitaalisen esitystavan, joka toimii perustana useille erilaisille soveltamistavoille, kuten rakennustietomallinnukselle (BIM) (Gao et al., 2024). Kun BIM otettiin käyttöön 2000-luvulla, sen tarkoituksena oli auttaa arkkitehteja ja insinöörejä keskittymään rakennusten esisuunnitteluun pohjapiirustuksia, analysointia, visualisointia, kustannuslaskentaa ja hallintaa varten. Menetelmää kuitenkin laajennettiin käytettäväksi myös käytöstä poistoon liittyvien näkökohtien analysoinnissa (Volk, Stengel and Schultmann, 2014). 3D-keilauksen integrointi BIM-prosessiin parantaa rakennusmallien tarkkuutta ja helpottaa päätöksentekoa koko rakennushankkeen elinkaaren ajan (Bosché et al., 2015). Tämän teknologian avulla nykyiset olosuhteet voidaan taltioda häiritsemättömällä tavalla ja varmistaa, että kaikki spatiaaliset parametrit dokumentoidaan tarkasti. 3D-keilauksista johdetuilla tiedoilla voidaan lisäksi parantaa hankkeen eri sidosryhmien välistä koordinaatiota, mikä parantaa tehokkuutta suunnittelu-, rakennus- ja kunnossapitovaiheissa (Bosché et al., 2015; Mohammed et al., 2024). Kun ala siirtyy käyttämään yhä enemmän tietoon perustuvia menetelmiä, kyky hyödyntää pistepilviä rakennustietojen mallinnuksessa muodostuu hankkeiden onnistumisen kannalta ratkaisevaksi.

Kestävyyden ja kiertotalouden edistämiseksi on myös ensiarvoisen tärkeää ymmärtää näiden innovaatioiden yhteydessä, mitä seurauksia vanhojen rakennusten purkamisella voi olla (Fritz Benachio, Freitas ja Tavares, 2020). Ikääntyvien rakenteiden purkaminen aiheuttaa usein huomattavia määriä materiaali-jätettä, mutta ihmisten ja robottien yhteistyö sekä 3D-keilaus voivat tunnistaa talteen otettavat materiaalit tarkasti semanttisten tietojen avulla ja siten auttaa valikoivassa purkuprosessissa, kuten Wang et al. osoittivat (2024). Arvioimalla rakenteellisten elementtien uudelleenkäyttömahdollisuuksia arkkitehdit ja urakoitsijat voivat ohjata materiaaleja pois kaatopaikalta ja käyttää niitä uudelleen uusissa hankkeissa (Hopkinson et al., 2019). Tämä käytäntö paitsi vähentää rakennusjätettä myös auttaa säästämään luonnonvaroja ja minimoimaan ympäristövaikutuksia kiertotalouden tavoitteiden mukaisesti.

2. Kirjallisuuskatsaus

Park et al. (2023) osoittavat, että automaattisesta keilauksesta on tehty useita tutkimuksia stop-and-go-järjestelmien kontekstissa. He korostavat kahta ensisijaista optimaalisen keilauksen menetelmää: ilman ennakkotietoja toimivaa ei-mallipohjaista menetelmää ja mallipohjaista menetelmää. Tekstissä käsitellään tarkemmin mallipohjaista lähestymistapaa, jonka Gonzalez-Banos esitteli alun perin vuonna 2001 ja jossa hyödynnetään laskennallisen

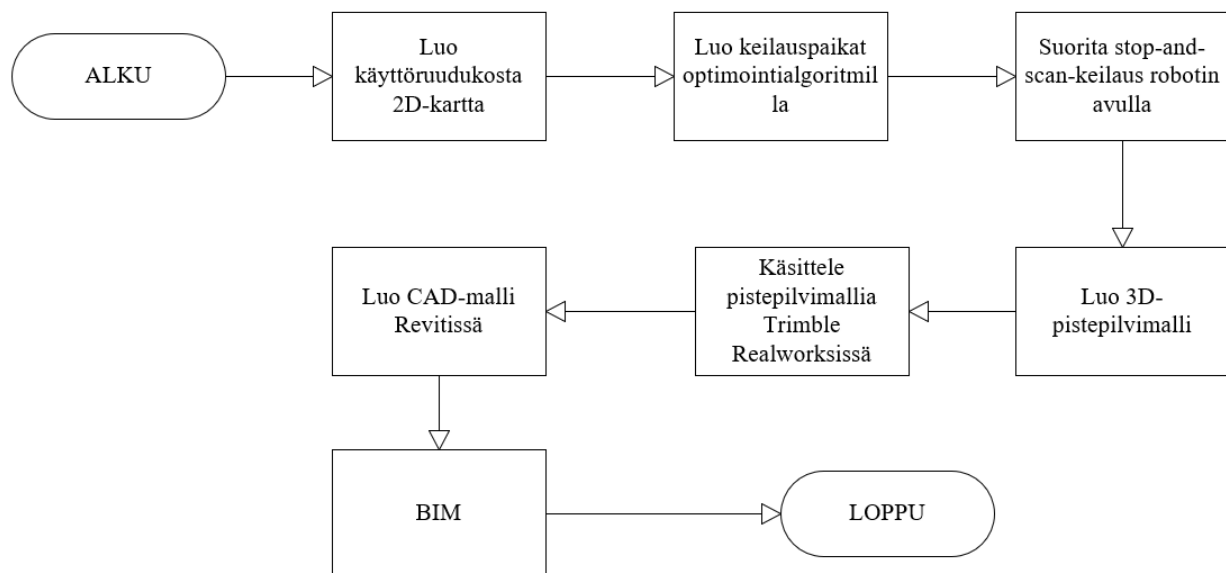
geometrian taidemuseoalgoritmia antureiden sijoittamisessa. Tekstissä todetaan myös, että samanlaista lähestymistapaa ovat myöhemmin hyödyntäneet Blaer ja Allen, jotka käyttivät sitä automaatioon miehittämättömällä ohjatulla ajoneuvolla (UGV), sekä Soudarissanane ja Lindenbergh, jotka vuonna 2011 optimoivat sen avulla maanpäällisen laserkeilauspaikkoja tuottamalla keilauspaikat kaksiulotteisen ruudukkokartan kaikista mahdollisista pisteistä. (Park et al., 2023)

Friasin et al. mukaan (2019) ei-mallipohjaisen menetelmän mahdollinen keilauskohde muotoillaan yleensä seuraavaksi parhaaksi näkymäksi (NBV), minkä tarkoituksena on määrittää keilattava paikka edellisen keilauksen perusteella.

3. Tutkimusmenetelmät

Rakennustietomallin (BIM) laatimista varten ehdotettu kehys koostuu neljästä erillisestä vaiheesta.

Ensimmäisessä vaiheessa käytetään mobiilirobotia käyttöruudun luontiin ja siten alustavan 2D-kartan luomiseen ympäristöstä. Toisessa vaiheessa karttaa hienosäädetään poistamalla kohinaa ja käsittelemällä sitä algoritmeilla optimaalisten keilauspaikkojen määrittämiseksi. Kolmannessa vaiheessa keilauksista luodaan korkearesoluutioinen 3D-pistepilvi. Neljännessä vaiheessa nämä 3D-pistepilvet kootaan ja viedään CAD-malliin rakennusesitystä varten. Työnkulkua havainnollistetaan jäljempänä kuvassa 1.



Kuva 1: Automatisoitu mallinnustyönkulku

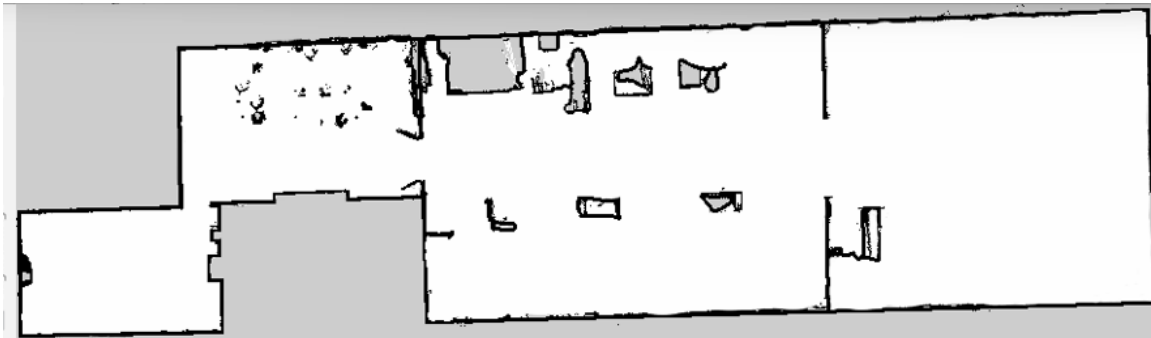
Vaihe 1: Käyttöruudukkokartta

Hankkeen ensimmäinen vaihe alkaa sen tunnistamisesta, että rakennuksen yleisestä pohjaratkaisusta ei ole ennakkotietoja. Tilanteen korjaamiseksi ympäristöstä kerätään keilaamalla anturitietoja, joiden pohjalta luodaan 2D-käyttöruudukkokartta hyödyntämällä keilauskäsittelyä ja asentokaavion optimointia (PGO) käyttävää samanaikaisen lokalisoinnin ja kartoituksen (SLAM) -algoritmia. Tämä kartta on olennainen robotin asennon arvioimiseksi tunnetussa ympäristössä ja autonomisen navigoinnin helpottamiseksi rakennuksen sisätiloissa.

Mobiilirobotti on varustettu antureilla, kuten valonhavaitsemis- ja etäisyysmittarilla (LIDAR) ja inertiamittausyksiköllä (IMU), jotka molemmat ovat välttämättömiä tehokkaan navigoinnin kannalta. LIDAR-anturi lähettää lasersäteitä, jotka mittaavat etäisyyttä ympäröiviin kohteisiin ja mahdollistavat niiden anturitietojen tallentamisen, jotka verkkoyhteydetön SLAM-algoritmi käsittelee tuottaakseen yksityiskohtaisen 2D-esityksen ympäristöstä. Samalla IMU seuraa jatkuvasti robotin kiihtyvyyttä, suuntaa, kulmanopeuksia ja yleistä sijaintia sekä antaa kriittisiä tietoja sen spatiaalisesta dynamiikasta.

Tässä alkukartoitusprosessissa muodostetaan perustavanlaatuinen käsitys robotin toimintaympäristöstä. Antureista kerättyjä tietoja hyödyntämällä robotti pystyy tarkasti määrittämään sijaintinsa kartoitetulla alueella. Robotti on ohjelmoitu siirtymään tämän paikkatietoisuuden avulla itsenäisesti useisiin ennalta määritettyihin kohteisiin. Kehittyneiden algoritmien ansiosta robotti pystyy lisäksi havaitsemaan ja välttämään tiellään olevia esteitä. Tämä takaa, että toiminta on sekä turvallista että tehokasta.

Alla on esimerkki laboratoriotestissä luodusta kartasta (kuva 2), jossa satunnaiset kohteet tilassa aiheuttavat kohinaa kartalla kartoitusprosessin aikana ja jossa huonekalut vievät tilaa kartalla.



Kuva 2: Kaksiulotteinen käyttöruudukkokartta

Näiden toimintojen tueksi robotti käyttää NAV2-navigointikehystä ROS2 Humble -ympäristössä. Tämän valinnan taustalla on sen joustavuus ohjelmoinnissa sekä erikoistuneiden pakettien luomisessa lokalisointia ja navigointia varten.

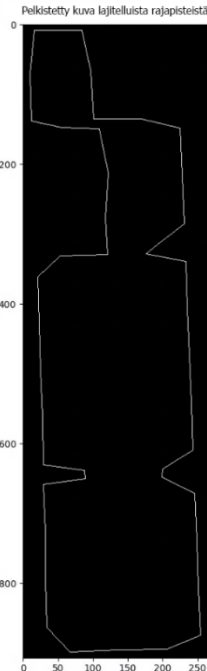
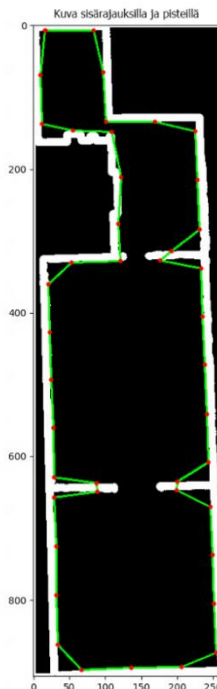
Vaihe 2: Keilauspisteiden luominen

Perinteisesti 3D-pistepilven keilauspaikat määrittää ihmistarkkailija, joka voi hyödyntää koko näkökenttäänsä tarkan sijainnin varmistamiseksi. Kuten Park et al. kuitenkin toteavat (2023), tämän prosessin automatisointi algoritmisen luonnin avulla vähentää tarvittavien keilauspaikkojen määrää merkittävästi ja säilyttää samalla tehokkuuden. Kun kaksiulotteinen kartta on valmis, käynnistetään kohinaa poistava ja suljetun silmukan rajaava jalostusprosessi, mikä parantaa luodun kartan rakenteellista eheyttä. Rajaviivoja paksunnetaan selkeyden parantamiseksi, minkä lisäksi tietyt ääriviivapisteet tunnistetaan järjestelmällisesti ja viedään koordinaatteina.

Koordinaattiluettelolla on ratkaiseva merkitys luotaessa vektorikarttaa, joka yhdistyy optimaalisten keilauspaikkojen määrittämiseen suunniteltuihin algoritmeihin. Käyttäjät voivat joustavasti määrittää pisteiden resoluution, jolloin he voivat määrittää optimaalisen raja-alueen. Kuvauspaikkojen strategista sijoittelua ohjaa taidemuseo-ongelma, jossa vartijoiden optimaalinen sijoittuminen pyritään tunnistamaan heidän näkökenttensä perusteella. Haluttujen kuvauspaikkojen saavuttamiseksi rajattua aluetta analysoidaan järjestelmällisesti algoritmin avulla.

Alla olevissa kuvissa esitetään vektoripohjaisen kuvan luontivaiheet (kuva 3). Vasemmalla oleva kuva käsitellään seinien paksuuden kasvattamiseksi. Keskimmaisessä kuvassa luodaan laskentapisteet, joiden avulla luodaan pisteluettelo peräkkäisessä järjestyksessä. Luettelo tulostetaan 2D-koordinaatteina. Oikeanpuoleinen kuva on tuloksena saatu vektorikuva.

Paksummat ääriviivat



Kuva 3: kuvankäsittely vektorikuvaksi

Seuraavissa vaiheissa käsi tellään yksityiskohtaisesti keilauspaikkojen luontia, jotta voidaan sijoittaa mobiilirobotti korkearesoluutioisella 3D-keilaimella ja keilata 3D-pistepilvi.

Vaihe 3: Luo pistepilvi

Trimble X7 -keilain

3D-pistepilven yksityiskohtaisuuden ja tarkkuuden parantamiseksi käytetään pienikokoista ja kevyttä Trimble X7 -keilainta. Laitteen laaja 360 x 282 asteen näkökenttä takaa perusteellisen kattavuuden. 3D-pistepilven keilaustarkkuus vaihtelee 2,4 mm:n ja 6,0 mm:n välillä jopa 40 metrin pituudelta. Keilaimessa on erilaisia toimintatiloja, joiden avulla se voi tarpeen mukaan tuottaa tietoja korkeammalla resoluutiolla (Trimble Inc., 2019).

Keilausasetukset

Mobiilirobotissa on Trimblen keilain, joka on kiinnitetty lujasti robotin yläosaan. Robotti toimii kehittyneenä kuljetusyksikkönä, joka helpottaa keilaimen liikuttamista useiden ennalta määrättyjen paikkojen välillä. Siihen on ohjelmoitu etukäteen sarja reittipisteitä, joiden avulla sen tarkat sijainnit ja suunnat voidaan hahmottaa kaksiulotteisella kartalla. Keilausmekanismi aktivoituu automaattisesti robotin siirtyessä näihin määritettyihin pisteisiin, jolloin robotti pystyy keräämään ympäristön yksityiskohtaiset pistepilvitiedot tehokkaasti. Alla olevassa kuvassa esitetään mobiilikeilaimen moduuliasetukset.



Kuva 4: Mobiilirobotti (Roverpro), jossa Trimble X7

Näiden reittipisteiden lasketut sijainnit on integroitu ROS2 (Robot Operating System) -navigointikehykseen, jolla on ratkaiseva merkitys robotin ohjaamisessa suunniteltuihin paikkoihin. Kun robotti saapuu kuhunkin reittipisteeseen, se käynnistää 3D-keilauksen, jolloin syntyy pistepilvikeilaustiedostoja. Nämä tiedostot eivät kuitenkaan liity toisiinsa, eikä niitä voida kohdistaa oikein ilman jälkikäsittelyä. Käsittelyllä varmistetaan, että tiedot esittävät tarkasti yhtenäisen 3D-mallin keilatusta alueesta.



Kuva 5: Algoritmin määrittämä keilauspaikka (oranssit läntit).



Vaihe 4: Jälkikäsittely ja CAD-mallinnus

3D-keilausprosessista luodut tiedostot järjestetään numerojärjestyksessä. Niitä ei kuitenkaan ole kohdistettu tai järjestetty oikein siten, että ne vastaisivat toisiaan. Ongelman korjaamiseksi tiedostot tuodaan Trimble RealWorks -ohjelmistoon, jossa ne järjestetään huolellisesti uudelleen. Tällä vaiheella varmistetaan, että tiedostot vastaavat tarkasti ympäristöä kuvaavia pistepilviä. Kun kohdistus on tehty, tiedot yhdistyvät toisiinsa johdonmukaisesti ja luovat kattavan CAD-mallin rakennuksesta. Tämän jälkeen valmis malli viedään Autodesk Revitiin, jossa muodostetaan lisäelementtejä ja määritetään materiaaliominaisuudet. Rakennustietomallinnuksen (BIM) alku on ratkaiseva vaihe, joka mahdollistaa rakennushankkeen yksityiskohtaisen visualisoinnin ja suunnittelun.

4. Tulokset

Tutkimuksen aikana havaittiin robotisoidun keilausprosessin käytön olevan hyödyllistä runsaasti hometta sisältävissä ympäristöissä ja asbestia sisältävissä vaarallisissa ympäristöissä. Ympäristöstä riippuen havaittiin, että optimointialgoritmi luo vähemmän vaatimukset täyttäviä keilauspaikkoja, mikä säästää aikaa seuraavaa parasta näkymää (NBV) hyödyntävään manuaaliseen prosessiin verrattuna.

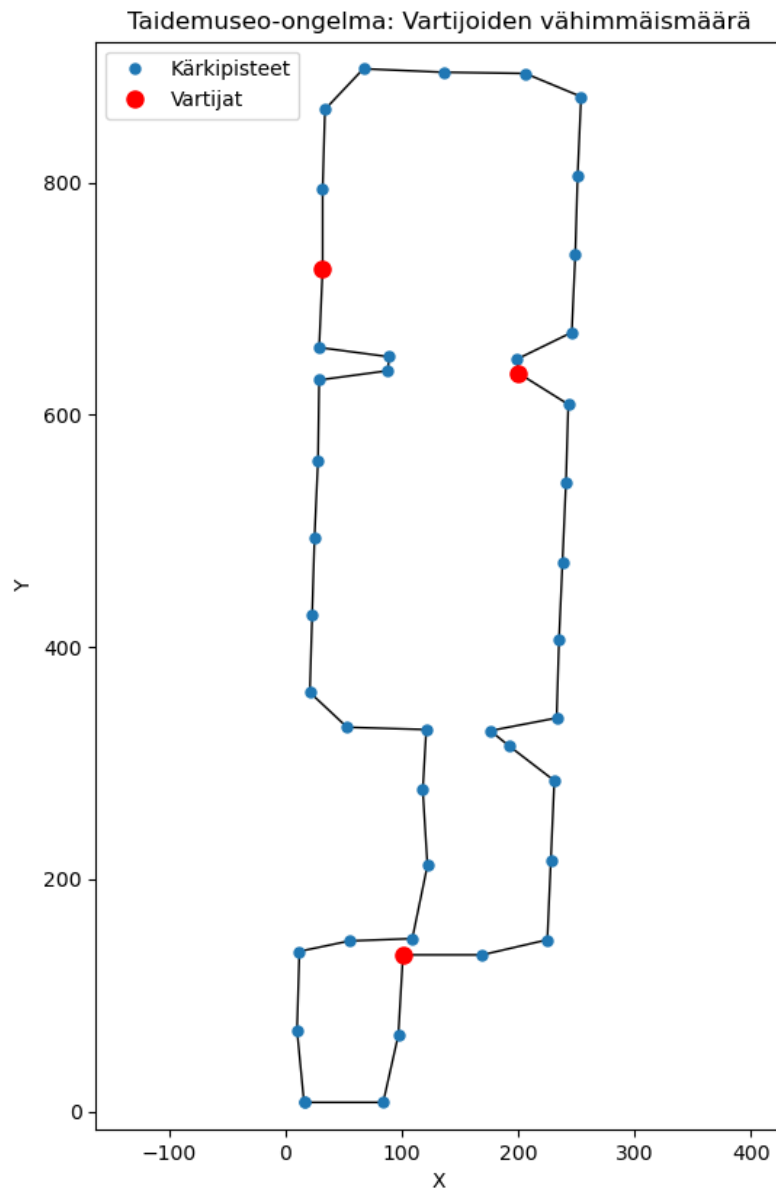
Toisaalta automaatioprosessi ei ottanut huomioon henkilökunnan läsnäoloa keilausalueella eikä sitä, että laitteen ja jalustan kuljettaminen eri keilauspaikkoihin on työlästä. Oli myös ilmeistä, että lattian pinnasta riippuen instrumenttien tasauksen kalibrointia ei käytetty useimmissa keilausprosessin alustustapauksissa, jolloin keilaus oli nopeampaa.

Mahdollisten keilattavien kohteiden ja keilausprosessin väheneminen tuotti merkittävän edun, jonka ansiosta kokonaiskesto lyheni vähintään 30 prosenttia manuaaliseen prosessiin verrattuna.

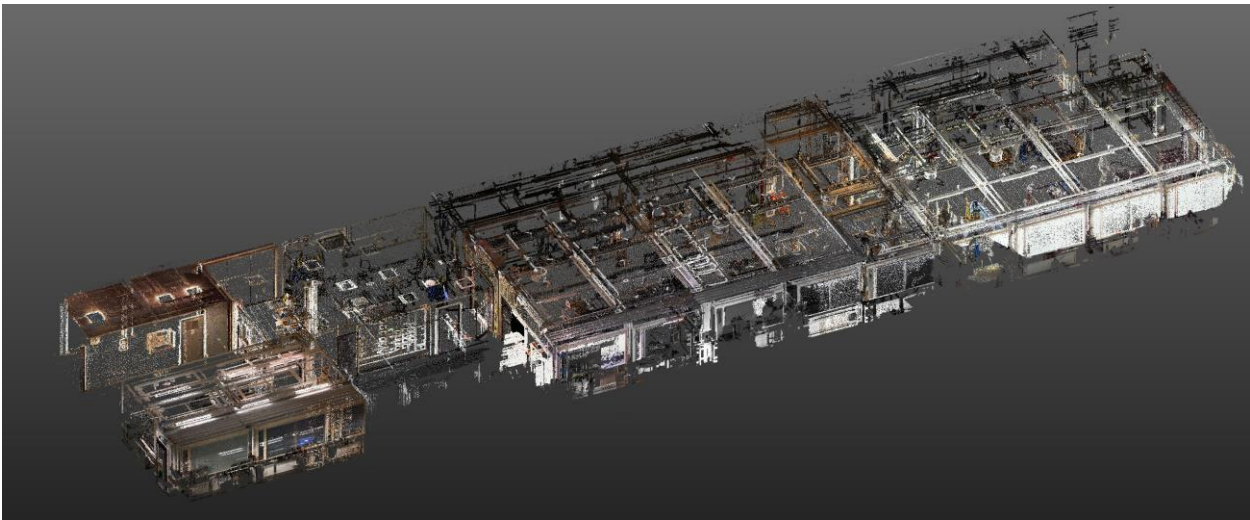
Järjestelmän haittapuolena pidettiin etäyhteyso ongelmia, koska WiFi:n toimintasäde oli rajallinen ja olisi tarvinnut paremman mesh-verkon muodostaakseen yhteyden robottiin kaikkialla ympäristössä. Verkon toimintasäteen rajallisuus tarkoitti siis, että keilausprosessi oli suoritettava osissa. Robotista tehtiin koetta varten liikkuva asentamalla pyörät, mikä rajoitti tutkimusalueen yhteen kerrokseen kerrallaan.

Alla olevassa kuvassa 6 esitetään optimoidut keilauspaikat kartalla kehittyneiden algoritmien käytön jälkeen.

Kuvassa 7 määritetyn alueen keilauspaikat on rajoitettu kolmeen keilausalueeseen, jolloin normaalin suuren herkkyyden keilausprosessin kokonaiskesto on enintään 23 minuuttia. Keilauspaikat on luotu algoritmien avulla. Jos keilaus olisi kuitenkin tehty manuaalisesti, pistepilven tallentamiseksi huoneiden keskellä tehtyjen keilausten avulla olisi todennäköisesti tarvittu neljä paikkaa. Sen lisäksi olisi tarvittu lisää aikaa jalustan siirtämiseen ja tasaamiseen, jolloin aikaa olisi kulunut yhteensä 34 minuuttia. Alla olevassa kuvassa esitetään työstölaboratorion 3D-pistepilvi Trimble Realworksissä käsiteltynä.



Kuva 6: Algoritmeilla luodut keilauspaikat



Kuva 7: Työstölaboratorion 3D-pistepilvimalli

5. Lopuksi

Yhteenvedona voidaan todeta, että automatisoidun 3D-keilausteknologian käyttöönotto rakennusten rakenteiden tallentamiseksi pistepilvien muodossa nopeuttaa pitkää keilausprosessia huomattavasti eli vähintään 30 prosenttia. Se on myös turvallinen tapa seurata rakennusten purkamisprosessia. Se nopeuttaa rakennustietojen mallinnusprosessia. Tämä menetelmä yhdistettynä materiaalien kierrätykseen tähtääviin kestäviin purkukäytäntöihin edistää vastuullisempaa ja ympäristötietoisempaa rakennusteollisuutta. Edistämällä teknologista integraatiota rakentamisessa ja suunnittelussa tasoitamme tietä älykkäämmälle ja kestävämmälle tulevaisuudelle.

Viitteet

- [1] Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C.T. and Haas, R. (2015). The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components. *Automation in Construction*, 49, pp.201–213. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.014>.
- [2] Frías, E., Díaz-Vilariño, L., Balado, J. and Lorenzo, H. (2019). From BIM to Scan Planning and Optimization for Construction Control. *Remote Sensing*, 11(17), p.1963. doi:<https://doi.org/10.3390/rs11171963>.



- [3] Fritz Benachio, G.L., Freitas, M. do C.D. and Tavares, S.F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260(1), p.121046.
- [4] Gao, X., Yang, R., Tan, J. and Liu, Y. (2024). Floor plan reconstruction from indoor 3D point clouds using iterative RANSAC line segmentation. *Journal of Building Engineering*, 89, pp.109238–109238.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109238>.
- [5] González-Banos, H. A randomized art-gallery algorithm for sensor placement. In Proceedings of the seventeenth annual symposium on Computational geometry-SCG'01, Medford, MA, USA, 3–5 June 2001; ACM Press: New York, NY, USA, 2001; pp. 232–240.
- [6] Hopkinson, P., Chen, H.-M., Zhou, K., Wang, Y. and Lam, D. (2019). Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 172(3), pp.119–128.
doi:<https://doi.org/10.1680/jensu.18.00007>.
- [7] Mohammed, A., Fadia Al Hajj, Ahsan Waqar, Bageis, A.S., Houda, M. and Omrane Benjeddou (2024). Building Information Modeling (BIM) driven performance-based construction for the optimization of sustainable and smart structures development. *Environmental Challenges*, pp.100980–100980.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100980>.
- [8] Park, S., Yoon, S., Ju, S. and Heo, J. (2023). BIM-based scan planning for scanning with a quadruped walking robot. *Automation in Construction*, 152, p.104911.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104911>.
- [9] Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R. Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2012**, XXXVIII-5/W12, 127–132.
- [10] Trimble Inc (2019). Trimble x7 3D laser scanning system datasheet. Available at: <https://www.seilergeo.com/wp-content/uploads/sites/9/2020/05/Datasheet-Trimble-X7-English-US1.pdf>
- [11] Volk, R., Stengel, J. and Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, [online] 38(1), pp.109–127.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>.
- [12] Wang, T., Fan, J. and Zheng, P. (2024). An LLM-based vision and language cobot navigation approach for Human-centric Smart Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 75, pp.299–305.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.020>.