

KULUTTAJAHINTAINEN MONIKAMERAJÄRJESTELMÄ 3D-MALLIEN TEKEMISEEN

Markus Sarlin^a, Matti Kurkela^a, Juho-Pekka Virtanen^b, Hannu Hyyppä^{a,c}

^a Aalto-yliopiston Rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutti MeMo

^b Paikkatietokeskus FGI, Maanmittauslaitos

^c Metropolia AMK, Rakentaminen ja arkkitehtuuri

Fotogrammetrialla tarkoitetaan kolmiulotteisten mallien tuottamista valokuvien pohjalta. Taskukokoinen tietokone, Raspberry Pi, siihen saatavan kameramodulin kanssa soveltuu niin vasta-alkajien kuin ammattilaistenkin käyttöön moniin mitä mielikuvituksellisimpiin käyttötarkoituksiin – kuten lepakkokameran rakentamiseen. Nämä edulliset tietokoneet kameroineen soveltuvat myös kolmiulotteisten mallien tekemiseen. Malleja voidaan tehdä jopa liikkuvista kohteista hyödyntäen useita samanaikaisesti otettuja valokuvia. Tässä artikkelissa kerromme yleisesti fotogrammetriasta ja esittelemme edullisen tavan, miten kolmiulotteisia malleja voisi tehdä itse.

JULKAISTU

30.12.2021

AVAINSANAT

3D-malli, fotogrammetria, raspberry pi, monikamerajärjestelmä

1. JOHDANTO

Digitaalisten kolmiulotteisten mallien tuottaminen on perinteisesti ollut sekä asiantuntemusta että kallista laitteistoa vaativaa. Malleja on tehty joko suoraan 3D-ohjelmistoilla, laserkeilaimilla tai fotogrammetrisesti kuvista laskemalla. Laserkeilaus vaatii edelleen asiantuntemusta ja kalliita laitteita, mutta fotogrammetriset menetelmät ovat usein kustannuksiltaan maallikoiden käytettävissä. Kerromme artikkelissa fotogrammetriasta, Raspberry Pi -tietokoneesta ja siihen liitetyn kameramodulin soveltuvuudesta kolmiulotteisten mallien tekemiseen.

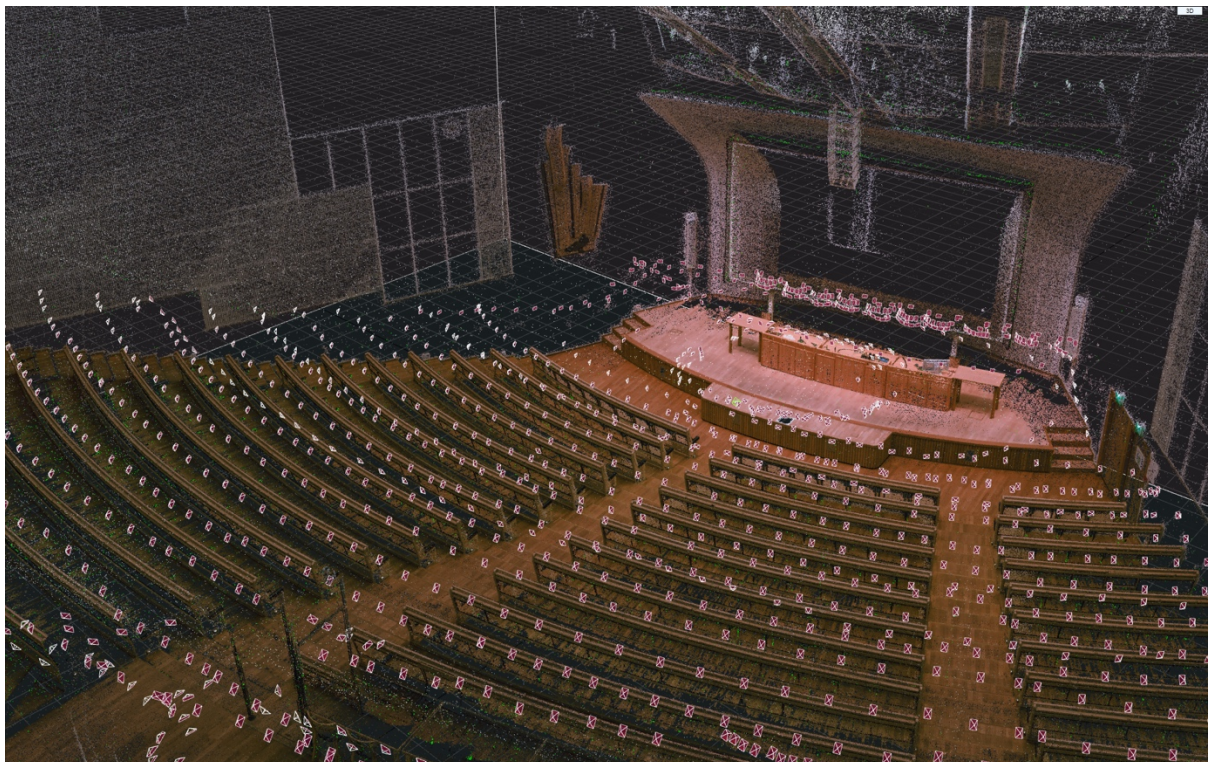
2. FOTOGRAMMETRIA — KUVILTA MITTAAMINEN

Vaikka fotogrammetrian historia joissain lähteissä ulotetaan aina Aristoteleen ja Leonardo da Vincin esittämiin optisen projektion periaatteisiin (esim. Gosh, 1981, s. 311), useimmiten fotogrammetristen tekniikoiden ajatellaan kehittyneen ilmakuvauksen myötä. Lyhyesti selitettynä menetelmällä saadaan laskettua esimerkiksi ilmakuvasarjoista maaston korkeuseroja. Menetelmä edellyttää, että kukin

kuvattavan alueen kohta näkyy ainakin kahdessa kuvassa ja hyödyntää kameran objektiivin parametreja laskennassa (ominaisuuksia kuten polttoväli ja linssivääristymät). Toimintaperiaate on sama kuin näköhavaintojen tulkinnassa. Silmien välinen etäisyys mahdollistaa kaksi toisistaan hieman poikkeavaa kuvaa samasta näkymästä ja kohteiden sijainnin hienoiset erot tekevät etäisyyksien arvioinnin mahdolliseksi. Yhdellä silmällä katsottuna etäisyyksien arviointi nojaa kohteen oletettuun kokoon, mutta sen muoto voi olla vaikea arvioida.

Menetelmän käyttökelpoisuus ei rajoitu ilmakuvauksiin. Kolmiulotteinen malli voidaan tehdä niin talosta kuin koriste-esineestäkin. Siihen tarvitaan kuvia kohteen ympäriltä niin, että kukin kohteen piste näkyy ainakin kahdessa kuvassa.

Nykyisin fotogrammetriaan käytetyt ohjelmistot ovat lähes automaattisia. On kuitenkin hyvä huomata, että läpinäkyvät kohdat ja heijastukset voivat sotkea mallin laskemista ja siihen voi jäädä esimerkiksi reikiä – kohtia, joista ei ole löytynyt vastinpisteitä useammasta kuvasta. Pienen ja yksinkertaisen kappaleen mittaamiseen voi riittää vain 12 kuvaa, mutta esimerkiksi talon tarkkaan mallintamiseen otetaan useita satoja kuvia. Ohjelmisto etsii kuvista vastinpisteitä ja laskee pisteiden välisen geometrian. Tulokseksi saadaan kolmiulotteinen pistepilvi (Kuva 1.), joka vastaa kuvatun kohteen geometriaa. Lasketusta pistepilvestä voidaan muodostaa kolmioverkkopinta. Etuna laserkeilauksiin verrattuna on, että fotogrammetrialla pistepilveen saadaan samalla myös väritieto ja kolmioverkkopinta voidaan värittää samalla lähtöaineistolla.



Kuva 1. Fotogrammetrisesti tuotettu pistepilvi, jossa näkyvät myös kameroiden sijainnit. © Matti Kurkela

Mallien laskemiseen tarvitaan kuvasarjoja. Jos kuvattava kohde on liikkumaton, kuten talo tai patsas, voi kuvaaja kiertää kohteen, ottaen tarvittavan määrän kuvia. Toisaalta, jos pyritään mallintamaan liikkuva kohde, siitä on saatava samanaikaisia kuvia monesta eri suunnasta, jotta asento – kohteen geometria – pysyisi muuttumattomana koko kuvasarjassa. Tähän tarkoitukseen on erilaisia ratkaisuja, jotka hyödyntävät useita kameroita eli monikamerajärjestelmiä. Kaupallisesti monikamerajärjestelmiä hyödynnetäänkin esimerkiksi hahmojen mittaukseen peli- ja elokuvateollisuuden tarpeisiin. Usein tällaiset järjestelmät kootaan yhdistelemällä valoja, järjestelmäkameroita ja laskentaa soveltuvia ohjelmistoja (esim. <https://xangle3d.com/>).

3. KULUTTAJAHINTAISIA VAIHTOEHTOJA

Viimeisen kolmenkymmenen vuoden ajan digitaaliset kamerat ovat sekä kehittyneet paremmiksi, että halventuneet merkittävästi. Samaan aikaan fotogrammetrisiä malleja laskevat ohjelmistot ovat kehittyneet ja nykyään niitä on tarjolla myös ilmaisina *open source* -ohjelmistoina (esim. Schoenberger, 2020). Tämän kehityksen myötä on mielekästä arvioida tarjolla olevia, kuluttajahintaisia mahdollisuuksia kolmiulotteisten mallien tuottamiseen fotogrammetrisesti.

Vuosituhanne alusta lukien nk. kuluttajahintaista kalustoa on käytetty fotogrammetriaa hyödyntävissä sovelluksissa useissa tutkimuksissa (mm. Chandler, 2005; Ordóñez, 2015; Alba, 2011; Pesce, 2015; Fryskowska, 2016; Dominici, 2017). Vaikka yksittäinen laadukas järjestelmäkamera olisi ns. kuluttajahintainen – tyypillisesti tuhannen tai muutaman tuhannen euron arvoinen – useamman kamerasuorittimen hankkiminen rasittaa kukkaroa jo monen kuukausipalkan verran. Halvemmaksi vaihtoehdoksi perinteisille kameroille onkin tullut useimpien taskussa kulkeva kännykkäkamera.

Samoja pienikokoisia sensoreita ja linsskejä on käytössä muuallakin. Kuvassa 2 yhtenä esimerkkinä saman teknologian käytöstä on Raspberry Pi -tietokoneiden lisälaitteena myytävä kamera. Raspberry Pi on alun perin digikasvatukseen kehitetty, luottokorttia hieman kookkaampi, yhdelle piirilevyllä mahdutettu alle 50 euron tietokone. Ensimmäinen versio koneesta julkaistiin vuonna 2012 (BBC News, 2012). Lisälaitteena myytävää kameraa saa 8 ja 12 megapikselin versioina.



Kuva 2. Raspberry Pi ja kamera koteloituna ja yhdistettynä paikalliseen lankaverkkoon. © Aalto Memo

8 megapikselin kamerasta on saatavissa myös lähi-infrapunakamera, joka tallettaa myös hieman näkyvän valon aallonpituuksia pidempiä aallonpituuksia. Teknisesti lähi-infrapunakameroissa on kysymys samanlaisista kameroista kuin normaaleissa verrokeissaan – näistä ”erikoiskameroista” vain puuttuu lähi-infrapunaa suodattavat filtit. Lähi-infrapunakameroilla on monenlaisia käyttösovelluksia arkeologiasta (esim. Verhoeven, 2008) rakennusmateriaalien luokitteluun (Sánchez, 2017) ja kasvillisuuden tutkimukseen (Berni, 2009).

Toiminallisesti nämä kamerat vastaavat nykyisiä kännykkäkameroita. Ne kytketään suoraan Raspberry Pi -tietokoneeseen ja niitä käytetään ohjelmallisesti kuten kännykässäkin: tarkoitusta varten olevalla ohjelmalla. Etuna alhaisten kustannusten lisäksi ratkaisussa ovat sen monipuoliset käyttömahdollisuudet rakentelussa ja ohjelmoinnissa – omien sovellusten tuottaminen Raspberry Pi -tietokoneelle on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin toimivan mobiilisovelluksen ohjelman toteutus.

4. RASPBERRY PI:N JA KAMERAMODULIN OHJAUS

Koska Raspberry Pi on luonteeltaan täysiverinen tietokone – joskin pienoiskoossa – sitä voidaan ohjata varsin monipuolisesti erilaisilla ohjelmilla. Rajoituksena ovat lähinnä koneen muisti ja laskentateho. Kolmiulotteisen mallin laskemiseen kannattaakin käyttää tehokkaampaa tietokonetta. Raspberry Pi:n käyttöjärjestelmänä on usein Raspberry Pi OS (ent. Raspbian) tai muu Linux-järjestelmä, mutta verkosta löytyy ohjeita myös Windowsin asentamiseen, joka tosin vaatii uusimman ja tehokkaimman version: Raspberry Pi 4 (Pounder, 2020).

Kameran ohjaamiseen on tarjolla useita vaihtoehtoja, esimerkiksi komentorivityökalu Raspberry Pi Camera Module (Raspberry Pi Foundation, 2020) ja Python-kirjasto Picamera. Kirjasto on Python-ohjelmointikielellä käytettävä aliohjelma, joka hoitaa fyysisten komponenttien välisen kommunikoinnin ja antaa ohjelmoijalle selvärakenteisen ohjelmointirajapinnan (Jones, 2016). Python on matalan kynnyksen ohjelmointikieli, joka on yleisesti käytössä mm. verkkosivustojen kehitystyössä, koneoppimissovelluksissa ja tieteellisessä laskennassa. Monella aloittelijoille suunnatulla ohjelmointikurssilla opetetaan Pythonia (esim. FITech, 2020).

Aloittelijaa varten verkossa on useita sivustoja, joiden yksityiskohtaisten ohjeiden mukaan on helppo rakentaa varsin monimutkaisiakin järjestelmiä, jotka hyödyntävät Raspberry Pi:tä ja sen kameraa. Ohjeita löytyy esimerkiksi ”lintu-liven” – lintujen elämää tallentavan linnunpöntön rakentamiseen (mattwood0, 2019) ja näytetään miten tehdä lepakoiden kuvaamiseen tarkoitettu, akkuporan kahvaan integroitu, infrapunalamppu ja lähi-infrapunakamera (MisterM, 2016).

Kameran käyttäminen ohjelmallisesti mahdollistaa kamerasovelluksen monipuolisen hyödyntämisen. Tavallisten valokuvien lisäksi voidaan tallentaa esimerkiksi ajastettuja kuvasarjoja (eng. *timelapse*) tai videokuvaa. Koska Raspberry Pi:ssä on tietokoneille ominaiset verkko-ominaisuudet, voidaan mainittujen melko ilmeisten etujen lisäksi kameraan käyttää verkon yli, kuten monessa internetin rakenteluohjeiden tapauksissa on tehty. Verkon välityksellä kuvaamista varten on myös saatavilla monia valmiita kirjastoja. Esimerkiksi valvontakamerakäyttöön soveltuva RPi-Cam-Web-Interface (eLinux.org, 2020) tai komentorivityökalu Compund Pi, joka antaa käyttäjälle mahdollisuuden ohjata useita samassa verkossa olevia Raspberry Pi -kameroita samanaikaisesti (Hughes, 2014). Samaan verkkoon liitettyjen kameroiden

avulla saadaan stereokuvaa tai kuvattua koko 360 astetta halutun kohteen ympäri. Kameroiden kytkeminen verkkoon mahdollistaa myös kuvien automaattisen siirtämisen yhdelle koneelle, helpottaen jälkikäsittelyprosessia.

5. ESIMERKKI MONIKAMERAJÄRJESTELMÄSTÄ

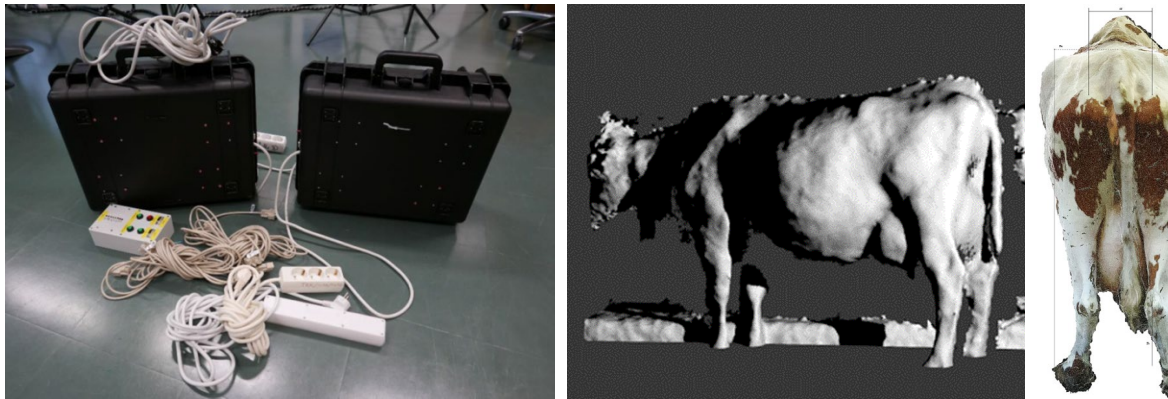
Aalto-yliopiston Rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutti MeMossa (*Measuring and Modeling*) on rakennettu Raspberry Pi -kameroihin pohjautuvia kamerajärjestelmiä, joilla saadaan otettua valokuvia mallinnustarkoitukseen. Laajimmillaan järjestelmään on liitetty 20 kameraa, jotka on kiinnitetty neljälle eri korkeudelle jalustoihin (Kuva 3.). Järjestelmää on käytetty projekteissa ja opetuksessa ja sillä on pääasiassa mitattu ihmisiä (Ahlavuo ym., 2016).



Kuva 3. Kuvakaappaus Raspberry Pi -kamerajärjestelmän kuvista tuotetusta pistepilvestä. Oikealla alhaalla näkyvät 3D-mallin laskemiseen käytettyjen kameroiden sijainnit. © Aalto Memo

Useat Raspberry Pi -kameroista rakennetut järjestelmät on liitetty langalliseen lähiverkkoon kuten myös edellä kuvattu 20 kameran monikamerajärjestelmä. Järjestelmät toimivatkin hyvin, kun mitattava kohde voidaan tuoda mittauspaikalle eikä kohteella ole taipumusta vahingoittaa monikamerajärjestelmää. Mikäli kohde esimerkiksi eläin, jota on vaikea ohjata, kamerrat pitää suojata koteloilla ja samalla kameroiden sijoittelu on normaalia rajoitetumpaa.

Kuvassa 4 näkyy 20 kameran järjestelmästä rakennettu 8 kameran versio, jotka sijoitettiin kahteen salkkuun. Lisäksi kameroille tehtiin ohjain, joka kestää kannettavaa tietokonetta paremmin ympäristön epäpuhtauksia. Järjestelmällä mitattiin lehmän rakennetta.



Kuva 4. Salkkuihin rakennettu Raspberry Pi -kamerajärjestelmä: vasemmassa kuvassa on kamerat ja niiden ohjain, keskellä järjestelmällä tuotettu pintamalli, oikeassa kuvassa teksturoidusta 3D-mallista on mitattu lehmän rakennetta.
© Aalto Memo

Jatkokehitysvaiheessa kameroiden riippuvuus sähköverkosta ja verkkojohdoista poistettiin ja siitä tehtiin akkujen varassa toimiva langaton järjestelmä, jota ohjataan esimerkiksi kännykältä tai tabletilla graafisella käyttöliittymällä. Tämä antaa entisestään lisää erilaisia käyttömahdollisuuksia järjestelmälle.

6. LOPUKSI

Verraten matalasta erottelukyvystään huolimatta Raspberry Pi:n kamera on osoittautunut usein riittävän tarkaksi kolmiulotteisten mallien laskentaa varten (Piras ym., 2017). Digikameroiden yleistymisen alkua ajoilta peräisin olevassa artikkelissa Chandler (2005) toteaa, että jo viiden megapikselin kenno on riittävä fotogrammetristen mallien laskemiseen. Merkittävimäksi tekijäksi kuvan laatuun jää siis kameras optiikka. Ammattilaistason optiikalla varustetulla järjestelmäkameralla saa toki ylivertaista kuvalaatu, eikä sen käyttäminen edellytä perehtymistä ohjelmointiin, mutta jos yhden kameras hinnalla saa esimerkiksi 25 kameraa ja tilaisuuden tutustua yksinkertaiseen ohjelmointiin ei vaihtoehto välttämättä kuulosta niin pahalta. Näin yksittäisen kameras hankintakustannukset jäävät maltillisiksi ja kameroita voi lisätä järjestelmään useita yhden järjestelmäkameras hinnalla.

Raspberry Pi -kamerat ovatkin muodostuneet useiden monikameraprojektien lähtökohdaksi (esim. <https://www.pi3dscan.com/> ja 6G Waves magazine, 2021) Monikamerajärjestelmän rakentamiseksi on perehdyttävä yksinkertaiseen ohjelmointiin ja fotogrammetriseen laskentaan, mutta lopputuloksena on oma 3D-skanneri.

7. LÄHTEET

6G Waves magazine. 2021. 6G Edge: 3D Scanner. 4/Autumn. 2021. ISBN9789526231297.
<http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526231297.pdf>

- Ahlavuo, M., Kurkela, M., Parkkola, T., Luostarinen, N., Virtanen, J-P., Vaaja, M., Jansson, H. & Hyyppä, H., Dec 2016, Digitaalista tulevaisuutta – Huippuosaamisella vaikuttavuutta ja vuorovaikutusta. Ahlavuo, M., Hyyppä, H. & Ylikoski, E. (eds.). p. 85-92 8 p. (Humanistinen ammattikorkeakoulu julkaisuja; no. 32).
- Alba, M. I., Barazzetti, L., Scaioni, M., Rosina, E., & Previtali, M. (2011). Mapping infrared data on terrestrial laser scanning 3D models of buildings. *Remote Sensing*, 3(9), 1847-1870.
- BBC News. (29.2.2012). The Raspberry Pi computer goes on sale. Haettu osoitteesta <https://www.bbc.com/news/technology-17190918>
- Berni, J. A., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722-738.
- Chandler, J. H., Fryer, J. G., & Jack, A. (2005). Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *The Photogrammetric Record*, 20(109), 12-26.
- Dominici, D., Alicandro, M., & Massimi, V. (2017). UAV photogrammetry in the post-earthquake scenario: case studies in L'Aquila. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 87-103.
- eLinux.org. (22 .5. 2020). RPi-Cam-Web-Interface, Haettu osoitteesta <https://elinux.org/RPi-Cam-Web-Interface>
- FITech. (2020). Ohjelmoinnin alkeet. Haettu osoitteesta <https://fitech.io/fi/opinnot/ohjelmoinnin-alkeet/>
- Fryskowska, A., Kedzierski, M., Grochala, A., & Braula, A. (2016). CALIBRATION OF LOW COST RGB AND NIR UAV CAMERAS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Gosh, S. (1981). *History of photogrammetry*. Laval University, Canada: ISPRS.
- Hughes, D. (2014). Compound Pi. Haettu osoitteesta <https://compoundpi.readthedocs.io/en/release-0.4/>
- Jones D. (2016) Picamera. Haettu osoitteesta <https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.13/>
- mattwood0. (2019). Raspberry Pi Birdbox Camera. Haettu osoitteesta <https://www.instructables.com/Raspberry-Pi-Birdbox-Camera/>
- MisterM. (2016). The Raspberry Pi Batinator. Haettu osoitteesta <https://www.instructables.com/The-Raspberry-Pi-Batinator/>
- Ordóñez, C., Martínez, J., Arias, P., & Armesto, J. (2010). Measuring building façades with a low-cost close-range photogrammetry system. *Automation in Construction*, 19(6), 742-749.
- Pesce, M., Galantucci, L. M., Percoco, G., & Lavecchia, F. (2015). A low-cost multi camera 3D scanning system for quality measurement of non-static subjects. *Procedia CIRP*, 28, 88-93.

Piras, M., Grasso, N., & Jabbar, A. A. (2017). Uav Photogrammetric Solution Using a Raspberry pi Camera Module and Smart Devices: Test and Results. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 289.

Pounder L. (19.7.2020). How to install Window 10 on a Raspberry Pi 4. Haettu osoitteesta <https://www.tomshardware.com/how-to/install-windows-10-raspberry-pi>

Raspberry Pi Foundation. (30.4.2020). Raspberry Pi Camera Module. Haettu osoitteesta <https://www.raspberrypi.org/documentation/raspbian/applications/camera.md>

Sánchez, J., & Quirós, E. (2017). Semiautomatic detection and classification of materials in historic buildings with low-cost photogrammetric equipment. *Journal of Cultural Heritage*, 25, 21-30.

Schoenberger J. L. (2020). COLMAP. Haettu osoitteesta <https://colmap.github.io/index.html>

Verhoeven, G. (2008). Imaging the invisible using modified digital still cameras for straightforward and low-cost archaeological near-infrared photography. *Journal of Archaeological Science*, 35(12), 3087-3100.