



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Ehituse ja arhitektuuri instituut

MEHITAMATA LENNUMASINATE (UAV)  
FOTOGRAMM-MEETRILISTE MÕÕDISTUSTE  
PÕHJAL KOOSTATAVATE PINNAMUDELITE  
TÄPSUS TEE-EHITUSLIKE RAKENDUSTE NÄITEL

Accuracy of UAV Photogrammetry With  
Applications to Road Construction Works

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Romet Köök

Kood: 110557EATI

Juhendaja/õppejõud: Kalev Julge  
Artu Ellmann

Tallinn 2018

## Kokkuvõte

Käesoleva uurimustöö raames sooritati UAV fotogramm-meetrilisi mõõdistusi Võõbu katselõigul eesmärgiga hinnata antud mõõdistusmeetodiga moodustatud pinnamudelite vertikaaltäpsusi. Varieeriti nii lennukõrguseid, markeeringute kasutamist kui ka kaameraid ning vaadeldi erinevate faktorite mõju tulemustele. Erinevatel meetoditel saadud pinnamudeleid kasutati mahtude arvutamisel ning võrreldi saadud tulemusi nõuetega.

Referentsandmetena kasutati terrestrialse laserskaneerimise ja GNSS-mõõdistuse teel kogutud andmed. GNSS-mõõdistusandmetest moodustatud pinnamudel sõltub palju mõõdistajast/andmetöötlejast, sest vähema arvu punktidega maapinna üldistamine võib tuua suuri erinevuseid reaalsest. Käesolevas töös sooritatud eksperimetaalse mõõdistuse korral valiti mõõdistuspunkte mõnedes kohtades kriitiliselt vähe, mis tõi kaasa ligi meetriseid kõrguserinevuseid aeromõõdistuste vahel.

Testitavaid mehitamata õhusõidukeid oli antud uurimustöös kaks – DJI Phantom 2 Vision Plus ning DJI S1000. Mõlemad on koptertüüpi lennuplatvormid, mille pardal vastavalt FC200 (14 Mpix) ja Sony NEX-7 (24 Mpix) kaamerad.

UAV fotogramm-meetriliste mõõdistuste eelselt paigaldati maapinnale markeeringud ning määrati neile koordinaadid kasutades GNSS-mõõdistusseadmeid. Markeeringutena kasutati nii keraamilisi plaate, aerosoolvärviga tehtud riste ning kontrastseid 50 x 50 cm mõõtudega must-valgeid tähised.

Fotogramm-meetrilise mõõdistusviisiga on võimalik genereerida täpseid punktipilvi, kuid täpsus oleneb ka eeltööst. Markeeringute tihe paiknemine ning nende täpne mõõdistamine loob eelduse parema kvaliteediga punktipilve saamisele, kuid selline eeltöö nõuab rohkem aega. Uurimistöös selgus, et markeeringute vähene kasutamine põhjustab maapinnamudeli moonutust. Samuti madalam UAV lennukõrgus suurendab aerofotode eraldusvõimet maapinnal, mille tulemusel on fotodelt leitavaid ühiseid tunnusteid rohkem ning mudelpind täpsem. Samas andmetöötluse aeg suureneb seoses fotode rohkusega.

DJI Phantom seeria droonid on jaekaubanduses laialdaselt levinud, enamjaolt hobilennutajate seas. Antud uurimustöös tehtud testide tulemusel jääb Phantom 2-e fotogramm-meetrilise töötamise tulemusel saadud pinnamudeli KRV võrreldes GNSS-mõõdistuse, laserskaneerimise ning UAV S1000 fotogramm-meetria teel saadud

tulemustega kümne sentimeetri ulatusse, mis Maanteeameti tee-ehituslike katendite mõõdistuseks nõutava täpsusega (5 cm), ei ole lubatud piirides.

Phantom 2 tulemusi mõjutas ka asjaolu, et kasutatava kaamera objektiiv oli kalasilma efektiga, mis tagab küll piltide vahel suurema ülekattuvust, kuid piksli suurus maapinnal on fotode servades ligi kahekordne. Mahtude arvutamine antud lennuplatvormiga andis GNSS-mõõdistusega võrreldes ligi nullilähedase mahuerinevuse ning UAV S1000 mõõdistusega võrreldes ligi 1 %. Alla 20 000 kuupmeetri mulde korral vastavad need tulemused markšeideritööde nõuetele, sest kahe mõõtesuuruse erinevus ei tohi ületada 12 %. Küll aga peab silmas pidama et tee-ehituslike mahtude arvutamisel peab lähtuma Maanteeameti, mitte markšeideritööde nõuetest. UAV S1000 mõõdistusega võrreldes tekkisid UAV Phantom 2 kasutades pinnamudeli loomisel ligi 0,4 m hälbed. Suurimad hälbed esinevad markeeringute vahel ning hälbe märgid (pluss/miinus) on varieeruvad.

Mehitamata õhusõiduki DJI S1000 käitamine on küll tunduvalt keerukam kui eelmainitud lennuplatvormi puhul, kuid suurema kandevõime korral on see võimeline kandma raskemat ja kvaliteetsemat fotokaamerat. 24 Mpix fotod on väga teravad ning markeeringute tsentri tuvastamine on lihtne.

Lennuplatvormi S1000 kasutades hinnati fotogramm-meetrilisel teel saadud pinnamudelite kõrgusväärtuste erinevusi muutes lennukõrgust. 60 m kõrgusel jäädvustati 54 ja 100 m kõrgusel 24 aerofotot ning maapinna eraldusvõime oli vastavalt 1,3 ja 2,4 cm. Võrdlustest järeldus, et KRV oli 0,021 m, hälvete keskmine 0,002 m ning miinum ja maksimum vastavalt -0,197 ja 0,212 m. Kõrgema lennu puhul joonistusid väiksemad detailid halvemini välja (autode rööpajäljed jms) ning nendes kohtades esinesid suurimad erinevused. Kui 60 m kõrguse lennu puhul oli ilmastik suhteliselt pilvine ja aerofotodel ei esinenud varje, siis 100 m lennu puhul jäi päikesepaistelise ilma tõttu fotodele puude tumedad varjud, mis töötlusel muudavad pinna madalamaks ning neis kohtades on suurimad negatiivsed hälbed. Üldjuhul on hälbed muudel pindadel nullilähedased ning seega võib antud kaamera mõõdistusi lugeda väga usaldatavaks.

S1000 platvormil fotogramm-meetrilise teel saadud pinnamudelite võrdlus GNSS-mõõdistusandmetega andis sarnaseid tulemusi, mis oli saadud UAV Phantom 2 kasutades – mõlema UAV fotogramm-meetrilise pinnamudeli ning GNSS referentspinna vahel esines ligi meetriseid erinevusi samades kohtades. UAV S1000 ja referentspinna vaheline KRV oli 8,8 cm ning üksnes mõõdistuspunktidega võrreldes 5,7 cm. Mõõdistusel esinenud üldistuste

vähenedes on ka KRV väiksem ning võib eeldada UAV S1000 mõõdistusega saadud pinnamudelil suuremat täpsust kui GNSS referentspinnal. Antud referentsandmete valik ei anna piisavat ülevaadet mehitamata õhusõiduki S1000 pardal oleva Sony NEX-7 kaamera fotodest loodud pinnamudeli tegeliku täpsuse kohta, vaid pigem kinnitab ka varem esinenud väidet kahe mõõdistusmeetodi sarnase täpsuse saavutamise võimalikkusest.

UAV käitlemise eelisteks on automatiseeritus. Lennujuhtimistarkvaradega on võimalik UAV saata aerofotosid pildistama etteantud lennutrajektoori ning sobiva ülekatte järgi. Punkt pilve loomisel on enim töötunde nõudvam protsess markeeringute tähistamine fotodel, ning edaspidi võimalik soovitud parameetritega punkt pilve töötlust jätkata. Töötlusel saadud punkt pilve punktid omavad maapinnale omast värvust, mis hõlbustab punkt pilve järeltöötlust läbi viimist.

UAV mõõdistust piirav tegur on piiritletud lennuruum. Lennuloa vajadusel on nõutud igakordne kooskõlastus Lennuametiga, mida on tarvis teha 3 päeva enne aerolendu, kui lennukõrgus on madalam kui 150 m. Kõrgema lennukõrguse korral tarvis kooskõlastus läbi viia 7 päeva varem.

Fotogramm-meetrilisel mõõdistusel on aeropiltidel oluline roll täpsuse kujunemisel. Uurimistöös selgus, et madalamat eraldusvõimet omava aérokaamera fotodest moodustatud pinnamudel on tunduvalt ebatäpsem, võrreldes raske ja kvaliteetse kaameraga salvestatud piltidega saadust.

Teedeehituses esinevate pinnavormide mõõdistus nõuab topograafilisest mõõdistusest suuremat täpsust. Lennukõrguse planeerides tuleb arvestada nõutava täpsusega ning selle suhtes valida lennukõrgus selliselt, et GSD oleks 3 korda väiksem.

Antud uurimustöö kinnitas varem tehtud uurimistöodes nimetatuid elemente ning eksperimentaalselt leiti UAV fotogramm-meetria mõõdistusmeetodi läbiviimisel, millest tuleks hoiduda ning kuidas saavutada võimalikult täpne ja realistlik maapinnamudel.

## Summary

In the framework of this research, unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetric surveys were carried out at the Võõbu Test Section with the aim of assessing the vertical accuracy of surface models formed by this survey method. Flight altitudes, ground control points and cameras were varied, and the impact of various factors on the results was monitored. Surface models acquired by different methods were used to calculate volumes and compare the results with requirements set by Estonian Road Administration.

Survey data collected by terrestrial laserscanning and GNSS was used as reference data - the surface model formed by the GNSS survey data depends on the surveyor, the generalization of the ground with fewer points can lead to large errors. In the survey performed in this study, few measurement points were selected at some locations, which caused up to a meter of height differences compared to UAV surveys.

Two UAV's were tested - DJI Phantom 2 Vision Plus and DJI S1000. Both are helicopter type UAV's, which carry FC200 (14 Mpix) and Sony NEX-7 (24 Mpix) cameras, respectively. Before the UAV photogrammetric survey, ground control points (GCP) were placed and coordinated using RTK GNSS. Ceramic tiles, aerosol crosses and 50 x 50 cm black and white targets were used.

With a photogrammetric survey, it is possible to generate accurate point clouds, but accuracy depends on the preparation work. The density of the ground control points and their precise measurement method also provide a prerequisite for obtaining a better quality point cloud, but such initial work takes more time. Research shows that the lack of markings leads to ground-level transformation. Also, lower UAV flight altitude will increase the resolution of aerial photos on the ground, resulting in a higher number of common features detected in photographs and a more precise model, but a large number of photographs will increase the processing time.

The DJI Phantom series is widely distributed. As a result of the tests carried out in this research, the RMS of surface model from the UAV Phantom 2 photogrammetry remains within ten centimeters of the GNSS survey, laserscanning and photogrammetric measurements of the UAV S1000. It is not within the limits required (5 cm accuracy) for road construction (Estonian Road Administration).

The results from Phantom 2 were also influenced by the fish-eye lens, which improved overlap between the photos but the pixel size on the ground almost doubled on the edges of the photographs. The calculation of the volumes with this platform gave approximately 0% of volume differences compared to the GNSS survey, and about 1% of the UAV S1000, which is better than the tolerance required for surveying open-pit mines (12 %). However calculating road construction volumes must be based on the requirements of the Road Administration and not of the requirements for surveying open-pit mines. Using a UAV Phantom 2 to create a surface model, there were 0,4 m deviations, compared to the UAV S1000 survey. The maximum height differences between the ground control points are difficult to predict.

Operation of the UAV DJI S1000 is more complicated than the aforementioned UAV platform, but with a higher payload, a higher-quality camera can also be carried. 24 Mpix photos were very sharp and the marking center was easy to detect on the photos.

Using the UAV S1000, different flight heights were used. At a height of 60 m, 24 aerial photographs and 54 photos at 100 m were captured, with a ground sampling distance (GSD) of 1,3 and 2,4 cm, respectively. From the comparisons, it was concluded that the RMS was 0,021 m, the average deviation was 0,002 m, and the minimum and maximum respectively -0,197 and 0,212 m. In the case of a higher flight, the smaller detail quality was reduced (tire tracks, etc.), and there were largest height differences in these locations. The weather was relatively cloudy at 60 m and shadows did not appear, tree shadows were seen in the 100 m flight, which in the process, made the surface lower, and there were largest negative deviations in those places. Generally, the deviations around the surface were close to zero, and this camera can be considered very reliable in surveys.

A comparison between the S1000 photogrammetric surface and GNSS survey data provided close to one meter difference in some places. The RMS between the UAV S1000 and the reference surface was 8,8 cm and 5,7 cm in relation to the measuring points. Reducing the generalizations on the measurement also lowers RMS. The selection of the GNSS reference data does not provide sufficient insight into the actual accuracy of the surface model created with UAV S1000, but confirms the earlier claim that the two methods have similar precision.

The benefit of handling UAVs is automation. With flight planning software, UAV's can take aerial photographs on a predetermined flight path and overlay. Also, in post-processing, human resources are needed when marking the GCP on photos. The points in point cloud have the same color as the terrain, which eases the post-processing of the point cloud.

In photogrammetric surveys, aerial photographs play an important role in the accuracy. The research revealed that the surface based on the photos of the aerial camera with a lower resolution is more inaccurate compared to a large-scale camera.

The survey of surface patterns in road construction requires greater accuracy than the topographic survey. Therefore, it is not suitable to use a plane type UAV in this area, but rather a helicopter UAV used in research, which allows lower flight height to be performed. When planning flight height, it is necessary to take into account the required accuracy and to choose the flight altitude so that the GSD is 3 times smaller.

This study confirmed the elements mentioned earlier in the researches. Also, experimentally found elements of the UAV photogrammetric survey method, which should be avoided and how to achieve the most accurate and realistic surface model.