

1 Positsioneerimine

Selleks, et droonidelt kogutavat teavet saaks kasutada, peab seda ruumis positsioneerima. Neid andmeid on vaja ka drooni enda asukoha jälgimisel. Selleks ülesandeks kasutatakse GNSS (*Global Navigation Satellite System*) seadmeid, mis kombineerivad erinevate riikide poolt loodud ja hooldatavaid satelliitsüsteeme nagu GPS, GLOSNASS, BEIDOU, GALILEO. Tavaliselt jääb droonidel kasutatavate geopositsioneerimise seadmete täpsus 2–5 m piiresse, mis on samas suurusjärgus nutitelefonidega. Taoliselt täpsusest üldiselt ei piisa näiteks (korduv)kaardistuste jaoks, kus oleks vajalik erinevatel aegadel tehtud ortofotod joondada sisuliselt ühe piksli täpsusega – tüüpiliselt < 10 cm.

Kõige levinum viis vajaliku täpsuse saavutamiseks ja hiljem ka kontrollimiseks on kasutada maapealseid referentspunkte. Viimati nimetatud jagunevad omakorda sõlm- ja kontrollpunktideks (vt peatükk 1.2) ja nende koordinaadid mõõdetakse vajalikku täpsust võimaldava mõõteriistaga, tavaliselt täppisGNSS seadmega. Sõlmpunkte kasutatakse andmete, näiteks ortofoto täpsemaks georefereerimiseks ja kontrollpunkte, et iseloomustada vigu. Põhimõtteliselt peab referentspunkt olema märgitud maastikul nõnda, et ta oleks andmetest üheselt äratuntav – fotode jaoks kasutatakse näiteks värviga markeerimist, LIDAR-tööde puhul kindla kujuga markereid, termotöödel alumiiniummarkereid, mis peegeldavad külma taevast jne. Hea tulemuse saamiseks peavad sellised punktid paiknema ühtlaselt üle kaardistatava ala, nende arv sõltub konkreetse ülesande jaoks vajalikust täpsusastmest. Tuleb pidada silmas, et lisaks plaanilisele katvusele, peab arvestama ka referentspunktide ühtlase vertikaalse jaotusega. Ortofotode toomisel on soovituslik märkida üks referentspunkt 1–10 miljoni piksli kohta (Singh ja Frazier, 2018). Tihtilugu on kontrollpunktide mahamärkimine ja mõõdistamine kõige ajamahukam osa droonipõhisel kaardistamisel.

Alates 2018. aastast jõudsid laiemalt turule droonidele mõeldud täpsemad GNSS-seadmed, mille täpsusklass (1–5 cm plaaniliselt, <10 cm vertikaalselt) on juba piisav enamike tööde puhul andmete otseseks georefereerimiseks (*direct georeferencing*). Nende kasutamisel saab juba droonilt tehtud üksikud fotod või laserskanneri puhul andmepunktid georefereerida vajaliku täpsusega ning vajaminevate maapealsete sõlmpunktide arv langeb oluliselt või kaob isegi täielikult. Täpsuse kontrolliks on sõltumatuid kontrollpunkte siiski vaja, aga kuna täpsushinnangud käivad kaasas nüüd juba iga fotoga, siis piisab üldjuhul vaid paarist kontrollpunktist.

Valdavalt kasutatakse praegusel ajal kahte täppisGNSS lahendust: **PPK** (*Post Processed Kinematic*) ja **RTK** (*Real Time Kinematic*). Mõlema puhul on vajalik kahe samaaegselt töötava GNSS-anduri olemasolu, kusjuures üks nendest paikneb droonil ja teine on paigalseisev e staatiline baasjaam kuskil läheduses. Need kaks seadet peavad ruumis paiknema võimalikult lähestikku, et nad saaksid signaale samadelt satelliitidelt ning atmosfääriolud oleksid võimalikult sarnased. Kahe GNSS-seadme vahekaugusest (*baseline*) sõltub lõpliku georefereerimise täpsus: näiteks iseloomustatakse RTK mooduli puhul täpsust kujul „1.5 cm + 1 ppm“. Sealjuures „1.5 cm“ on viga igal juhul aga „+1 ppm“ tähendab, et drooni ja baasjaama vahekauguse iga kümne kilomeetri kohta kasvab viga ühe sentimeetri võrra.

Maapealse, staatilise baasjaamana võib kasutada iseenda teist GNSS-vastuvõtjat või kasutatakse kuskil kaugemal asuva püsijaama andmeid, millelt saadakse GNSS parand üle mobiilse andmeside või on andmed hiljem võrgust alla laetavad. Püsijaamadest on loodud võrgud (CORS - *Continuously Operating Reference Station*), mis on olemas enamikus Euroopa riikides, Selline võrgustik annab võimaluse arvutuslikult tekitada püsijaamade vahele virtuaalset baasjaama (VRS - *Virtual Base Station*), et vähendada baasjaama ja drooni vahekaugust võrreldes reaalse püsijaamaga. Eestis on riigi poolt hallatav 27 püsijaamast koosnev võrk, mis pakub ESTPOS-i nime all GNSS parandi jagamise teenust. Lisaks on Eestis veel mitu eraettevõtete (nt Trimble, Hades jne) poolt hallatavat püsijaamade võrku.

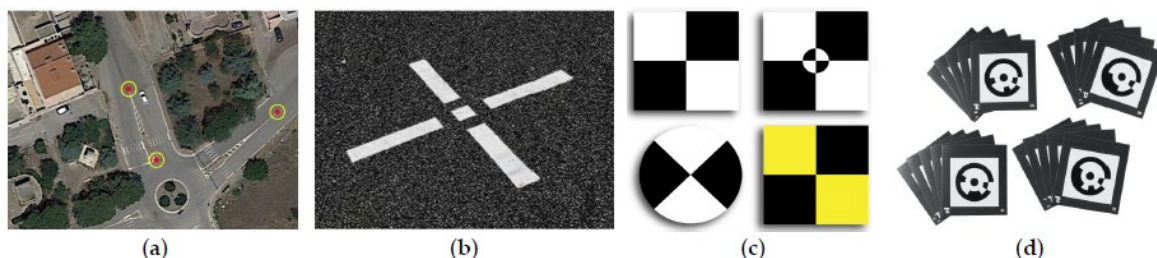
PPK lahenduse puhul toimub täpsete koordinaatide arvutamine peale lendu, RTK puhul aga reaalajas. Seega on RTK kasutamise puhul vajalik pidev kahepoolne side drooni ja maapealse kontrolleri ja püsijaama võrgu vahel. Kontrolleri ja drooni vaheliseks suhtluseks kasutatakse telemeetria jaoks mõeldud sidekanalit. Samas on pideva side tagamine kogu lennu ajal mõningatel juhtudel problemaatiline. PPK lahenduse korral salvestatakse üheaegselt mõlema GNSS-andmed ja koordinaatide parandamine tehakse hiljem arvutis. Sellisel juhul on kasutajal oluliselt suurem paindlikkus arvustuskeemide valimisel ja lisaks saab ka vigu täpsemalt analüüsida. Nii peetakse PPK süsteemi mõneti töökindlamaks aga võrreldes RTK-ga on see töömahukam. Samas üks ei välista teist: ka vaikimisi töötava RTK korral saab tavaliselt GNSS-andmed salvestada ning vajadusel teha nende abil hiljem PPK töötlus.

Nii PPK- kui ka RTK-lahendusi on võrreldud maapealsete referentspunktide meetodiga. Nende katsete tulemusena selgus, et fotode täpsemad asukohad (Stöcker *et al* 2017; Turner *et al* 2014) koos kaamera kalibreerimisega (Carbonneau ja Dietrich, 2017) võimaldavad tõesti saavutada vajaliku täpsuse (peaaegu) ilma aeganõudva referentspunktide märkimiseta. 2022. aastal on professionaalseks kasutuseks mõeldud droonid praktiliselt kõik RTK- ja/või PPK-võimekusega, lisaks saab vanematele droonidele juurde lisada PPK-lisamooduleid (nt Emlid Reach või Topodrone tooted). Mõlema täppisGNSS-lahenduse puhul on vajalik fikseerida täpne foto tegemise hetk – selleks kasutatakse tavaliselt välgu hoidjasse (*hotshoe*) käivat lisaseadet.

2 Maapealsed referentspunktid ja õpiandmed

Maateadustes kasutatavad andmed peavad/võiksid enamasti olla georefereeritud ehk seotud mõne absoluutse koordinaatsüsteemiga. Üks viis selle eesmärgi täitmiseks on kasutada maapealseid referentspunkte e markereid. Maapealsed referentspunktid saab jaotada kaheks: sidupunktid ja kontrollpunktid. Esimesi kasutatakse andmete georefereerimiseks ja sisemiste parameetrite täpsustamiseks. Kontrollpunkte kasutame sõltumatuks georefereerimise vigade hindamiseks.

Maapealsete referentspunktide puhul on väga oluline, et need oleksid fotodelt hästi näha ja nende keskkohast üheselt identifitseeritav. Punkte võib märkida mitut moodi, aga kõige olulisem on, et need oleksid selgelt eristuvad keskkonnast, kuhu nad paigutatakse (Joonis 1).



Joonis 1. Mõned näited maapealsetest referentspunktidest e markeritest (Pepe *et al.*, 2022): a) olemasolevate reaalsete objektide kasutamine markerpunktidenä b) värviga tähistatud markerpunkt c) kõrge kontrastiga markerid d) masinloetavad markerid.

Markerina kasutatav tähistus ei tohi olla liiga hea peegeldaja, eriti, kui lennutada drooni ja teha pildistustöid lauspäikesega. Näiteks valget värvi markeri peegeldus võib päikese käes olla nii tugev, et hajub anduris ka naaberpikslitele. Nii võib säravvalge ruut „määrida“ ka kõrval olevat musta ruutu ja markeri keskpunkti tuvastamine pildilt muutub keerukaks. Selleks, et tagada keskpunkti ühene tuvastus, peab see olema piisavalt suur. Kui referentspunkti tähis katab fotol ainult 6x6 piksli suuruse ala, siis

muutub sellise markeri keskpunkti pildil märkimine keeruliseks. Maleruudu konfiguratsiooniga maapealse referentspunkti tähise suurus pildil peab olema üle 10 piksli.

Maapealsete referentspunktide märkimine ja mõõdistamine on üks aeganõudvamaid protseduure droonilt tehtava seire juures. Seetõttu üritatakse hakkama saada võimalikult väheste punktidega. Kui droonil on peal suure täpsusega diferentsiaal GNSS, siis on siinjuures suur abi piltide otsesest georefereerimisest, sest sel juhul väheneb vajalike referentspunktide arv oluliselt.

Tihtilugu võib olla maapealsete markerite märkimisel piiravaks teguriks ala ligipääsetavus. Seega on iga seireala omamoodi unikaalne, aga mõningad üldised juhised markerite paigutusel on järgmised:

1. Referentspunktid peaks paiknema seireala nurkades (servades) ja keskel – sellise paigutuse puhul on oluline, et katame ära võimalikult suure x ja y suunalise ulatuse. Samuti tuleb meeles pidada, et drooni fotogramm-meetria abil valmiva 3D-mudeli täpsus väheneb oluliselt maapealsetest referentspunktidest väljapoole jääval alal (ekstrapoleerimine), kui need on ainuke georefereerimise viis.
2. Kui vähegi võimalik, tuleb seirealal katta referentspunktidega vertikaalne ulatus ehk siis paigutada markereid erinevatele kõrgustele, nt oru põhja, künka tippu vms.
3. Vajalik on arvestada lennutrajektooriga – mida suuremale arvule piltidele referentspunkt jääb, seda suurem on selle punkti kasutegur. Seetõttu ei ole soovitatav panna maapealset referentspunkti päris uuringuala äärmisesse nurka, kus ta jääb ainult kahele või kolmele pildile. Referentspunktide paigutust tuleks planeerida ja läbi mõelda koos lennuplaani kavandamisega.
4. Kasulik on mõelda uuritava ala suuruse ja keerukuse peale. Ristkülikukujulise ala ja korrapäraste lennujoonte võrgustiku puhul võib minimaalselt piisata neljast markerpunktist ala nurkades ja ühest markerpunktist uuritava ala keskel. Kui ala ei ole enam nii korrapärane, siis tuleb punktide asukohad paremini läbi mõelda. Ühtlasi võib uuringualas olla osalasid, mille puhul on vaja suuremat täpsust – nendesse osadesse tuleks planeerida rohkem referentspunkte.

Maapealsete referentspunktide kohta on soovitatav teha paberile visand, kus punktid üksteise suhtes asuvad. Eriti oluliseks muutub see juhul, kui punkte on rohkem ja seireala on üpris ühetaoline. Põhjus, miks on vaja markeritega nii palju vaeva näha, on see, et algset tehtud viga on kumuleeruv ja referentspunktide ja/või piltide otsese georefereerimise vead kanduvad paratamatult edasi fotogramm-meetria tulemustesse. Enamikus fotogramm-meetria tarkvarades saab mõõdistustäpsuse defineerida, mis lubab tarkvaral nende vigade piires muid mudeldamise parameetreid kohendada ja lõpptulemus võib olla keskmiselt pisut täpsem.

Drooniseirega koos või ajaliselt võimalikult lähestikku, on soovitatav koguda ka **referentsandmed**. Üldiselt öeldes on referentsandmed maapealne kontrollitud andmestik, mis võimaldab meil drooni andmeid interpreteerida. Sarnaselt referentspunktidega jaotatakse referentsandmed kaheks: õpiandmed klassifitseerimisalgoritmide treenimiseks ja kontrollandmestikuks, mille abil mõõdetakse klassifitseerimise täpsust.

Näiteks, kui soovime kaardistada Sosnovski karuputke levikut, siis võivad referentsandmeteks olla selle karuputke olemasolu tähistavad asukohad. Tähistamiseks on aga üsna mitmeid viise, mis erinevad omavahel ka usaldusväärsuse ja töömahukuse poolest. Näiteks võib välitöötaja salvestada käsi-GNSSiga kontuuri, mille sisse jääb karuputke kasvuala. Nende andmetega tegeleja paraku ei tea ilma metaandmeteta, mis on sellise kontuuri asukohatäpsus (1-5m?) ja mis on drooniseire ja selle ortofoto-mosaiigi georefereerimise täpsus. Ehk siis ei saa vaikumisi eeldada, et selle kontuuri kogu „sisu“ on ka tegelikult referentsandmetena kasutatav.

Nagu referentspunktid, on ka referentsalad hea enne lendu visuaalselt tähistada, nii et need tähised oleks nähtavad ka droonipiltidelt. Tulles tagasi karuputke-näite juurde, siis referentsala tähistamine on väga

ajamahukas osa välitööst ning taimestik, sõltuvalt lokaalsetest kasvukohtadest, kipub ka ühe liigi piires olema üsna varieeruv. Nagu ka varasemalt mainitud, tuleb referentsalaks otsida fenoloogiliselt sobivat hetke, kus meid huvitav objekt oleks maksimaalselt kontrastne ümbritseva suhtes. Teiselt pool on hea, kui valitud hetkel on meie huviobjekt (liigi)siseselt võimalikult homogeen, sest referentsalad peaksid ära katma kogu uuringualal oleva varieeruvuse.

Üheks väga meelitavaks võimaluseks drooniseire puhul on tõsta ruumilist/spektraalset/radiomeetrilist resolutsiooni (mis maksab kätte andmemahus ja suuremas töömahus!), nii et meie karuputk oleks ortofotolt paremini äratuntav ja ekspert saab õpialad digitaliseerida otse drooni ortofotolt. See variant on hea enne suuremahulist kaardistamist testida. Isiklikust kogemusest võib öelda, et ka lihtsa struktuuri ja väheste taimeliikidega koosluste ortofotodelt on isegi tipp-eksperdil raske kohe klassifitseerimist teostada, sest üldiselt ei sobi traditsioonilised maapealsed seiremeetodid otse drooniseirega kokku. Nii tuleb maapealset metoodikat kohandada (nt grupeerida liike jne), et need seiremeetodid omavahel kohanduksid (Sun *et al.*, 2021). Tasub läbi mõelda maapealsete referentsandmete kogumise protsess. Näiteks, kuidas dokumenteerida asukohad ja andmepunktide nimetamise skeem, mis klasside kohta andmeid koguda ja kuidas see hiljem ühildada järeltöötlusega. Metaandmed on siingi suureks abiks, kui hiljem midagi vaja täpsustada. Väga suure kasuteguriga on maapinnal tehtud georefereeritud fotod.

3 Kasutatud kirjandus

- Carbonneau, P. E., & Dietrich, J. T. (2017). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: Implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3), 473–486. <https://doi.org/10.1002/esp.4012>
- Pepe, M., Alfio, V. S., & Costantino, D. (2022). UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field. *Applied Sciences*, 12(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/app122412886>
- Singh, K. K., & Frazier, A. E. (2018). A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5078–5098. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420941>
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., & Gerke, M. (2017). QUALITY ASSESSMENT OF COMBINED IMU/GNSS DATA FOR DIRECT GEOREFERENCING IN THE CONTEXT OF UAV-BASED MAPPING. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W6, 355–361. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-355-2017>
- Sun, Z., Wang, X., Wang, Z., Yang, L., Xie, Y., & Huang, Y. (2021). UAVs as remote sensing platforms in plant ecology: Review of applications and challenges. *Journal of Plant Ecology*. <https://doi.org/10.1093/JPE/RTAB089>
- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2014). Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738–2745. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>