

1 Fotogramm-meetria lühikirjeldus

Drooni abil saadavate andmete fotogramm-meetria on üks enamlevinud andmetöötlusviis, mille tulemusel parandatakse üksikute fotode geomeetrilisi moonutusi, luuakse objektist 3D-mudeleid ning mosaiigitakse kokku ortofotosid. Fotogramm-meetria edukas kasutus nõuab kindlat fotode paigutust ning arvestamist mitmete asjaoludega.

Võrreldes klassikaliste, väga täpselt kalibreeritud meetriliste aerofotokaameratega, põhjustavad droonide ja kalibreerimata kaamerate kasutamine kaameraplatvormi ebastabiilsust ja tulemuseks on kehvema kvaliteediga aerofotod (Hardin ja Jensen, 2011). Drooni fotogramm-meetria kasutajale mõeldud väljakutsed toob esil Turner *et al.* (2014) oma artiklis: varieeruva mõõtkavaga pildid, suured ülekatted, väga erineva orienteeritusega pildid ja madalast lennukõrgusest ning reljeefist tingitud suured asukohanihked. Kuna probleemide loetelu on pikk, siis ei sobigi enam traditsioonilise fotogramm-meetria võtted selliste piltide töötlemiseks, vaid on vaja teistsugust lähenemist.

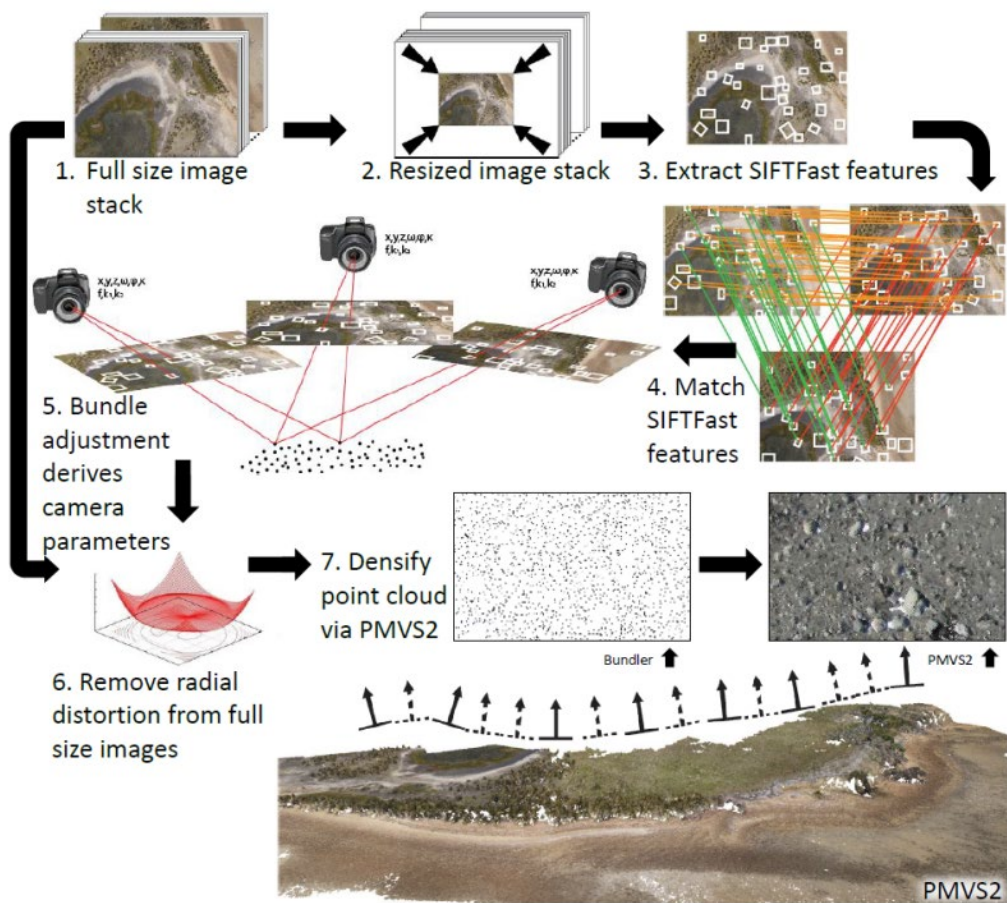
Uuenenud lähenemisviisi on ära kirjeldanud Snavely (2008). Drooni fotogramm-meetria tähendab siinkohal *Structure from Motion – Multi View Stereo* töövoogu (SfM-MVS, edaspidi SfM). Tegemist on klassikalise fotogramm-meetria printsiipe kasutava meetodiga, mis seob klassikalise töövoogu arvutinägemise ja matemaatilise optimeerimisega. See ongi Snavely (2008) poolt tehtud uuendus, kes sidus esimesena eelnimetatud arenguloo ühte protsessi kokku. SfM töövoogu tulemusel luuakse piltide põhjal 3D-punktipilv, arvutatakse jooksvalt kaamera geomeetrilise moonutuse parameetrid, asukohad ja vaatesuunad. Loogilise jätkuna saab 3D-punktipilvest luua pinnamudeli, mille üksikute fotode abil nn sulatatakse kokku ortofoto.

SfM-töövoogu saab lisada ka maapealseid referentspunkte, mis aitavad loodud, esialgu suhtelises ja ilma skaalata, 3D-mudeli siduda reaalse objekti skaala ning asukohaga ruumis.

Kokkuvõtvalt on SfM fotogramm-meetria peamised etapid järgmised:

1. Fotodelt otsitakse unikaalsed võtmepunkte (*key points*), kasutades värvigradiiente ehk muutusi erinevas skaalas. Otsimiseks kasutatakse erinevaid masin-nägemise algoritme (nt SIFT-algoritm);
2. Fotod on sobitatakse omavahel, kasutades selleks eelnevalt leitud võtmepunkte. Kokkusobivad võtmepunktid ühendatakse ja nii tekivad sõlmpunktid (*tie points*);
3. Sobitatud piltide sõlmpunktide põhjal arvutatakse välja kaamera matemaatiline mudel, mille abil korrigeeritakse piltide geomeetrilised moonutused ning koostatakse kogu objekti ja pildistamiskohtade paigutuse suhteline 3D-mudel. See kõik toimub ühe suure iteratiivse optimeerimisprotsessi (*bundle adjustment*) käigus. Tulemuseks saadakse kaamera matemaatiline mudel, pildistamise suhtelised asukohad ning objektist hõre punktipilv (*sparse point cloud*);
4. Neid kasutatakse sisendina MVS algoritmide abil tiheda punktipilve (*dense point cloud*) loomiseks;
5. Tihedat punktipilve kasutatakse objektist lihtsustatud, katkematu 3D-pinna (*mesh*) või pinnamudelite (DSM – *Digital Surface Model*) arvutamiseks. Nende andmete abil on võimalik üksikutest fotodest juba kokku mosaiikida ortofoto.
6. Tihedat punktipilve on võimalik klassifitseerida, eraldades näiteks maapinna punktid hoonete ning taimestiku punktidest. Ainult maapinna klassi kuuluvatest punktidest saab arvutada digitaalse maapinna mudeli (DEM – *Digital Elevation Model*, ka DTM – *Digital Terrain Model*). Taimestiku puhul saadakse tehte DSM – DEM abil võramudel (CHM – *Canopy Height Model*), mis iseloomustab taimestiku kõrgust. Tänapäeval on punktipilve klassifitseerimise võimekus olemas kõigis enam-levinud SfM-programmides. Enamasti kasutatakse punktipilve klassifitseerimiseks suhteliselt lihtsaid geomeetriapõhiseid lävendeid, aga järjest kasvab masinõppemeetodite kasutamise osatähtsus.

SfM fotogramm-meetriaga seotud protsessist, probleemidest jne. on oma artiklites kokku võtnud näiteks Harwin ja Lucieer (2012), kelle artiklist on võetud ka alljärgnev kokkuvõttev Joonis 1. SfM fotogramm-meetria põhietapid (Harwin & Lucieer, 2012).



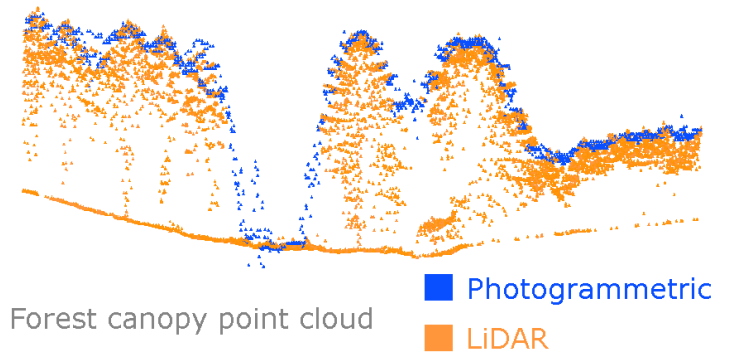
Joonis 1. SfM fotogramm-meetria põhietapid (Harwin & Lucieer, 2012).

SfM-meetodi kasutamine eeldab kokkuvõttelt järgmist:

- 1) pildistatavad objektid on piisavalt unikaalse tekstuuriga, kuna SfM-meetod ei toimi vee, tugevalt peegeldavate objektide, väga ühtlast värvi või ühtlase muustriga objektide puhul.
- 2) objekt (peaaegu) ei muutu pildistamise ajal (nt tüüpiline probleem on tuule käes liikuvad oksad ja sõitvad autod, aga foto mõttes muutuvad piltidel ka peegeldavad objektid, sest eri nurga alt pildistades paistab objektilt uus peegeldus. SfM meetod on tolerantsem valguse, skaala, orientatsiooni muutumisele, aga väga suured muutused ka nendes parameetritest halvendavad meetodi täpsust.
- 3) Vajalik on fotode suur ülekate – tüüpiliselt ca 70% nii piki- kui põiksuunas ja keerulisemate objektide korral isegi kuni 90%. Iga punkti, mida me tahame hiljem mudelis näha, peaksime pildistama minimaalset 3–5 erinevast asukohast ja punkti peab ümbritsema mõningane värvimuutus, mida SfM saab ära tunda. Näiteks mets on SfM-meetodi jaoks raske objekt, sest tegemist on väga sarnase ja ennast kordava muustriga ning lisaks on puude vahel palju kitsaid tühimikke, mida ei saa mitme eri nurga alt pildistada. Selliste raskete objektide korral peab pildistamise ülekate ning erinevate nurkade alt tehtud fotode hulk olema suurem. Kõrgemalt lennates katab üks pilt suurema ala, kust ehk õnnestub unikaalseid võtmepunkte leida, lisaks saab pildistada suurema radiomeetrilise lahutusega, et väikeseid erinevusi paremini tabada. Üldiselt

SfM vähegi tihedamast metsast „läbi“ ei näe. Erinevate nurkade alt pildistamine aitab oluliselt parandada matemaatilist kaameramudelit ja seetõttu on kasulik ka tavalise „otse-alla“ kaardistuselennu lõppu lisada mõned nurga alt tehtud pildid (James *et al.*, 2019).

NB! Siinkohal peab rõhutama SfM-punktipilve erinevust laserskanneritega toodetud andmestikust, sest laseri osapeegelduste abil toodetud punktipilv tungib üldjuhul läbi taimeistiku ja annab infot taimeistiku sisemise struktuuri ning selle all oleva maapinna kohta (Joonis 2).



Joonis 2. Fotogramm-meetria ja lidari punktipilve võrdlus (Lisein *et al.*, 2013).

Drooni fotogramm-meetria punktipilv peegeldab seega pigem „pealmist kihti“ objektidest, mida pildistatakse.

Kõige tuntumad SfM-meetodit rakendavad programmid on Agisoft MetaShape ja Pix4D. Viimasega käib kaasas ka spetsiaalne lennuplaneerija Pix4Dcapture. Ka suurimal droonitootjal, DJI, on olemas oma SfM-tarkvara (DJI Terra). Vabavaralisi programme on samuti loodud, millest tuntuimad on MicMac ja WebODM. Kommertstarkvarad on tänapäeval juba üpris automatiseeritud ja suure osa nüanssidega ei pruugi kasutaja üldse kokku puutuda. Teadlikumale kasutajale on samas jäetud võimalused, et tulemusi detailselt üle kontrollida ja vajadusel muuta erinevaid seadistusi. Interneti otsingumootorite toel leiab huviline erinevaid töövooge ja heade praktikate kirjeldusi, kuidas nende tarkvarade abil saavutada parimat tulemust. Üsna värske ülevaate SfM-tarkvarast ja töövoost koos droonide kasutamisega leiab lugeja Pepe *et al.*, (2022) ülevaateartiklist.

Lisaks tavapärasele n-ö oma arvutisse installeeritud tarkvarale, on huvilistele saadaval mitmed pilveteenused. Sellisel juhul saab kasutaja oma fotod üles laadida ning mõne aja pärast saadetakse juba vastu ortofoto ja 3D-mudel. Nende puhul on aga kasutajal oluliselt väiksem võimalus kuidagi kontrollida töövoogu või täpsust. Tuntuim sellist teenust pakkuv koht on DroneDeploy.

Kindlasti tuleb fotogramm-meetria töövoogu puhul arvestada suurte arvutusmahtudega, mis nõuavad suuremate andmehulkade läbitöötamisel võimekat arvutit. Osad arvutusetapid on paljudes tarkvarades optimeeritud graafikaprotsessorite (GPU – *Graphical Processing Unit*) kasutamiseks – hea videokaart on SfM-tööjaama hädavajalik osa.

Mõni tarkvara võimaldab ka osalist pilvearvutust, kus kõige mahukamate etappide arvutamise saab kasutaja tellida võrgust, säilitades samas täieliku kontrolli parameetrite üle. Kuna SfM-meetod on suure arvutusmahuga ja toodab ka üsna mürist infot, siis kõik tarkvarad kasutavad sisemist optimeerimist ja filtreerides vaheprodukte. Samuti on omavahel erinevad nii algoritmid kui ka nende rakendamise viisid. Kõik need asjaolud avalduvad ka tulemustes – erinevatest programmidest saame sama sisendiga pisut erinevaid tulemusi. Seetõttu peaks suurt täpsust nõudvates ning korduvates uuringutes kasutama võimalusel sama riist- kui ka tarkvara ja töötlemise parameetreid. Enamik tarkvaradest koostab kogu töövoost automaatse kokkuvõtte, kus on parameetrid kirjas. See kokkuvõte tuleb metaandmetena salvestada SfM abil saadud tulemuste juurde.

Kokkuvõttena saab öelda, et SfM fotogramm-meetria on hetkel üks kõige odavam meetod, et teha objektidest 3D-mudeleid ja ortofotosid. Kusjuures andmeallikatenä viivad SfM fotogramm-meetria sisendiks olla ka multispektraal- või termopildid. Kui vaadata seda meetodid kriitiku pilgu läbi, on tegemist ka pirtsaka meetodiga, mille rakendamisel tuleb arvestada päris paljude kvaliteeti mõjutavate teguritega. Eelnevat väidet toetab allolev tabel (Tabel 1), kus Iglhaut *et al.*, (2019) on teinud põhjaliku kokkuvõtte.

Tabel 1. SfM fotogramm-meetria tulemusi mõjutavad parameetrid (Iglhaut *et al.*, 2019).

Valdkond	Muutuja	Soovitus
Objekt	Tekstuur	Suur kontrastsus, mis võimaldab tuvastada võtmepunkte
	Korduvad mustrid	Suurenda ülekatteid ja georeferentseerimise täpsust!
	Liikuvad objektid	Välgi!
	Varjus olevad alad	Suurenda kattuvust ja vaatenurki!
Valgusolud	Päikese nurk	Kõrge! Keskpäev on parim aeg!
	Ilm	Pilvealune ühtlane valgus on parim 3D-mudelite koostamise jaoks; spektraalvaatluste puhul eelistatud selge taevast.
	Muutuva valgus	Välgi!
Kaamera parameetrid	Fookuskaugus	28–35 mm on vaikimisi sobivaim, et vähendada moonutusi.
	Heledus	Ühtlane üle pildi, kontrastne. Välgi pildil tugevalt ala- ja ülesäris alasid.
	- Ava	Väike, maksimaalse fookussügavuse jaoks*. Objektiivid on tavaliselt parima teravusega f 5,6–8 avaga.
	- Säriaeg	Kiire, et vähendada liikumisest tingitud hägusust*.
Pildistamise plaan	- ISO	Madal minimaalne pildimüra* saamiseks, soovitatav vaikimisi automaatne ISO
	Piksli füüsiline suurus anduril	*Ideaalne stsenaarium, kuid on alati selle kolme parameetri kompromiss
	Ülekatted	Võimalikult suur, sest mõjutab positiivselt dünaamilist ulatust ja tundlikkust
	Vaatenurgad	Kõrge, > 70% piki- ja põiki, metsade puhul min 80%, termopiltide puhul 90%.
Töötluse parameetrid	Kaugus objektist	Lisa kaldfotosid kaamera ja 3D-mudeli paremaks arvutamiseks!
	SfM - sobitamine	Ortofoto tootmiseks kasuta ainult pinnaga risti pildistatud fotosid!
	- Pildi skaleerimine	Suureneva kaugusega kasvab GSD ja langeb mudelite täpsus.
	- Võtmepunktid	Pildi allaskaleerimine vähendab oluliselt arvutusmahtu, kuid vähendab ka leitud sõlmpunktide hulka
Teisendused	MVS - tihe punktipilv	Erinevatel skaaladel võib piltide sobitamine olla erineva tulemuslikkusega.
	Teisendused	Tiheda punktipilve puhul võib samuti pilte allapoole skaleerida, vähendades arvutusmahtu koos lõpliku leitud punktide arvuga
		Punktipilvede teisendamiseks pindadeks on palju erinevaid meetodeid, mis annavad ka erineva tulemuse.

2 Kasutatud kirjandus

- Hardin, P. J., & Jensen, R. R. (2011). Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Remote Sensing: Challenges and Opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 99–111. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.1.99>
- Harwin, S., & Lucieer, A. (2012). Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*, 4(6), 1573–1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: A Review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155–168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., Noble, T., Robson, S., & Lane, S. N. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(10), 2081–2084. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- 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>
- 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>