

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Ovrednotenje različnih načinov označitve katastrskih mejnikov za fotogrametrično izmero z letalnikom in analiza njihovega vpliva na položajno točnost oblaka točk in ortofota

Ciljni raziskovalni program »CRP 2019« v letu 2019
Raziskovalni projekt št. V2-1934

KONČNO POROČILO



Ljubljana, oktober 2021

Ovrednotenje različnih načinov označitve katastrskih mejnikov za fotogrametrično izmero z letalnikom in analiza njihovega vpliva na položajno točnost oblaka točk in ortofota

Končno poročilo

CRP program: Ciljni raziskovalni program »CRP 2019« v letu 2019
Težišče: Visoko produktivno gospodarstvo, ki ustvarja dodano vrednost za vse
Tematski sklop: Učinkovito upravljanje in kakovostne javne storitve

Št. projekta: V2-1934

Naročnika: **Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS)**
Ministrstvo za okolje in prosto RS, Geodetska uprava RS (MOP-GURS)
Pogodba št.: 2552-19-000100 (MOP-GURS)
Predstavniki naročnika: Ljiljana LUČIČ (ARRS)
Franc RAVNIHAR (MOP-GURS)

Izvajalka: **Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG)**
Raziskovalna skupina: Geoinformatika in upravljanje nepremičnin (0792-015)
Vodja projekta: dr. Anka LISEC

Člani projektne skupine:
(po abecednem vrstnem redu) dr. Anka Lisec (24340)
dr. Marjan Čeh (14001)
dr. Samo Drobne (11215)
Bujar Fetai (54080)
dr. Dejan Grigillo (17882)
dr. Mojca Kosmatin Fras (06120)
dr. Klemen Kozmus Trajkovski (23500)
dr. Klemen Kregar (33435)
dr. Krištof Oštir (15112)
dr. Polona Pavlovčič Prešeren (19585)
dr. Dušan Petrovič (15392)
Jernej Tekavec (38467)
Barbara Trobec (18846)
dr. Tilen Urbančič (33455)

Lisec A., Kosmatin Fras, M., Grigillo, D., Čeh, M., Kozmus Trajkovski, K., Fetai, B., Drešček, U., Urbančič, T., Tekavec, J., Pavlovčič Prešeren, P., Kregar, K., Oštir, K., Drobne, S., Petrovič, D., Trobec, B. (2021): Ovrednotenje različnih načinov označitve katastrskih mejnikov za fotogrametrično izmero z letalnikom in analiza njihovega vpliva na položajno točnost oblaka točk in ortofota. končno poročilo projekta CRP V2-1934. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 29. 10. 2021

izr. prof. dr. Anka Lisec, vodja projekta

Pregled nad izvedenimi dejavnostmi

Št.	Delovni svežnji in naloge (načrtovane/ izvedene)	Načrtovano	Rezultati
DS1	Določitev okvira za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenega letalnika [M01-M08]	30. 6. 2020	R1: Prvo vmesno poročilo
	Naloga 1.1: Pregled literature in mednarodnih priporočil	29. 2. 2020	R1.1
	Naloga 1.2: Analiza in opredelitev zahtevane položajne kakovosti koordinat mejnikov	31. 3. 2020	R1.2
	Naloga 1.3: Določitev pogojev za objektivno oceno kakovosti označitve	30. 6. 2020	R1.3
	Naloga 1.4: Določitev tipov tarč za začasno označitev oslonilnih točk in mejnikov v testiranju ter predlog tarč za stalno označitev katastrskih točk (mejniov)		
DS2	Testiranje kakovosti različnih načinov označitve oslonilnih točk in mejnikov za samodejno razpoznavanje in slikovno merjenje na oblaku točk in na ortofotu [M07-M12]	31. 10. 2020	R2: Drugo vmesno poročilo (letno)
	Naloga 2.1: Izbor študijskih območij	31. 8. 2020 (prvo študijsko območje)	R2.1
	Naloga 2.2: Opredelitev parametrov izvedbe zajema podatkov z letalnikom		
	Naloga 2.3: Izvedba zajema podatkov z letalnikom		
	Naloga 2.4: Obdelava podatkov	31. 10. 2020 (delni rezultati)	R2.2 (in R3.1)
DS3	Ocena primernosti predlagane fotogrametrične izmere mejnikov z daljinsko vodenim letalnikom [M19-M24]	31. 10. 2021	R3: Zaključno poročilo
	Naloga 3.1: Kontrola kakovosti in verifikacija	30. 4. 2021	R3.2
	Naloga 3.2: Ocena ekonomske učinkovitosti	31. 7. 2021	
DS4	Izdelava priporočil za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenih letalnikov [M22-M24]	31. 10. 2021	R3: Zaključno poročilo
	Naloga 4.1: Priprava priporočil za označevanje oslonilnih in kontrolnih točk s tarčami in priporočila za točno ter zanesljivo določitev njihovih položajev	31. 10. 2021	R3.3
	Naloga 4.2: Izdelava usmeritev za označevanje mej pravic na zemljiščih s stalnimi mejniki in začasnimi tarčami		
	Naloga 4.3: Priprava priporočil za uporabo daljinsko vodenih letalnikov za izmero katastrskih mejnikov v praksi		
DS5	Koordinacija in diseminacija [M01-M24]	31. 10. 2021	R4: Objave
	Naloga 5.1: Koordinacija projekta in komunikacija z naročnikom	31. 10. 2021	R4.1, R4.2, R4.3
	Naloga 5.2: Diseminacija in prenos znanja v prakso		

IV

Pregled pričakovanih rezultatov

Št. izsledka	Naziv	Datum
R1	Prvo vmesno poročilo	30. 6. 2020
	R1.1: Pregled domače in mednarodne literature ter dobrih praks s področja obravnave	29. 2. 2020
	R1.2: Povzetek zakonskega okvirja na področju katastra nepremičnin v Sloveniji in opredelitev zahtevane položajne kakovosti koordinat mejnikov	31. 3. 2020
	R1.3: Opredelitev pogojev za objektivno oceno kakovosti označitve	30. 6. 2020
R2	Drugo vmesno poročilo – letno poročilo	31. 10. 2020
	R2.1: Načrt izvedbe zajema podatkov z letalnikom na študijskih območjih	31. 8. 2020
	R2.2: Prvi rezultati zajema in obdelave podatkov (prvo testno študijsko območje)	31. 10. 2020
R3	Zaključno poročilo	31. 10. 2021
	R3.1: Rezultati zajema in obdelave podatkov na študijskih območjih	30. 4. 2021
	R3.2: Rezultati verifikacije in ocena ekonomske učinkovitosti	31. 7. 2021
	R3.3: Priporočila za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenih letalnikov	31. 10. 2021
R4	Objave rezultatov	31. 10. 2021
	R4.1: Strokovni članek v reviji	
	R4.2: Recenzirani raziskovalni (znanstveni) članek v reviji	
	R4.3: Predstavitev projekta na simpoziju	

Legenda:

Opravljen
V teku
Načrtovano

KAZALO

1	Uvod.....	1
2	Določitev okvira za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenega letalnika.....	5
2.1	Pregled literature in mednarodnih priporočil.....	5
2.1.1	Fotogrametrija in zemljiški kataster.....	5
2.1.2	Raziskave na področju uporabe UAV v zemljiškem katastru	6
2.2	Analiza in opredelitev zahtevane položajne kakovosti koordinat mejnikov	9
2.2.1	Dejavniki vpliva, povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij.....	10
2.2.2	Dejavniki vpliva, povezani s snemalno misijo.....	16
2.2.3	Dejavniki vpliva, povezani z oslonilnimi točkami za georeferenciranje fotogrametričnega bloka	20
2.2.4	Slovenski zakonski okvir glede zahtevane kakovosti koordinat katastrskih točk..	25
2.3	Določitev pogojev za objektivno oceno kakovosti označitve ter Določitev tipov tarč za začasno označitev oslonilnih točk in mejnikov v testiranju ter predlog tarč za stalno označitev katastrskih točk (mejniov)	26
2.3.1	Analiza tipov tarč	26
2.3.2	Izbor oziroma določitev tipov tarč za nadaljnje testiranje	31
3	Testiranje kakovosti različnih načinov označitve oslonilnih točk in mejnikov za samodejno razpoznavanje in slikovno merjenje na oblaku točk in na ortofotu.....	35
3.1	Izbor študijskih območij	35
3.1.1	Študijsko območje Kandrše – testna polja.....	36
3.1.2	Študijsko območje Budanje – območje nove izmere	37
3.1.3	Študijsko območje Kompolje.....	38
3.2	Kratek uvod v UAV fotogrametrični zajem podatkov na študijskih območjih	39
4	Rezultati: Študijsko območje Kandrše	41
4.1	Študijsko območje Kandrše: načrt izvedbe in vzpostavitev geodetske mreže.....	41
4.2	Študijsko območje Kandrše: izvedba snemanja.....	44
4.3	Študijsko območje Kandrše: obdelava podatkov.....	45
4.3.1	Študijsko območje Kandrše: fotogrametrična obdelava in izdelava oblaka točk	45
4.3.2	Študijsko območje Kandrše: zajem koordinat detajlnih točk	50
4.3.3	Podrobnejša analiza primernosti označbe mejnikov na delovišču Kandrše.....	54
5	Rezultati: Študijsko območje Budanje	59
5.1	Študijsko območje Budanje: načrt izvedbe in vzpostavitev geodetske mreže	59
5.2	Študijsko območje Budanje: izvedba snemanja	62
5.3	Študijsko območje Budanje: obdelava podatkov.....	63
5.3.1	Študijsko območje Budanje: fotogrametrična obdelava in izdelava oblaka točk	63

5.3.2	Študijsko območje Budanje: zajem koordinat detajlnih točk.....	65
6	Rezultati: Študijsko območje Kompolje.....	69
6.1	Študijsko območje Kompolje: načrt izvedbe in vzpostavitev geodetske mreže.....	69
6.2	Študijsko območje Kompolje: izvedba snemanja	71
6.3	Študijsko območje Kompolje: obdelava podatkov	71
6.3.1	Študijsko območje Kompolje: fotogrametrična obdelava in izdelava oblaka točk.....	71
6.3.2	Študijsko območje Kompolje: zajem koordinat detajlnih točk.....	76
7	Ocena primernosti uporabe UAV fotogrametrije v katastru in priporočila	79
7.1	Kratek uvod.....	79
7.2	Priporočila za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenih letalnikov	81
7.2.1	Faze obdelave v UAV fotogrametriji.....	81
7.2.2	Ocena položajne točnosti izdelkov UAV fotogrametrije.....	83
7.2.3	Pregled ključnih dejavnikov in njihovi vplivi na kakovost izdelkov.....	85
7.3	Usmeritve glede uporabe UAV fotogrametrije v katastru ter priporočila za označbe mejn timerov za UAV fotogrametrično izmero.....	91
7.3.1	Označbe mej timerov za UAV fotogrametrično izmero.....	92
7.3.2	Usmeritve/priložnosti glede uporabe UAV fotogrametrije v katastru	93
8	Viri in literatura.....	95
Priloga A:	Ocena vidljivosti tarč za izvedenih 12 serij letov.....	103

KAZALO SLIK

Slika 1: Poziv lastnikom zemljišč k označbi parcelnih mej za namene aerofotogrametrične zemljiškokatastrske izmere v 16 katastrskih občinah Prekmurja iz leta 1959 (Vir: Arhiv OGU Murska Sobota, cit po Triglav, 2015).....	1
Slika 2: Fotografija pokrajine iz vozečega avtomobila. Geometrična popačenja, ki so posledica pomičnega zaklopa, so vidne na stebričkih ograje (foto: Tilen Urbančič).....	11
Slika 3: V Razmerje med slikovnimi in objektnimi koordinatami točke (Drešček, 2021, povzeto po Kraus, 2007).....	14
Slika 4: Primeri »klasičnih« tarč za oznako oslonilnih in kontrolnih točk, kot so jih analizirali Jain, Mahajan in Saraf (2019).....	26
Slika 5: Izbrane oblike in velikosti tarč, ki smo jih testirali z vidika vidnosti oziroma razpoznavnosti na podobah.....	27
Slika 6: Primer postavitve testnih tarč na avtosejmu pod kotom 30° - v sredi svetlomer.....	27
Slika 7: Postopek ocenjevanja primernosti izbranih tarč za uporabo UAV fotogrametrije v katastru.....	28
Slika 8: Interpretacija kakovosti prepoznavnosti tarč glede na razpoznavnost oblike in središča tarče.....	28
Slika 9: Priprava podatkov za oceno vidnosti in prepoznavnosti tarč – primer prvih treh letov.....	29
Slika 10: Rezultati analize primernosti tarč za štiri velikostne razrede tarč – upoštevajoč rezultate vseh 12 izvedenih letov.....	30
Slika 11: Tarče za samodejno prepoznavanje točk Vir: https://www.surveyorsequipment.co.uk).....	30
Slika 12: Kodne fotogrametrične tarče različnih avtorjev: (a) Caesar, 2005; (b) Wong, 1988; (c) Ahn, 2001; (d) Fraser, 1997; (e) Fiala, 2010; (f) Schneider, 1993; (g) van den Heuvel, 1993; (h) Ma, 2006 (Vir: Guo et al., 2016).	31
Slika 13: Posebne tarče za kalibracijo kamere podjetja Mapir (Vir: https://www.mapir.camera/).	31
Slika 14: Ponudbe označevalcev parcelne meje podjetja KZP kovinoplastika Ivan Zupanc s. p. – kape s sidri.	32
Slika 15: Ponudbe označevalcev parcelne meje podjetja Master d. o. o. Idrija – kape s sidri.....	32
Slika 16: Izbrane oblike tarč za nadaljnje testiranje.....	32
Slika 17: Izbrane oblike tarč za nadaljnje testiranje – izsek iz testnega polja Kandrše.....	33
Slika 18: Eno izmed testnih polj na delovišču Kandrše.....	33
Slika 19: Maske za vzpostavitev »tarč« na betonskih oziroma asfaltnih podlagah z nanosom barv ne negative.....	34
Slika 20: Testno polje na delovišču Kandrše – oznaka točk detajla na asfaltni podlagi.....	34
Slika 21: Študijsko območje Kandrše (k.o. Kandrše – 1881).....	36
Slika 22: Študijsko območje Budanje – območje nove izmere (k. o. Budanje).	38
Slika 23: Študijsko območje Kampilje.....	39
Slika 24: Geodetska mreža na delovišču Kandrše (podlaga Google Zemlja).....	41
Slika 25: Mreža oslonilnih točk (vijolično) in testna polja (zeleno – dva odtenka, modro, rumeno) na delovišču Kandrše.....	42
Slika 26: Testna polja s tarčami na delovišču Kandrše.....	42
Slika 27: Razporeditev tarč in oznaka točk za primer testnega polja TP1.....	43
Slika 28: Razporeditev tarč in oznaka točk za primer testnega polja TP6.....	43
Slika 29: Obrazec za spremljanje parametrov UAV snemanja.....	45
Slika 30: Razpored oslonilnih točk na študijskem območju Kandrše.....	46
Slika 31: Največja odstopanja na kontrolnih točkah glede na uporabljeno število oslonilnih točk.....	47
Slika 32: RMSE na kontrolnih točkah glede na uporabljeno število oslonilnih točk.....	47
Slika 33: Izgled OT 013 na nadirni fotografiji z dne 13. 5. 2020 (levo) in z dne 4. 5. 2020 (desno).....	49
Slika 34: Postopek ocenjevanja primernosti izbranih tarč za uporabo UAV fotogrametrije v katastru za delovišče Kandrše.....	50
Slika 35: Primer tarč TP132 in TP133 iste velikosti (15 cm x 15 cm) z različnim vzorcem, kjer smo TP132 uvrstili med dobro vidno (2), TP133 pa med tarčo srednje vidljivosti (1).....	51
Slika 36: Testno polje TP1 pred in po košnji na dan UAV-fotogrametričnega snemanja 21. 5. 2021.....	53
Slika 37: Primer rjavega mejnika TP113, kjer smo še prepoznali mejnik na fotografiji (levo) in rjavega mejnika TP213, kjer mejnika ne moremo več prepoznati (desno).....	54
Slika 38: Shematični prikaz tarč za testno polje TP1 (ista konfiguracija polj je bila tudi pri TP 2 in TP3).....	55

Slika 39: Primer tarče z belim robom TP326 – črn krog z belim križem, velikost tarče 20 cm x 20 cm (levo) in primer tarče brez belega roba TP332 – bel križ na črni podlagi, velikost tarče 20 cm x 20 cm (desno).....	56
Slika 40: Geodetska mreža na delovišču Budanje (podlaga Google Zemlja).....	59
Slika 41: Razširjena geodetska mreža na delovišču Budanje (podlaga Google Zemlja).....	60
Slika 42: Razpored oslonilnih in kontrolnih točk na študijskem območju Budanje ter dve testni polji z detajlnimi točkami.....	61
Slika 43: Testni polji s tarčami na delovišču Budanje.....	61
Slika 44: Izbrane oblike tarč za testiranje na študijskem območju Budanje.....	62
Slika 45: Približno območje snemanja in pregled označb zemljiškokatastrskih točk na študijskem območju Budanje.....	62
Slika 46: Razpored oslonilnih in kontrolnih točk na študijskem območju Budanje.....	64
Slika 47: Primer tarče TP2, ki smo jo uvrstili med dobro vidno (2), TP40 pa med tarčo srednje vidljivosti (1).	66
Slika 48: Geodetska mreža na delovišču Kompolje (podlaga Google Zemlja).....	69
Slika 49: Shematičen prikaz območij snemanj z daljinsko vodenim letalnikom za delovišče Kompolje in predlog lokacij oslonilnih točk.....	70
Slika 50: Razporeditev detajlnih točk na delovišču Kompolje.....	70
Slika 51: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na delovišču Kompolje – manjše območje snemanja (rdeče so oslonilne točke, rumene so kontrolne točke).....	72
Slika 52: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na delovišču Kompolje – večje območje snemanja (rdeče so oslonilne točke, rumene so kontrolne točke).....	73
Slika 53: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na delovišču Kompolje – območje linijskega objekta (rdeče so oslonilne točke, rumene so kontrolne točke).....	74
Slika 54: Aerofotografiranje ceste na delovišču Kompolje – območje linijskega objekta, snemanje na vsaki višini je bilo izvedeno v treh pasovih.....	75
Slika 55: Primer tarče, označene s klasičnim mejnim znamenjem na fotografiji, zajeti na približni višini 55 m (levo) in višini 110 m (desno).....	77
Slika 56: Koncept grajenja strukture iz gibanja (SfM).....	80
Slika 57: Splošen procesni model UAV fotogrametrije (Drešček, 2021).....	82
Slika 58: Vpliv višine leta na prostorsko ločljivost fotografije ob uporabi iste fotografske opreme (Drešček, 2021).....	86
Slika 59: Vzдолžno (levo) in prečno (desno) prekrivanje fotografij (Drešček, 2021).....	87
Slika 60: Različni načini fotografiranja, ki določajo geometrijo fotogrametričnega bloka: (a) osnovna smer leta letalnika; (b) osnovnemu preletu letalnika je dodan prečni prelet na drugi višini; (c) geometrijo mreže sestavljajo zgolj nadirne fotografije; (d) nadirnim fotografijam dodamo poševne fotografije (Drešček, 2021).....	88
Slika 61: Primeri enakomerne razporeditve oslonilnih in kontrolnih točk po snemalnem območju v odvisnosti od njegove velikosti in oblike. (Drešček, 2021).....	89
Slika 62: Izbrane oblike tarč za testiranje – izsek iz testnega polja Kandrše.....	92
Slika 63: Maske za vzpostavitev »tarč« na betonskih oziroma asfaltnih podlagah z nanosom barv na negative.	92

KAZALO PREGLEDNIC

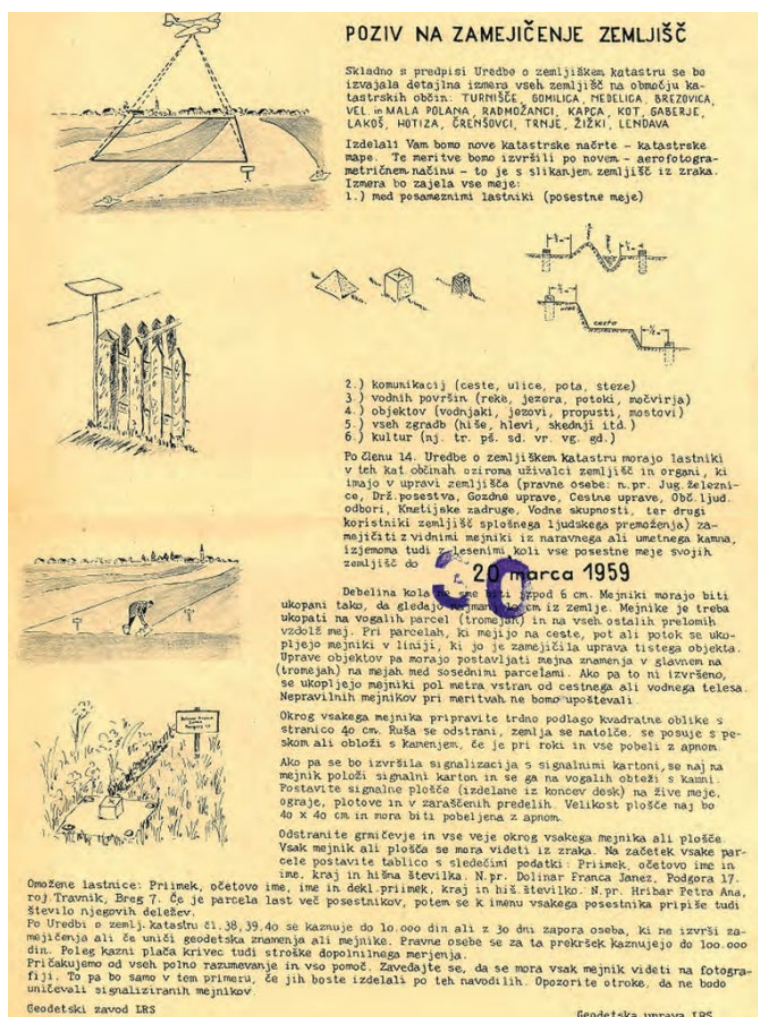
Preglednica 1: Izbor zanimivih objav s področja zemljiškega katastra in UAV fotogrametrije – pregledni članki.....	6
Preglednica 2: Pregled objav v zadnjem desetletju s področja uporabe UAV fotogrametrije v katastru v državah v razvoju (z vidika zemljiškega katastra).....	7
Preglednica 3: Pregled objav v zadnjem desetletju s področja uporabe UAV fotogrametrije v katastru v državah, z razvitim katastrom.....	8
Preglednica 4: Šifrant metode določitve koordinat ZK-točk v državnem koordinatnem sistemu (GURS, 2020a).....	25
Preglednica 5: Koordinate točk geodetske mreže Kandrše (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).....	41
Preglednica 6: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kandrše.....	48
Preglednica 7: Izsek rezultatov analize položajne točnosti detajlnih točk na delovišču Kandrše za podatke z dne 4. 5. 2020, višina leta 50 m.....	51
Preglednica 8: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše.....	52
Preglednica 9: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: pregled po testnih poljih in glede na tip oznak.....	52
Preglednica 10: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše, testno polje TP1.....	53
Preglednica 11: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi ortofota v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše, testno polje TP1.....	54
Preglednica 12: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava po velikosti tarč.....	56
Preglednica 13: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava tarč z belim robom in brez.....	56
Preglednica 14: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava glede na vrsto/barvo industrijske označbe.....	56
Preglednica 15: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava glede na podlago industrijske označbe.....	57
Preglednica 16: Koordinate točk geodetske mreže Budanje (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).....	59
Preglednica 17: Koordinate točk razširjene geodetske mreže Budanje, tudi oslonilne točke (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).....	60
Preglednica 18: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave, upoštevajoč RTK določevanje položaja letalnika – delovišče Budanje.....	64
Preglednica 19: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave, brez upoštevanja opazovanj RTK za določevanje položaja letalnika – delovišče Budanje.....	65
Preglednica 20: Rezultati analize položajne točnosti detajlnih točk na delovišču Budanje za podatke z dne 18. 3. 2021, višina leta 55 m nad vzletiščem.....	66
Preglednica 21: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Budanje, konstantna višina nad vzletiščem.....	67
Preglednica 22: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Budanje, konstantna višina nad terenom (DMR).....	67

Preglednica 23: Koordinate točk geodetske mreže Kompolje (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).....	69
Preglednica 24: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kompolje, manjše območje.....	72
Preglednica 25: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kompolje, večje območje.....	74
Preglednica 26: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kompolje, območje linijskega objekta.....	75
Preglednica 27: Rezultati analize položajne točnosti detajlnih točk na delovišču Kompolje za podatke z dne 21. 4. 2021, višina leta 55 m.	76
Preglednica 28: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kompolje, z upoštevanjem opazovanj RTK.	77

1 Uvod

Osnovni namen ciljnega raziskovalnega projekta V2-1934: *Ovrednotenje različnih načinov označitve katastrskih mejnikov za fotogrametrično izmero z letalnikom in analiza njihovega vpliva na položajno točnost oblaka točk in ortofota* je preučiti možnosti uporabe daljinskega zaznavanja za namene zajema katastrskih prostorskih podatkov. Pri tem se osredotočamo na uporabo optičnih senzorjev na daljinsko vodenih letalnikih UAV (angl. *Unmanned Aerial Vehicles*) za fotogrametrično izmero. Poudarek projekta je na optimizaciji fotogrametričnega zajema podatkov o položajih katastrskih točk z daljinsko vodenimi letalniki (v nadaljevanju: letalniki).

Fotogrametrični zajem katastrskih podatkov ni novost v zemljiškem katastru, saj so se prvi projekti v Evropi in na širši mednarodni ravni pojavili že v 50-ih letih preteklega stoletja, predvsem v povezavi z razvojem tehnologij za optični zajem prostorskih podatkov z letali. Tudi v Sloveniji poznamo iz tega obdobja fotogrametrične projekte nove izmere (Triglav, 2015; Drobež et al., 2016), kjer je bila vedno velika pozornost namenjena tudi ustreznemu označevanju lomov parcelnih mej na terenu (Slika 1).



Slika 1: Poziv lastnikom zemljišč k označbi parcelnih mej za namene aerofotogrametrične zemljiškokatastrske izmere v 16 katastrskih občinah Prekmurja iz leta 1959 (Vir: Arhiv OGU Murska Sobota, cit po Triglav, 2015).

Sam fotogrametrični zajem katastrskih podatkov pa se na območju Slovenije ni zelo uveljavil v praksi – razlog je mogoče iskati v dragem snemanju z letali. Velik izziv na področju fotogrametričnega zajema katastrskih podatkov je prinesel razvoj novih platform in tehnologij za zajem prostorskih podatkov iz zraka, predvsem daljinsko vodenih letalnikov UAV (angl. *Unmanned Aerial Vehicles*) oziroma daljinsko vodenih sistemov UAS (angl. *Unmanned Aerial Systems*). Še posebej neraziskano je področje označevanja oslonilnih točk in mejnikov na terenu, ki bi omogočalo optimizacijo postopkov obdelave in interpretacije tako zajetih prostorskih podatkov.

Glavni cilj aplikativnega projekta »Ovrednotenje različnih načinov označitve katastrskih mejnikov za fotogrametrično izmero z letalnikom in analiza njihovega vpliva na položajno točnost oblaka točk in ortofota« je bil preučiti in ovrednotiti različne načine označitve oslonilnih točk in mejnikov za fotogrametrično izmero z daljinsko vodenimi letalniki. Različne načine označevanja oslonilnih točk in mejnikov pri tem preučujemo predvsem z vidikov:

- možnosti (pol)samodejnega prepoznavanja tarč pri slikovni obdelavi podatkov,
- zagotavljanja položajne točnosti oblaka točk in ortofota, ter
- zagotavljanja položajne točnosti določitve koordinat mejnih točk v državnem geodetskem referenčnem sistemu.

Naloge projekta so bile organizirane v petih delovnih svežnjih (DS) – prvi štiri so vsebinski sklopi in sledijo vsebinskim ciljem predlaganega projekta, peti (DS5) pa je namenjen koordinaciji in diseminaciji:

- Delovni sveženj 1 (DS1): ***Določitev okvira za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenega letalnika*** [M01–M08];
- Delovni sveženj 2 (DS2): ***Testiranje kakovosti različnih načinov označitve oslonilnih točk in mejnikov za samodejno razpoznavanje in slikovno merjenje na oblaku točk in na ortofotu*** [M07–M18];
- Delovni sveženj 3 (DS3): ***Ocena primernosti predlagane fotogrametrične izmere mejnikov z daljinsko vodenim letalnikom*** [M19–M24];
- Delovni sveženj 4 (DS4): ***Izdelava priporočil za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenih letalnikov*** [M22–M24];
- Delovni sveženj 5 (DS5): ***Koordinacija in diseminacija*** [M01–M24].

V okviru prvega delovnega svežnja DS1 (*Določitev okvira za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenega letalnika*) smo na osnovi preučene literature in rezultatov najnovejših znanstvenih kot tudi aplikativnih projektov na državni in mednarodni ravni opredelili različne načine označevanja oslonilnih točk in mejnikov za fotogrametrični zajem podatkov o njihovih položajih z namenom zagotovitve (pol)samodejno razpoznavanje tarč in slikovnega merjenja. Na posebnem delovišču smo izvedli testno snemanje z daljinsko vodenim letalnikom, kjer smo v testno polje vključili različne oblike in velikosti tarč, posebej pa smo preučevali tudi vpliv naklona tarč ter osvetlitev tarč na vidnost oziroma prepoznavnost tarč na UAV fotografiji. Na podlagi rezultatov prvega delovnega svežnja smo zmanjšali začetni nabor tarč za označevanje detajlnih točk na terenu, to je zemljiškokatastrskih točk, za namene tako imenovanega UAV fotogrametričnega zajema katastrskih podatkov. Rezultati so predstavljeni v drugem poglavju tega poročila.

V okviru nalog delovnega svežnja 2 (DS2): *Testiranje kakovosti različnih načinov označitve oslonilnih točk in mejnikov za samodejno razpoznavanje in slikovno merjenje na oblaku točk in na ortofotu* in delovnega svežnja 3 (DS3): *Ocena primernosti predlagane fotogrametrične izmere mejnikov z daljinsko vodenim letalnikom* smo preučevali primernost izbranih načinov označitve oslonilnih točk in mejnikov točk na testnih območjih, ki so bila:

- *Študijsko območje Kandrše*, k. o. Kandrše (1881): testno območje, ki poleg kmetijske dejanske rabe vključuje pozidana stavbna zemljišča podeželskih naselij, vključno z industrijsko rabo, poudarek pa je na podrobnejši analizi položajne kakovosti fotogrametrično določenih koordinat detajlnih točk v testnih poljih, kjer smo uporabljali različne tarče in industrijske oznake za mejnike ter geodetske točke;
- *Študijsko območje Budanje*, k. o. Budanje (2379): testno območje, ki je bilo izbrano predvsem zaradi nedavno izvedene nove izmere, zanimivo pa je tudi z vidika razgibanosti terena in mešane kmetijske rabe ter območja naselja; na tem delovišču smo med drugim preučevali vpliv višine leta daljinsko vodenega letalnika na položajno točnost oblaka točk in koordinat detajlnih točk;
- *Študijsko območje Kompolje*, k. o. Kompolje (1382): testno območje s pretežno kmetijsko dejansko rabo in dolžinskimi objekti (cesto); na tem delovišču smo prav tako preučevali vpliv višine leta daljinsko vodenega letalnika na položajno točnost oblaka točk in koordinat detajlnih točk, dodatno pa smo testno izvedli zajem dolžinskega objekta (ceste) in analizirali položajno točnost pridobljenega oblaka točk.

Rezultati obširnega testiranja različnih načinov označevanja oslonilnih točk in mejnikov na študijskih območjih na rezultate UAV fotogrametričnega zajema koordinat detajlnih točk, kjer smo preučevali tudi vpliv izbranih parametrov fotogrametričnega snemanja in vpliv parametrov obdelave podatkov na položajno točnost koordinat detajlnih točk, so bili temelj za oblikovanje priporočil glede uporabe UAV fotogrametrije v zemljiškem katastru. Slednje smo obravnavali v okviru delovnega svežnja 4 (DS4): *Izdelava priporočil za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenih letalnikov*. Priporočilo obsega predloge za načrtovanje in izvedbo fotogrametrične izmere mejnikov z letalniki ter metodološka priporočila za obdelavo podob ter slikovno merjenje, vključujoč predloge za označevanje oslonilnih točk in mejnikov, metodo kontrolnih meritev in oceno kakovosti tako pridobljenih podatkov.

Rezultati raziskave so bili do zaključka projekta objavljeni že na več forumih in kot recenzirani članki (delovni sveženj DS5), izpostavljamo predvsem:

- Recenzirani članek:
 - Kosmatin Fras, M., Drešček, U., Lisec, A., Grigillo, D. (2020). ***Analiza vplivov na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije***. Geodetski vestnik, 64 (4), 489–50. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.489-507>
- Predstavitvi na simpoziju:
 - Grigillo, D., Petrovič, D., Kozmus Trajkovski, K., Urbančič, T., Kosmatin Fras, M. (2020). ***Korektna uporaba letalnikov v geodeziji***. Referat na simpoziju 48. geodetski dan, Ljubljana, 17. 9. 2020. Ljubljana: Zveza geodetov Slovenije.
 - Fetai, B., Tekavec, J., Kosmatin Fras, M., Lisec, A. (2021). ***Samodejni pristopi za analizo skladnosti mej dejanske rabe in katastrskih mej zemljišč na podlagi UAV fotografij***. Referat na simpoziju 49. geodetski dan, Koper, 16. 9. 2021. Ljubljana: Zveza geodetov Slovenije.

Deloma so z raziskavo vezane tudi naslednje objave, ki odpirajo nova področja raziskav za prihodnje:

- Fetai, B., Račič, M., Lisec, A. (2019). Visible Land Boundaries from UAV Imagery. Remote Sensing, 13 (11), 2077. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13112077>
- Drešček, U., Kosmatin Fras, M., Tekavec, J., Lisec, A. (2021). Spatial ETL for 3D building modelling based on unmanned aerial vehicle data in semi-urban areas. Remote sensing, 12 (1972). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12121972>

Predstavitev projekta in rezultatov je na spletni strani projekta

- <https://www.fgg.uni-lj.si/raziskovalna-dejavnost/projekti/v2-1934-ovrednotenje-razlicnih-nacinov-oznacitve-katastrskih-mejnikov-za-fotogrametricno-izmero-z-letalnikom-in-analiza-njihovega-vpliva-na-polozajno-tocnost-oblaka-tock-in-ortofota/>

2 Določitev okvira za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenega letalnika

Glavni cilj delovnega svežnja DS1 (*Določitev okvira za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenega letalnika*) je bil določiti pogoje oziroma okvire za fotogrametrično izmero mejnikov zemljiških parcel z uporabo daljinsko vodenega letalnika. Delovni sveženj sestavljajo štiri naloge:

- Naloga 1.1: Pregled literature in mednarodnih priporočil,
- Naloga 1.2: Analiza in opredelitev zahtevane položajne kakovosti koordinat mejnikov,
- Naloga 1.3: Določitev pogojev za objektivno oceno kakovosti označitve,
- Naloga 1.4: Določitev tipov tarč za začasno označitev oslonilnih točk in mejnikov v testiranju ter predlog tarč za stalno označitev katastrskih točk (mejnikov).

2.1 Pregled literature in mednarodnih priporočil

V tem delu študije smo preučili najbolj aktualne projekte in dosežke na mednarodni ravni s področja obravnave. Poseben poudarek je bil na preučevanju priporočil in izkušenj, predstavljenih v objavljenih prispevkih za fotogrametrični zajem katastrskih podatkov z daljinsko vodenimi letalniki.

2.1.1 Fotogrametrija in zemljiški kataster

Fotogrametrija je veda, ki se ukvarja z določitvijo položaja in oblike objektov iz fotografij. Glavni namen fotogrametrije je pridobiti informacije o površju in objektih v prostoru na podlagi fotografij, pri čemer imajo ključno vlogo zahtevana točnost, zanesljivost in popolnost pridobljenih podatkov. V klasični fotogrametriji so postopki in algoritmi pridobivanja prostorskih podatkov iz fotografij že uveljavljeni, saj so se osnovni koncepti razvili v času uporabe analogne fotografije in so se kasneje prenesli tudi na digitalno fotografijo. Z razvojem zmogljivejše in cenovno dostopnejše računalniške tehnologije ter novih odkritij na področju računalniškega vida je v zadnjih desetih letih tudi v fotogrametriji prišlo do sprememb tako pri zajemu kot tudi obdelavi fotogrametričnih posnetkov. Pri tem so kot nosilci senzorjev pomembno vlogo odigrali daljinsko vodeni letalniki, ki so se začeli uporabljati ne zgolj v vojaške, temveč tudi v številne civilne namene. Razvoj cenejših senzorjev za zajem podatkov in boljših algoritmov slikovnega ujemanja za obdelavo fotografij in izdelavo 3D-fotogrametričnih oblakov točk je omogočil vse širšo uporabo letalnikov v fotogrametriji za različne uporabniške rešitve (Nex in Remondino, 2014; Dandois, Olano in Ellis, 2015). Razvilo se je novo področje UAV fotogrametrije (angl. *UAV photogrammetry*), kjer kratica UAV izhaja iz angleškega termina za daljinsko vodeni letalnik (angl. *Unmanned Aerial Vehicle*). Ker se je ta termin uveljavil v tuji strokovni literaturi, ga zaradi enostavnosti in jasnega pomena uporabljamo tudi v tem poročilu.

Uporaba tehnologij daljinskega zaznavanja, predvsem fotogrametrije, v zemljiškem katastru sega v 70. leta prejšnjega stoletja (Weissmann, 1971; Dale, 1979), med drugim tudi v Sloveniji, kjer je že leta 1959 potekala aerofotogrametrična detajlna zemljiškokatastrska izmera v šestnajstih katastrskih občinah v vzhodnem delu Prekmurja (Triglav, 2015). Danes omogočajo sodobni merski geodetski sistemi, vključujoč tehnologije daljinskega zaznavanja, učinkovit zajem katastrskih podatkov na velikih površinah, relativno cenovno ugodne tehnologije, kot je UAV fotogrametrija, pa prinašajo nove priložnosti širšemu trgu.

2.1.2 Raziskave na področju uporabe UAV v zemljiškem katastru

Uporabo daljinsko vodenih letalnih sistemov za izmero mejnih znamenj in drugih katastrsko-relevantnih entitet v prostoru so izpostavili številni avtorji (Cunningham et al., 2011; Manyoky et al., 2011; van Hinsbergh et al., 2013; Rijsdijk et al., 2013; Mumbone, Bennett in Gerke, 2015; Drobež et al., 2016; Ramadhani, 2016; Ramadhani, Bennett in Nex, 2018; Stöcker et al., 2019). Rezultati omenjenih raziskav so pokazali, da so prostorski podatki, določeni na podlagi tako imenovane UAV fotogrametrije, dosegli kakovost, primerljivo s terestrično geodetsko izmero v zemljiškem katastru. Vzporedno se razvijajo različne metode samodejnega in pol-samodejnega zajema katastrskih podatkov iz letalskih in visoko ločljivih satelitskih podob (Crommelinck et al., 2016, 2017; Luo et al., 2017; Fetai et al., 2019; Koeva, Bennett in Zevenbergen, 2019). Te raziskave se osredotočajo predvsem na avtomatsko oziroma samodejno pridobivanje podatkov o poteku tako imenovanih »vidnih« parcelnih mej (angl. *visible land plot boundaries*), medtem ko odmevnejših mednarodnih raziskav na področju prepoznavanja mejnikov z UAV fotogrametrijo ni zaslediti. S tega vidika predvidevamo, da bodo rezultati naše raziskave ne le izredno pomembne za morebitne prenove sistema zemljiške administracije v Sloveniji, ampak tudi mednarodno odmevni.

Vsebinsko smo posebej analizirali objave s področja obravnave v mednarodnih recenziranih revijah s faktorjem vpliva (IF) in v okviru konferenc mednarodnih združenj za področja fotogrametrije in katastra, to so Svetovna banka (WB), Mednarodna zveza geodetov (FIG) in Mednarodna organizacija za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje (ISPRS). Med analiziranimi članki je pomembna skupina člankov, ki podajajo splošen pregled razvoja UAV fotogrametrije in možnosti uporabe le te za namene zemljiškega katastra (Preglednica 1).

6

Preglednica 1: Izbor zanimivih objav s področja zemljiškega katastra in UAV fotogrametrije – pregledni članki.

Delo	Naslov	Vrsta objave
Colomina in Molina (2014)	Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review.	Pregledni članek
Pajares (2015)	Overview and current status of remote sensing applications based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs).	Pregledni članek
Stöcker et al. (2017)	UAV-based cadastral mapping: An assessment of the impact of flight parameters and ground truth measurements on the absolute accuracy of derived orthoimages.	Pregledni članek
Ma et al. (2019)	Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review.	Pregledni članek
Stöcker, Koeva in Benett (2019)	Review of the current state of UAV regulations	Pregledni članek

Medtem ko se mnogo objav na temo uporabe UAV fotogrametrije nanaša na katastrske projekte v državah tretjega sveta (Preglednica 2), to je v državah, ki še nimajo (digitalnega) zemljiškega katastra (Mumbone, Bennett in Gerke, 2015; Muneza et al., 2015; Bennett et al., 2017; Wayumba, Mwangi in Chege, 2017; Koeva et al., 2018; Ramadhani, Bennett in Nex, 2018; Cho, Lee in Kebede, 2019; Stöcker et al., 2019a in 2019b; Stöcker, Koeva in Bennett, 2019; Suran et al., 2019; Koeva et al., 2020 in 2021), je vse več raziskav s tega področja tudi v državah z razvitim zemljiškim katastrom.

Preglednica 2: Pregled objav v zadnjem desetletju s področja uporabe UAV fotogrametrije v katastru v državah v razvoju (z vidika zemljiškega katastra).

Delo	Naslov	Primer uporabe	Vrsta objave
Mumbone et al. (2015)	Innovations in boundary mapping: Namibia, customary lands and UAVs.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Konferenčni članek (WB)
Muneza et al. (2015)	A photogrammetric approach for map updating using UAV in Rwanda.	Posodabljanje katastrskih načrtov	Znanstveni članek
Ramadhani, Bennett in Nex (2016)	Exploring UAV in Indonesian cadastral boundary data acquisition.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Znanstveni članek
Benett et al. (2017)	Building third generation land tools: Its4land, smart sketchmaps, UAVs, Automatic feature extraction, and the geocloud.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Konferenčni članek (WB)
Wayumba, Mwangi in Chege, 2017	Application of Unmanned Aerial Vehicles in improving land registration in Kenya.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Znanstveni članek
Koeva et al. (2018)	Using UAVs for map creation and updating. A Case Study in Rwanda.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje	Znanstveni članek
Cho, Lee in Kebede (2019)	Drone-based cadastral data acquisition methodology.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Konferenčni članek (WB)
Stöcker et al. (2019a)	Unmanned Aerial System Imagery, Land Data and User Needs: A Socio-Technical Assessment in Rwanda.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Znanstveni članek
Stöcker et al. (2019b)	Evaluation of UAV-based technology to capture land rights in Kenya: Displaying stakeholder perspectives through interactive gaming	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Konferenčni članek (WB)
Suran et al. (2019)	UAV-based hyperspectral data analysis for urban area mapping.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Konferenčni članek (ISPRS)
Koeva et al. (2020)	Innovative remote sensing methodologies for Kenyan land tenure mapping.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Znanstveni članek
Koeva et al. (2021)	Remote Sensing for Property Valuation: A Data Source Comparison in Support of Fair Land Taxation in Rwanda.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov	Znanstveni članek

V preglednici 3 so predstavljene objave v zadnjem desetletju na temo uporabe daljinsko vodenih letalnikov v zemljiškem katastru v državah, ki že imajo vzpostavljen sistem zemljiškega katastra (Cunningham et al., 2011; Manyoky et al. 2011; Cramer et al., 2013; Rijsdijk et al., 2013; Mesas-Carrascosa et al., 2014; Volkman in Barnes, 2014; Reis, Torun in Bilgilioglu, 2015; Kurczynski et al., 2016; El Meouche et al., 2016; Crommelinck et al., 2017 in 2018; Puniach et al., 2018; Fetai et al., 2019; Park in Song, 2020; Stöcker et al., 2021; Bennett et al., 2020; Fetai et al., 2021; Šafář et al., 2021). Omejili smo se, kot že rečeno, na objave v mednarodnih recenziranih revijah s faktorjem vpliva (IF) in v okviru konferenc mednarodnih združenj (WB, FIG in ISPRS). Poudarjeni so članki naše raziskovalne skupine, kjer smo se ukvarjali predvsem z možnostjo samodejnega zajema podatkov o poteku vidnih zemljiških mej, to je mej območij rabe zemljišč, ki lahko včasih tudi sovpadajo s katastrskimi parcelnimi mejami – te raziskave sicer presegajo namen pričujočega projekta.

Preglednica 3: Pregled objav v zadnjem desetletju s področja uporabe UAV fotogrametrije v katastru v državah, z razvitim katastrom.

Delo	Naslov	Primer uporabe	Vrsta objave
Cunningham et al. (2011)	Cadastral audit and assessments using unmanned aerial systems.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov (mednarodna raven)	Konferenčni članek (ISPRS)
Manyoky et al. (2011)	Unmanned Aerial Vehicle in cadastral applications.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov (Švica)	Konferenčni članek (ISPRS)
Cramer et al. (2013)	On the use of rpas in national mapping - The Eurosd point of view.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Evropa)	Konferenčni članek (ISPRS)
Rijsdijk et al. (2013)	Unmanned Aerial Systems in the process of Juridical verification of cadastral border.	Posodabljanje katastrskih načrtov (Nizozemska)	Konferenčni članek (ISPRS)
Mesas-Carrascosa et al. (2014)	Validation of measurements of land plot area using UAV imagery.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov (Španija)	Znanstveni članek
Volkman in Barnes (2014)	Virtual surveying: Aerial Systems (UAS). Mapping and modeling cadastral boundaries using Unmanned Aer	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov (ZDA)	Konferenčni članek (FIG)
Reis et al. (2015)	Investigation of availability remote sensed data in cadastral works.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Turčija)	Konferenčni članek (WB)
El Meouche et al. (2016)	UAV photogrammetry implementation to enhance land surveying, comparisons and possibilities.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov (Francija)	Konferenčni članek (ISPRS)
Kurczynski et al. (2016)	The possibility of using images obtained from the UAS in cadastral works.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Poljska)	Konferenčni članek (ISPRS)
Crommelinck et al. (2017)	Contour detection for UAV-based cadastral mapping.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Nemčija, Francija)	Znanstveni članek
Crommelinck et al. (2018)	Interactive cadastral boundary delineation from UAV data.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Nemčija)	Konferenčni članek (ISPRS)
Puniach et al. (2018)	Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for updating farmland cadastral data in areas subject to landslide.	Posodabljanje katastrskih načrtov (Poljska)	Znanstveni članek
<i>Fetai et al. (2019)</i>	<i>Extraction of visible boundaries for cadastral mapping based on UAV imagery.</i>	<i>Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Slovenija)</i>	<i>Znanstveni članek</i>
Park in Song (2020)	Discrepancy analysis for detecting candidate parcels requiring update of land category in cadastral map using hyperspectral UAV images: A case study in Jeonju, South Korea.	Posodabljanje katastrskih načrtov (Južna Koreja)	Znanstveni članek

Delo	Naslov	Primer uporabe	Vrsta objave
Stöcker et al. (2020)	High-quality UAV-Based orthophotos for cadastral mapping: guidance for optimal flight configurations.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Nemčija, Nizozemska)	Znanstveni članek
Bennett et al. (2020)	Remote sensing for land administration.	Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Nizozemska)	Znanstveni članek
Fetai et al. (2021)	<i>Deep learning for detection of visible land boundaries from UAV imagery.</i>	<i>Nastavitev katastra oz. katastrskih načrtov in njihovo posodabljanje (Slovenija)</i>	Znanstveni članek
Šafář et al. (2021)	The use of UAV in cadastral mapping of the Czech Republic.	Posodabljanje katastrskih načrtov (Češka)	Znanstveni članek

Velik poudarek omenjenih raziskav je na eni strani na preučevanju izbranih parametrov UAV snemanja in fotogrametrične obdelave podatkov na položajno točnost fotogrametrično zajetih katastrskih podatkov, na drugi strani pa se raziskovalci ukvarjajo tudi z možnostjo avtomatizacije zajemanja podatkov za namene katastra. Manj raziskav je namenjenih ekonomičnosti in zanesljivosti takega pristopa (Šafář et al., 2021). Zanimivo je, da avtorji navajajo možnost uporabe prostorskih podatkov, pridobljenih s kamerami oziroma fotoaparati na daljinsko vodenih letalnikih, tako za namene posodabljanja katastrskih podatkov kot tudi za namene vzpostavitve katastra na območjih, kjer katastrski načrti ne izkazujejo mirnega posestnega stanja v naravi, ali za območja, kjer je prišlo do večjih topografskih sprememb. Po slovenski zakonodaji je v ta namen na voljo katastrski postopek nastavitev katastra (ZEN, 2006), kjer imajo podatki, pridobljeni z daljinsko vodenimi letalniki, velik potencial tudi z vidika prispevati k učinkovitosti izvedbe postopka.

2.2 Analiza in opredelitev zahtevane položajne kakovosti koordinat mejnikov

V tem delu raziskovalne naloge smo preučevali dejavnike, ki vplivajo na kakovost fotogrametrične izmere z daljinsko vodenimi letalniki. Najprej smo se osredotočili na pregled raziskav na področju zagotavljanja kakovosti fotogrametrične izmere z daljinsko vodenimi letalniki, sledi poglavje, kjer smo pregledali zakonsko zahtevano kakovost katastrskih podatkov, s poudarkom na položajni točnosti določitve koordinat tako imenovanih zemljiškokatastrskih točk (v nadaljevanju *ZK-točk*).

V prvem delu se omejujemo zgolj na fotogrametrični zajem fotografij z letalniki, kjer so spremembe glede dejavnikov, ki vplivajo na kakovost zajetih podatkov, v primerjavi s klasično aerofotogrametrijo opazne že pri izbiri opreme in načinu izvedbe snemanja. Izbira opreme je omejena z največjo dovoljeno skupno težo bremena na letalniku in zmogljivostjo baterij, ki omogočajo nemoteno delovanje senzorjev na letalniku. Zaradi posebnosti uporabljene opreme je za doseg kakovostnih rezultatov, primerljivih z uveljavljenimi fotogrametričnimi izdelki, treba prilagoditi zajem podatkov, ki vključuje tako izbiro parametrov že v fazi načrtovanja snemanja kot tudi način izvedbe snemanja in nadaljnje postopke obdelave zajetih podatkov. V analizi smo se osredotočili na letalnike, ki so lažji od 25 kg in za zajem fotografij uporabljajo optične senzorje pretežno v vidnem delu elektromagnetnega valovanja. Poleg tega smo obravnavali samo primere posrednega georeferenciranja fotografij preko terensko izmerjenih oslonilnih točk.

Glavni izdelki UAV fotogrametrije so oblak točk, digitalni model površja in ortofoto. Analize kakovosti fotogrametričnih izdelkov se običajno delajo eksperimentalno na različnih testnih območjih (različne velikosti območij in geografske značilnosti kot razgibanost terena in pokrovnost), z različno opremo, metodologijo itn. Obsežno metaanalizo in pregled znanstvenih objav z vidika uporabljene snemalne opreme, parametrov leta, nadaljnjih obdelav in analiz sta opravila Singh in Frazier (2018). Naša analiza je ožje usmerjena na izbrane dejavnike. Rezultate raziskav je težko neposredno primerjati, kljub temu pa lahko glede vplivov določenih dejavnikov oblikujemo nekatera splošna načela, ki jih je priporočljivo upoštevati v projektih, kjer je zahtevana nekaj centimeterska točnost izdelkov. Dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije, lahko razvrstimo v naslednje skupine (Nasrullah, 2016; Gindraux et al., 2017):

- uporaba nemerskih fotoaparátov (metoda kalibracije oziroma umerjanja, časovna stabilnost parametrov notranje orientacije, kakovost senzorja in objektiva, zaklop itn.);
- kakovost fotografij (prostorska ločljivost, ostrina, kontrast, dinamični razpon, ustrezna tekstura itn.);
- parametri snemalne misije, ki definirajo fotogrametrični blok (vzdolžno in prečno prekrivanje fotografij, različne snemalne višine itn.);
- terenske oslonilne točke za namene georeferenciranja fotogrametričnega bloka (označitev točk, metoda izmere, število in njihova razporeditev v bloku itn.).

Te dejavnike smo analizirali po naslednjih sklopih:

- (a) dejavniki vpliva, ki so povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij;
- (b) dejavniki vpliva, ki so povezani s snemalno misijo; in
- (c) dejavniki vpliva, ki so povezani z oslonilnimi točkami.

10

Manjši vpliv na končne rezultate ima tudi uporabljena programska oprema za obdelavo, vendar tega v tem pregledu literature nismo obravnavali.

2.2.1 Dejavniki vpliva, povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij

Dejavnike vpliva, ki so povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij, smo nadalje obravnavali v naslednjih tematskih sklopih:

- geometrične lastnosti fotografij;
- radiometrične lastnosti fotografije.

Dodatno smo v tem delu obravnavali vpliv vremenskih in svetlobnih pogojev na kakovost fotografij ter parametre notranje orientacije fotoaparata.

2.2.1.1 Geometrične lastnosti fotografije

Digitalna fotografija je rastrska slika, ki je definirana kot matrika, ki jo sestavljajo vrstice in stolpci mrežnih celic oziroma slikovnih elementov (pikslov). Prostorska ločljivost fotografije, ki je opredeljena z velikostjo piksla v naravi GSD (angl. *Ground Sample Distance*), je pomemben dejavnik, ki vpliva na geometrično kakovost fotogrametričnih izdelkov. Definirana je kot razdalja v naravi med središčema dveh sosednjih pikslov in je odvisna od velikosti slikovnega senzorja, velikosti piksla na senzorju, goriščne razdalje objektiva in oddaljenosti med fotoaparatom ter objektom, ki ga fotografiramo. Prostorska ločljivost fotografije opredeljuje tudi najmanjšo velikost detajla, ki ga na fotografiji še lahko prepoznamo (Oštir, 2006).

V fotogrametriji običajno definiramo prostorsko ločljivost kot razdaljo med središčema dveh sosednjih slikovnih elementov, merjeno na terenu. Na letalnikih praviloma uporabljamo nemerske fotoaparate, ki imajo manjši senzor v primerjavi z merskimi fotoaparati, zato je za doseg dobre prostorske ločljivosti treba izbrati ustrezno nižjo višino leta letalnika – običajno med 50 m in 150 m. S tem dobimo primerljivo ali boljšo prostorsko ločljivost zajetih fotografij kot z aerofotogrametričnimi kamerami, kar omogoča lažje prepoznavanje detajlov in ekstrakcijo detajlov na posnetkih oziroma fotografijah (Mikrut, 2016).

Pomemben dejavnik je goriščna razdalja objektiva fotoaparata. Uporaba fotoaparata s krajšo goriščno razdaljo ob nespremenjenih ostalih parametrih leta letalnika pomeni povečanje zornega kota FOV (angl. *field of view*) fotoaparata. To pomeni, da lahko naenkrat zajamemo širše območje in s tem zmanjšamo čas letenja, kar je zaradi omejitve delovanja baterij na letalnikih precejšna prednost. Na drugi strani s tem pridobimo fotografije z manjšo prostorsko ločljivostjo, kar poslabša geometrijsko natančnost zajetih podatkov in zmanjša zmožnost prepoznavanja detajlov ter višjo stopnjo radialne distorzije, ki ob neupoštevanju negativno prispeva h kakovosti rezultatov (Mosbrucker et al., 2017).

Na kakovost zajetih fotografij vpliva tudi vrsta uporabljenega fotoaparata, natančneje način delovanja sestavnih delov glede na vrsto senzorja in vrsto zaklopa. V digitalnih fotoaparatih je lahko nameščen CCD-senzor ali CMOS-senzor. Če je na letalniku nameščen lažji, cenejši nemerski fotoaparat, ta vsebuje običajno CMOS-senzor s pomičnim zaklopom. Zaradi premikanja letalnika med zajemom fotografij in zaporednega zajema posameznih vrstic pri pomičnem zaklopu se na fotografiji pojavijo deformacije (Slika 2). Pri nižjih višinah do 50 m nad terenom in večjih hitrostih leta letalnika nad 10 m/s so deformacije zaradi pomičnega zaklopa večje in jih je smiselno upoštevati v fotogrametrični obdelavi fotografij za doseg večje kakovosti rezultatov. Prav tako je mogoče sistematične vplive zaradi pomičnega zaklopa zmanjšati z dodatnimi oslonilnimi točkami, enakomerno razporejenimi po celotnem snemalnem območju, ki jih vključimo v fotogrametrično obdelavo (Vautherin et al., 2016).



Slika 2: Fotografija pokrajine iz vozečega avtomobila. Geometrična popačenja, ki so posledica pomičnega zaklopa, so vidne na stebričkih ograje (foto: Tilen Urbančič).

2.2.1.2 Radiometrične lastnosti fotografije

Vsak slikovni element, ki sestavlja rastrsko podobo, vsebuje podatek o vrednosti elektromagnetnega valovanja, ki se je odbilo od objektov in ga je zajel slikovni senzor. Odbito elektromagnetno valovanje je shranjeno v obliki radiometrične vrednosti piksla. V fotogrametriji je radiometrična kakovost fotografij še posebej pomembna, saj je to pogoj za kakovostno obdelavo in kasnejšo ekstrakcijo informacij o obravnavanih pojavih. Fotogrametrična obdelava fotografij temelji na slikovnem ujemanju točk na več posnetkih in uspešnost postopka je močno odvisna od radiometrične kakovosti fotografij in teksture na površinah (Meißner, Cramer in Piltz, 2017).

Pred fotografiranjem je treba izbrati ustrezne vrednosti parametrov nastavitve fotoaparata, to so predvsem čas ekspozicije, velikost zaslonke in občutljivost senzorja (ISO). Fotografija mora biti pravilno osvetljena, ostra in s čim manj šuma. Pri snemanju z letalnikom se običajno izbere fokusiranje na fotografsko neskončnost, s čimer zagotovimo ostrino fotografij ne glede na izbrano snemalno višino ali stopnjo razgibanosti terena. Lastnosti fotografije, kot so geometrijska in radiometrična kakovost, osvetlitev in možnost prepoznavanja tekstur, vplivajo na uspešnost slikovnega ujemanja, ki nadaljnje vpliva tako na kakovost določitve parametrov notranje orientacije fotoaparata kot tudi na gostoto točk v fotogrametričnem oblaku točk in točnost izdelanega 3D-modela (Mosbrucker et al., 2017).

Na zmožnost prepoznavanja detajlov na zajetih fotografijah vpliva tudi ostrina slike (angl. *sharpness*). Zaradi gibanja letalnika so fotografije pogosto neostre (angl. *motion blur*) (Nasrullah, 2016). Na stopnjo neostrine fotografij vplivajo tako nastavitve fotoaparata, kot je čas ekspozicije, kot tudi parametri leta letalnika, kot sta hitrost in višina leta letalnika ter tudi velikost nagibov letalnika, ki nastanejo zaradi različnih zunanjih vplivov, na primer vetra. Vpliv neostrine zaradi premikanja fotoaparata med zajemom fotografije je bolj očiten pri manjših razdaljah med fotoaparatom in objektom, ki ga snemamo. Sieberth, Wackrow in Chandler (2014 in 2015) so podrobneje analizirali vpliv uporabe neostrih fotografij v fotogrametrični obdelavi. Ugotovili so, da se s povečevanjem neostrine zmanjša točnost izmere slikovnih koordinat, kar neposredno vpliva na slabšo točnost določitve nadaljnjih količin v obdelavi, med drugim parametrov kalibracije, predvsem koordinat glavne točke. Ob tem so tudi ugotovili, da v primeru uporabe neostrih fotografij algoritmi slikovnega ujemanja niso zmožni zaznati tako velikega števila veznih točk med prekrivajočimi fotografijami, kot bi jih v primeru obdelave ostrih fotografij. Na neostrih fotografijah so ugotovili ne le manjše število veznih točk, temveč tudi manjše število pravilno določenih veznih točk. Sieberth, Wackrow in Chandler (2016) so nadalje predlagali algoritem za avtomatsko prepoznavanje neostrih fotografij v nizu zajetih fotografij. Pri tem je treba paziti, da imamo kljub izločanju neostrih fotografij zagotovljen zadosten prekop med fotografijami.

2.2.1.3 Vpliv vremenskih in svetlobnih pogojev na kakovost fotografij

Na geometrično in radiometrično kakovost fotogrametričnih izdelkov, kot sta ortofoto in 3D-model z dodanimi teksturami, pomembno vplivajo vremenski in svetlobni pogoji, v katerih nastanejo fotografije. Slabši vremenski pogoji, kot so močna oblačnost, megla ali rahel dež, povzročijo slabo osvetlitev ali premajhen kontrast fotografij. Takšne fotografije so slabše vizualne kakovosti, saj je razpon radiometričnih vrednosti slikovnih elementov manjši kot v primeru zajema fotografij v jasnem vremenu in ob zadostni naravni svetlobi. Na fotografijah, zajetih v slabših svetlobnih pogojih, je težje prepoznati posamezne detajle in je zato težje določiti vezne točke.

Wierzbicki, Kedzierski in Fryskowska (2015) so na podlagi preizkusa ugotovili, da se z uporabo fotografij, zajetih v slabših vremenskih pogojih, kar za 20 % zmanjša število veznih točk, v primerjavi z obdelavo fotografij, zajetih v dobrih vremenskih in svetlobnih pogojih. Prav tako se pri uporabi takšnih fotografij poslabša točnost tako izravnave bloka fotografij kot tudi točnost izdelanega digitalnega modela reliefa in posledično ortofota. Iz fotografij s slabšo ali spremenljivo radiometrično kakovostjo prav tako ni mogoče izdelati kakovostnega mozaika ortofotov, sestavljenega iz več blokov ortofota. Pomanjkanje veznih točk vpliva nadalje na slabšo popolnost izdelanega fotogrametričnega oblaka točk in posledično 3D-modela. Na kakovost obdelave in algoritmov slikovnega ujemanja vpliva tudi prisotnost šuma. Večja, kot je vrednost razmerja med signalom in šumom SNR (angl. *Signal to Noise Ratio*), več veznih točk je algoritem slikovnega ujemanja pri nadaljnji obdelavi sposoben zaznati. Kedzierski in Wierzbicki (2015) sta podala objektivno merilo za oceno radiometrične kakovosti fotografij v obliki vrednosti indeksa ocene kakovosti fotografije (angl. *image quality assessment index value*), ki jo lahko izračunamo za vsako uporabljeno fotografijo. Predlagata izračun te ocene pred izvedbo slikovnega ujemanja, saj tako lahko že pred obdelavo izločimo fotografije s slabo ali zelo slabo radiometrično kakovostjo. S tem dobimo dobro določene vezne točke. Slabost tega pristopa je predvsem v tem, da z izločanjem fotografij izgubimo določen delež podatkov in posledično nimamo več zagotovljenega zadostnega prekrivanja med sosednjimi fotografijami. Če je le mogoče, je za doseg zelo kakovostnih fotografij boljše izvajati snemanje v dobrih vremenskih pogojih.

Dandois, Olano in Ellis (2015) so na podlagi preizkusov določili najprimernejše parametre in pogoje snemanja, ki omogočajo pridobitev rezultatov ustrezne kakovosti v primeru snemanja gozdnih površin in spremljanja strukture gozda. Poleg predlagane višine leta in zadostnega preklopa med fotografijami so potrdili, da na točnost in popolnost pridobljenega fotogrametričnega oblaka točk vplivajo tudi vremenski pogoji v času snemanja.

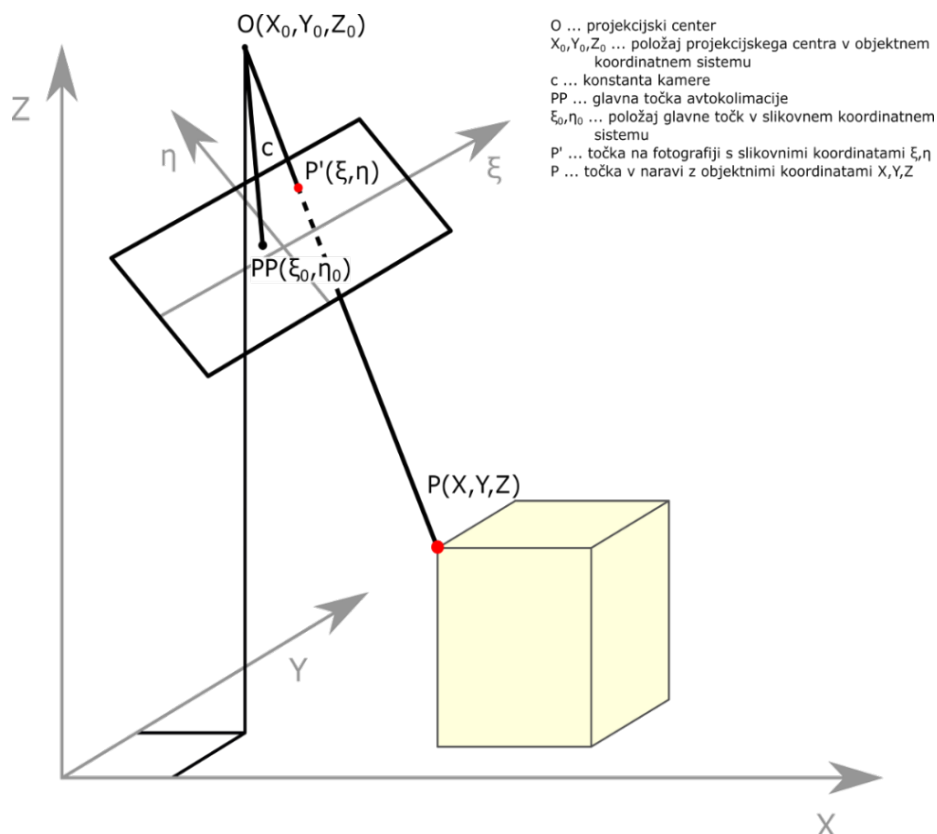
13

Omeniti je treba še vpliv prisotnosti senc na fotografijah. Če snemanje na terenu poteka dlje časa, lahko pride do spremembe položaja sonca ali celo vremenskih pogojev, kar povzroči spremembo položaja senc in osvetlitve fotografij. To lahko negativno vpliva tako na delovanje algoritmov za slikovno ujemanje (Rock, Ries in Udelhoven, 2012) kot tudi na samodejno prepoznavanje objektov na fotografiji. Zaradi slabšega slikovnega ujemanja fotografij je pridobljen fotogrametričnih oblak točk lahko močnejše notranje deformiran in nepopoln, kar negativno vpliva na kakovost izdelkov, zato se moramo takim primerom na terenu, če je le mogoče, izogniti (Martensson in Reshetyuk, 2017). V fazi predobdelave fotografij lahko ta vpliv nekoliko zmanjšamo z ustreznimi funkcijami v programih za digitalno obdelavo slik (Shahbazi et al., 2015).

2.2.1.4 Parametri notranje orientacije fotoaparata

Parametre notranje orientacije fotoaparata, krajše: *notranja orientacija*, potrebujemo, da lahko določimo slikovni koordinatni sistem, v katerem merimo slikovne koordinate (Slika 3). Osnovni parametri notranje orientacije so položaj glavne točke na fotografiji, goriščna razdalja in podatki o optični distorziji objektiva. Poleg tega predvsem pri nemerskih fotoaparatih določamo še nekatere druge parametre, kot so nepravokotnost koordinatnih osi, različna merila v smeri koordinatnih osi. Postopek, s katerim določamo parametre notranje orientacije fotoaparata, imenujemo kalibracija fotoaparata.

Parametre zunanje orientacije (krajše: zunanja orientacija) običajno določamo z izravnavo snopa slikovnih žarkov v bloku fotografij (angl. *bundle block adjustment*; krajše: izravnavo bloka fotografij), pri čemer moramo poznati objektne (to so prostorske, referenčne, lokalne ipd.) koordinate ustreznega števila oslonilnih točk. Parametri zunanje orientacije so objektne koordinate projekcijskega centra in zasuki slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem. V klasični fotogrametriji sta postopka določitve parametrov notranje in zunanje orientacije praviloma ločena.



Slika 3: V Razmerje med slikovnimi in objektnimi koordinatami točke (Drešček, 2021, povzeto po Kraus, 2007).

Osnovni načini kalibracije fotoaparata so: laboratorijska kalibracija, kalibracija s testnimi polji in samo-kalibracija. Redkeje se uporabljajo tudi nekatere druge metode, kot je kalibracija z uporabo poznanih oblik v prostoru, na primer navpičnice na objektu, prostorske linije ipd. Merske fotoaparate kalibrira proizvajalec z laboratorijsko kalibracijo, za katero je potreben poseben laboratorij z ustrezno opremo, zato tega uporabnik ne more izvajati sam. V UAV fotogrametriji uporabljamo manjše, lažje in cenejše nemerske fotoaparate, pri katerih so sestavni deli sistema manj geometrični stabilni, zato laboratorijska kalibracija ni primerna. Kalibracijo moramo izvajati bolj pogosto in na drugačne načine.

Pri kalibraciji s testnimi polji se uporabljajo polja posebej označenih točk (tarč), ki so razporejene v ravnini ali več ravninah, pri čemer poznamo lokalne koordinate teh točk ali razdalje med njimi. Kalibracijo lahko izvajamo ločeno od objekta obdelave ali hkrati s fotografiranjem samega objekta; v tem primeru to imenujemo kalibracija in-situ oziroma ob delu (angl. *on-the-job calibration*, *in-situ calibration*). Ta način kalibracije se uporablja predvsem pri terestričnih bližnjefotogrametrijskih aplikacijah. V UAV fotogrametriji je najbolj primerna metoda samo-kalibracija. Pri tej metodi uporabimo dobro določljive podrobnosti na objektu oziroma površju (značilke), ki niso posebej

označene. Zelo je pomembno, da pri fotografiranju zagotovimo ustrezno razporeditev fotografij, ki zagotavlja dobro geometrijo presekov slikovnih žarkov (Luhmann, Fraser in Maas, 2016). Takšno geometrijo zagotavljajo predvsem konvergentni posnetki, česar pa pri izključno nadirnem načinu fotografiranja iz letalnika ne moremo zagotoviti. Če je le mogoče, se v blok fotografij vključijo konvergentni posnetki, oziroma če to ni možno, se geometrija bloka lahko utrdi s kombinacijo različnih konfiguracij fotografiranja, na primer snemanje na dveh višinah, snemanje v različnih smereh ipd. Nadaljnji pomemben pogoj za uspešnost metode samo-kalibracije je, da se nastavitve na fotoaparatu med fotografiranjem ne spreminjajo in tudi objekt fotografiranja se ne sme premikati. V osnovi za izvedbo samo-kalibracije ne potrebujemo znanih referenčnih (objektnih) koordinat. Parametri notranje orientacije se lahko izračunajo zgolj iz geometrijsko določene oblike objekta. Vendar, če imamo na razpolago oslonilne točke, izmerjene v objektnem koordinatnem sistemu, se v izravnavi hkrati določijo tudi parametri zunanje orientacije. V primeru, da nas zanima le pravo merilo modela, ne pa tudi njegova pravilno geolociranje, je treba poznati najmanj eno dolžino v objektnem prostoru. Pomembno je upoštevati tudi ugotovitve, da netočnost parametrov notranje orientacije povzroča znatne sistematične napake v fotogrametričnih oblakih točk in izpeljanih izdelkih (James in Robson, 2014).

V zvezi s kalibracijo fotoaparata pri UAV fotogrametričnih aplikacijah lahko uporabimo tri različne pristope: predhodno kalibracijo fotoaparata, kalibracijo fotoaparata s samo-kalibracijo v okviru samega projekta oziroma kombinacijo obeh pristopov (Luhmann, Fraser in Maas, 2016; Nex in Remondino, 2014).

Harwin, Lucieer in Osborn (2015) so s primerjavo različnih načinov kalibracije nemerskih fotoaparatorov, nameščenih na letalnikih, analizirali vpliv izbrane metode kalibracije fotoaparata na točnost fotogrametričnega oblaka točk. Kalibracija je poleg nastavitvev in lastnosti uporabljenega fotoaparata, geometrije zajetih fotografij ter razporeditve, natančnosti in točnosti oslonilnih točk, ključnega pomena pri poznavanju vpliva slučajnih in sistematičnih pogreškov v fotogrametričnem oblaku točk. Z oceno točnosti na kontrolnih točkah je bila izvedena primerjava treh načinov kalibracije, in sicer predhodne kalibracije z uporabo šahovnice, predhodne kalibracije na testnem polju in postopka samo-kalibracije. Rezultati raziskave so pokazali najboljšo točnost fotogrametričnega oblaka točk, če v obdelavo pri izvedbi samo-kalibracije vključimo poševne fotografije (angl. *oblique images*). Ob tem je treba poudariti, da je treba imeti ustrezno programsko opremo za skupno obdelavo tako navpičnih kot poševnih fotografij. Velik del programskih okolij za obdelavo fotografij, zajetih z UAV, namreč ustrezno deluje zgolj v primeru obdelave le navpičnih fotografij.

Kakovost določitve parametrov notranje orientacije in njen vpliv na kakovost pridobljenega fotogrametričnega oblaka točka sta raziskovala tudi Hastedt in Luhmann (2015), ki sta dokazala, da so parametri notranje orientacije pri cenejših, nemerskih fotoaparatih med seboj zelo korelirani, kar je posledica nestabilnosti posameznih komponent teh fotoaparatorov. Pri uporabi metode samo-kalibracije je treba za natančno in zanesljivo določitev parametrov notranje orientacije zagotoviti dobro geometrijo bloka fotografij. Pri tem je dobra geometrija bloka mišljena kot takšna konfiguracija fotografij, ki vsebuje navpične in poševne fotografije. Do podobnih zaključkov sta prišla tudi James in Robson (2014), ki sta preverjala vpliv sistematičnih pogreškov na kakovost fotogrametričnih izdelkov v primeru obdelave bloka fotografij s približno vzporednimi osmi fotoaparata in uporabe postopka samo-kalibracije. V primeru uporabe zgolj fotografij, ki imajo vzporedne osi, so ocenjene vrednosti radialne distorzije zelo povezane s

kakovostjo pridobljenih rezultatov fotogrametrične obdelave, kot je digitalni model višin. V primeru, da v izravnavo bloka posnetkov ne vključimo oslonilnih točk, se pogrešek določitve radialne distorzije v postopku kalibracije močno izrazi kot sistematični pogrešek digitalnega modela reliefa, ki se kaže v obliki notranjih deformacij fotogrametričnega oblaka točk oziroma kot učinek (efekt) kupole (angl. *doming effect*). To pomeni, da se teren, ki je v resnici raven, modelira v obliki kupole. Pogrešek radialne distorzije in vpliv kupole v digitalnem modelu površja, izdelanih iz fotografij s približno vzporednimi osmi, sta med seboj povezana in ju ni mogoče ločiti, če nimamo na voljo dodatnih informacij o terenu oziroma objektu, ki ga snemamo. Za odstranitev ali vsaj zmanjšanje te napake James in Robson (2014) predlagata vključitev dobro razporejenih oslonilnih točk v izravnavo, tako na sredini študijskega območja kot na njegovih robovih, in uporabo poševnih fotografij, ki prispevajo k boljši geometriji bloka fotografij. Izdelava poševnih fotografij je možna z več-rotorskimi letalniki, pri katerih se lahko spreminja naklon fotoaparata. Pri letalnikih s fiksnimi krili to običajno ni možno, zato se predlaga izvedba dodatnega prečnega preleta na drugi višini. Podoben učinek dobimo tudi v primeru snemanja razgibanega terena, kjer razdalja med letalnikom in terenom ni konstanta, s čimer dobimo boljšo geometrijo bloka fotografij in posledično bolj robustno določitev parametrov notranje orientacije pri uporabi samo-kalibracije (Gerke in Przybilla, 2016).

Cilj nekaterih raziskav je ugotavljanje časovne stabilnosti parametrov notranje orientacije fotoaparata. Cramer, Przybilla in Zurhorts (2017) so med seboj primerjali vrednosti kalibracijskih parametrov, ki so jih določili z večkratno kalibracijo. Primerjavo so izvedli za več različnih digitalnih fotoaparata, in sicer za kompaktni, brez-zrcalni DSML (angl. *digital single lens mirrorless*) in zrcalno refleksni fotoaparata DSLR (angl. *digital single lens reflex*) ter rezultate primerjali z merskim fotoaparatom. Po večkratni izvedbi kalibracije v laboratoriju ob nadzorovanih pogojih snemanja so ugotovili, da je mogoče opaziti razlike v vrednosti parametrov med več zaporednimi kalibracijami, iz česar lahko sklepamo o mehanski nestabilnosti testiranih fotoaparata.

Prisotnost optičnih distorzij na fotografijah poslabša točnost končnih fotogrametričnih izdelkov. Radialna distorzija je močno odvisna od goriščne razdalje, ki tudi določa zorni kot fotoaparata. Z zmanjševanjem goriščne razdalje povečamo zorni kot, hkrati pa povečamo radialno distorzijo in zmanjšamo merilo zajete podobe. Ta učinek je najbolj opazen pri ekstremno širokokotnih (angl. *wide angle »fish-eye«*) objektivih, ki imajo izjemno širok zorni kot, kar omogoča hitrejši zajem večjih snemalnih območij, a so fotografije zaradi prisotnosti distorzij močno popačene in znotraj iste fotografije so vrednosti GSD različne (Strecha et al., 2015). Za doseg ustreznosti fotogrametričnega izdelka moramo zagotoviti ustrezno kalibracijo optičnih distorzij in te v nadaljnji obdelavi upoštevati (odpraviti). V splošnem velja, da je pri izbiri objektiva za fotogrametrično snemanje primerneje izbrati objektiv s fiksno goriščno razdaljo in nastavitve fiksne fokusa, s čimer zmanjšamo vpliv spreminjajoče goriščne razdalje in se izognemo neostrim fotografijam (Mosbrucker et al., 2017).

2.2.2 Dejavniki vpliva, povezani s snemalno misijo

Dejavnike vpliva na kakovost zajetih podatkov, povezanih s snemalno misijo, smo obravnavali v naslednjih tematskih sklopih:

- prostorska ločljivost fotografij, višina leta in prekrivanje fotografij in
- geometrija fotogrametričnega bloka.

2.2.2.1 Prostorska ločljivost fotografij, višina leta in prekrivanje fotografij

Prostorska ločljivost fotografij je zelo pomemben parameter pri načrtovanju snemanja z letalnikom. Pri izbranem fotoaparatu na prostorsko ločljivost fotografij neposredno vpliva višina leta (Nasrullah, 2016). Velikokrat avtorji raziskav svoje izsledke podajajo glede na snemalno višino. Z različnimi programi za načrtovanje snemalne misije lahko hitro in preprosto določimo ustrezne parametre. Prostorska ločljivost neposredno vpliva na prepoznavanje najmanjših podrobnosti oziroma detajlov na fotografiji, posredno pa tudi na končno geometrično točnost izdelkov. Vpliva prostorske ločljivosti fotografij na položajno točnost izdelkov ni možno ločeno in jasno ovrednotiti, saj na položajno točnost izdelkov vpliva še veliko drugih dejavnikov. V večini raziskav avtorji ugotavljajo, da se z višino leta položajna točnost izdelkov manjša (Dandois, Olano in Ellis (2015); Santise et al. (2014). Včasih so rezultati tudi manj jasni glede tega (Nasrullah, 2016), vendar kot že povedano, lahko drugi dejavniki prevladajo, kot so na primer slabše svetlobne razmere, veter ipd., in so rezultati slabši od pričakovanj. V raziskavah, ki smo jih preučili, se največkrat izbira prostorsko ločljivost fotografij v razponu od 1 do 5 cm.

Rock, Ries in Udelhoven (2012) so ugotovili, da višina leta vpliva na točnost izdelanega digitalnega modela površja. Na podlagi snemanj na različnih višinah od 50 do 550 m nad terenom so ugotovili, da položajna odstopanja na kontrolnih točkah na modelu od pravih vrednosti v splošnem naraščajo z višino leta. Na višinah med 50 m in 70 m so opazili, da se lahko pojavijo večja odstopanja od pričakovanih zaradi spremenjenih radiometričnih vrednosti na fotografijah. Če snemamo na nizki višini, je treba za pokritje zelenega območja snemanja zajeti več fotografij, kar traja dlje časa in je časovno potratno, hkrati pa lahko povzroči spremembo položaja senc, ki negativno vplivajo na kakovost določitve 3D-modela.

17

Mesas-Carrascosa et al. (2015) so v svoji raziskavi primerjali absolutno in relativno točnost ortofotov, izdelanih iz fotografij, ki so bile zajete na višinah 60, 80 in 100 m nad terenom (prostorska ločljivost 3, 4 oziroma 5 cm). Ugotovili so, da se z višino absolutna točnost zmanjšuje, najboljše rezultate so dobili na višini 60 m, kjer je bila dosežena točnost od 5 do 10 cm, odvisno od ostalih nastavitvev snemanja, kar znaša 2–3 GSD. V analizi relativne točnosti ortofota, to je z izračunom položajnih odstopanj med pari kontrolnih točk, pa so pri vseh treh višinah leta dobili primerljive rezultate. Ugotovili so tudi, da so na točnost izdelkov bolj kot sama višina leta vplivali drugi parametri, kot je način leta in število oslonilnih točk. Do podobnih rezultatov so prišli tudi Mesas-Carrascosa et al. (2017), ko so še bolj podrobno analizirali vpliv višine leta, saj so primerjali ortofote, izdelane iz fotografij na kar sedmih različnih višinah, na vsakih 10 m med 30 in 90 m nad terenom. Najprej so med seboj primerjali ortofote z ločljivostjo med 1,6 in 4,6 cm. Sledila je primerjava točnosti ortofotov, izdelanih iz fotografij, zajetih z različnih višin, a hkrati prevzorčenih na vrednost 5 cm. V obeh primerih so s primerjavo odstopanj na kontrolnih točk ugotovili, da je snemanje na višini med 60 in 90 m nad terenom dosegalo točnost velikosti 3 cm ob upoštevanju zadostnega prečnega in vzdolžnega preklopa med fotografijami. Pri višinah med 30 in 50 m se je točnost izdelanih ortofotov z višino zmanjševala ne glede na velikost prekrivanja fotografij. Avtorji to razlagajo kot posledico točnosti izmere oslonilnih in kontrolnih točk, ki je bila slabša od velikosti piksla. Kot že omenjeno, obstaja povezava med prostorsko ločljivostjo fotografij in položajno točnostjo izdelkov, vendar, predvsem pri zelo visokih ločljivostih, lahko vpliv drugih parametrov prevlada.

Nižja višina snemanja zagotavlja dobro prepoznavanje detajlov na fotografijah in končnih izdelkih. Pri tem pa se je treba zavedati, da letenje na nižjih višinah podaljša čas letenja, s tem pa lahko spremembe svetlobnih in drugih razmer bolj vplivajo na radiometrično kakovost fotografij in posledično na kakovost slikovnega ujemanja. Večja podrobnost in veliko število fotografij tudi podaljša čas fotogrametrične obdelave.

V nekaterih raziskavah so ugotovili, da ima lahko višina snemanja drugačen vpliv na ravnisnko oziroma horizontalno in višinsko točnost. Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez in Martínez-Carricondo (2017a) so ugotovili, da višina leta nima bistvenega vpliva na horizontalno točnost izdelkov, če je prostorska ločljivost fotografij primerna glede na zahteve položajne točnosti. Ugotovili pa so tudi, da ima višina leta večji vpliv na višinsko točnost, saj se je višinska točnost izdelkov s povečevanjem višine leta zmanjševala. Do podobnih rezultatov sta prišla tudi Udin in Ahmad (2014), ko sta primerjala položajno točnosti ortofotov, izdelanih iz UAV fotografij, zajetih na različnih višinah med 40 m in 100 m nad terenom. Tudi v tem primeru se horizontalna točnost ortofota s spreminjanjem višine ni bistveno spreminjala, medtem ko se je višinska točnost digitalnega modela terena zmanjševala z višino. Pri primerjavi zadnjih dveh prispevkov je treba poudariti, da so bili v obeh primerih v absolutnem smislu dosežene različne končne točnosti fotogrametričnih izdelkov, kar je posledica več dejavnikov, med drugim površina snemalnega območja, vrsta uporabljene strojne opreme in velikost preklopa.

Prekrivanje (uporablja se tudi izraz *preklop*) fotografij je naslednji zelo pomemben parameter pri načrtovanju snemanja. Prekrivanje fotografij se podaja v odstotkih glede na smer leta (vzdolžno in prečno). Prekrivanje med fotografijami v vzdolžni smeri omogoča ustvarjanje stereo-učinka med sosednjimi fotografijami. Prekrivanje med fotografijami v prečni smeri služi povezovanju fotografij v enoten blok. Velik odstotek prekrivanja v prečni smeri dodatno zagotavlja večjo stabilnost bloka fotografij, saj je več skupnih območij za določanje veznih točk. Navajamo nekaj izsledkov izbranih raziskav, v katerih so analizirali vplive različnih parametrov snemalnih misij na položajno točnost izdelkov.

V zvezi z raziskavami vpliva prekrivanja fotografij na prostorsko točnost fotogrametričnih izdelkov sta Colomina in Molina (2014) navedla, da je treba že v fazi načrtovanja snemanja z letalnikom predvideti večje prekrivanje kot pri klasičnem letalskem snemanju, s čimer zagotovimo zadostno nadštevilnost med prekrivajočimi fotografijami in preprečimo premajhno prekrivanje v primeru neugodnih pogojev za snemanje, na primer pri sunkih vetra. V strokovni literaturi najdemo priporočila, da naj bi pri snemanju z letalniki uporabljali vsaj 70 % preklopa v vzdolžni in vsaj 50–60 % v prečni smeri glede na smer letenja letalnika (Singh in Frazier, 2018). Že v nekaterih prvih raziskavah kakovosti fotogrametričnih oblakov točk, ki so bili izdelani iz fotografij, zajetih s tehnologijo UAV, je bilo dokazano, da prekrivanje med sosednjimi fotografijami vpliva na točnost določitve parametrov zunanje orientacije fotografij in nadaljnje na točnost določitve točk v oblaku. Večje vzdolžno preklop poveča število veznih točk med sosednjimi fotografijami, kar omogoči večje število opazovanj in posledično večjo nadštevilnost določitve detajlov na fotografijah (Rosnell in Honkavaara, 2012).

Dandois, Olano in Ellis (2015) so v fazi načrtovanja snemanja spreminjali razdaljo med sosednjimi linijami preleta letalnika, tako da so z različnimi konfiguracijami leta dobili različne vrednosti prekrivanja prečno glede na smer premikanja letalnika, in sicer so izbrali vrednosti prečnega prekrivanja 20 %, 40 %, 60 % in 80 %. Za vsako so izvedli več ponovitev snemanja in nato med

seboj primerjali dobljene rezultate v obliki fotogrametričnega oblaka točk. Nato so analizirali še vpliv prekrivanja v vzdolžni smeri. Tovrstno testiranje so izvedli tako, da so snemanje za izbrano študijsko območje izvedli z zelo visoko vrednostjo vzdolžnega prekrivanja (96 %), nižje vrednosti prekrivanja pa so dobili z izločanjem vmesnih fotografij. Izvedli so več obdelav z različnim vzdolžnim preklopom: najvišji je bila 96 %, najmanjši pa 60 %. V več ponovitvah snemanja z enakimi nastavitvami prečnega prekrivanja so ugotovili, da sicer nižja vrednost prečnega prekrivanja vpliva na nižjo gostoto točk v fotogrametričnem oblaku, vendar prečno prekrivanje ne vpliva bistveno na položajno točnost določitve 3D-modela.

Na drugi strani so pri različnih vrednostih vzdolžnega preklopa ugotovili, da obstaja visoka statistična povezanost med velikostjo prekrivanja in odstopanju 3D-modela od pravih vrednosti. Podobno so tudi pri vzdolžnem prekrivanju ugotovili povezanost med prekrivanjem in gostoto fotogrametričnega oblaka točk. Večje, kot je prekrivanje, več veznih točk lahko algoritem slikovnega ujemanja zazna med prekrivajočimi se fotografijami, kar posledično pomeni večjo gostoto točk v oblaku. Iz podobnih predpostavk so izhajali tudi Torres-Sanchez et al. (2017), ki so potrdili vpliv velikosti vzdolžnega prekrivanja med fotografijami in višine leta na gostoto točk v izdelanem fotogrametričnem oblaku točk. Ta povezava je bila bolj očitna na nižji višini leta (50 m), medtem ko je bila povezanost med prekrivanjem in gostoto točk manj izrazita na snemalni višini 100 m. S praktičnim preizkusom so dokazali tudi odvisnost trajanja obdelave od števila fotografij, ki jih vključimo v obdelavo. Za dosego večjega prekrivanja je treba zajeti in kasneje obdelati več fotografij, kar bistveno podaljša čas, potreben za pridobitev rezultata. Podobno kot pri gostoti oblaka točk je tudi v primeru trajanja obdelave povezanost bolj izrazita pri obdelavi fotografij, zajetih na višini 50 m, kot pri obdelavi fotografij s snemalne višine 100 m, kar gre pripisati višji prostorski ločljivosti fotografij in zato zahtevnejši obdelavi.

19

Večje prekrivanje zagotavlja večjo gostoto oblaka točk in posledično večjo kakovost tako z vidika popolnosti kot tudi natančnosti pridobljenega oblaka, hkrati pa negativno vpliva na trajanje terenskega dela za zajem fotografij in trajanje ter zahtevnost kasnejše obdelave, zato je treba pred izvedbo terenskega dela vedno razmisliti o optimalnem razmerju med velikostjo prekrivanja, višino leta in želeno končno kakovostjo pridobljenih rezultatov.

Na osnovi preizkusov so Dandois, Olano in Ellis (2015) ter Torres-Sanchez et al. (2017) ugotovili, da je za dosego zadostne popolnosti oblaka točk in nekaj centimetske točnosti ob hkratni optimizaciji trajanja zajema in obdelave podatkov, smiselno pri snemanju na višini 50–60 m zagotoviti 80–85 % vzdolžno prekrivanje in vsaj 60 % prečo prekrivanje. Če snemamo na višji višini, je lahko vzdolžno prekrivanje še nekoliko večje (do 90 %), vendar se s tem podaljša čas zajema istega območja, trajanje obdelave pa še ni bistveno daljše. Pri višjih vrednostih prekrivanja pa se zahtevnost obdelave zelo poveča, hkrati pa ne dobimo bistveno bolj kakovostnih rezultatov. Do podobnih zaključkov so prišli tudi Rupnik et al. (2015). Povečano prekrivanje sicer podaljša čas snemanja in trajanje obdelave, a zaradi višje nadštevilnosti pripomore k boljši točnosti rezultatov. Iz rezultatov so sklepali, da vrednosti vzdolžnega prekrivanja 80 % in prečnega prekrivanja 60 % dasta najboljše razmerje med točnostjo izdelkov in smotrnostjo povečanega obsega dela na terenu ter obdelave.

2.2.2.2 Geometrija fotogrametričnega bloka

Na točnost določitve 3D-modela iz fotografij, zajetih z letalnikom, vpliva tudi geometrija bloka fotografij, ki določa medsebojno lego in orientacijo fotografij, ki jih uporabimo za izdelavo 3D-modela. Ustrezna geometrija bloka fotografij omogoča pridobivanje točnih in zanesljivih rezultatov, ki jih pridobimo na osnovi meritev v izdelanem fotogrametričnem oblaku točk ali nadaljnjem 3D-modelu (Nocerino et al., 2013).

V klasičnem letalskem fotogrametričnem snemanju zajamemo fotografije tako, da so si osi fotografije med seboj vzporedne. Tako usmerjenost osi fotografij pogosto uporabljamo tudi pri snemanju z letalnikom, s čimer optimiziramo delo na terenu, saj v najkrajšem času posnamemo želeno območje na terenu. Ob uporabi nemerskega fotoaparata se lahko v primeru klasične geometrije bloka fotografij v izdelanem 3D-modelu površja pojavi učinek kupole, ki smo ga že opisali. Ta sistematični pogrešek je posebej očitno v primeru, ko so osi zajetih fotografij med seboj vzporedne in nimamo na voljo dovolj oslonilnih točk, ki bi ta učinek lahko zmanjšale. Kot predlagata James in Robson (2014), je poleg vključitve več oslonilnih točk mogoče tovrsten sistematični vpliv zmanjšati tudi z nekoliko spremenjenim blokom fotografij, in sicer z dodanimi poševnimi fotografijami ali z dodatni letom letalnika prečno na prvotno smer letenja. Do podobnih zaključkov sta prišla tudi Gerke in Przybilla (2016), ki sta ugotovila izboljšavo kakovosti izdelanih 3D-modelov z vključitvijo dodatnih fotografij, zajetih v prečni smeri glede na prvotno smer letenja na različni višini od prvotne, s čimer dobimo spremenjeno geometrijo bloka fotografij. Harwin, Lucieer in Osborn (2015), ki so med seboj primerjali različne načine kalibracije, so prav tako ugotovili, da lahko dodatne poševne fotografije izboljšajo položajno kakovost izdelanih oblakov točk, če ob tem zagotovimo zadostno prekrivanje med fotografijami in zadostno število oslonilnih točk, enakomerno razporejenih po celotnem območju snemanja.

20

S primerjavo rezultatov, pridobljenih iz različnih geometrij blokov fotografij, je bilo ugotovljeno, da visoka stopnja nadštevilnosti v smislu prekrivanja fotografij in konvergentne osi zajetih fotografij omogočajo doseganje višje zanesljivosti rezultatov fotogrametrične obdelave. To je posebej očitno v primeru 3D-modeliranja, saj če navpičnim fotografijam dodamo še poševne in hkrati v fotogrametrično obdelavo v postopek izravnave fotografij oziroma posnetkov s snopi vključimo tudi ustrezno izmerjene in po celotnem snemalnem območju enakomerno razporejene oslonilne točke, dobimo rezultate, ki so bolj zanesljivi in hkrati vsebujejo manj notranjih deformacij. Na drugi strani je treba upoštevati, da dodatne poševne fotografije podaljšajo izvedbo terenskega dela, potrebna je posebna pozornost pri zajemu fotografij za doseg ustreznih geometrije bloka fotografij, s čimer omogočimo uspešno slikovno ujemanje in zahtevajo bolj kompleksne algoritme fotogrametrične obdelave za doseg kakovostnih rezultatov (Nex in Remondino, 2014; Nocerino et al., 2013).

2.2.3 Dejavniki vpliva, povezani z oslonilnimi točkami za georeferenciranje fotogrametričnega bloka

S fotogrametrično obdelavo fotografij, zajetih z letalnikom, v prvem koraku pridobimo rezultate v obliki fotogrametričnega oblaka točk. Pravo merilo, položaj in orientacijo tega oblaka dobimo, če smo v postopku uporabili oslonilne točke v referenčnem koordinatnem sistemu (posredno ali indirektno georeferenciranje). Lahko pa uporabimo tudi postopek neposrednega oziroma direktnega georeferenciranja, pri katerem parametre zunanje orientacije pridobimo z dodatnimi senzorji za določanja položaja in orientacije, ki so nameščeni na letalniku. Doseganje visoke

točnosti s tem pristopom še ni možno zaradi omejitev nosilnosti letalnikov ter drage opreme, zato se tak način orientacije fotografij redkeje uporablja. Pogosteje se zato odločamo za indirektno georeferenciranje, torej za izmero terenskih oslonilnih točk GCP (angl. *ground control points*). V začetnem obdobju uporabe tehnologije UAV so bile oslonilne točke uporabljene šele v drugi fazi fotogrametrične obdelave, ko se je že izdelan 3D-model na osnovi podobnostne transformacije transformiral iz tako imenovanega modelnega v želen ciljni objektni koordinatni sistem. V tem primeru se pogosto zgodi, da dobimo rezultat, ki je notranje deformiran in posledično slabše točnosti. Model se na oslonilnih točkah dobro prilega pravim vrednostim, z oddaljenostjo od oslonilnih točk pa se pojavijo odstopanja. Sodobnejši algoritmi obdelave fotografij, zajetih z letalnikom, omogočajo vključitev koordinate oslonilnih točk kot opazovanj neposredno v izravnavo snopov (angl. *bundle block adjustment*), s čimer se zmanjšajo notranje deformacije modela (Nocerino et al., 2013; Nex in Remondino, 2014; Gerke in Przybilla, 2016).

Ker je v primeru letalnikov še vedno bolj razširjena uporaba indirektnega georeferenciranja, se bomo v nadaljevanju osredotočili zgolj na to vrsto georeferenciranja. Sledi povzetek znanstvenih objav, v katerih so avtorji analizirali vpliv števila oslonilnih točk in njihove razporeditve po območju, ki ga želimo zajeti z letalnikom, na kakovost rezultatov fotogrametrične obdelave.

Harwin, Lucieer in Osborn (2015) so poleg drugih vplivov primerjali točnosti oblakov točk, pridobljenih z vključitvijo različnega števila oslonilnih točk v izravnavo posnetkov. Najprej so v obdelavo vključili 5 oslonilnih točk, od tega so bile štiri razporejene na vsakem vogalu, ena pa v središču snemalnega območja velikosti 0,1 ha in primerjali točnosti na kontrolnih točkah. Nato so v obdelavo dodali dodatne oslonilne točke, enakomerno razporejene po istem snemalnem območju; druga obdelava je vključevala skupno 13 oslonilnih točk. Rezultati analize točnosti v obliki izračunanih vrednosti korena srednjega kvadratnega pogreška RMSE (angl. *root mean square error*) na kontrolnih točkah so pokazali, da poleg drugih vplivov, ki so jih avtorji v raziskavi upoštevali, omogoča uporaba večjega števila oslonilnih točk doseganje višje točnosti fotogrametričnega oblaka točk, pri čemer je izboljšanje izrazitejše za višine. Manjše število oslonilnih točk ima večji vpliv na višinsko točnost oblaka točk predvsem v primeru, ko so oslonilne točke izmerjene z manjšo točnostjo. Podobno sta Reshetyuk in Mårtensson (2016) pri izdelavi digitalnega modela terena na območju velikosti 2,4 ha analizirala točnost aerotriangulacije fotografij za pridobitev fotogrametričnega oblaka točk, pri čemer sta prav tako preverjala vpliv različnega števila oslonilnih točk. Na podlagi rezultatov sta ugotovila, da se s povečevanjem števila oslonilnih točk povečuje točnost izvedene aerotriangulacije. Z večjim številom oslonilnih točk, enakomerno razporejenih po celotnem območju, se zmanjšajo predvsem odstopanja na sredini območja, s čimer se zmanjša učinek kupole, ki nastane v primeru premajhnega števila oslonilnih točk. Tudi Gerke in Przybilla (2016) podajata podobne zaključke na osnovi rezultatov empiričnih testov na dveh snemalnih območjih. S povečanjem števila oslonilnih točk s štirih točk na robovih območja na 17 točk na prvem območju oziroma 18 točk na drugem, razporejenih po celotnem območju, ne le na robovih, sta prav tako opazila izboljšavo točnosti izravnave fotografij, ki je bila še posebej očitna pri višinski komponenti koordinat kontrolnih točk.

Število in razporeditev oslonilnih točk ne vpliva samo na kakovost fotogrametričnega oblaka točk, ampak posledično tudi na izdelke, ki jih pridobimo z nadaljnjo obdelavo oblaka. Več avtorjev je analiziralo vpliv števila oslonilnih točk na točnost digitalnega modela površja, izdelanega iz fotografij, zajetih z letalnikom. Med njimi tudi Tonkin in Midgley (2016), ki sta analizirala ponovljivost in robustnost določitve modela površja ob uporabi različnega števila oslonilnih točk.

V praktičnem preizkusu sta na območju velikosti 14,5 ha izdelala več digitalnih modelov površja, ki so se med seboj razlikovali po številu uporabljenih oslonilnih točk v postopku izravnavе fotografij s snopi in georeferenciranja oblaka točk. Primerjava je pokazala, da so že ob uporabi vsaj štirih kontrolnih točk odstopanja med višino na modelu površja in višino, izmerjeno z GNSS, med 5,9 cm in 7,6 cm, kar je znotraj položajne točnosti določitve koordinat oslonilnih točk na terenu, na podlagi katerih so bili modeli površja georeferencirani. Koordinate oslonilnih točk so bile na terenu izmerjene z metodo, ki ni bistveno natančnejša od izdelanega modela površja, zato predstavlja omejitev pri določitvi površja z višjo točnostjo. Prav zato izrazito povečevanje števila oslonilnih točk med izračunanimi modeli površja od začetnih štirih do končnih 101 ni bistveno pripomoglo k boljši točnosti določitve modela površja. Za ustrežnejšo analizo vpliva števila oslonilnih točk na višinsko točnost digitalnega modela površja je smiselno oslonilne točke izmeriti z višjo točnostjo od pričakovane točnosti modela površja, s čimer bi se vpliv števila oslonilnih točk na višinsko točnost izdelanega modela površja bolj izrazil. Tudi Shahbazi et al. (2015) so analizirali točnost digitalnega modela reliefa z upoštevanjem različnega števila oslonilnih točk in ugotovili, da več oslonilnih točk, ki so enakomerno razporejene po snemalnem območju, omogoča doseganje višje točnosti rezultatov. Če ni mogoče zagotoviti zadostnega števila oslonilnih točk, je treba pri določitvi manjšega števila točk upoštevati dejstvo, da so točke nahajajo na takih lokacijah na snemalnem območju, da so vidne na čim več fotografijah, ki jih zajamemo z letalnikom. Podobno raziskavo so izvedli Gindraux, Boesch in Farinotti (2017), ki so na treh nekoliko večjih snemalnih območjih, velikosti med 140 ha in 690 ha, analizirali vpliv števila in razporeditve oslonilnih točk na točnost digitalnega modela površja. S postopnim povečevanjem števila oslonilnih točk se je točnost modela izboljševala, dokler ni bila dosežena dovolj visoka gostota točk na snemalnem območju. Ob dovolj gosti razporeditvi točk je bilo doseženo optimalno razmerje med številom oslonilnih točk in točnostjo rezultatov. Avtorji so podali optimalno število oslonilnih točk glede na velikost snemalnega območja za doseg visoke točnosti rezultatov, zajetih z letalnikom, in znaša za višinsko komponento 0,17 točk/ha, za horizontalno pa 0,07 točk/ha. Nadaljnje dodajanje dodatnih oslonilnih točk ni prispevalo k višji točnosti modela, temveč je vrednost odstopanj na kontrolnih točkah ostajala enaka, kar je v skladu tudi z ugotovitvami v prispevkih Sanz-Ablanado et al. (2018) ter Tonkin in Midgley (2016). Pri tem poudarjamo, da je treba pri izbiri ustreznega števila oslonilnih točk upoštevati tako površino območja, ki ga želimo zajeti, kot tudi prostorsko ločljivost fotografij, ki jih bomo uporabili v obdelavi, saj tudi ta dva faktorja močno vplivata na odločitev o številu oslonilnih točk in njihovi razporeditvi za doseg ustreznе kakovosti rezultatov.

Tako Tonkin in Midgley (2016) kot Gindraux, Boesch, in Farinotti (2017) so analizirali vpliv razporeditve oslonilnih točk na točnost modela površja. V obeh objavah avtorji ugotavljajo, da omogoča enakomerna in dovolj gosta razporeditev oslonilnih točk doseg homogene točnosti modela po celotnem območju, saj se s povečevanjem oddaljenosti od najbližje oslonilne točke poslabša lokalna točnost izdelanega modela površja. Odstopanja modela od pravih vrednosti so bila največja v predelih snemalnega območja, ki so bila najbolj oddaljena od najbližje oslonilne točke. Avtorji obeh prispevkov podajajo zelo primerljive rezultate z vidika slabše točnosti v primeru neenakomerne razporeditve oslonilnih točk, saj je v obeh primerih na oddaljenosti 100 m od najbližje oslonilne točke znašalo višinsko odstopanje modela že 10 cm, medtem ko je bilo na oddaljenosti 250 m to odstopanje že približno 40 cm. To sovпада z ugotovitvami drugih avtorjev, ki priporočajo razporeditev oslonilnih točk na robovih oziroma na zunanjem obodu snemalnega območja, hkrati pa naj bodo točke enakomerno razporejene tudi znotraj območja, predvsem v primeru večjih snemalnih območij, saj s tem zagotovimo boljšo višinsko točnost in preprečimo

notranje deformacije modela (James in Robson, 2014; Gerke in Przybilla, 2016; Coveney in Roberts, 2017; Martínez-Carricondo et al., 2018; Sanz-Abianedo et al., 2018; Stöcker et al., 2019b). Tudi Mesas-Carrascosa et al. (2015) so ugotovili izboljšavo točnosti rezultatov pri vključitvi dodatne oslonilne točke na sredini snemalnega območja. V raziskavi so primerjali rezultate točnosti ortofota, izdelanega na podlagi različnega števila in razporeditve oslonilnih točk. V prvem primeru so štiri oslonilne točke razporedili zgolj na zunanem robu (v vogalih) območja snemanja, v drugi obdelavi so dodali še dodatno točko na sredni območja. Rezultati so pokazali boljše točnosti na kontrolnih točkah v primeru uporabe dodatne točke v sredini območja. Izboljšava v točnosti ortofota je bila še bolj očitna v naslednjem koraku, ko oslonilne točke niso bile nameščene na skrajnem robu območja, temveč je bilo območje snemanja za 10 % širše od prvotnega.

Zelo podobne rezultate navajajo tudi Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez, in Martínez-Carricondo (2017b) v raziskavi vpliva števila oslonilnih točk na horizontalno točnost ortofota in višinsko točnost digitalnega modela površja, pridobljena iz fotografij z letalnikom. Na nekoliko manjšem snemalnem območju velikosti 17,6 ha so izvedli več obdelav fotografij z upoštevanjem od 4 do 20 oslonilnih točk. Za obravnavan empirični test so ugotovili, da je mogoče najboljšo točnost doseči pri uporabi 15 in 20 oslonilnih točk, in sicer okoli 3 cm v pri položajnih koordinatah in okoli 5 cm pri višinah. Podobne srednje vrednosti točnosti so bile ugotovljene tudi v primeru uporabe zgolj 10 točk, vendar je bila v tem primeru dosežena slabša natančnost z večjo razpršenostjo rezultatov. Tudi v tej raziskavi je uporaba 15 oslonilnih točk predstavljala optimalno razmerje med številom oslonilnih točk in doseženo točnostjo rezultatov oziroma razmerje med čas in trudom, ki ga porabimo na terenu za natančno izmero oslonilnih točk, ter kakovostjo rezultatov, ki jih pridobimo s fotogrametrično obdelavo. Če primerjamo rezultate raziskav Coveney in Roberts (2017) ter Agüera-Vega, Carvajal-Ramírez, in Martínez-Carricondo (2017b), lahko vidimo, da so izračunane točnosti ortofota in digitalnega modela reliefa primerljive ob upoštevanju razmerja med velikostjo snemalnega območja in številom oslonilnih točk.

Analizo vpliva števila in razporeditve oslonilnih točk na točnost ortofota in digitalnega modela površja so nadalje izvedli Martínez-Carricondo et al. (2018). Tudi v tem primeru se je točnost rezultatov povečevala z dodajanjem dodatnih oslonilnih točk. V raziskavi so poleg števila oslonilnih točk na izbranem snemalnem območju velikosti 17,64 ha podrobno analizirali točnost rezultatov glede na število kot tudi razporeditev oslonilnih točk. Ne glede na število oslonilnih točk je bila najboljša horizontalna točnost ortofota dosežena pri razporeditvi oslonilnih točk po robu snemalnega območja, ki je v primeru dovolj velikega števila oslonilnih točk znašala okrog 3,5 cm in je bila na obravnavanem območju dosežena pri 20 oslonilnih točkah oziroma z vsaj eno točko na vsakih 84 m. Višinska točnost digitalnega modela površja je bila pri vseh številih in razporeditvah oslonilnih točk slabša od horizontalne točnosti ortofota in je v najbolj gostih razporeditvah oslonilnih točk znašala okrog 4,3 cm, ki je bila pridobljena na osnovi 30 oslonilnih točk. V splošnem je najboljše višinsko točnost ne glede na število oslonilnih točk dala enakomerna razporeditev točk po celotnem snemalnem območju. Na osnovi rezultatov analize so avtorji podali optimalno razmerje med številom oslonilnih točk in točnostjo rezultatov, ki jo lahko dosežemo ob uporabi danega letalnika za zajem fotografij ter z izmero območja primerljive velikosti, in sicer znaša to razmerje 0,5–1 oslonilna točka/ha. Podano razmerje je skladno z rezultati raziskav drugih avtorjev (Agüera-Vega et al., 2017b; Coveney in Roberts, 2017), ki so pridobili podobne vrednosti števila oslonilnih točk glede na površino, pri katerih je bila dosežena najvišja točnost rezultatov in se z dodajanjem dodatnih oslonilnih točk ni izboljševala. Za dosego dobre položajne točnosti bi bila gostota točk lahko nižja, vendar ker na osnovi istih podatkov v obdelavi izdelamo

tako ortofoto kot digitalni model površja, je treba zagotoviti tolikšno število oslonilnih točk, da dobimo tudi ustrezno točnost modela površja. Pri tem je treba upoštevati tudi razporeditev oslonilnih točk, in kot je razvidno iz rezultatov, je najbolje točke enakomerno razporediti po celotnem območju snemanja. V prispevkih Gindraux, Boesch in Farinotti (2017) ter Sanz-Ablanedo et al. (2018), kjer je bila analizirana točnost oblakov točk ali izdelkov na precej večjem snemalnem območju, je bilo zahtevano število oslonilnih točk/ha bistveno manjše za doseg optimalne točnosti, in sicer je znašalo zgolj 0,07 točk/ha.

Zanimivo raziskavo točnosti fotogrametričnih izdelkov so izvedli Galván Rangel et al. (2018). Z vidika števila in razporeditve oslonilnih točk so primerjali ustreznost ortofota in digitalnega modela terena glede na zahteve treh standardov, ki opredeljujejo zahtevano točnost fotogrametričnega izdelka, in sicer so uporabili standard NMAS (angl. *National map accuracy standard*), standard ASPRS (angl. *American society for photogrammetry and remote sensing*) in standard NSSDA (angl. *National standard for spatial data accuracy*). Ugotovili so, da enakomerna razporeditev oslonilnih točk na robovih območja in v njegovi notranjosti, ob upoštevanju zadostnega prekrivanja ter dovolj visoki natančnosti določitve koordinat oslonilnih točk, omogoča uporabo UAV tehnologije za izdelavo fotogrametričnih izdelkov s točnostjo, ki je skladna z zahtevami izbranih standardov. Hkrati so ugotovili, da na horizontalno točnost vplivajo zgolj točke na robovih snemalnega območja. S povečevanjem števila točk na robovih se horizontalna točnost izboljšuje, dodatne točke v sredini območja pa ne pripomorejo bistveno k višji točnosti, kar je skladno z ugotovitvami iz klasične fotogrametrije. Na višinsko točnost pa imajo oslonilne točke na sredini snemalnega območja velik pomen, zato je treba za ustrezno višinsko točnost poleg točk na robovih snemalnega območja zagotoviti tudi točke znotraj območja. To zmanjša učinek kupole, kar so dokazali tudi drugi avtorji (James in Robson, 2014; Gerke in Przybilla, 2016; Martínez-Carricondo et al., 2018). Galván Rangel et al. (2018) so določili tudi optimalno število oslonilnih točk, ki omogoča doseganje optimalne točnosti glede na ostale parametre snemanja, in sicer so za položajno točnost opredelili 0,07 točk/ha in za višinsko točnost 0,10 točk/ha. Z nadaljnjim dodajanjem oslonilnih točk po snemalnem območju se točnost izdelkov ni bistveno izboljšala, zato vključevanje večjega števila oslonilnih točk od predlaganega na tovrstnem območju ni smiselno. Rezultati so primerljivi z ugotovitvami drugih avtorjev, ki so izvajali snemanje razmeroma velikih območjih (Gindraux et al., 2017; Sanz-Ablanedo et al., 2018).

Kot je bilo že izpostavljeno, pa ne smemo zanemariti zunanjih pogojev, ki lahko znatno vplivajo na geometrično kakovost obdelave fotografij. Pozornost je treba nameniti predvsem sencam, ki se jim na fotografijah skorajda ne moremo izogniti. Če snemanje na terenu poteka dlje časa, lahko pride do spremembe položaja sonca ali celo vremenskih pogojev, kar povzroči spremembo položaja senc ali celo osvetlitve fotografij. To lahko negativno vpliva tako na delovanje algoritmov za slikovno ujemanje (Rock et al., 2012) kot tudi na samodejno prepoznavanje objektov na fotografiji. Zaradi slabšega slikovnega ujemanja fotografij je pridobljen fotogrametričnih oblak točk lahko močnejše notranje deformiran in nepopoln, kar negativno vpliva na kakovost izdelkov, pridobljenih iz takega oblaka točk, zato se je takim situacijam na terenu, če je le mogoče, izogniti (Martensson in Reshetyuk, 2017). Prav tako se priporoča, da se že v fazi predobdelave fotografij izvedejo radiometrične operacije za odstranitev senc na fotografijah in se na ta način izboljša končno točnost fotogrametričnih izdelkov (Shahbazi et al., 2015).

2.2.4 Slovenski zakonski okvir glede zahtevane kakovosti koordinat katastrskih točk

V Sloveniji so bili januarja 2019 vsi položajni podatki zemljiškega katastra, kot tudi drugih uradnih prostorskih evidenc Geodetske uprave RS, transformirani v novi koordinatni sistem D96/TM (glej Berk et al., 2015). V naši raziskavi nas zanimajo koordinate tako imenovanih zemljiškokatastrskih točk (v nadaljevanju *ZK-točk*), katerih natančnost položajne določitve je zaradi zgodovinskega razvoja zemljiškega katastra zelo heterogena in praviloma le približno določena. Zahteve glede kakovosti določevanja koordinat katastrskim točkam pri katastrskih postopkih so opredeljene v *Pravilniku o evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru* (2018). Ta omenja različno, to je heterogeno položajno natančnost koordinat *ZK-točk*, ki pa je opredeljena kot daljša polos standardne elipse zaupanja a koordinate točke (1):

$$a = \sqrt{\frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}{2}} + \sqrt{\frac{(\sigma_e^2 - \sigma_n^2)^2}{4}} + \sigma_{en}^2 \quad (1)$$

kjer so σ_e, σ_n ... standardni odklon ravninskih koordinat (e in n),
 σ_{en} ... kovarianca ravninskih koordinat.

Na temelju lastnih izkustev so na Geodetski upravi RS z letom 2020 uvedli nove razrede *ZK-točk* glede na metodo določitve njihovih koordinat, za nekatere šifre metod določitve koordinat *ZK-točk* pa je ocenjena tudi položajna točnost le-teh (Preglednica 4). Pred tem so bile *ZK-točke* razvrščene v več razredov glede na metodo izmere in ocenjeno položajno točnost, kar je predstavljeno v trenutno veljavnih Tehničnih navodilih (GURS, 2020b).

25

Preglednica 4: Šifrant metode določitve koordinat *ZK-točk* v državnem koordinatnem sistemu (GURS, 2020a).

Šifra	Ime	Opis
00	Ni znana	Metoda določitve koordinat <i>ZK-točk</i> ni poznana
77	Homogenizacija	Koordinate <i>ZK-točk</i> , določene s homogenizacijo
85	Izboljšava lokacijskih* podatkov	Koordinate <i>ZK-točk</i> , določene z izboljšavo lokacijskih* podatkov ($1\text{ m} \leq a \leq 2\text{ m}$)
86	Izboljšava lokacijskih* podatkov	Koordinate <i>ZK-točk</i> , določene z izboljšavo lokacijskih* podatkov ($2\text{ m} < a \leq 5\text{ m}$)
87	Izboljšava lokacijskih* podatkov	Koordinate <i>ZK-točk</i> , določene z izboljšavo lokacijskih* podatkov ($5\text{ m} < a \leq 10\text{ m}$)
88	Izboljšava lokacijskih* podatkov	Koordinate <i>ZK-točk</i> določene z izboljšavo lokacijskih* podatkov (natančnost ni določena)
90	Brez koordinat	Točke brez koordinat
91	Terenska meritev	Geodetska izmera na terenu
92	Privzete	Koordinate <i>ZK-točk</i> , določene na podlagi državnega ortofota, geodetskih načrtov ali topografskih podatkov; koordinate delno urejenih točk so vedno pridobljene s to metodo
93	Transformirana	Koordinate <i>ZK-točk</i> , dobljene s transformacijo terenskih D48/GK koordinat v D96/TM
97	ZPS** - terenska meritev	Koordinate <i>ZK-točk</i> ZPS

**lokacijskih: mišljeno je »položajnih«

**ZPS – zemljišče pod stavbo

V projektni nalogi preučujemo možnosti uporabe UAV fotogrametrije za namen izmere detajlnih točk zemljiškega katastra. S tega vidika je ciljna položajna kakovost koordinat ZK-točk enaka tisti, ki je zahtevana pri terenski izmeri. Ta je v *Pravilniku o evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru* (2018) opredeljena kot daljša polos standardne elipse zaupanja v koordinate točke (1) ki znaša 4 cm.

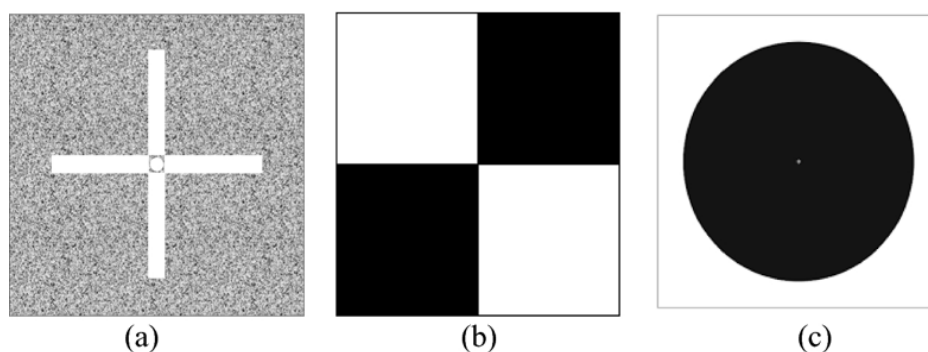
Glede metode izmere v zemljiškem katastru so na voljo navodila iz leta 2007, to so *Tehnična navodila za uporabo novega koordinatnega sistema v zemljiškem katastru* (GURS, 2007), ki podrobneje opredeljujejo metode geodetske izmere detajla za potrebe zemljiškega katastra. Te vključujejo klasično tahimetrično metodo izmere, kombinirano metodo izmere in metode izmere GNSS (angl. *Global Navigation Satellite Systems*).

2.3 Določitev pogojev za objektivno oceno kakovosti označitve ter Določitev tipov tarč za začasno označitev oslonilnih točk in mejnikov v testiranju ter predlog tarč za stalno označitev katastrskih točk (mejniov)

Ta del raziskave je bil namenjen opredelitvi pristopa za objektivno oceno kakovosti označitve oslonilnih točk in mejnikov. Na temelju literature in raziskav smo določili parametre in postopke za oceno primernosti označitve oslonilnih točk in mejnikov za fotogrametrični zajem podatkov o položajih le-teh. Sledilo je preučevanje tarč, ki se jih lahko uporablja v UAV fotogrametriji. V nadaljevanju projekta je bila pri preizkusih na testnih območjih posebna pozornost namenjena opredelitvi pogojev snemanja ter oceni primernosti označevanja oslonilnih točk in mejnikov z vidika, da ustrezna označba omogoča kakovostno samodejno razpoznavanje in določevanje koordinat teh točk v referenčnem geodetskem koordinatnem sistemu. Za oceno kakovosti označitve oslonilnih točk in točk detajla predlagamo sicer že uveljavljeni postopek neodvisne terenske kontrolne izmere izbranih točk, katerih koordinate morajo biti določene z natančnostjo, kot jih zahteva zakonodaja na področju zemljiškega katastra.

2.3.1 Analiza tipov tarč

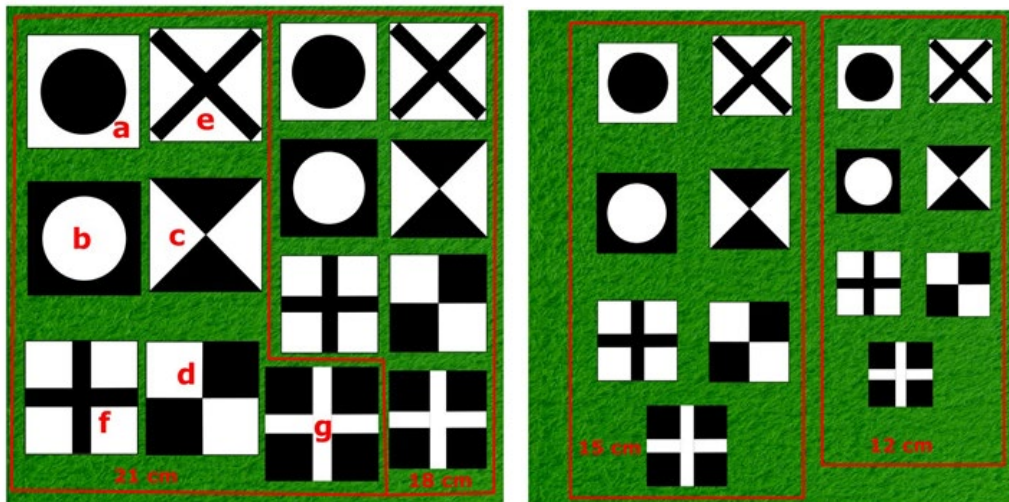
V svetu so se za namene UAV fotogrametrije uveljavile različne oblike in velikosti tarč – tako za oslonilne in kontrolne točke kot za same točke podrobne oziroma detajlne izmere (v našem primeru ZK-točke). Jain, Mahajan in Saraf (2019) so izvedli zanimivo raziskavo glede primernosti tarč za oslonilne in kontrolne točke, kjer so analizirali tri uveljavljene oblike tarč (Slika 4).



Slika 4: Primeri »klasičnih« tarč za oznako oslonilnih in kontrolnih točk, kot so jih analizirali Jain, Mahajan in Saraf (2019).

Z vidika možnosti samodejnega ali pol-samodejnega prepoznavanja tarč pri obdelavi podatkov, pridobljenih s fotoaparatom na daljinsko vodenem letalniku, je treba upoštevati dejavnike, ki vplivajo na kakovost in učinkovitost prepoznavanja tarč. Sem spadajo vse vizualne spremenljivke, kot so oblika, tekstura, barva, velikost ipd. Dodatno je treba upoštevati zunanje dejavnike, ki vplivajo na prepoznavnost tarč na podobah, kot so osvetljenost, orientacija, velikost ipd. Na osnovi lastnih izkušenj in pregledanih praks v tujini smo predlagali nabor oblik in velikosti tarč, ki bi bile najbolj primerne za uporabo UAV fotogrametrije v zemljiškem katastru (Slika 5):

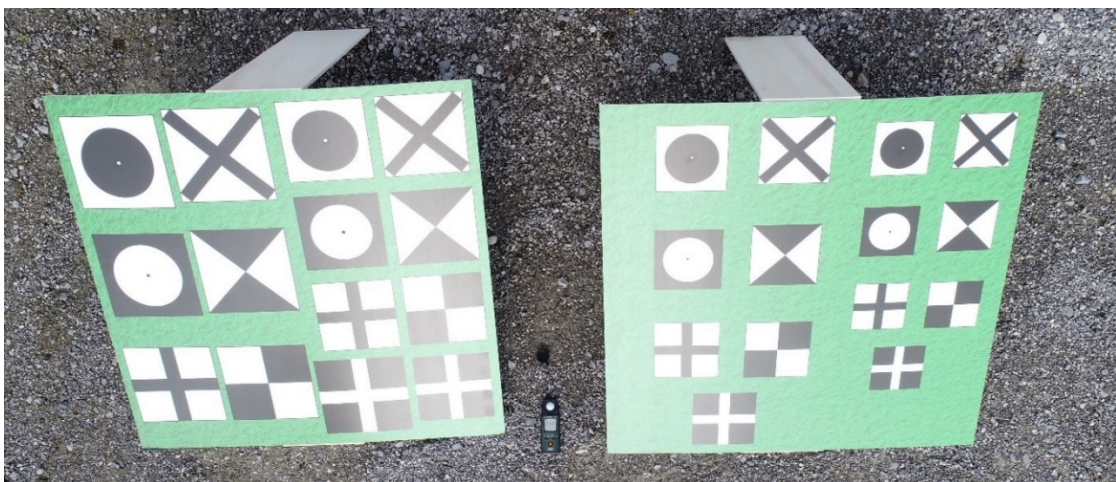
- trije velikostni razredi: 21 cm, 18 cm in 12 cm;
- sedem oblik tarč: a, b, c, d, e, f in g (slika 3).



Slika 5: Izbrane oblike in velikosti tarč, ki smo jih testirali z vidika vidnosti oziroma razpoznavnosti na podobah.

Vidnost izbranih tarč smo testirali tako, da smo jih natisnili na kompaktni plošči (Slika 6) in na ta način omogočili tudi testiranje vidnosti tarč pri snemanju pod različnim kotom. Snemanje smo izvedli v 11. 2. 2020 na območju ljubljanskega avtosejma. Fotografiranje tarč s kamero na daljinsko vodenem letalniku smo izvedli:

- za različne višine letalnika nad površjem: 20 do 80 m (korak 10 m);
- za različne naklone tarč: 15°, 30° in 45°;
- v različnih svetlobnih pogojih, kjer smo osvetljenost merili s svetlometerom.

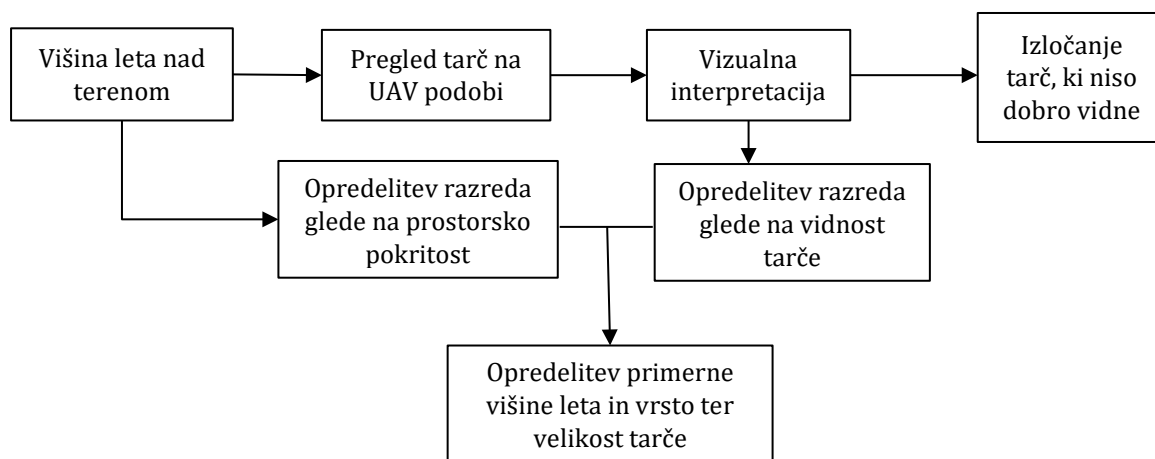


Slika 6: Primer postavitve testnih tarč na avtosejmu pod kotom 30° - v sredi svetlometer.

Pri tem smo uporabili letalnik in kamero, ki sta predvidena tudi v nadaljevanju študije:

- Letalnik: DJI Phantom 4 Pro
- Kamero: 20 MPix, maksimalne ločljivost 5472 x 3648, velikost senzorja 13,2 x 8,8 mm, $f = 8,8$ mm.

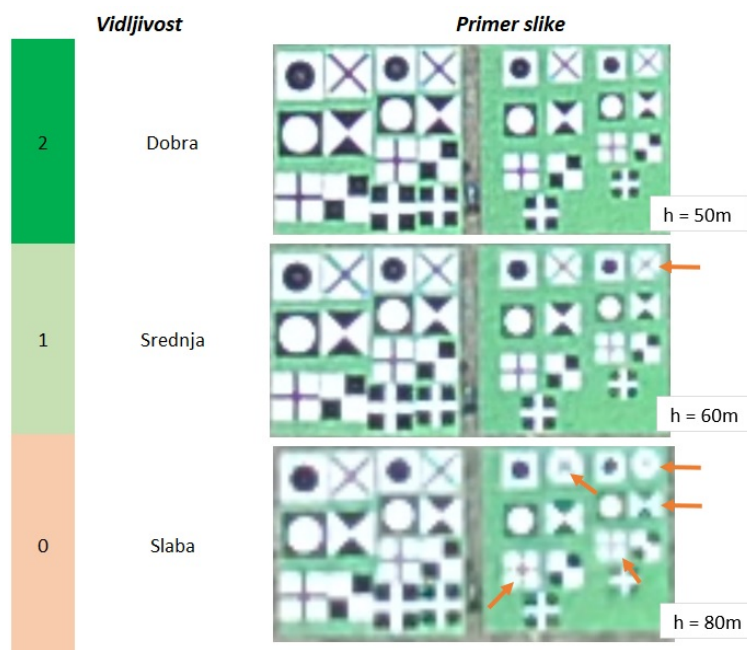
Za določitev najbolj primernih tarč za označevanje mejnikov oziroma položajev lomnih točk parcelne meje smo za posamezno višino leta na terenu za vse tarče vizualno opredelili vidnost tarče. Pri odločitvi, katere tarče bomo uporabili na testnem polju, smo posebno pozornost namenili tudi prostorski pokritosti, to je višini leta. Postopek analitičnega dela v tej fazi je predstavljen z diagramom poteka (Slika 7).



Slika 7: Postopek ocenjevanja primernosti izbranih tarč za uporabo UAV fotogrametrije v katastru.

Stopnjo vidljivosti smo opredelili s tremi razredi (Slika 8), in sicer z:

- *dobra vidljivost,*
- *srednja vidljivost in*
- *slaba vidljivost.*



Slika 8: Interpretacija kakovosti prepoznavnosti tarč glede na razpoznavnost oblike in središča tarče.

V razred z opisom *dobra vidljivost* smo uvrstili tarče, ki so popolnoma in jasno vidne na podobi in kjer je tudi vizualno mogoče razbrati središče tarče. Te tarče so v analitičnem delu dobile vrednost 2. V razred z opisom *srednja vidljivost* smo uvrstili tarče, katerih oblika je na podobi nekoliko deformirana, še vedno pa je mogoče določiti središče tarče. Te tarče so v analitičnem delu dobile vrednost 1. V razred z opisom *slaba vidljivost*, smo uvrstili tarče, katerih oblika se je močno popačila, prav tako je z vizualno interpretacijo težko določiti središče tarče. Takim tarčam smo pripisali vrednost 0 (glej tudi sliko 8).

Stopnjo prostorske pokritosti smo prav tako opredelili s tremi razredi, to so:

- visoka (višine leta 70 m in 80 m nad terenom);
- srednje (višine leta 50 m in 60 m nad terenom);
- nizke (višine leta 20 m, 30 m in 40 m nad terenom).

Za posamezne lete in skupine tarč smo pripravili oceno vidnosti in prostorske pokritosti (Slika 9) – glej tudi *Prilogo A*. Za posamezne velikostne razrede tarč smo nadalje za posamezne lete in skupine letov (glede na naklon tarč in osvetljenost tarč) izračunali vsoto vseh zbranih točk glede na ocenjeno razpoznavnost (vidnost) tarč – višja je prepoznavnost tarče, višje so pripisane relativne točke. Dodatno smo izračunali delež pravilnosti (angl. *correctness*), ki je bil izračunan glede na največjo možno doseženo vsoto točk.

Let	Naklon	Višina [m] Pokritost [barva]	Svetlometer	Tarče 21 cm	Tarče 18 cm	Tarče 15 cm	Tarče 12 cm
1	0	80	1962	2	2	0	0
1	0	70	1962	2	2	1	0
1	0	60	1962	2	2	2	1
1	0	50	1962	2	2	2	2
1	0	40	1962	2	2	2	2
1	0	30	1962	2	2	2	2
1	0	20	1962	2	2	2	2
2	15	80	1967	2	1	0	0
2	15	70	1967	2	2	0	0
2	15	60	1967	2	2	1	0
2	15	50	1967	2	2	2	1
2	15	20	1967	2	2	2	2
3	30	80	2793	0	0	0	0
3	30	70	2793	0	0	0	0
3	30	60	2793	1	1	0	0
3	30	50	2793	1	1	0	0
3	30	40	2793	1	1	0	0
3	30	30	2793	2	2	1	1
3	30	20	2793	2	2	2	2
4	45	80	4371	0	0	0	0
4	45	70	4371	0	0	0	0
4	45	60	4371	0	0	0	0
4	45	50	4371	0	1	0	0

Slika 9: Priprava podatkov za oceno vidnosti in prepoznavnosti tarč – primer prvih treh letov.

Na splošno smo potrdili domnevo, da so bolj vidne večje tarče, ne glede na višino leta. Glede na to, da je pri uporabi UAV fotogrametrije v katastru zelo pomembno tudi ekonomičnost, smo upoštevali tudi slednje, in sicer z negativnim popravkom glede velikosti tarče: -10 % za tarče velikosti 21 cm x 21 cm, -5 % za tarče velikosti 18 cm x 18 cm ter -2,5 % za tarče velikosti 15 cm x 15 cm. Na ta način smo želeli prednost dati manjšim tarčam, če so zbrane točke med sosednjima velikostnima razredoma tarč primerljive.

Skupno je bilo izvedenih 12 serij snemanj, kjer smo upoštevali naklon in osvetlitev tarč. V vseh serijah smo pridobili slike za vse izbrane višine leta nad terenom (od 20 m do 80 m, korak 10 m), z izjemo druge serije, kjer nimamo podatkov za višini 30 m in 40 m. Za vse izvedene serije in višine leta so rezultati primernosti tarče predstavljeni na sliki 10.

		Tarče 21 cm	Tarče 18 cm	Tarče 15 cm	Tarče 12 cm		
SKUPNO točk		✓ 124	✓ 126	✗ 90	✗ 75	od	164
pravilnost [%]		75.6%	76.8%	54.9%	45.7%		100.0%
negativni porpavek [%]		-10.0%	-5%	-2.5%	0%		
SKUPNO točk (upoštevana velikost tarče)		! 111.6	✓ 119.7	✗ 87.75	✗ 75		

Slika 10: Rezultati analize primernosti tarč za štiri velikostne razrede tarč – upoštevajoč rezultate vseh 12 izvedenih letov.

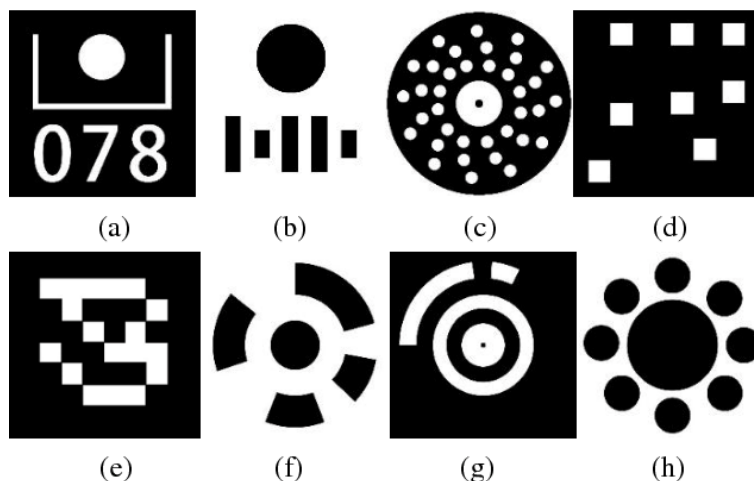
Kot je razvidno že s *Priloge A*, smo beležili tudi osvetljenost tarč. Prve štiri serije so se izvedle v pretežno oblačnem vremenu, občasno so se prikazali sončni žarki. Posebej zanimiva je četrta serija, kjer smo beležili veliko razliko v osvetljenosti na začetku in koncu snemanja. Od pete serije dalje je bilo pretežno jasno. Zadnja, dvanajsta serija je simulacija sence za kakšnim objektom, v tem primeru je to bil priklopnik. Pri tej seriji so trije odčitki svetlomera – dva v senci in eden na soncu. Kljub veliki razliki v osvetljenosti so tarče lepo vidne tudi z višine 80 m, čeprav je velika večina fotografije osončena. Pri tem letalniku in kameri smo sicer že večkrat ugotovili, da je v primeru večjih kontrastov slika večkrat preveč osvetljena, zato so včasih svetli deli presvetljeni. Serija osem je nadalje pokazala, da so lahko tarče zaradi odboja sončnih žarkov tudi popolnoma nevidne. Odboj sončnih žarkov v osni seriji je tudi vplival na skupne rezultate, prikazane na sliki 8, kjer se največje tarče niso izkazale za najboljše, ker so bile preveč osvetljene. Nasploh se je izkazalo, da v močni svetlobi tarče, kjer prevladuje bela barva (*b, e, f*), niso primerne.

Za področje letalskega snemanja so na trgu že tarče, ki omogočajo samodejno prepoznavanje na temelju različnih vzorcev – take tarče med drugimi ponuja britansko podjetje *SouthSurvey* (Slika 11).



Slika 11: Tarče za samodejno prepoznavanje točk Vir: <https://www.surveyorsequipment.co.uk>.

V praksi so se sicer uveljavile tudi napredne oblike tarč, ki pa jih v tej fazi nismo vključili v raziskave. Tako imenovane kodne fotogrametrične tarče za samodejno prepoznavanje na fotogrametričnih slikah so sicer poznane že iz klasične fotogrametrije, kot so predstavljene tudi v članku Guo et al. (2016), vendar bolj na področju bližjeslikovne fotogrametrije (Slika 12).



Slika 12: Kodne fotogrametrične tarče različnih avtorjev: (a) Caesar, 2005; (b) Wong, 1988; (c) Ahn, 2001; (d) Fraser, 1997; (e) Fiala, 2010; (f) Schneider, 1993; (g) van den Heuvel, 1993; (h) Ma, 2006 (Vir: Guo et al., 2016).

Posebna skupina fotogrametričnih tarč je namenjena kalibraciji sistema oziroma fotoaparata. Take tarče, testiranje katerih je vredno razmisleka pri nadaljnjem delu, ponuja podjetje Mapir, Inc. (Slika 13).



Slika 13: Posebne tarče za kalibracijo kamere podjetja Mapir (Vir: <https://www.mapir.camera/>).

2.3.2 Izbor oziroma določitev tipov tarč za nadaljnje testiranje

Na podlagi priporočil, predstavljenih v domači in tuji literaturi, ter rezultatov testiranja vidnosti oziroma prepoznavnosti različnih tarč, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, smo omejili nabor tarč. Te smo nato izdelali in jih vključili v nadaljnje testiranje na testnih poljih v okviru nalog delovnega sklopa 2 (DS2). Poleg obravnavanih oblik in velikosti tarč, predstavljenih v prejšnjem poglavju, smo se posebej osredotočili na označevanje katastrskih točk v naravi v Sloveniji, saj je eden izmed ciljev projekta tudi preučiti možnosti določitve položajev mejnikov na podobah, pridobljenih s kamero na daljinsko vodenem letalniku. V ta namen smo preučili trg v Sloveniji in se osredotočili na ponudbe podjetij:

- KZP kovinoplastika Ivan Zupanc s. p., Kranj (Slika 14),
- Master d. o. o. Idrija (Slika 15).



Slika 14: Ponudbe označevalcev parcelne meje podjetja KZP kovinoplastika Ivan Zupanc s. p. – kape s sidri.



Slika 15: Ponudbe označevalcev parcelne meje podjetja Master d. o. o. Idrija – kape s sidri.

Podobno smo preučili tudi ponudbe tarč za fotogrametrijo in jih vključili v nadaljnje obravnavo pri vzpostavljanju testnega polja.

Rezultati predstavljenih analiz in uveljavljene prakse označevanja poteka parcelne meje v naravi v Sloveniji so bili v pomoč pri opredeljevanju tarč za testno polje. Odločili smo se za naslednje skupine tarč, ki smo jih razporedili v več polj na testnem območju Kandrše:

- Fotogrametrične tarče (Slika 5);
- Maske fotogrametričnih tarč za označitev točk na asfaltni ali betonski podlagi;
- Uveljavljena katastrska mejna znamenja (Slika 12 in Slika 13).

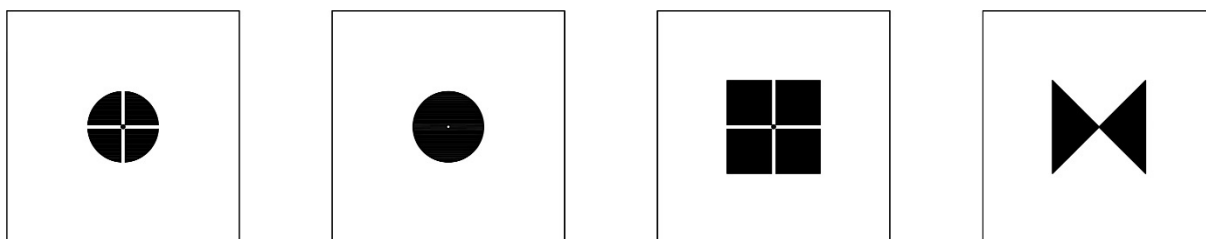
32

Pri velikosti in obliki fotogrametričnih tarč (kot tudi mask za nanos tarč z razpršilom na trde površine) smo upoštevali priporočila:

- da so primerljive s standardno velikostjo mejnih znamenj v katastru 10 cm x 10 cm;
- da je treba uporabiti za oslonilne točke večje tarče, saj je od kakovosti določitve položajev oslonilnih točk odvisna kakovost rezultatov nadaljnje obdelave podatkov;
- da tarče ne smejo imeti prevelikega območja belega polja (nevarnost preosvetljenosti);
- da oblika (vzorec) tarče omogoča kakovostno določitev središča tarče na UAV fotografiji.

Tako smo za prvo delovišče s testnimi polji za različne tarče (Kandrše) izbrali štiri oblike tarč (Slika 16):

- a) črn krog na beli podlagi z belim križem,
- b) črn krog na beli podlagi,
- c) bel križ na črni podlagi in
- d) diagonalna črno-bela polja.



Slika 16: Izbrane oblike tarč za nadaljnje testiranje.

Za vse izbrane oblike tarč smo v nadaljnje analize vključili tarče različnih velikosti, začenši z 10 cm x 10 cm, 15 cm x 15 cm in 20 cm x 20 cm. Primer razporeditve tarč v testnem polju na študijskem območju Kandrše je prikazan na sliki 17.



Slika 17: Izbrane oblike tarč za nadaljnje testiranje – izsek iz testnega polja Kandrše.

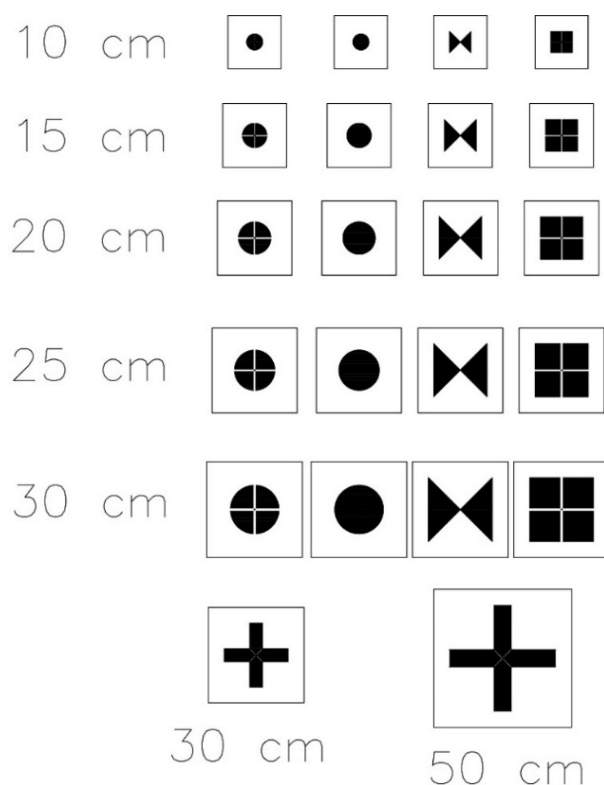
Za namene analize kakovosti prepoznavanja tarč na fotogrametričnih podobah, zajetih z daljinsko vodenimi letalniki, smo v testna polja Kandrše vključili še (Slika 18):

- industrijsko izdelana že predstavljena mejna znamenja, ki se v katastru uporabljajo v Sloveniji in sosednjih državah, ter
- industrijsko izdelane fotogrametrične tarče za oslonilne točke, ki jih ponujajo slovenska podjetja za namene UAV fotogrametrije.



Slika 18: Eno izmed testnih polj na delovišču Kandrše.

Posebno pozornost smo namenili označevanju točk detajla na betonskih oziroma asfaltnih podlagah. V ta namen smo za izbrane oblike in velikosti tarč izdelali maske, ki so služile za nanos barve (razpršila) na take površine (Slika 19). Poleg že omenjenih velikosti tarč smo za izdelavo mask za nanos barve na asfaltno in betonske površine dodali tarče velikosti 25 cm x 25 cm in 30 cm x 30 cm. Posebej smo testirali tudi označevanje oslonilnih točk na takih površinah z maskama velikosti 30 cm x 30 cm in 50 cm x 50 cm z v fotogrametriji uveljavljenim vzorcem.



Slika 19: Maske za vzpostavitev »tarč« na betonskih oziroma asfaltnih podlagah z nanosom barv ne negative.

Pri nanosu tarč na asfaltne in betonske podlage smo izbrali dve barvi, to sta rdeča in bela, z namenom preučiti tudi vpliv uporabljene barve na prepoznavanje tarč na fotogrametričnih podobah (Slika 20).



Slika 20: Testno polje na delovišču Kandrše – oznaka točk detajla na asfaltni podlagi.

Pri izboru tarč za nova delovišča smo izhajali iz rezultatov analiz kakovosti prepoznavanja in določevanja položajev tarč na testnih poljih v Kandršah, kot je predstavljeno v naslednjem poglavju.

3 Testiranje kakovosti različnih načinov označitve oslonilnih točk in mejnikov za samodejno razpoznavanje in slikovno merjenje na oblaku točk in na ortofotu

Glavni cilj delovnega svežnja DS2 (*Testiranje kakovosti različnih načinov označitve oslonilnih točk in mejnikov za samodejno razpoznavanje in slikovno merjenje na oblaku točk in na ortofotu*) je bil izbrati primerna študijska območja ter za ta študijska območja izvesti analitično študijo fotogrametričnega zajema in obdelave prostorskih podatkov (koordinat simuliranih mejnikov), skupaj z oceno kakovosti določevanja položaje oslonilnih točk in mejnikov. Delovni sveženj vključuje štiri vsebinske naloge, ki so:

- Naloga 2.1: Izbor študijskih območij,
- Naloga 2.2: Opredelitev parametrov izvedbe zajema podatkov z letalnikom,
- Naloga 2.3: Izvedba zajema podatkov z letalnikom,
- Naloga 2.4: Obdelava podatkov.

V tem poglavju predstavljamo način izbora študijskih območij, poglavju pa sledijo samostojna poglavja, ker so za vsako od študijskih območij predstavljeni tako parametri leta kot izvedba zajema z letalnikom in obdelava podatkov.

3.1 Izbor študijskih območij

Pri izboru študijskih območij smo upoštevali usmeritve, da se lahko preučujejo različne dejavnike, ki lahko vplivajo na kakovost in učinkovitost uporabe UAV fotogrametrije v katastru. Med drugim izpostavljamo:

- različno konfiguracijo terena in zemljišč (naklon, reliefna razgibanost, oblike zemljišč oziroma parcel);
- različne oznake poteka parcelnih mej v naravi (industrijsko izdelani mejniki, grajeni objekti, naravne meje);
- različna raba zemljišč (kmetijska zemljišča, ceste oziroma poti, peri-urbana območja, pozidana območja);
- možnost dodatnega označevanja s tarčami ali barvnimi maskami, kjer smo predhodno preverili tudi pri lastnikih oziroma obvestili lokalno skupnost o terenskem delu v okviru projekta.

Študijska območja glede na dejansko rabo zemljišč smo zbrali zaradi več razlogov. Podeželska območja s prevladujočo kmetijsko rabo so namreč območja, ki poleg gozdov, kjer je uporaba metod daljinskega zaznavanja za namene izmere katastrskih mejnikov zelo omejena, prevladujejo v slovenskem prostoru. Nadalje velja poudariti, da so v Sloveniji predvsem podeželska območja s pretežno kmetijsko rabo in manjšimi območji pozidanih zemljišč (naselja ter zemljišča infrastrukturnih objektov) območja, kjer prevladujejo več kot sto let stari katastrski podatki. Tako imenovani podatki grafične izmere iz 19. stoletja so zelo omejene kakovosti. Na teh območjih izmera katastrskih mejnikov ni zanimiva le z vidika urejanja parcelnih mej (nove izmere), ampak tudi z vidika katastrskega preurejanja (zložbe, komasacije) in celo nastavitve katastra. To so torej območja, kjer množični zajem katastrskih podatkov kaže velik potencial tako pri katastrskem urejanju kot pri katastrskem preurejanju zemljišč. Slednje velja tudi za pri-urbana območja.

Kljub temu da smo v študijska območja vključili tudi pozidana zemljišča, smo se vendarle pri analitičnem in sinteznem delu osredotočili predvsem na nepozidana zemljišča. Podatke, zajete v okviru projektne naloge, smo sicer uporabili tudi za 3D-modeliranje stavb (glej tudi Drešček, 2021; Drešček et al., 2021), toda tematika presega namene tega projekta.

Pri izboru študijskih območij in načrtovanju zajema prostorskih podatkov z daljinsko vodenimi letalniki smo nadalje upoštevali takrat veljavno *Uredbo o sistemih brezpilotnih zrakoplovov (2016)*, pa tudi spremembe, ki so rezultat evropskih uredb:

- *Izvedbena Uredba Komisije (EU) 2019/947 z dne 24. maja 2019 o pravilih in postopkih za upravljanje brezpilotnih zrakoplovov* (Izvedbena Uredba Komisije (EU) 2019/947) in
- *Delegirana Uredba Komisije (EU) 2019/945 z dne 12. marca 2019 o sistemih brezpilotnega zrakoplova in operatorjih sistemov brezpilotnega zrakoplova iz tretjih držav* (Delegirana Uredba Komisije (EU) 2019/945).

3.1.1 Študijsko območje Kandrše – testna polja

Za prvo študijsko območje smo izbrali delovišče *Kandrše* v k. o. Kandrše (1881) v osrednji Sloveniji, kjer smo se v dogovoru z lastnikom zemljišč dogovorili o postavitvi testnih polj za daljše obdobje (Slika 21). Snemanje testnih polj z izborom tarč smo izvedli pri več zunanjih pogojih, povezanih z letnim časom in višino vegetacije, osvetlitvijo ter drugimi zunanjimi razmerami.



Slika 21: Študijsko območje Kandrše (k.o. Kandrše – 1881).

3.1.2 Študijsko območje Budanje – območje nove izmere

Za nadaljnjo študijo izvedljivosti UAV fotogrametričnega zajema podatkov za namene vzpostavitve ali posodobitve podatkov zemljiškega katastra, smo se odločili, da izberemo območje, na katerem je bila v preteklih letih izvedena komasacije ali nova izmera. Glavni razlog je v predvidevanju, da je na teh območjih materializiranih veliko lomnih točk, ki določajo potek parcelnih mej v naravi. Na ta način lahko na stvarnih primerih preverimo, ali so v praksi uveljavljena mejna znamenja vidna in prepoznana na fotografijah pri fotogrametrični obdelavi UAV podatkov in pri ročnem ali (pol)samodejnem zajemu podatkov o položaju teh mejnikov.

Po podatkih Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano je bilo v preteklih petih letih uvedenih več upravnih komasacij po Zakonu o kmetijskih zemljiščih, in sicer (MKGP, 2020):

- *Komasacija Videm 3* v občini Videm, leta 2016, na površini 273 ha;
- *Komasacija Gančani* v občini Beltinci, leta 2016, na površini 692 ha;
- *Komasacija Odranci* v občini Odranci, leta 2016, na površini 567 ha;
- *Komasacija Hajdina 2* v občini Hajdina, leta 2016, na površini 110 ha;
- *Komasacija Hajdina 3* v občini Hajdina, leta 2016, na površini 127 ha;
- *Komasacija Gubno* v občini Kozje, leta 2016, na površini 127 ha;
- *Komasacija Nasovče-Kaplja vas* v občini Komenda, leta 2016, na površini 115 ha;
- *Komasacija Gatina* v občini Grosuplje, leta 2016, na površini 122 ha;
- *Komasacija Sodinsko polje* v občini Ormož, leta 2016, na površini 190 ha;
- *Komasacija Seneško polje* v občini Ormož, leta 2016, na površini 99 ha;
- *Komasacija Drnovo* v občini Kamnik, leta 2016, na površini 310 ha;
- *Komasacija Veliki Podlog* v občini Krško, leta 2017, na površini 138 ha;
- *Komasacija Starše* v občini Starše, leta 2017, na površini 156 ha;
- *Komasacija Hajdina 4* v občini Hajdina, leta 2017, na površini 117 ha.

37

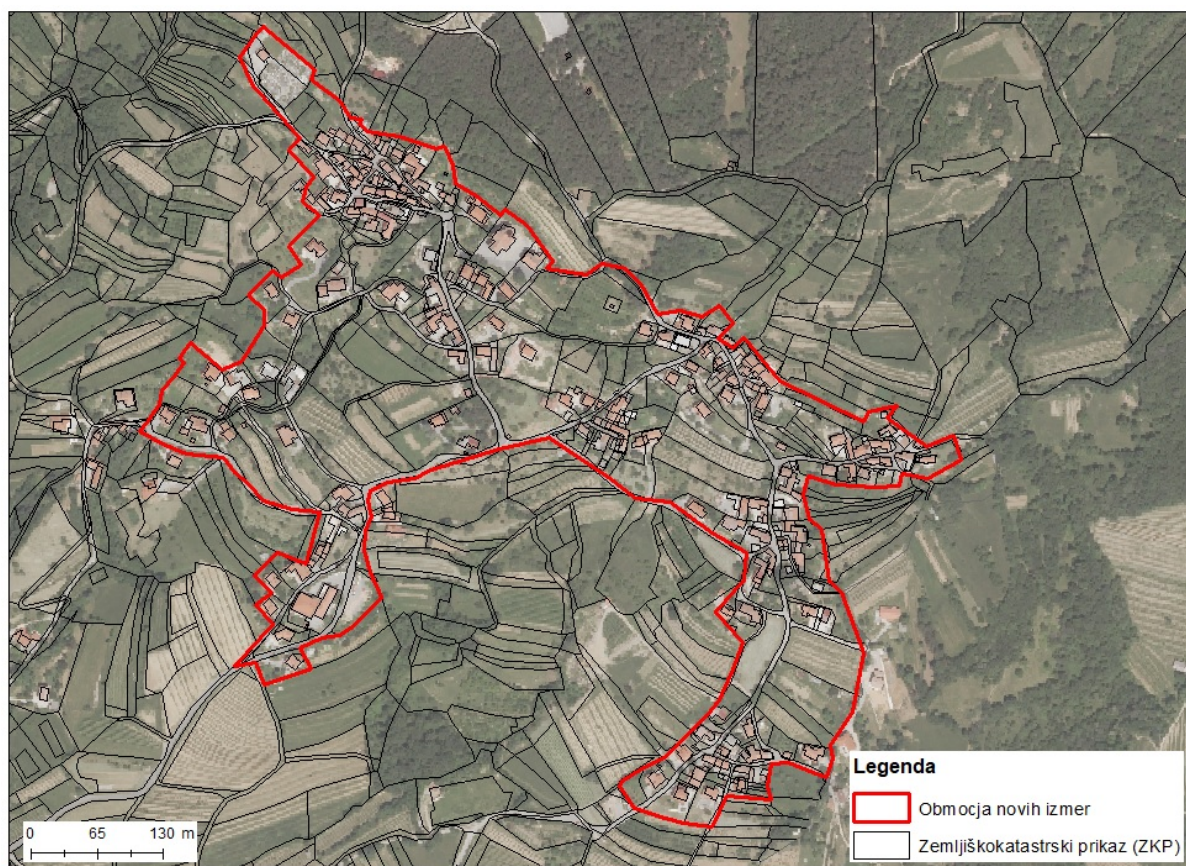
Ker so območja komasacij po zakonodaji, ki ureja komasacije kmetijskih zemljišč, izredno velika, in sicer praviloma več kot sto hektarjev, smo se pri izboru območij za študijo osredotočili na območja novih izmer. Velikostno bi bile sicer zanimive komasacije stavbnih zemljišč, za katere imamo v Sloveniji iz preteklih pet let nekaj primerov, toda na območjih naselij so velike omejitve za uporabo daljinsko vodenih letalnikov.

Po podatkih Geodetske uprave RS so se v preteklih petih letih izvajale nove izmere, ponekod tudi v povezavi z nastavitvijo katastra, na naslednjih deloviščih:

- *Nova izmera Modrič*, k. o. Kot (725), leta 2016, na površini 31 ha (213 zemljiških parcel, 55 stavb, 50 lastnikov);
- *Nova izmera naselja Saksid*, k. o. Dornberk (2335), leta 2017;
- *Nova izmera naselja Dragovica*, k. o. Bate (2294), leta 2017, na površini 2,6 ha;
- *Nova izmera naselja Avče*, k. o. Avče (2263), leta 2017, na površini 7,7 ha;
- ***Nova izmera Budanje***, k. o. Budanje (2379), leta 2018, na površini 21 ha (382 zemljiških parcel, 240 stavb, 220 lastnikov);
- *Nova izmera naselja Rečica ob Savinji*, k. o. Rečica ob Savinji (921);
- *Nova izmera naselja Petrovče*, k. o. Petrovče (1001).

V letih 2019 in 2020 so se in se še izvajajo nove izmere dela naselja Podkraj v k. o. Budanje (2375) ter območij delov več naselij (Preserje, Pedrovo, Cvetroč) v k. o. Branik (2336).

Med novimi izmerami se večina pretežno nanaša na območja naselij z izjemo nove izmere Modrič, k. o. Kot, in nove izmere Budanje, k. o. Budanje. Območje nove izmere Budanje je bilo, izbrano za naše drugo delovišče (Slika 22), kjer smo se omejili na zahodni del območja nove izmere.



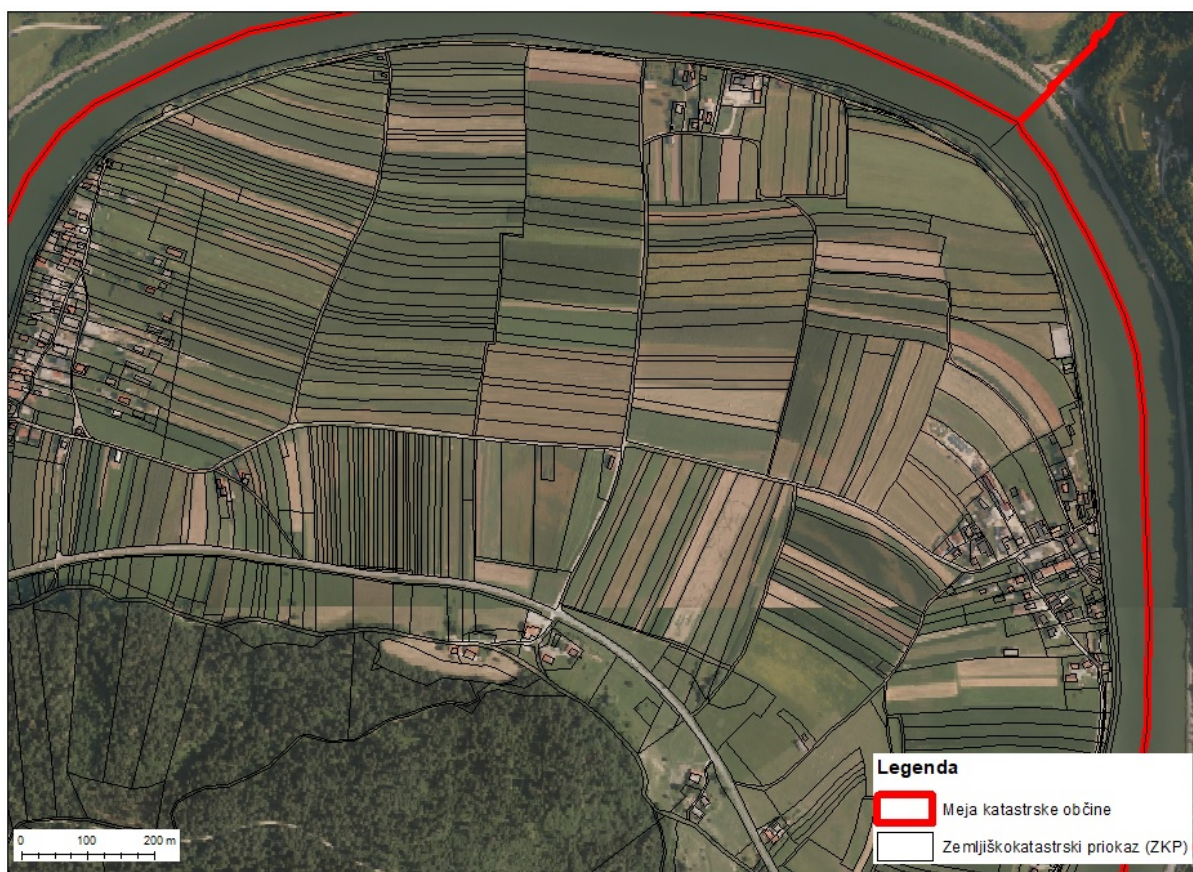
Slika 22: Študijsko območje Budanje – območje nove izmere (k. o. Budanje).

Kljub temu da je bila nova izmera izvedena v letu 2018, je bilo na terenu zelo težko najti mejna znamenja. Dodatno smo ugotovili, da je teren na določenih območjih zelo plazovit in pri primerjavi koordinat mejnikov, ki so evidentirane v zemljiškem katastru, in koordinat mejnikov, ki smo jih določili na osnovi terenske izmere, je prišlo do večjih odstopanj od predpisane položajne točnosti določevanja koordinat zemljiškokatastrskim točkam.

Na tem delovišču smo se tako v osnovi osredotočili predvsem na preučevanje izbranih parametrov snemanja na položajno točnost georeferenciranega fotogrametričnega bloka, za preučevanje položajne točnosti koordinat mejnikov pa smo dodatno postavili tarče na terenu.

3.1.3 Študijsko območje Kompolje

Tretje delovišče je bilo *Kompolje* v k. o. Kompolje (1382), ki je izrazito ravninsko območje z zanimivo parcelno strukturo in bližino vodnih površin (Slika 23). Študijsko območje je bilo namenjeno predvsem preučevanju vpliva izbranih parametrov leta na položajno točnost fotogrametričnega oblaka točk, vključno z višino leta. Dodatno smo na tem delovišču obravnavali možnosti zajema podatkov o dolžinskem objektu, to je o cesti.



Vir podatkov: Državni ortofoto in katastrski podatki: Geodetska uprava RS (2019)

Slika 23: Študijsko območje Kampilje.

3.2 Kratek uvod v UAV fotogrametrični zajem podatkov na študijskih območjih

Primernost izbranih načinov označitve oslonilnih točk in katastrskih mejnikov za prepoznavanje tarč in slikovno merjenje smo tako preučevali na treh študijskih območjih:

- *Študijsko območje Kandrše*, k. o. Kandrše (1881): testno območje, ki poleg kmetijske dejanske rabe vključuje pozidana stavbna zemljišča podeželskih naselij; poudarek je bil na podrobnejši analizi položajne kakovosti fotogrametrično določenih koordinat detajlnih točk v testnih poljih, kjer smo uporabljali različne tarče (Slika 21);
- *Študijsko območje Budanje*, k. o. Budanje (2379): testno območje, ki je bilo izbrano predvsem zaradi nedavno izvedene nove izmere, zanimivo pa je tudi z vidika razgibanosti terena in raznolike dejanske rabe; na tem delovišču smo med drugim preučevali vpliv višine leta daljinsko vodenega letalnika na položajno točnost oblaka točk in koordinat detajlnih točk (Slika 22).
- *Študijsko območje Kampilje*, k. o. Kampilje (1382): testno območje s pretežno kmetijsko dejansko rabo in dolžinskimi objekti (cesto); na tem delovišču smo prav tako preučevali vpliv višine leta daljinsko vodenega letalnika na položajno točnost oblaka točk in koordinat detajlnih točk (Slika 23).

Za vsako posamezno izbrano delovišče smo morali najprej podrobneje opredeliti območje snemanja in vzpostaviti geodetsko mrežo. Predhodno smo preverili pogoje leta in glede na posebnosti območja snemanja tudi določili parametre leta. Fazi načrtovanja je sledila izvedba

izmere na terenu, ki vključuje fotogrametrično snemanje oziroma aerofotografiranje terena in zajem dodatnih podatkov oziroma parametrov, pomembni za nadaljnjo obdelavo.

Terenskemu delu je sledila obdelava zajetih podatkov, ki je sestavljena iz več korakov. Pred glavnim postopkom obdelave je bila izvedena predobdelava zajetih podatkov. Sledila je izvedba postopka grajenja strukture iz gibanja (SfM), v katerem se s samodejnim postopkom iskanja ujemajočih se točk med fotografijami hkrati določi 3D geometrijo zajetega območja, parametre notranje orientacije in približne parametre zunanje orientacije fotografij v izbranem koordinatnem sistemu. Rezultat tega koraka obdelave je redek oblak točk. Sledila je izmera slikovnih koordinat oslonilnih in kontrolnih točk na fotografijah. Začetne vrednosti parametrov notranje in zunanje orientacije, slikovne koordinate oslonilnih točk ter slikovne koordinate homolognih točk, iz katerih je bil izračunan prvoten redek oblak točk, so vhodni podatek v izravnavo bloka posnetkov. Z izravnavo bloka posnetkov pridobimo redek georeferenciran fotogrametrični oblak točk in končne parametre orientacije fotografij. Redek fotogrametrični oblak točk je bil georeferenciran v referenčnem geodetskem koordinatnem sistemu D96-17/TM, v katerem je bila izračunana tudi zunanja orientacija fotografij. Orientirane fotografije predstavljajo vhodni podatek za gosto slikovno ujemanje (angl. *dense image matching*, DIM; tudi angl. *multi-view stereo*, MVS), v katerem se izdelata gost georeferenciran fotogrametrični oblak točk.

Gost oblak točk je osnovni izdelek postopka SfM-MVS, ki smo ga nadalje uporabili za fotogrametrične izdelke, ki so služili za zajem koordinat detajlnih točk, ki so bile označene z tarčami ali industrijskimi izdelanimi oznakami za mejnike in geodetske točke. V okviru naloge smo tako primerjali koordinate detajlnih točk, ki so bile zajete na temelju (i) fotogrametričnega zajema na podlagi več prekrivajočih se georeferenciranih fotografij, (ii) izdelanega ortofota in (iii) georeferenciranega 3D oblaka točk. Tako določene položaje detajlnih točk (tarč) smo primerjali s položaji, določenimi na podlagi neodvisnih opazovanj s tahimetrično izmero.

4 Rezultati: Študijsko območje Kandrše

Za prvo delovišče smo izbrali Kandrše, kjer smo za namene testiranja vidnosti in prepoznavnosti tarč pri fotogrametrični obdelavi UAV fotografij vzpostavili testna polja z izbranimi tarčami. Gre za študijsko območje zasebnega lastnika, ki je dovolil, da se vzpostavi testna polja. Testna polja so bila vzpostavljena v februarju 2020 in odstranjena po zadnji izvedbi zajema podatkov z letalnikom avgusta 2020.

4.1 Študijsko območje Kandrše: načrt izvedbe in vzpostavitev geodetske mreže

Najprej smo za namen projekta vzpostavili geodetsko mrežo na podlagi statične izmere GNSS, ki smo jo izvedli 4. 3. 2020. Koordinate točk (Preglednica 5) smo izračunali s programsko rešitvijo *Leica Infinity 2.3.2*, kjer smo določili v državnem koordinatnem sistemu D96-17/TM (Slika 24). Za izmero GNSS smo uporabili sprejemnike *Leica GS15* in *Leica GS18*, kjer smo izvajali za vsako točko opazovanja približno 240 min. Na ta način smo zagotovili natančnost opazovanj 1 mm v položajnem in 3 mm v višinskem smislu.



Slika 24: Geodetska mreža na delovišču Kandrše (podlaga Google Zemlja).

Preglednica 5: Koordinate točk geodetske mreže Kandrše (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).

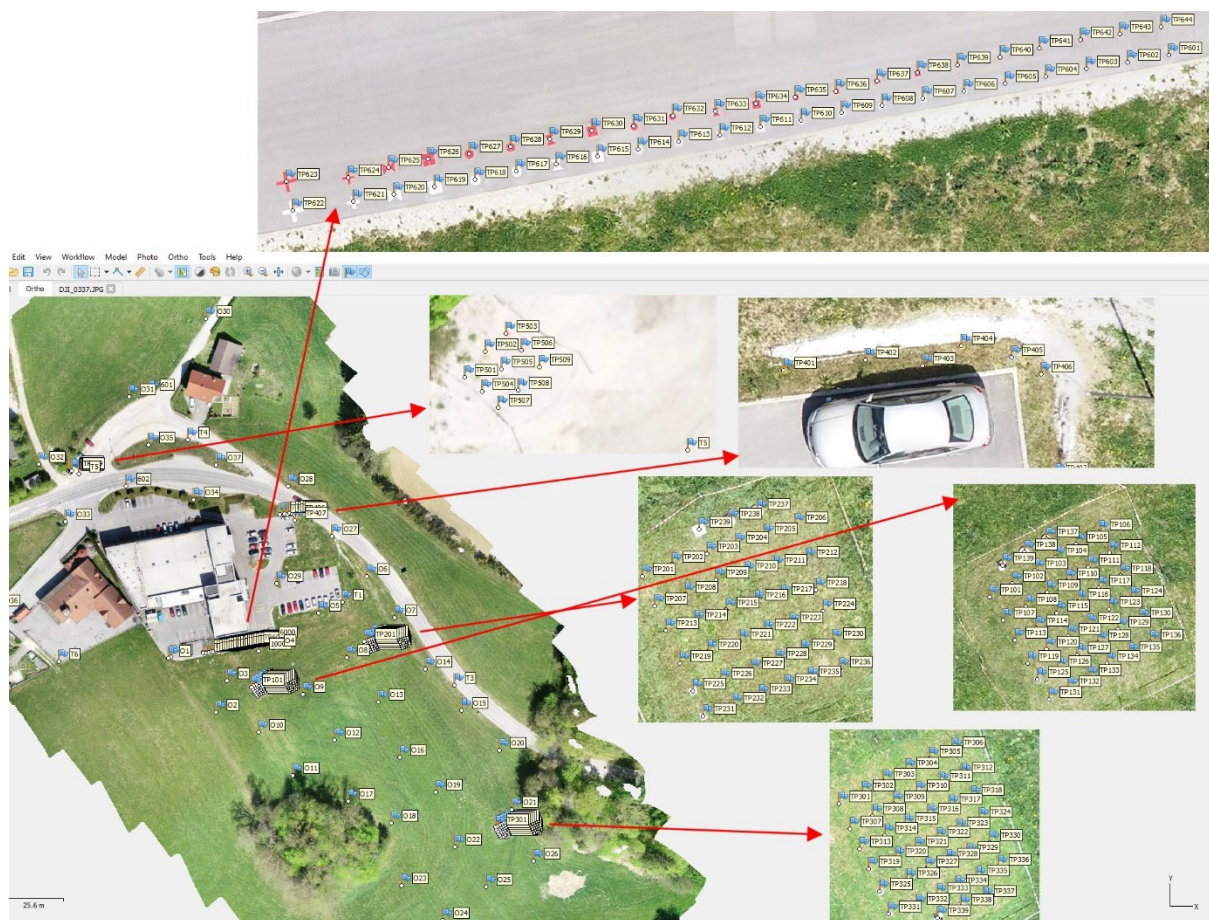
Točka	e [m]	n [m]	h [m]	H [m]
T1	487.696,8640	110.312,3384	514,0048	467,2638
T2	487.622,8018	110.288,6751	519,7492	473,0091
T3	487.745,4568	110.276,3575	511,7675	465,0272
T4	487.630,0766	110.382,6182	521,0967	474,3543
T5	487.582,7322	110.367,7321	519,4914	472,7495
T6	487.574,2908	110.286,7592	522,1165	475,3765

Na delovišču smo z namenom simulacije različne razporeditve in gostote oslonilnih točk pri obdelavi podatkov vzpostavili gosto mrežo oslonilnih točk (Slika 25). Za UAV snemanje smo tako s tahimetrično izmero določili še koordinate oslonilnih točk in vzpostavili testna polja. Koordinate oslonilnih in detajlnih točk smo ob vsaki snemalni misiji določili znova (možnosti premika tarč). Tahimetrično izmero smo izvajali s tahimetrom *Leica MultiStation MS50*. Ocena natančnosti koordinat točk tahimetrične izmere izhaja iz natančnosti koordinat izmere GNSS in natančnosti tahimetra in je ocenjena na 2 mm po posamezni koordinatni osi.



Slika 25: Mreža oslonilnih točk (vijolično) in testna polja (zeleno – dva odtenka, modro, rumeno) na delovišču Kandrše.

Na delovišču smo, da bi preverili vidnost in prepoznavnost različnih oznak točk detajla pri fotogrametrični obdelavi podatkov UAV, vzpostavili pet testnih polj, kamor smo razporedili izbrane vzorce tarč (Slika 26).



Slika 26: Testna polja s tarčami na delovišču Kandrše.

Pri tem smo posebej obravnavali (Slika 26):

- Tarče na travnati površini na ravnem terenu (testno polje 1 – TP1);
- Tarče na travnati površini na nagnjenem terenu (testno polje 2 – TP2);
- Tarče na travnati površini na nagnjenem terenu in blizu sence (testno polje 3 – TP3);
- Tarče na makadamu (testno polje 4 – TP4 in testno polje 5 – TP5);
- Tarče na asfaltni površini (testno polje 6 – TP6).

Tarče testnih polj TP1, TP2 in TP3 so bile razvrščene na primerljiv način, prav tako smo sistematično označili točke za lažjo in bolj pregledno analizo – primer testnega polja je prikazan na sliki 27.



Slika 27: Razporeditev tarč in oznaka točk za primer testnega polja TP1.

Za primer tarč na asfaltni površini smo testirali tarče več velikosti in dveh barv (Slika 28).



Slika 28: Razporeditev tarč in oznaka točk za primer testnega polja TP6.

Zaradi omejene možnosti višine leta na študijskem območju smo se na delovišču Kandrše odločili, da bomo podatke zajemali na dveh višinah, in sicer na višini 35 m in 50 m, saj je najvišja dopustna višina leta 50 m. Glede na priporočila iz pregledane literature smo se odločili za vzdolžni preklop v vrednosti 80 % oziroma 85 % in prečni preklop 70 % oziroma 75 %

4.2 Študijsko območje Kandrše: izvedba snemanja

Za aerofotografiranje smo uporabili letalnik *DJI Phantom 4 Pro* s fotoaparatom FC6310, ki ima goriščno razdaljo 8,8 mm, velikost slikovnega senzorja 13,2 mm x 8,8 mm in geometrično ločljivost 20M pikslov. Aerofotografiranja smo izvedli z vzdolžnim preklopom med fotografijami 80 % in prečnim preklopom 70 % ter z dveh različnih višin nad terenom: 35 m in 50 m. Prostorska ločljivost fotografij GSD je znašala približno 1 cm pri fotografiranju z višine 35 m in približno 1,5 cm pri fotografiranju z višine 50 m. Ker se študijsko območje nahaja znotraj cone obvezne uporabe odzivnika (TMZ LJL), je največja dovoljena višina leta nad terenom 50 m, kar je onemogočilo, da bi testiranja izvajali tudi z nižjimi prostorskimi ločljivostmi fotografij (npr. 2 cm).

Na prvem študijskem območju v Kandršah, prostorske razsežnosti približno 300 m x 120 m, smo v okviru petih izmer izvedli več aerofotografiranj z daljinsko vodenim letalnikom. Termini izmer z letalnikom (izvajali smo nadirno snemanje s konstantno višino leta nad terenom):

- 1. izmera: 24. 4. 2020, ko smo aerofotografiranje izvedli:
 - o za obe višini leta (približna višina nad terenom 35 m in 50 m) z izbranim vzdolžnim (80 %) in prečnim (70 %) preklopom med fotografijami.
- 2. izmera: 4. 5. 2020, ko smo aerofotografiranje izvedli:
 - o za obe višini leta (približna višina nad terenom 35 m in 50 m) z izbranim vzdolžnim (80 %) in prečnim (70 %) preklopom med fotografijami;
 - o za približno višino leta 35 m in povečanim vzdolžnim (85 %) in prečnim (75 %) preklopom med fotografijami.
- 3. izmera: 13. 5. 2020, ko smo aerofotografiranje izvedli:
 - o za obe višini leta (približna višina nad terenom 35 m in 50 m) z izbranim vzdolžnim (80 %) in prečnim (70 %) preklopom med fotografijami.
- 4. izmera: 21. 5. 2020, ko smo aerofotografiranje izvedli:
 - o za obe višini leta (približna višina nad terenom 35 m in 50 m) z izbranim vzdolžnim (85 %) in prečnim (75 %) preklopom med fotografijami *pred košnjo testnih polj TP1-TP3*;
 - o za obe višini leta (približna višina nad terenom 35 m in 50 m) z izbranim vzdolžnim (85 %) in prečnim (75 %) preklopom med fotografijami *po košnji testnih polj TP1-TP3*;
 - o za obe višini leta (približna višina nad terenom 35 m in 50 m) z izbranim vzdolžnim (85 %) in prečnim (75 %) preklopom med fotografijami *po košnji testnih polj TP1-TP3* z modeliranjem pomičnega zaklopa fotoaparata;
 - o dodatno smo za del delovišča aerofotografirali tudi v poševni smeri (na 25 m in 15 m) in vodoravno.
- 5. izmera: 26. 8. 2020, ko smo aerofotografiranje izvedli:
 - o za obe višini leta (približna višina nad terenom 35 m in 50 m) z izbranim vzdolžnim (85 %) in prečnim (75 %) preklopom med fotografijami;
 - o za dodatno višino leta (približna višina nad terenom 45 m), s prečno smerjo aerofotografiranja glede na smer leta v prvih dveh primerih.

Poleg aerofotografiranja smo na terenu vsakič izvedli tahimetrična opazovanja za namene določitve koordinat oslonilnih in kontrolnih točk (tarč v testnih poljih). Dodatno smo spremljali zunanje pogoje aerofotografiranja, kot so temperatura, hitrost in moč vetra, osvetljenost ter druge vremenske okoliščine (Slika 29). Za testna polja TP1 do TP3 smo dodatno opazovali višino

oziroma posebnosti vegetacije, saj je cilj naloge med drugim preučiti vidnost in prepoznavnost tarč, ki so označevale kontrolne oziroma detaljne točke, v odvisnosti od vegetacije pri fotogrametrični obdelavi UAV fotografij.

OBRAZEC ZA SPREMLJANJE PARAMETROV UAV SNEMANJA			
Projekt: UAV v katastru			
PODATKI			
Datum snemanja	13/05/2020	spremenljivost vetra [1-5]	1
Čas začetka snemanja	13:10	temperatura [°C]	21
Čas konca snemanja	13:25	relativna vlažnost [%]	
LetaInik	Phantom 4 Pro	hitrost vetra [m/s]	0-1.6
preklop	80/70	višina trave C1 [cm]	do 30 cm
višina leta [m]	35	višina trave C2 [cm]	do 30 cm
		višina trave C3 [cm]	do 30 cm
		osvetljenost pred letom [lux]	2500
		osvetljenost po letu [lux]	1300
Oblačnost 			
CELICA 1  CELICA 2  CELICA 3 			

Slika 29: Obrazec za spremljanje parametrov UAV snemanja.

4.3 Študijsko območje Kandrše: obdelava podatkov

4.3.1 Študijsko območje Kandrše: fotogrametrična obdelava in izdelava oblaka točk

Podatke posameznih aerofotografiranj smo izvednotili s programsko opremo *Metashape* proizvajalca *Agisoft*. Osnovna obdelava je zajemala izravnavo fotogrametričnega bloka s postopkom grajenja strukture iz gibanja SfM (angl. *Structure from Motion*). V izravnavo v postopku SfM smo za pridobitev georeferenciranih izdelkov vključili slikovne koordinate oslonilnih točk. V postopek smo vključili izravnavo parametrov notranje orientacije fotoaparata: goriščno razdaljo, koordinati glavne točke, tri koeficiente radialne distorzije in dva koeficienta tangencialne distorzije. V primerih, ko aposteriori točnost izravnave fotogrametričnega bloka ni dosegla pričakovanih rezultatov (ravninska točnost je približno enaka GSD, višinska točnost pa približno enaka 1,5 x GSD), smo v izravnavo vključili še nepravokotnost koordinatnih osi slikovnega koordinatnega sistema in modeliranje vpliva pomičnega zaklopa fotoaparata, kar pa v večini primerov ni prineslo dodatnih izboljšav. Po končani izravnavi smo s postopki gostega slikovnega ujemanja MVS (angl. *Multi-View Stereo*) izdelali goste oblake točk.

Oslonilne točke

Na študijskem območju Kandrše smo za potrebe izravnave aerofotogrametričnega bloka fotografij v postopku SfM razporedili 37 oslonilnih točk (OT), signaliziranih z belimi ploščami velikosti 40 cm x 40 cm in črnim krogom premera 30 cm v sredini. Razpored oslonilnih točk na študijskem območju prikazuje slika 30.

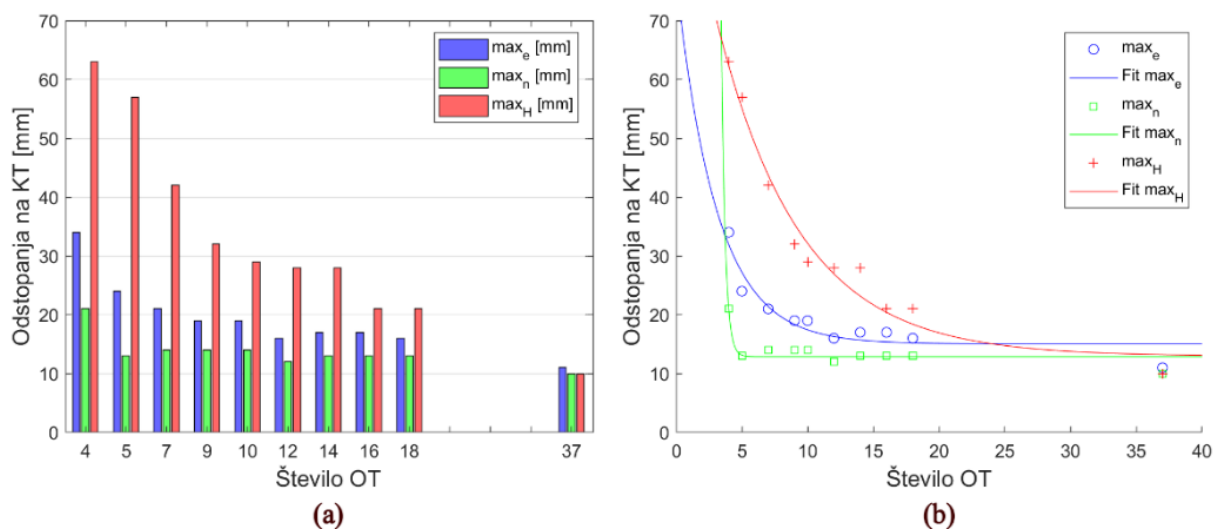
Slikovne koordinate oslonilnih točk so bile izmerjene samodejno na približno polovici fotografij (v nekaterih primerih tudi manj), na katerih je oslonilna točka. Na fotografijah, kjer s samodejnim prepoznavanjem signalov slikovne koordinate oslonilnih točk niso bile izmerjene (op. zaradi slabega kontrasta fotografije signala, preosvetljenega signala, perspektivno popačenega signala ipd.), smo slikovne koordinate oslonilnih točk izmerili ročno s pol-samodejnim postopkom. V izravnavo bloka fotografij so bile vključene vse slikovne koordinate oslonilnih točk s fotografij, kjer je bil položaj posamezne oslonilne točke na fotografiji nedvoumno prepoznan. Oslonilne točke, ki zaradi navedenih razlogov niso bile zanesljivo prepoznane na večini fotografij, smo dodelili status kontrolnih točk (KT), ki na izravnavo nimajo vpliva. Primer takšne kontrolne točke je točka O17, ki je bila stabilizirana v bližini visoke vegetacije.



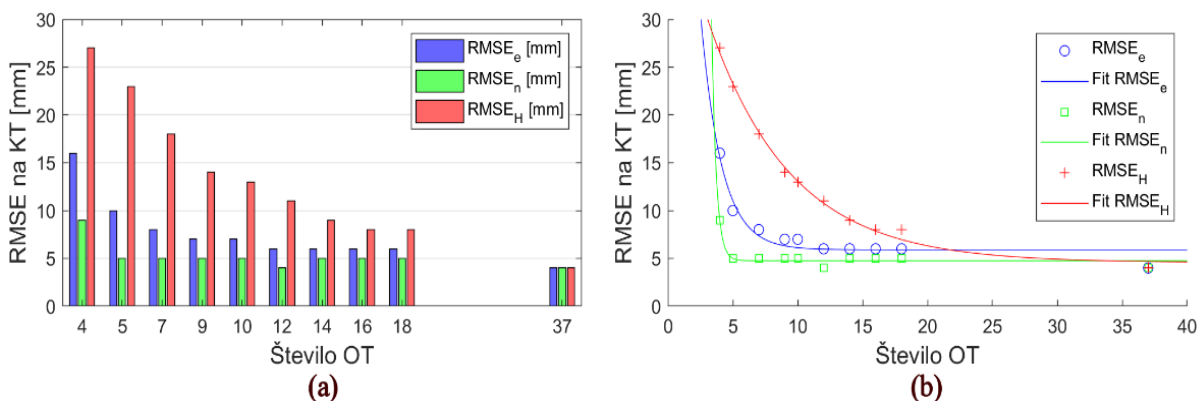
Slika 30: Razpored oslonilnih točk na študijskem območju Kandrše.

Položajno točnost izravnave fotogrametričnega bloka smo ocenili na podlagi kontrolnih točk. Izravnavo smo izvedli večkrat, z različnim številom točk, ki so bile uporabljene kot oslonilne točke (OT) ali kontrolne točke (KT). Ugotavljamo, da položajna točnost fotogrametričnega bloka eksponentno narašča s številom uporabljenih oslonilnih točk. Slika 31 prikazuje največja odstopanja položajev na kontrolnih točkah, slika 32 pa koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE) položajev kontrolnih točk po koordinatnih sestavinah e , n in H za en primer fotogrametričnega bloka. V primeru, ko je za orientacijo uporabljenih vseh 37 oslonilnih točk, so

podani največji popravki in RMSE oslonilnih točk. Ravninska točnost se ustali pri uporabi od 8 do 10 oslonilnih točk, višinska točnost pa pri uporabi od 15 do 20 oslonilnih točk, ki so enakomerno prostorsko razporejene po celotnem študijskem območju.



Slika 31: Največja odstopanja na kontrolnih točkah glede na uporabljeno število oslonilnih točk.



Slika 32: RMSE na kontrolnih točkah glede na uporabljeno število oslonilnih točk.

Potem ko smo z uporabo različnega števila enakomerno razporejenih kontrolnih točk ugotovili, da so slikovne koordinate signalov na fotografijah izmerjene optimalno, smo za končno izravnavo vse točke, razen zgoraj omenjenih problematičnih točk, ki niso bile zanesljivo prepoznane na večini fotografij, uporabili kot oslonilne točke.

V preglednici 6 so navedene položajne točnosti posameznih izravnav fotogrametričnih blokov, pridobljenih v petih terminskih izmerah. Točnosti so podane po koordinatnih sestavinah (e , n , H), za oslonilne točke so izračunane kot RMSE popravkov opazovanj v izravnavi, za kontrolne točke pa kot RMSE na kontrolnih točkah. Iz preglednice je vidno, da pride do večjih popravkov opazovanj oziroma odstopanj predvsem pri višinski komponenti – to velja tako za oslonilne kot za kontrolne točke, medtem ko so popravki opazovanj oziroma odstopanja manjša od velikosti piksla v primeru ravninskih koordinat. Rdeče obarvane vrednosti so tiste, ki presegajo vrednosti GDS za ravninski komponenti, in 1,5 GDS za višinsko komponento.

Preglednica 6: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kandrše.

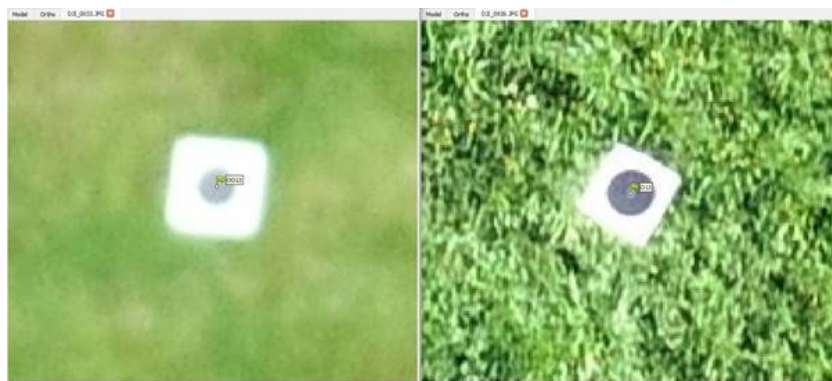
Datum izmere	Aerofotografiranje – višina leta	RMSE OT [m]			RMSE KT [m]		
		e	n	H	e	n	H
24. 4. 2020	35 m (GSD ~1 cm)	0,005	0,006	0,019	0,001	0,001	0,017
	50 m (GSD ~1,5 cm)	0,004	0,004	0,005	0,007	0,005	0,005
4. 5.2020	35 m (GSD ~1 cm)	0,003	0,003	0,002	0,004	0,004	0,010
	50 m (GSD ~1,5 cm)	0,003	0,002	0,003	0,005	0,003	0,014
	35 m, povečan vzdolžni/prečni preklap (85%/75%) (GSD ~1 cm)	0,003	0,003	0,003	0,005	0,002	0,014
13. 5. 2020	35 m (GSD ~1 cm)	0,005	0,005	0,020	0,004	0,008	0,047
	50 m (GSD ~1,5 cm)	0,005	0,006	0,014	0,005	0,004	0,043
21. 5. 2020	35 m, pred košnjo (GSD ~1 cm)	0,003	0,004	0,006	0,003	0,003	0,005
	50 m, pred košnjo (GSD ~1,5 cm)	0,005	0,005	0,027	0,007	0,004	0,043
	35 m, po košnji (GSD ~1 cm)	0,003	0,004	0,010	0,002	0,005	0,010
	50 m, po košnji (GSD ~1,5 cm)	0,002	0,003	0,002	0,006	0,005	0,005
	35 m, po košnji, z modeliranjem pomičnega zaklopa (GSD ~1 cm)	0,002	0,002	0,003	0,004	0,005	0,007
	50 m, pred košnjo, z modeliranjem pomičnega zaklopa (GSD ~1,5 cm)	0,004	0,006	0,015	0,009	0,008	0,032
26. 8. 2020	35 m (GSD ~1 cm)	0,003	0,003	0,002	0,002	0,004	0,010
	50 m (GSD ~1,5 cm)	0,004	0,003	0,002	0,006	0,003	0,008

Posebnosti obdelave posameznih aerofotogrametričnih blokov

48 Pri izravnavi fotogrametričnega bloka **prve izmere z dne 24. 4. 2020**, pridobljenega z višine 35 m nad terenom, so se v severnem delu bloka pojavili popravki koordinat oslonilnih točk, ki so po višinski sestavini presegali 4 cm. Pravega razloga za napake nismo odkrili. Fotografije smo obdelali še v programih *3Dsurvey* in *Pix4D*. Rezultati so bili nekoliko boljši, vendar so se pri obdelavi s programom *Pix4D* pojavile nepričakovane vrednosti elementov zunanje orientacije fotografij (npr. letalnik naj bi se za dve fotografiji spustil za 20 m in potem ponovno dvignil na načrtovano višino). **Podatke tega bloka ocenjujemo kot neprimerne za nadaljnjo obdelavo.**

Glede na slabe izkušnje prve izmere smo med **drugo izmero z dne 4. 5. 2020** opravili dodatno aerofotografiranje s povečanim vzdolžnim preklapom (85 %) in povečanim prečnim preklapom med fotografijami (75 %). Obdelava vseh treh blokov je potekala brez posebnosti, položajna točnost fotogrametričnega modela je bil pri vseh treh blokkih (dva bloka na višini 35 m in en blok na višini 50 m nad terenom) v okviru pričakovanih vrednosti.

Za **tretjo izmero z dne 13. 5. 2020** se je izkazala slaba položajna točnost na podlagi rezultatov izravnave obeh fotogrametričnih blokov. Pri fotografiranju z višine 35 m je višinsko odstopanje na oslonilni točki OT 019 na južnem delu bloka preseglo 6 cm. Pri fotografiranju z višine 50 m je višinsko odstopanje na južnem delu bloka na oslonilni točki OT 019 3,6 cm, na OT 024 3,5 cm, na kontrolni točki KT 017 pa skoraj 7 cm. Ocenjujemo, da so glavni razlogi za slabše rezultate fotogrametričnega izvedenja hitrejši let letalnika, slabši svetlobni pogoji in posledično dolgi časi ekspozicij. Slabo kakovost fotografij tretje izmere predstavlja tudi slika 33. Modeliranje vpliva pomičnega zaklopa ni izboljšalo rezultatov izravnave.



Slika 33: Izgled OT 013 na nadirni fotografiji z dne 13. 5. 2020 (levo) in z dne 4. 5. 2020 (desno).

Za **četrto izmero z dne 21. 5. 2020** smo izravnali več fotogrametričnih blokov, pridobljenih z višine 35 m in 50 m, **pred košnjo in po košnji trave v okolici detajlnih točk**, na katerih smo ugotavljali prepoznavnost in natančnih meritev različnih signalov. Rezultati izravnave prvega bloka fotografij, zajetih s 35 m pred košnjo trave na testnih poljih z detajlnimi točkami, so pričakovani in brez posebnosti. Rezultati izravnave drugega bloka fotografij, zajetih s 35 m po košnji trave na testnih poljih z detajlnimi točkami, so zadovoljivi, vendar je na točki O30 v severnem vogalu bloka višinski popravek dosegel 3,6 cm. V tem primeru smo z modeliranjem vpliva pomičnega zaklopa bistveno izboljšali rezultate, saj v tem primeru največji višinski popravek na oslonilni točki ni presegal 1 cm.

Pri izravnavi bloka fotografij, zajetih s 50 m nad terenom pred košnjo trave na testnih poljih z detajlnimi točkami, so se pojavili nepričakovano veliki višinski popravki v severnem delu bloka, 7,9 cm na oslonilni točki O34 in 7,2 cm na O30. Največje višinsko odstopanje na kontrolni točki O35 je preseglo 6 cm. Modeliranje vpliva pomičnega zaklopa je malenkostno izboljšalo rezultate izravnave: največji višinski popravek za oslonilno točko je 4,6 cm. Rezultati izravnave bloka fotografij, zajetih z višine 50 m po košnji trave so pričakovani in brez posebnosti.

Glede na izkušnje predvsem tretje izmere smo pri **peti izmeri z dne 26. 8. 2020** poskrbeli, da je bila na fotoaparatu izključena večina samodejnih nastavitev glede osvetljenosti senzorja. Čas ekspozicije smo zaklenili na 1/320 s, ki je še vedno zagotavljal, da odprtina zaslonke ni bila največja, kar bi lahko poslabšalo globinsko ostrino fotografij. Obdelava obeh aerofotogrametričnih blokov (35 m in 50 m) je potekala brez posebnosti, položajna točnost fotogrametričnega modela je bil pri obeh blokkih v okviru pričakovanih vrednosti. V okviru pete izmere smo nadalje zajeli še fotogrametrični blok z višine 45 m nad terenom, pri katerem je bila smer leta letalnika prečna glede na smer fotografiranja z višin 35 m in 50 m. S skupno obdelavo prečnih preletov z različnih višin bi lahko preverili ugotovitve iz znanstvene literature, da kombinacija prečnih snemanj na različnih višinah izboljša modeliranje notranje orientacije fotoaparata in izboljša (predvsem višinsko) točnost fotogrametričnega, a ta cilj presega vsebino pričujoče naloge.

Povzamemo lahko, da smo ob upoštevanju priporočil parametrov leta in snemanja, poznanih že iz literature, z ustrezno velikim številom in ustrezno razporeditvijo oslonilnih točk dosegli zadovoljivo ravninsko točnost aerofotogrametričnega bloka (približne velikosti GSD za ravninske koordinate in 1,5 GSD za višine). Višinska odstopanja so v nekaterih primerih presegla pričakovano točnost; razlogi so predvsem v predolgih časih ekspozicije in posledično neostrih fotografijah.

4.3.2 Študijsko območje Kandrše: zajem koordinat detajlnih točk

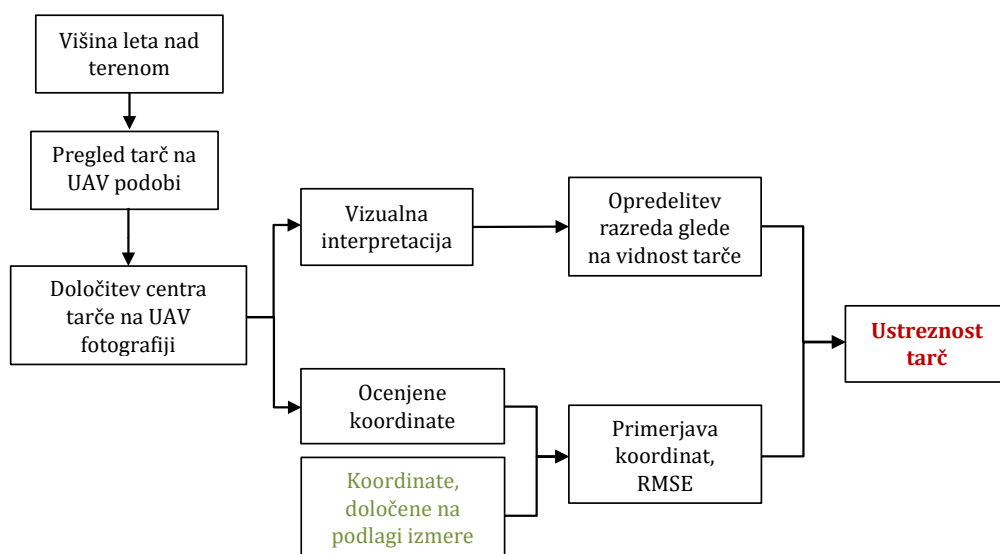
Tako pripravljene podatke smo nadalje uporabili za ročni oziroma pol-samodejni zajem podatkov o položaju točk tarč v testnih poljih. Glede na predstavljene ugotovitve o položajni kakovosti UAV fotogrametričnega oblaka točk smo se odločili, da za prve analize vzamemo bolj kakovostne (glede na prvo izmero) podatke druge izmere z dne 4. 5. 2020. Najprej smo obravnavali položajno točnost določitve koordinat 177 detajlnih točk, to je točk, ki so bile z različnimi tarčami označene v naravi v šestih testnih poljih. Pri tem smo posebej obravnavali položajno točnost določitve koordinat detajlnih točk na osnovi georeferenciranih fotografij za fotografije:

- pridobljene z aerofotografiranjem na približni višini 35 m nad terenom in z izbranim vzdolžnim (80 %) in prečnim (70 %) preklpom; ter
- pridobljene z aerofotografiranjem na približni višini 50 m nad terenom in z izbranim vzdolžnim (80 %) in prečnim (70 %) preklpom.

Koordinate točk smo najprej ročno določali na delno prekrivajočih se georeferenciranih fotografijah, in sicer:

- za primer podatkov aerofotografiranja na približni višini 35 m nad terenom na vseh fotografijah, kjer so bile tarče vidne (približno 20 fotografij za eno točko);
- za primer podatkov aerofotografiranja na približni višini 50 m nad terenom pa na 10 fotografijah, saj se je izkazalo, da je na podlagi zajema točk na 6-10 fotografijah položaj točk že kakovostno določen.

Tako določene koordinate 177 detajlnih točk (tarč) smo primerjali s položaji, določenimi na podlagi neodvisnih opazovanj s tahimetrično izmero. Odstopanja so določena za vsako koordinatno komponento in ločeno za ravninski oziroma horizontalni položaj ter za višino. Za namen analize najbolj primernih tarč za označevanje mejnikov oziroma položajev lomnih točk parcelne meje smo dodatno za vse tarče vizualno opredelili vidnost tarče, upoštevajoč višino leta, čeravno smo bili na testnem območju omejeni z najvišjo višino leta 50 m. Postopek analitičnega dela v tej fazi je predstavljen z diagramom poteka (Slika 34).



Slika 34: Postopek ocenjevanja primernosti izbranih tarč za uporabo UAV fotogrametrije v katastru za delovišče Kandrše.

Za vsako detajlno točko smo torej izračunali odstopanja po koordinatnih sestavinah e , n in H ter opredelili vidnost tarče na fotografiji (Preglednica 7), računske podatke pa smo povezali s slikami tarč za lažjo analizo vidnosti tarč (Slika 35).

Preglednica 7: Izsek rezultatov analize položajne točnosti detajlnih točk na delovišču Kandrše za podatke z dne 4. 5. 2020, višina leta 50 m.

Poly	Point Numb	Easting (true)	Easting (meas)	E true	dx2	Northing (true)	Northing (meas)	N true	dy2	Height (true)	Height (meas)	Z true	dz2	screenshot	visibility
P1	TP113	487658.577	487658.570	0.007	5.3E-05	110273.868	110273.868	0.000	2E-07	468.682	468.691	-0.009	9E-05	screenshot\TP113.JPG	0
P1	TP115	487660.241	487660.243	-0.002	2.3E-06	110274.933	110274.928	0.005	2E-05	468.683	468.670	0.013	0.0002	screenshot\TP115.JPG	1
P1	TP116	487661.041	487661.045	-0.004	1.8E-05	110275.389	110275.386	0.003	8E-06	468.593	468.587	0.007	4E-05	screenshot\TP116.JPG	0
P1	TP117	487661.888	487661.895	-0.007	5.3E-05	110275.922	110275.921	0.001	5E-07	468.554	468.549	0.005	2E-05	screenshot\TP117.JPG	1
P1	TP118	487662.746	487662.750	-0.004	1.5E-05	110276.415	110276.420	-0.005	3E-05	468.586	468.576	0.010	0.0001	screenshot\TP118.JPG	1
P1	TP119	487659.083	487659.082	0.001	4.9E-07	110272.975	110272.978	-0.002	6E-06	468.628	468.628	0.000	0	screenshot\TP119.JPG	0
P1	TP120	487659.838	487659.838	0.000	9E-08	110273.508	110273.512	-0.004	2E-05	468.592	468.594	-0.002	3E-06	screenshot\TP120.JPG	0
P1	TP121	487660.677	487660.677	0.000	0	110274.020	110274.017	0.003	7E-06	468.550	468.550	0.000	9E-08	screenshot\TP121.JPG	0
P1	TP122	487661.461	487661.461	0.001	2.5E-07	110274.470	110274.470	0.000	9E-08	468.518	468.516	0.002	4E-06	screenshot\TP122.JPG	0
P1	TP123	487662.289	487662.298	-0.009	8.5E-05	110275.084	110275.076	0.008	6E-05	468.556	468.543	0.013	0.0002	screenshot\TP123.JPG	1
P1	TP124	487663.140	487663.144	-0.004	1.4E-05	110275.518	110275.513	0.005	2E-05	468.547	468.538	0.009	9E-05	screenshot\TP124.JPG	0
P1	TP125	487659.473	487659.472	0.001	1E-06	110272.325	110272.328	-0.003	1E-05	468.598	468.598	0.000	4E-08	screenshot\TP125.JPG	1
P1	TP126	487660.289	487660.284	0.005	2.6E-05	110272.755	110272.755	0.000	4E-08	468.559	468.557	0.002	5E-06	screenshot\TP126.JPG	1
P1	TP127	487661.046	487661.036	0.010	0.0001	110273.291	110273.292	-0.001	1E-06	468.525	468.524	0.001	5E-07	screenshot\TP127.JPG	0
P1	TP128	487661.867	487661.863	0.004	1.7E-05	110273.775	110273.777	-0.002	3E-06	468.485	468.483	0.002	3E-06	screenshot\TP128.JPG	1
P1	TP129	487662.650	487662.645	0.005	2.9E-05	110274.313	110274.316	-0.003	6E-06	468.452	468.450	0.002	3E-06	screenshot\TP129.JPG	1
P1	TP130	487663.499	487663.495	0.004	1.4E-05	110274.663	110274.664	-0.001	4E-07	468.430	468.428	0.002	6E-06	screenshot\TP130.JPG	1
P1	TP131	487659.941	487659.933	0.008	7.2E-05	110271.544	110271.545	-0.001	2E-06	468.537	468.535	0.002	4E-06	screenshot\TP131.JPG	1
P1	TP132	487660.682	487660.678	0.004	1.5E-05	110271.974	110271.974	0.000	1E-08	468.501	468.497	0.004	2E-05	screenshot\TP132.JPG	2
P1	TP133	487661.480	487661.475	0.005	2.7E-05	110272.401	110272.400	0.001	5E-07	468.467	468.465	0.002	3E-06	screenshot\TP133.JPG	0
P1	TP134	487662.213	487662.210	0.003	1.2E-05	110272.958	110272.960	-0.002	3E-06	468.438	468.437	0.001	2E-06	screenshot\TP134.JPG	1
P1	TP135	487663.081	487663.076	0.005	2.6E-05	110273.321	110273.324	-0.003	1E-05	468.421	468.414	0.007	5E-05	screenshot\TP135.JPG	1
P1	TP136	487663.907	487663.908	-0.001	1.4E-06	110273.792	110273.791	0.001	1E-06	468.367	468.364	0.003	8E-06	screenshot\TP136.JPG	2
P1	TP137	487659.825	487659.819	0.006	3.1E-05	110277.849	110277.854	-0.004	2E-05	468.843	468.839	0.004	2E-05	screenshot\TP137.JPG	2



Slika 35: Primer tarč TP132 in TP133 iste velikosti (15 cm x 15 cm) z različnim vzorcem, kjer smo TP132 uvrstili med dobro vidno (2), TP133 pa med tarčo srednje vidljivosti (1).

Dodatno smo za vse detajlne točke vseh testnih polj izračunali koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE) položajev detajlnih točk za oba obravnavana primera podatkovnih nizov z dne 4. 5. 2021, to je za podatke, zajete na približni višini leta 35 m in višini leta 50 m. Rezultati analize položajne točnosti detajlnih točk, pridobljenih na podlagi primerjave koordinat ročnega zajema na georeferenciranih fotografijah, s koordinatami, določenimi na podlagi neodvisnih tahimetričnih opazovanj (referenčne vrednosti), kažejo, da so odstopanja v mejah dopustnih odstopanj (Preglednica 8), izjema je nekoliko višje odstopanje v višinski komponenti pri letu na približni višini nad terenom 35 m.

Preglednica 8: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše.

Datum izmere	Aerofotografiranje – višina leta	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
		d_e	d_n	d_H	$RMSE_{e,n}$	$RMSE_{e,n,H}$
4. 5.2020	50 m	0,007	0,006	0,006	0,009	0,011
	35 m	0,009	0,005	0,012	0,010	0,016

V preglednici 9 podajamo še rezultate ocene položajne točnosti koordinat detajlnih točk po posameznem testnem polju (glej sliko 26), kjer smo posebej obravnavali izdelane tarče na eni strani in katastrske oznake na drugi strani. Oznaka *n/a* je na mestih, kjer nismo razpolagali z izbranim tipom označb detajlnih točk:

- TP4 je testno polje za robnikom, kjer smo detajlne točke označili le z industrijsko izdelanimi oznakami za označbo mejnikov ali geodetskih točk;
- TP5 je testno polje na makadamski površini, kjer smo detajlne točke označili le z industrijsko izdelanimi oznakami za označbo mejnikov ali geodetskih točk;
- TP6 je testno polje na asfaltni površini, kjer smo detajlne točke označili (s sprejem) s pomočjo mask fotogrametričnih tarč v beli in rdeči barvi.

Preglednica 9: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: pregled po testnih poljih in glede na tip oznak.

Datum izmere	Višina leta	Testno polje	Fotogrametrične tarče [m]		Industrijsko izdelane oznake [m]	
			$RMSE_{e,n}$	$RMSE_{e,n,H}$	$RMSE_{e,n}$	$RMSE_{e,n,H}$
4. 5.2020	50 m	TP1	0,006	0,007	0,007	0,010
	35 m	TP1	0,005	0,008	0,006	0,016
4. 5.2020	50 m	TP2	0,006	0,007	0,007	0,010
	35 m	TP2	0,007	0,012	0,009	0,018
4. 5.2020	50 m	TP3	0,009	0,010	0,015	0,016
	35 m	TP3	0,017	0,018	0,019	0,025
4. 5.2020	50 m	TP4	n/a	n/a	0,014	0,017
	35 m	TP4	n/a	n/a	0,009	0,016
4. 5.2020	50 m	TP5	n/a	n/a	0,016	0,018
	35 m	TP5	n/a	n/a	0,006	0,009
4. 5.2020	50 m	TP6	0,005	0,007	n/a	n/a
	35 m	TP6	0,007	0,010	n/a	n/a

Rezultati analize kažejo, da v primeru tako imenovanih fotogrametričnih tarč sicer položajna točnost nekoliko višja, še vedno pa pri danih parametrih in pogojih UAV snemanja ter parametrih fotogrametričnega zajema podatkov tudi za primer katastrskih mejnih znamenj dosežemo zadovoljivo položajno točnost:

- Fotogrametrične tarče:
 - o Za podatke snemanja na višini 50 m $RMSE_{e,n} = 0,007$ m; $RMSE_{e,n,H} = 0,008$ m;
 - o Za podatke snemanja na višini 35 m $RMSE_{e,n} = 0,009$ m; $RMSE_{e,n,H} = 0,012$ m;
- Industrijsko izdelane oznake za mejnike in geodetske točke:
 - o Za podatke snemanja na višini 50 m $RMSE_{e,n} = 0,012$ cm; $RMSE_{e,n,H} = 0,014$ cm;
 - o Za podatke snemanja na višini 35 m $RMSE_{e,n} = 0,010$ cm; $RMSE_{e,n,H} = 0,017$ cm;

Za študijo ustreznosti označevanja mejnikov za UAV fotogrametrično izmero v katastru smo nadalje na delovišču Kandrše posebej obravnavali izbrano testno polje (TP1) z 39 detajlnimi točkami, za katero smo dodatno določili koordinate detajlnih točk (Slika 27) na podlagi:

- ortofota, ki smo ga izdelali na temelju zajetih podatkov, ter
- georeferenciranega oblaka točk.

V ta namen smo iz gostega oblaka točk izdelali digitalni model površja (DMP) v obliki poligonske 3D mreže in ortofoto s prostorsko ločljivostjo, ki je ustrezala prostorski ločljivosti aerofotografij. Rezultati kažejo (preglednica 10), da je ravninska kakovost koordinat, določenih na temelju ortofota, primerljiva z ravninsko točnostjo koordinat, določenih na temelju zajema koordinat na več prekrivajočih se fotografijah fotogrametričnega snemanja. Predvsem pri snemanju z višje višine opazimo slabšo višinsko točnost koordinat, pridobljenih iz poligonske 3D mreže. Do podobnih ugotovitev pridemo pri zajemu koordinat na temelju georeferenciranega 3D oblaka točk, kjer je vendarle opazno nekoliko večje odstopanje od referenčnih vrednosti tudi v ravninskem smislu, izstopajo pa predvsem odstopanja v višinski komponenti.

Preglednica 10: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše, testno polje TP1.

Datum izmere	Višina leta	Pristop zajema koordinat	Testno polje	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
4. 5.2020	50 m	Fotografije	TP1	0,004	0,003	0,006	0,005	0,008
	35 m	Fotografije	TP1	0,005	0,003	0,012	0,006	0,013
4. 5.2020	50 m	Ortofoto	TP1	0,007	0,006	0,019	0,009	0,021
	35 m	Ortofoto	TP1	0,006	0,006	0,015	0,009	0,018
4. 5.2020	50 m	3D oblak točk	TP1	0,014	0,013	0,039	0,019	0,044
	35 m	3D oblak točk	TP1	0,008	0,008	0,020	0,011	0,023

Na delovišču Kandrše smo preučevali tudi vpliv višine trave na prepoznavnost tarč na UAV fotografijah. V ta namen smo v okviru naloge analizirali podatke UAV fotogrametričnega snemanja z dne 21. 5. 2021, izvedenega pred in po košnji testnih polj (Slika 36), in sicer na osnovi izdelanega ortofota. V primeru snemanja 21. 5. 2021 smo sicer nekoliko zvišali prečni in vzdolžni preklap, in sicer prečni preklap je bil 85 %, vzdolžni pa 75 %, kar pa ni bistveno vplivalo na položajno točnost (glej tudi preglednico 6).



Slika 36: Testno polje TP1 pred in po košnji na dan UAV-fotogrametričnega snemanja 21. 5. 2021.

Pri visoki travi mnogih tarč sploh ni bilo vidnih, tako smo na testnem polju TP1 od skupno 39 detajlnih točk pri nepokošeni travi vizualno prepoznali le 11 točk pri višini leta 50 m oziroma 16 točk pri višini leta 35 m. Glavna ovira pri visoki travi je, pričakovano, slaba prepoznavnost označb detajlnih točk, ker praktično onemogoča fotogrametrični zajem podatkov. Tudi v primeru prepoznanih tarč so odstopanja fotogrametrično zajetih koordinat točk visoka, predvsem v višinskem smislu (Preglednica 11).

Preglednica 11: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi ortofota v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše, testno polje TP1.

Datum izmere	Višina leta	Čas snemanja	Testno polje	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
21. 5.2020	50 m	Pred košnjo	TP1 (11 točk)	0,010	0,016	0,038	0,018	0,043
	35 m	Pred košnjo	TP1 (16 točk)	0,011	0,011	0,060	0,015	0,062
21. 5.2020	50 m	Po košnji	TP1 (11 točk)	0,007	0,008	0,018	0,011	0,021
	35 m	Po košnji	TP1 (16 točk)	0,006	0,007	0,024	0,009	0,026
21. 5.2020	50 m	Po košnji	TP1 (39 točk)	0,007	0,010	0,017	0,012	0,021
	35 m	Po košnji	TP1 (39 točk)	0,005	0,007	0,020	0,009	0,022

4.3.3 Podrobnejša analiza primernosti označbe mejnikov na delovišču Kandrše

Do sedaj predstavljeni rezultati analiz kažejo, da je mogoče na osnovi kakovostnega georeferenciranega fotogrametričnega bloka, pri izbranih prostorskih ločljivostih fotografij (GSD ~ 1–1,5 cm), kakovostno določiti položaje detajlnih točk (mejnikov) z izbranimi oznakami. Izstopale so le industrijsko izdelane oznake rjave barve, ki mnogokrat niso bile prepoznane (vidne) na fotografijah (Slika 37), zato takih oznak z majhnim barvnim kontrastom glede na okolico ne priporočamo.

54

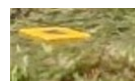
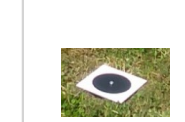
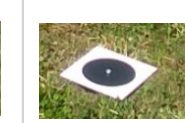


Slika 37: Primer rjavega mejnika TP113, kjer smo še prepoznali mejnik na fotografiji (levo) in rjavega mejnika TP213, kjer mejnika ne moremo več prepoznati (desno).

V nadaljevanju študije smo posebno pozornost namenili preučevanju kakovosti določitve koordinat detajlnim točkam v testnih poljih glede na;

- velikost in obliko fotogrametričnih tarč;
- barvo industrijsko izdelane oznake točke.

Položajno točnost določitve koordinat detajlnih točk glede na obliko in velikost tarč smo preučevali za testna polja TP1, TP2 in TP3, ki so imela enak vzorec razporeditev tarč (Slika 38), za analizo položajne točnosti določitve koordinat detajlnih točk glede na barvo oziroma vrsto industrijske oznake pa smo v analizo vključili tudi oznake s testnih polj TP4 in TP5.

					
		trača velika, dvignjena, pravokotna, črno-bela	trača okrogla, dvignjena, bela brez vzorca	trača okrogla, dvignjena, kupljena, redeče roza	
					
mejn.ik, plastičen, rumen, srednje višine, izstopajoč, viseč s terenom	mejn.ik, plastičen, rdeč, plitev, viseč s terenom	mejn.ik, plastičen, rumen, plitev, viseč s terenom	mejn.ik, plastičen, oranžen, plitev, viseč s terenom	mejn.ik, rdeč, nizek, viseč s terenom	mejn.ik, bel plastičen, srednje velik, izstopajoč iz terena, viseč s terenom
					
mejn.ik, plastičen, rumen, srednje višine, izstopajoč, horizontalen	mejn.ik, plastičen, rumen, izstopajoč, horizontalen	mejn.ik, rumen, podolgovat, izstopajoč iz terena, horizontalen, zgornja ploskev ukrivljena	mejn.ik, visok, bel, plastičen, izstopajoč, viseč s terenom	mejn.ik, rdeč, visok, izstopajoč iz terena, viseč s terenom	plastičen moder, viseč s terenom
					
mejn.ik, plastičen, rjav, srednje višine	mejn.ik, plastičen, rjav, viseč s terenom	mejn.ik betonski bel dvignjen, viseč s terenom, izstopajoč iz terena	mejn.ik betonski svetlo rumen, dvignjen, pokončen	mejn.ik betonski bel dvignjen, viseč s terenom, izstopajoč iz terena	mejn.ik betonski svetlo rumen, dvignjen, viseč s terenom
					
mejn.ik plastičen horizontalna glava, zabito do tal	mejn.ik, plastičen, srednje višine, viseč s terenom	mejn.ik, plastičen, plitev, rumen, viseč s terenom	mejn.ik plastičen, rumen, viseč s terenom	mejn.ik betonski svetlo rumen, dvignjen, viseč s terenom	mejn.ik betonski bel dvignjen, pokončen, izstopajoč iz terena
					
bela obroba kvadratna, črni sektorji kroga, bel križ	okrogla črna z belo piko	brez obrobe, diagonalni sektorji, črno bela	brez obrobe, kvadrat, črn, bel križ	bela obroba kvadratna, črni sektorji kroga, bel križ	okrogla črna z belo piko
20x20		10x10			
					
brez obrobe, diagonalni sektorji, črno bela	brez obrobe, kvadrat, črn, bel križ	brez obrobe, diagonalni sektorji, črno bela	brez obrobe, kvadrat, črn, bel križ	bela obroba kvadratna, črni sektorji kroga, bel križ	okrogla črna z belo piko
20x20		15x15			

Slika 38: Shematični prikaz tarč za testno polje TP1 (ista konfiguracija polj je bila tudi pri TP2 in TP3).

Analizo položajne točnosti določitve koordinat detajlnih točk glede na velikosti tarč in barve mejnikov smo izvedli na podlagi podatkov z dne 4. 5. 2021 in sicer za fotogrametrični blok približne prostorske ločljivosti 1,5 cm (približna višina leta 50 m)

Rezultati analize položajne točnosti določitve koordinat tarč ne kažejo značilne razlike glede na velikosti tarč (Preglednica 12). Prav tako ni značilnih razlik pri primerjavi položajne točnosti med tarčami, ki so natiskane na večjo podlago z belim robom ali brez roba (Preglednica 13). Pri tem pa velja poudariti, da smo opazili razlike pri vizualni interpretaciji, kjer so bolj vidne tarče oziroma lažje je določiti središče tarče, ki imajo bel rob (Slika 39).

Preglednica 12: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava po velikosti tarč.

Datum izmere	Višina leta	Velikost tarč	Testno polje	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
4. 5.2020	50 m	10 cm x 10 cm	TP1, TP2, TP3	0,006	0,002	0,003	0,007	0,007
4. 5.2020	50 m	15 cm x 15 cm	TP1, TP2, TP3	0,005	0,004	0,003	0,007	0,007
4. 5.2020	50 m	20 cm x 20 cm	TP1, TP2, TP3	0,007	0,004	0,003	0,008	0,009

Preglednica 13: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava tarč z belim robom in brez.

Datum izmere	Višina leta	Tip tarče	Testno polje	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
4. 5.2020	50 m	Beli rob	TP1, TP2, TP3	0,006	0,004	0,003	0,007	0,008
4. 5.2020	50 m	Ni belega roba	TP1, TP2, TP3	0,006	0,004	0,003	0,007	0,008



Slika 39: Primer tarče z belim robom TP326 – črn krog z belim križem, velikost tarče 20 cm x 20 cm (levo) in primer tarče brez belega roba TP332 – bel križ na črni podlagi, velikost tarče 20 cm x 20 cm (desno)

Pri primerjavi položajne točnosti določitve koordinat točk glede na vrsto oziroma barvo označbe z industrijsko izdelanimi oznakami prav tako ni značilnih razlik, z izjemo že omenjenih rjavih mejnikov, ki jih na fotografijah nismo vedno prepoznali – od šest označb smo prepoznali le dve (Preglednica 14).

Preglednica 14: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava glede na vrsto/barvo industrijske označbe.

Datum izmere	Višina leta	Velikost tarč	Testno polje	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
4. 5.2020	50 m	Rumena oznaka	TP1, TP2, TP3, TP4 in TP5	0,007	0,005	0,005	0,009	0,010
4. 5.2020	50 m	Bela oznaka	TP1, TP2, TP3, TP4 in TP5	0,009	0,006	0,008	0,011	0,014
4. 5.2020	50 m	Rdeča oznaka	TP1, TP2, TP3, TP4 in TP5	0,007	0,008	0,009	0,010	0,013
4. 5.2020	50 m	Modra oznaka	TP1, TP2, TP3, TP4 in TP5	0,008	0,006	0,003	0,010	0,011
4. 5.2020*	50 m	Rjava oznaka	TP1, TP2, TP3	0,021	0,028	0,009	0,035	0,036

Tudi primerjava prepoznavnosti industrijsko izdelanih označb na različnih podlagah, to je na travi (testna polja TP1, TP2 in TP3), na travi ob robniku (testno polje TP4) in na makadamu (testno polje TP5), ne kaže značilnih razlik med položajno točnostjo (Preglednica 15).

Preglednica 15: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE koordinat detajlnih točk, določenih na podlagi georeferenciranih fotografij, v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kandrše: primerjava glede na podlago industrijske označbe.

Datum izmere	Višina leta	Podlaga	Testno polje	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
4. 5.2020	50 m	Travnata površina	TP1, TP2, TP3	0,008	0,007	0,006	0,010	0,012
4. 5.2020	50 m	Travnata površina, ob robniku	TP4	0,008	0,012	0,010	0,014	0,017
4. 5.2020	50 m	Makadamska površina	TP5	0,014	0,008	0,008	0,016	0,018

Na podlagi rezultatov analiz, ki smo jih izvedli na delovišču Kandrše, smo za nova študijska območja zmanjšali nabor oznak mejnikov za preučevanje primernosti označevanja detajlnih točk za namene uporabe UAV fotogrametrije v katastru.

Medtem ko se je izkazalo, da so lastno izdelane tarče (poimenovali smo jih tudi »fotogrametrične tarče«), ki nimajo prevelikih belih površin na mestu osrednje oznake, vse primerne, so se pri industrijsko izdelanih oznakah bolje izkazale tiste, ki imajo večji barvni kontrast glede na barvo terenske podlage. Ker se v katastrski praksi v Sloveniji uporablja rumena mejna oznaka, smo za nadaljnjo študijo med industrijsko izdelanimi oznakami uporabili le standardne rumene oznake.

5 Rezultati: Študijsko območje Budanje

Delovišče Budanje je bilo izbrano, ker je bila na tem območju izvedena nova izmera, dodatna posebnost delovišča pa je tudi izredno razgiban teren. Za razliko od delovišča Kandrše smo lahko nadalje na študijskem območju Budanje preverili tudi možnost uporabe UAV-fotogrametrije za primer slabše prostorske ločljivosti fotografij, to je za primer višje višine leta daljinsko vodenega letalnika. Posebnost tega delovišča nadalje je, da smo UAV zajem podatkov izvedli z daljinsko vodenim letalnikom, ki je imel vgrajen sprejemnik GNSS z možnostjo določevanja položaja letalnika z izmero RTK.

5.1 Študijsko območje Budanje: načrt izvedbe in vzpostavitev geodetske mreže

Podobno kot v primeru študijskega območja Kandrše smo najprej vzpostavili geodetsko mrežo na podlagi statične izmere GNSS, ki smo jo izvedli 23. 2. 2021. Koordinate točk smo izračunali s programsko rešitvijo *Leica Infinity 2.3.2*, kjer smo določili v državnem koordinatnem sistemu D96-17/TM (Slika 40), upoštevajoč efemeride IGR in model troposfere VMFwGPT2 (Preglednica 16). Za izmero GNSS smo uporabili sprejemnike *Leica GS15* in *Leica GS18*.



Slika 40: Geodetska mreža na delovišču Budanje (podlaga Google Zemlja).

Preglednica 16: Koordinate točk geodetske mreže Budanje (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).

Točka	e [m]	n [m]	H [m]	σ_e [m]	σ_n [m]	σ_h [m]	h [m]
BU1	418.388,58	82.148,94	240,4724	0,0001	0,0001	0,0003	286,3309
BU2	418.478,58	81.963,05	211,3598	0,0001	0,0001	0,0003	257,2121
BU3	418.195,85	81.896,85	183,2371	0,0001	0,0001	0,0003	229,0676
BU4	418.183,16	82.076,92	196,7526	0,0001	0,0001	0,0003	242,5931

Na delovišču smo za UAV fotogrametrično izmero vzpostavili mrežo oslonilnih in kontrolnih točk. Zaradi izredno razgibanega terena smo za namene tahimetrične izmere oslonilnih točk in kontrolnih ter detajlnih točk geodetsko mrežo razširili s točkami T1 do T6 (Slika 41). Opazovanja smo izvedli s hitro statično izmero GNSS.



Slika 41: Razširjena geodetska mreža na delovišču Budanje (podlaga Google Zemlja).

Za izračun koordinat točk, opazovanih s hitro statično metodo izmere GNSS smo uporabili programsko rešitev *Leica Infinity 2.3.2*, upoštevajoč model troposfere VMFwGPT2, kot dano točko pa smo prevzeli točko BU1 (Preglednica 17).

Preglednica 17: Koordinate točk razširjene geodetske mreže Budanje, tudi oslonilne točke (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).

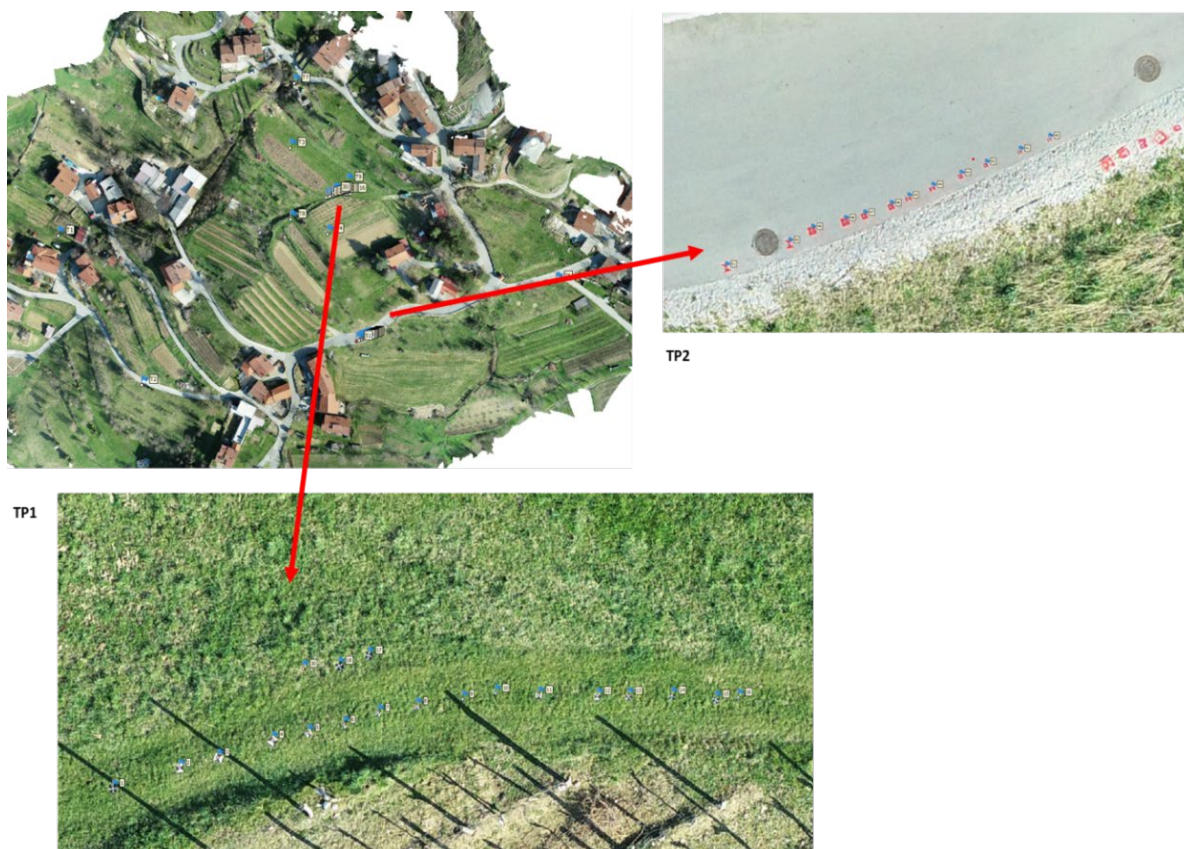
Točka	e [m]	n [m]	H [m]	σ_e [m]	σ_n [m]	σ_h [m]	h [m]
BU1	418.388,5775	82.148,9439	240,4724	dano	dano	dano	286,3309
T1	418.132,8987	81.991,3829	174,8216	0,0003	0,0005	0,0012	220,6537
T2	418.190,7493	81.892,6447	181,8602	0,0004	0,0005	0,0012	227,6901
T3	418.294,0947	82.049,2292	208,9997	0,0004	0,0005	0,0011	254,8457
T4	418.320,3163	81.992,2325	210,2401	0,0003	0,0004	0,0009	256,0842
T5	418.367,3338	81.937,2742	202,0110	0,0006	0,0011	0,0018	247,8547
T6	418.479,5618	81.961,2074	211,3784	0,0004	0,0005	0,0012	257,2307

Poleg že vzpostavljene mreže točk, katerim koordinate smo določili s hitro statično metodo izmere GNSS, smo vzpostavili dodatne oslonilne in kontrolne točke, katerih koordinate smo določili s tahimetrično izmero in navezavo na vzpostavljeno mrežo geodetskih točk. Tahimetrično izmero smo izvajali s tahimetrom *Leica MultiStation MS50*. Ocena natančnosti koordinat točk tahimetrične izmere izhaja iz natančnosti koordinat izmere GNSS in natančnosti tahimetra in je ocenjena na 2 mm po posamezni koordinatni osi.

Na delovišču smo, da bi preverili vidnost in prepoznavnost različnih oznak točk detajla pri fotogrametrični obdelavi podatkov UAV, vzpostavili tudi dve testni polji, kjer smo vzpostavili detajlne točke, ki smo jih označili z izbranimi fotogrametričnimi tarčami in industrijskimi oznakami za geodetske ali katastrske točke (Slika 42) – eno testno polje je bilo na travnati površini, drugo pa na delno makadamski delno asfaltni površini, kjer smo ponovno uporabili maske fotogrametričnih tarč za nanos bele in rdeče barve (Slika 43).



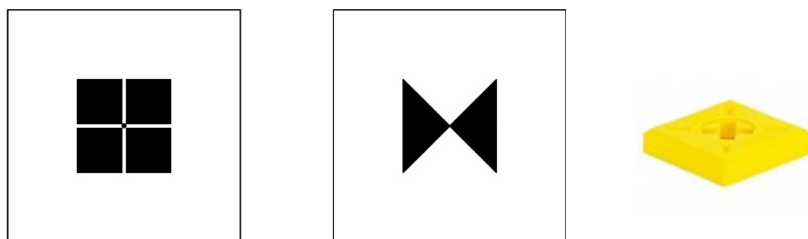
Slika 42: Razpored oslonilnih in kontrolnih točk na študijskem območju Budanje ter dve testni polji z detajlnimi točkami.



Slika 43: Testni polji s tarčami na delovišču Budanje.

Oznake detajlnih točk smo izbrali na podlagi predhodnih analiz (poglavje 2) in tudi izsledkov delovišča Kandrše, kjer so se pravzaprav vse izbrane oblike fotogrametričnih tarč izkazale za primerne. Na testnih poljih Budanje smo se omejili na fotogrametrične tarče (i) bel križ na črni

podlagi in (ii) diagonalna črno-bela polja, različnih velikosti, to je 10 cm x 10 cm, 15 cm x 15 cm in 20 cm x 20 cm. Dodatno smo obravnavali uveljavljeno oznako mejnikov v Sloveniji, to je mejnik z rumenim plastičnim pokrovom (Slika 44).



Slika 44: Izbrane oblike tarč za testiranje na študijskem območju Budanje.

Študijsko območje je bilo sicer izbrano zato, ker je bila na tem območju leta 2018 izvedena nova izmera, toda mnogo zemljiškokatastrskih točk ni bilo označenih, pri mnogih smo ugotovili, da so bile premaknjene zaradi nestabilnega terena, le mejnike, ki so položajno sovpadali z območji testnih polj (TP1 in TP2) pa smo vključili v analizo. Pregled nad zemljiškokatastrskimi točkami in načini oznake na terenu za delovišče Budanje je podan na sliki 45.



Slika 45: Približno območje snemanja in pregled označb zemljiškokatastrskih točk na študijskem območju Budanje.

Na delovišču Budanje smo posebej preučevali vpliv prostorske ločljivosti (višine leta) na položajno kakovost georeferenciranja fotogrametričnega bloka. Posebno pozornost smo namenili možnosti UAV fotogrametričnega snemanja na konstantni absolutni višini in na konstantni višini nad terenom, saj je območje zelo reliefno raznoliko.

5.2 Študijsko območje Budanje: izvedba snemanja

Za aerofotografiranje smo uporabili letalnik *DJI Phantom 4 RTK* s fotoaparatom FC6310, ki ima goriščno razdaljo 8,8 mm, velikost slikovnega senzorja 13,2 mm x 8,8 mm in geometrično ločljivost 20M pikslov. Aerofotografiranja smo izvedli z vzdolžnim preklopom med fotografijami 80 % in prečnim preklopom 70 % ter z dveh različnih višin nad terenom: 55 m in 110 m.

Na študijskem območju Budanje, prostorske razsežnosti približno 350 m x 300 m, smo v okviru aerofotografiranja z daljinsko vodenim letalnikom dne 18. 3. 2021 izvedli zajem podatkov za naslednje parametre leta:

- konstantna višina leta nad vzletiščem 55 m, s približno prostorsko ločljivostjo GSD 1,5 cm; nadirne fotografije;
- konstantna višina leta nad vzletiščem 110 m, s približno prostorsko ločljivostjo 3 cm; nadirne fotografije;
- višina leta konstantna nad DMR 55 m, s približno prostorsko ločljivostjo 1,5 cm; nadirne fotografije;
- višina leta konstantna nad DMR 110 m, s približno prostorsko ločljivostjo 3 cm; nadirne fotografije;
- višina leta konstantna nad DMR 110 m, s približno prostorsko ločljivostjo 3 cm; poševne fotografije.

Poleg aerofotografiranja smo na terenu izvedli tahimetrična opazovanja za namene določitve koordinat oslonilnih in kontrolnih točk (tarč v testnih poljih). Dodatno smo spremljali zunanje pogoje aerofotografiranja, kot so temperatura, hitrost in moč vetra, osvetljenost ter druge vremenske okoliščine.

5.3 Študijsko območje Budanje: obdelava podatkov

5.3.1 Študijsko območje Budanje: fotogrametrična obdelava in izdelava oblaka točk

Podatke posameznih aerofotografiranj smo izvrednotili, podobno kot v primeru delovišča Kandrše, s programsko opremo *Metashape* proizvajalca *Agisoft*. Osnovna obdelava je zajemala izravnavo fotogrametričnega bloka s postopkom grajenja strukture iz gibanja SfM (angl. *Structure from Motion*). Z izravnavo v postopku SfM smo za pridobitev georeferenciranih izdelkov vključili slikovne koordinate oslonilnih točk. Po končani izravnavi smo s postopki gostega slikovnega ujemanja MVS (angl. *Multi-View Stereo*) izdelali goste oblake točk. Obdelava je bila izvedena za dva primera, in sicer (i) z upoštevanjem meritev RTK na letalniku in upoštevanjem natančnosti določitve parametrov zunanje orientacije iz EXIF ter (ii) brez upoštevanja podatkov opazovanj RTK.

Oslonilne točke

Zaradi objektivnih razlogov, to je razgibanosti terena in možnosti signalizacije s fotogrametričnimi tarčami, razpored oslonilnih (OT) in kontrolnih točk (KT) ni bil idealen. Kot oslonilne točke so bile uporabljene štiri točke na vogalih območja UAV snemanja in ena točka na sredini, ostale točke so bile uporabljene kot kontrolne točke.

Kot oslonilne točke smo upoštevali točke T1, T2, T4, T6 in T7, kot kontrolne pa T3, T8 in T9. Glede na lego bi bila za oslonilno točko sicer primernejša T8 kot T4, vendar so se na T8 v vseh obdelavah pojavila večja odstopanja. Razpored prikazuje slika 46.



Slika 46: Razpored oslonilnih in kontrolnih točk na študijskem območju Budanje.

Vsi bloki so bili najprej obdelani z uporabo RTK meritev na letalniku. Na rezultate obdelav vplivajo apriori natančnosti določitve projekcijskih centrov in koordinat oslonilnih in kontrolnih točk, katerih položajno točnost smo ocenili z 1 cm. Natančnost položajev projekcijskih centrov, zapisana v EXIF fotografij (približno 1,5 cm za ravninski komponenti e in n položaja ter približno 2,5 cm v višinskem smislu), smo ocenili kot pretirano. Neodvisna ocena natančnosti ni realna zaradi neoptimalne razporeditve kontrolnih točk. V obdelavah blokov je uporabljena apriori natančnost določitve projekcijskih centrov:

- 1,8 cm po koordinatah e in n (za vse bloke)
- višinska natančnost 3 cm za bloke 1, 2, 3,
- višinska natančnost 3,5 cm za blok 4,
- višinska natančnost 4 cm za blok 5,

kjer sta imela bloka 4 in 5 že v EXIF slabšo natančnost določitve višine od 3 cm. Rezultati obdelav fotogrametričnih blokov so predstavljeni v preglednici (Preglednica 18).

Preglednica 18: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave, upoštevajoč RTK določevanje položaja letalnika – delovišče Budanje.

Datum izmere	Aerofotografiranje, višina leta	RMSE OT [m]			RMSE KT [m]		
		e	n	H	e	n	H
18. 3. 2021	55 m nad vzletiščem, nadirno snemanje (GSD ~1,5 cm), z RTK	0,005	0,008	0,004	0,008	0,003	0,003
	110 m nad vzletiščem, nadirno snemanje (GSD ~3 cm), z RTK	0,005	0,006	0,003	0,011	0,009	0,016
	55 m nad terenom (DMR), nadirno snemanje (GSD ~1,5 cm), z RTK	0,008	0,012	0,008	0,016	0,006	0,010
	110 m nad terenom (DMR), nadirno snemanje (GSD ~3 cm), z RTK	0,005	0,009	0,003	0,014	0,008	0,014
	110 m nad terenom (DMR), poševno snemanje 70° (GSD ~3 cm), z RTK	0,003	0,006	0,003	0,001	0,007	0,006

V vseh blokih smo dosegli pričakovana odstopanja na oslonilnih/kontrolnih točkah glede na prostorsko ločljivost fotografij, to je približno 1 x GSD za ravninski koordinati in 1,5 x GSD po višinski komponenti. Zanimivo, da so rezultati malenkost boljši pri letenju pri konstantni višini nad vzletiščem, a razlike niso značilne. S poševnimi posnetki na višini 110 m so rezultati nekoliko boljši, a vendar izboljšava ni značilna, zaključkov ne moremo potrditi tudi zaradi slabše razporeditve kontrolnih točk.

Podatke UAV-fotogrametričnega snemanja smo za študijsko območje Budanje obdelali tudi brez upoštevanja opazovanj RTK sprejemnika GNSS na letalniku (Preglednica 19).

Preglednica 19: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave, brez upoštevanja opazovanj RTK za določevanje položaja letalnika – delovišče Budanje.

Datum izmere	Aerofotografiranje, višina leta	RMSE OT [m]			RMSE KT [m]		
		e	n	H	e	n	H
18. 3. 2021	55 m nad vzletiščem, nadirno snemanje (GSD ~1,5 cm), brez RTK	0,008	0,006	0,010	0,014	0,002	0,006
	110 m nad vzletiščem, nadirno snemanje (GSD ~3 cm), brez RTK	0,005	0,004	0,004	0,017	0,009	0,009
	55 m nad terenom (DMR), nadirno snemanje (GSD ~1,5 cm), brez RTK	0,004	0,003	0,008	0,010	0,007	0,008
	110 m nad terenom (DMR), nadirno snemanje (GSD ~3 cm), brez RTK	0,003	0,003	0,005	0,010	0,008	0,018
	110 m nad terenom (DMR), poševno snemanje 70° (GSD ~3 cm), brez RTK	0,006	0,004	0,004	0,011	0,006	0,012

Pri primerjavi rezultatov izravnave fotogrametričnih blokov, kjer smo upoštevali opazovanja RTK sprejemnika GNSS na letalniku, z rezultati, kjer opazovanj RTK nismo upoštevali, ugotavljamo, da ni večjih razlik v položajni točnosti fotogrametričnih blokov, do manjših razlik prihaja v višinski komponenti, a ta odstopanja niso velika. Primerljiva prostorska točnost je pričakovana, saj smo uporabili iste oslonilne točke v obeh primerih izravnave fotogrametričnih blokov. Potrebne so dodatne raziskave glede vpliva števila oslonilnih točk na točnost fotogrametričnih izdelkov, če se upošteva opazovanja RTK sprejemnika GNSS na letalniku.

Dodatno smo obdelali še kombinacijo nadirnih in poševnih fotografij, kjer so rezultati podobni in ne moremo oblikovati posebnih zaključkov.

5.3.2 Študijsko območje Budanje: zajem koordinat detajlnih točk

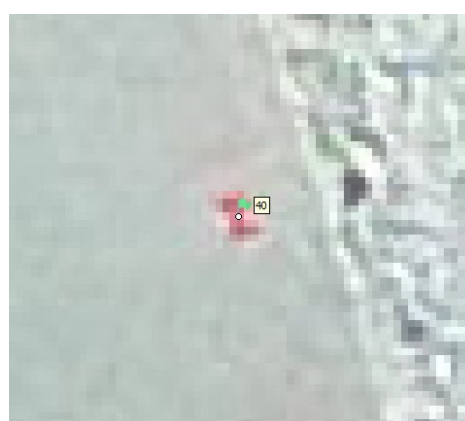
Za nadaljnje delo smo se osredotočili na podatke, ki smo jih fotogrametrično obdelali z upoštevanjem opazovanj RTK sprejemnika GNSS na letalniku. Tako pripravljene podatke smo nadalje uporabili za ročni oziroma pol-samodejni zajem podatkov o položaju točk tarč v testnih poljih (skupno 31). Koordinate detajlnih točk smo zajeli na temelju:

- prekrivajočih se georeferenciranih fotografij;
- ortofota, ki smo ga izdelali na temelju zajetih podatkov, ter
- georeferenciranega oblaka točk.

Metoda zajema in analize rezultatov so predstavljene že v poglavju, kjer predstavljamo rezultate za delovišče Kandrše. Za vsako detajlno točko smo torej izračunali odstopanja po koordinatnih sestavinah e , n in H ter opredelili vidnost tarče na fotografiji (Preglednica 20), računske podatke pa smo povezali s slikami tarč za lažjo analizo vidnosti tarč (Slika 47).

Preglednica 20: Rezultati analize položajne točnosti detajlnih točk na delovišču Budanje za podatke z dne 18. 3. 2021, višina leta 55 m nad vzletiščem.

Polygo	Point Numb	Easting (true)	Easting (meas)	E true-meas	dx2	Northing (true)	Northing (meas)	N true-meas	dy2	Height (true)	Height (meas)	Z true-meas	dz2	screenshot	visibility
TP1	1	418319,207	418319,200	0,007	4,8011E-05	82016,666	82016,661	0,005	2,0313E-05	256,364	256,358	0,006	3,2536E-05	capture_1.jpg	2
TP1	2	418321,002	418321,000	0,003	6,7029E-06	82017,189	82017,188	0,001	1,6282E-06	256,532	256,520	0,012	0,0001474	capture_2.jpg	2
TP1	3	418322,044	418322,047	-0,003	6,6306E-06	82017,454	82017,449	0,005	2,2868E-05	256,626	256,614	0,012	0,00014506	capture_3.jpg	2
TP1	4	418323,510	418323,507	0,003	1,1703E-05	82017,908	82017,904	0,004	1,3447E-05	256,772	256,774	-0,003	6,3908E-06	capture_4.jpg	2
TP1	5	418324,489	418324,485	0,004	1,6565E-05	82018,094	82018,091	0,003	7,6286E-06	256,859	256,845	0,014	0,00018879	capture_5.jpg	2
TP1	6	418325,450	418325,444	0,006	3,0537E-05	82018,292	82018,290	0,002	4,571E-06	256,956	256,946	0,010	0,00010504	capture_6.jpg	2
TP1	7	418326,380	418326,373	0,007	4,886E-05	82018,601	82018,600	0,001	1,0404E-06	257,034	257,023	0,011	0,00011712	capture_7.jpg	2
TP1	8	418327,409	418327,404	0,005	2,6409E-05	82018,768	82018,765	0,003	8,9341E-06	257,092	257,089	0,002	5,7264E-06	capture_8.jpg	2
TP1	9	418328,653	418328,646	0,006	4,0947E-05	82018,952	82018,949	0,003	8,4565E-06	257,166	257,144	0,022	0,00047163	capture_9.jpg	1
TP1	10	418329,544	418329,542	0,001	2,0938E-06	82019,113	82019,103	0,010	9,7812E-05	257,205	257,188	0,017	0,00029736	capture_10.jpg	1
TP1	11	418330,712	418330,710	0,002	4,1698E-06	82019,063	82019,062	0,001	9,4478E-07	257,274	257,267	0,007	4,6991E-05	capture_11.jpg	2
TP1	12	418332,295	418332,290	0,004	1,9634E-05	82019,031	82019,026	0,005	2,2363E-05	257,324	257,314	0,010	0,0001028	capture_12.jpg	2
TP1	13	418333,133	418333,126	0,006	4,1088E-05	82019,036	82019,033	0,003	2,209E-05	257,363	257,356	0,007	4,5725E-05	capture_13.jpg	2
TP1	14	418334,317	418334,309	0,008	6,7898E-05	82019,048	82019,037	0,008	5,7048E-05	257,449	257,437	0,012	0,00013654	capture_14.jpg	2
TP1	15	418335,496	418335,493	0,003	7,7228E-06	82018,950	82018,944	0,005	2,9387E-05	257,560	257,555	0,005	2,7857E-05	capture_15.jpg	2
TP1	16	418336,108	418336,104	0,004	1,8353E-05	82019,002	82018,996	0,006	4,0196E-05	257,605	257,590	0,015	0,0002165	capture_16.jpg	1
TP1	17	418326,111	418326,105	0,006	3,4117E-05	82020,084	82020,080	0,004	1,5492E-05	256,991	256,982	0,009	8,3741E-05	capture_17.jpg	2
TP1	18	418325,313	418325,309	0,004	2,0124E-05	82019,818	82019,813	0,005	3,025E-05	256,924	256,905	0,018	0,00033496	capture_18.jpg	2
TP1	30	418324,341	418324,313	0,028	0,00076934	82019,728	82019,697	0,031	0,0009773	256,781	256,788	-0,007	5,5577E-05	capture_30.jpg	0
TP2	40	418348,488	418348,496	-0,009	7,396E-05	81924,568	81924,573	-0,005	2,9257E-05	244,826	244,812	0,014	0,00018567	capture_40.jpg	1
TP2	41	418347,744	418347,750	-0,007	4,7431E-05	81924,269	81924,273	-0,004	1,7356E-05	244,715	244,696	0,019	0,00035461	capture_41.jpg	1
TP2	42	418346,893	418346,898	-0,005	2,5351E-05	81923,953	81923,961	-0,008	5,9598E-05	244,587	244,564	0,023	0,00052112	capture_42.jpg	2
TP2	43	418346,258	418346,267	-0,009	8,1631E-05	81923,689	81923,692	-0,003	9,0541E-06	244,487	244,479	0,008	6,1764E-05	capture_43.jpg	2
TP2	44	418345,546	418345,554	-0,007	5,392E-05	81923,400	81923,408	-0,008	6,9472E-05	244,377	244,376	0,001	6,3044E-07	capture_44.jpg	1
TP2	45	418344,940	418344,945	-0,006	3,0902E-05	81923,152	81923,162	-0,010	0,00010439	244,281	244,266	0,014	0,00020719	capture_45.jpg	2
TP2	46	418344,503	418344,513	-0,010	9,8525E-05	81922,966	81922,973	-0,007	4,4729E-05	244,208	244,226	-0,019	0,00034429	capture_46.jpg	2
TP2	47	418343,832	418343,841	-0,009	8,2828E-05	81922,742	81922,746	-0,004	1,7884E-05	244,090	244,087	0,003	7,8288E-06	capture_47.jpg	2
TP2	48	418343,351	418343,358	-0,008	5,7821E-05	81922,613	81922,618	-0,005	2,9257E-05	244,009	244,006	0,003	6,255E-06	capture_48.jpg	2



Slika 47: Primer tarče TP2, ki smo jo uvrstili med dobro vidno (2), TP40 pa med tarčo srednje vidljivosti (1).

Rezultati analize položajne točnosti koordinat detajlnih točk so posebej prikazani za primer:

- konstantne višina leta nad vzletiščem 55 m oziroma 110 m (Preglednica 21);
- konstantna višina leta nad terenom 55 m oziroma 110 m (Preglednica 22).

Preglednica 21: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Budanje, konstantna višina nad vzletiščem.

Datum izmere	Višina leta nad vzletiščem	Pristop zajema koordinat	Št. vidnih točk	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
18. 3. 2021	110 m	Fotografije	28*	0,016	0,011	0,027	0,019	0,033
	55 m	Fotografije	31	0,008	0,008	0,012	0,011	0,017
18. 3. 2021	110 m	Ortofoto	28*	0,018	0,012	0,009	0,022	0,023
	55 m	Ortofoto	31	0,009	0,010	0,007	0,013	0,015
18. 3. 2021	110 m	3D oblak točk	21* *	0,024	0,015	0,076	0,028	0,081
	55 m	3D oblak točk	30*	0,014	0,023	0,022	0,028	0,035

* Nekateri mejniki niso bili vidni (9, 10, 16 in 30)

** Nekateri mejniki niso bili vidni (9, 10, 16 in 30; 30-45)

Preglednica 22: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Budanje, konstantna višina nad terenom (DMR).

Datum izmere	Višina leta nad terenom	Pristop zajema koordinat	Št. vidnih točk	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
18. 3. 2021	110 m	Fotografije	28*	0,016	0,009	0,027	0,018	0,032
	55 m	Fotografije	31	0,015	0,007	0,016	0,016	0,023
18. 3. 2021	110 m	Ortofoto	28*	0,017	0,017	0,017	0,024	0,029
	55 m	Ortofoto	31	0,016	0,009	0,013	0,018	0,022
18. 3. 2021	110 m	3D oblak točk	21* *	0,032	0,018	0,055	0,036	0,066
	55 m	3D oblak točk	30*	0,026	0,018	0,019	0,032	0,037

* Nekateri mejniki niso bili vidni (9, 10, 16 in 30)

** Nekateri mejniki niso bili vidni (9, 10, 16 in 30; 30-45)

Rezultati analize položajne točnosti koordinat detajlnih točk, pridobljenih na podlagi primerjave koordinat ročnega zajema na georeferenciranih fotografijah, ortofotu in georeferenciranem oblaku točk, s koordinatami, določenih na podlagi neodvisnih tahimetričnih opazovanj (referenčne vrednosti), kažejo (Preglednica 21, Preglednica 22), da so ravninska položajna odstopanja v mejah pričakovanih in dopustnih odstopanj za namene zemljiškega katastra, do večjih odstopanj pa pride pri višinah v primeru, ko zajamejo podatke na podlagi georeferenciranega oblaka točk. Ugotovitve so podobne kot za delovišče Kandrše.

Posebej izpostavljamo, da nismo ugotovili značilnih razlik med rezultati, kjer smo uporabili UAV fotografije, zajete na konstantni višini nad vzletiščem, in rezultati, kjer smo uporabili UAV fotografije, zajete na konstantni višini nad terenom.

Pomembna ugotovitev nadalje je, da tudi v primeru nižje prostorske ločljivosti (približno 3 cm) še vedno lahko dosežemo zahtevano položajno točnost, ki jo določa zakonodaja na področju zemljiškega katastra – seveda ob upoštevanju vseh pravil kakovostnega UAV snemanja in obdelave podatkov, kot že predstavljeno v tem poročilu.

6 Rezultati: Študijsko območje Kompolje

Tretje delovišče je bilo v Posavju na Kompoljskem polju (k. o. Kompolje – 1382), ki je izrazito ravninsko območje z zanimivo parcelno strukturo in bližino vodnih površin. Na tem delovišču smo analizirali predvsem vpliv (i) višine leta in (ii) uporabe podatkov opazovanj GNSS RTK z anteno na letalniku na položajno točnost georeferenciranega oblaka točk in koordinat kontrolnih ter detajlnih točk. Dodatno smo preučevali možnosti optimizacije zajemanja podatkov linijskega objekta za primer cestnega odseka.

6.1 Študijsko območje Kompolje: načrt izvedbe in vzpostavitev geodetske mreže

Podobno kot pri študijskih območjih Kandrše in Budanje smo najprej vzpostavili geodetsko mrežo (Slika 48) na podlagi statične izmere GNSS, ki smo jo izvedli na isti dan, kot snemanje z daljinsko vodenim letalnikom, to je 21. 4. 2021. Pri sami izmeri GNSS smo imeli sicer težave z navezavo na stalno postajo Trebnje, kjer je omrežje zgeneriralo opazovanja le za satelitski sistem GPS. Koordinate točk smo izračunali s programsko rešitvijo *Leica Infinity 2.3.2*, kjer smo določili v državnem koordinatnem sistemu D96-17/TM, upoštevajoč efemeride esa-rapid in model troposfere VMFwGPT2 (Preglednica 23). Za izmero GNSS smo uporabili sprejemnike *Leica GS15* in *Leica GS18*.

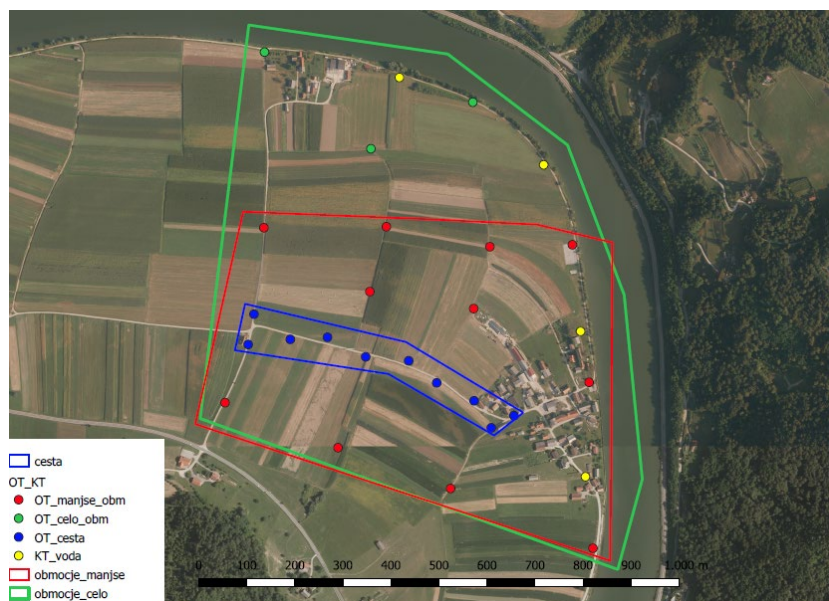


Slika 48: Geodetska mreža na delovišču Kompolje (podlaga Google Zemlja).

Preglednica 23: Koordinate točk geodetske mreže Kompolje (op. normalne višine H so izračunane iz elipsoidnih višin ob uporabi modela geoida SLO_VRP2016/Koper).

Točka	e [m]	n [m]	H [m]	σ_e [m]	σ_n [m]	σ_h [m]	h [m]
A	519.933,6506	100.144,2217	190,6290	0,0002	0,0003	0,0007	514,0048
B	520.224,7501	100.362,6089	186,0341	0,0002	0,0003	0,0007	519,7492
C	520.396,3702	99.932,6752	187,8969	0,0002	0,0003	0,0007	511,7675

Na delovišču smo za UAV fotogrametrično izmero vzpostavili mrežo oslonilnih in kontrolnih točk. Mreža oslonilnih in kontrolnih točk je bila prilagojena načrtovanim trem različnim območjem snemanja, kjer smo določili manjše območje za snemanje na višinah 55 m in 110 m, večje območje za poskusno snemanje večjega območja na višini 150 m ter območje linijskega objekta (Slika 49).



Slika 49: Shematičen prikaz območij snemanj z daljinsko vodenim letalnikom za delovišče Kompolje in predlog lokacij oslonilnih točk.

Lokacije oslonilnih in kontrolnih točk smo nekoliko prilagodili glede na konfiguracijo terena, kot je predstavljeno v nadaljevanju. Koordinate oslonilnih in kontrolnih točk smo določili na podlagi tahimetričnih opazovanj s tahimetrom *Leica MultiStation MS50*. Ocena natančnosti koordinat točk tahimetrične izmere izhaja iz natančnosti koordinat izmere GNSS in natančnosti tahimetra in je ocenjena na 2 mm po posamezni koordinatni osi.

70

Na delovišču smo, da bi preverili vidnost in prepoznavnost različnih oznak točk detajla pri fotogrametrični obdelavi podatkov UAV, vzpostavili tudi testno polje, kjer smo vzpostavili detajlne točke, ki smo jih označili z izbranimi fotogrametričnimi tarčami in rumeni industrijskimi oznakami za katastrske točke (Slika 50) – testno polje je vsebovalo tako točke na travnati, makadamski površini kot na asfaltni površini, kjer smo uporabili maske fotogrametričnih tarč za nanos bele in rdeče barve- skupno smo imeli na tem delovišču 27 detajlnih točk.



Slika 50: Razporeditev detajlnih točk na delovišči Kompolje.

Za oznake detajlnih točk smo uporabili tarče kot na delovišču Budanje, in sicer (i) bel križ na črni podlagi (v tem primeru v obliki kroga) in (ii) diagonalna črno-bela polja, različnih velikosti, to je 10 cm x 10 cm, 15 cm x 15 cm in 20 cm x 20 cm. Dodatno smo obravnavali uveljavljeno oznako mejnikov v Sloveniji, to je mejnik z rumenim plastičnim pokrovom.

Na delovišču Kompolje smo preučevali predvsem vpliv prostorske ločljivosti (višine leta) na položajno kakovost georeferenciranja fotogrametričnega bloka.

6.2 Študijsko območje Kompolje: izvedba snemanja

Za aerofotografiranje smo uporabili isti daljinsko vodeni letalnik, kot na delovišču Budanje, in sicer letalnik *DJI Phantom 4 RTK* s fotoaparatom FC6310, ki ima goriščno razdaljo 8,8 mm, velikost slikovnega senzorja 13,2 mm x 8,8 mm in geometrično ločljivost 20M pikslov. Aerofotografiranja smo izvedli z vzdolžnim preklopom med fotografijami 80 % in prečnim preklopom 70 % ter z dveh različnih višin leta nad terenom: 55 m in 110 m. Dodatno smo večje območje aerofotografirali na približni višini nad terenom 150 m. V vseh primerih smo uporabljali nadirni način snemanja. Na študijskem območju Kompolje smo v okviru aerofotografiranja z daljinsko vodenim letalnikom tako dne 21. 4. 2021 izvedli zajem podatkov za naslednje parametre leta:

- Manjše območje, višina leta 55 m s približno prostorsko ločljivostjo GSD 1,5 cm in višina leta 110 cm s približno prostorsko ločljivostjo GSD 3 cm; nadirne fotografije;
- Večje območje, višina leta 150 m s približno prostorsko ločljivostjo GSD 4,1 cm; nadirne fotografije;
- Območje ceste, višini leta 35 m in 45 m; nadirne fotografije;

Poleg aerofotografiranja smo na terenu izvedli tahimetrična opazovanja za namene določitve koordinat oslonilnih in kontrolnih točk (tarč v testnih poljih). Spremljali smo tudi zunanje pogoje aerofotografiranja, kot predstavljeno že na deloviščih Kandrše in Budanje.

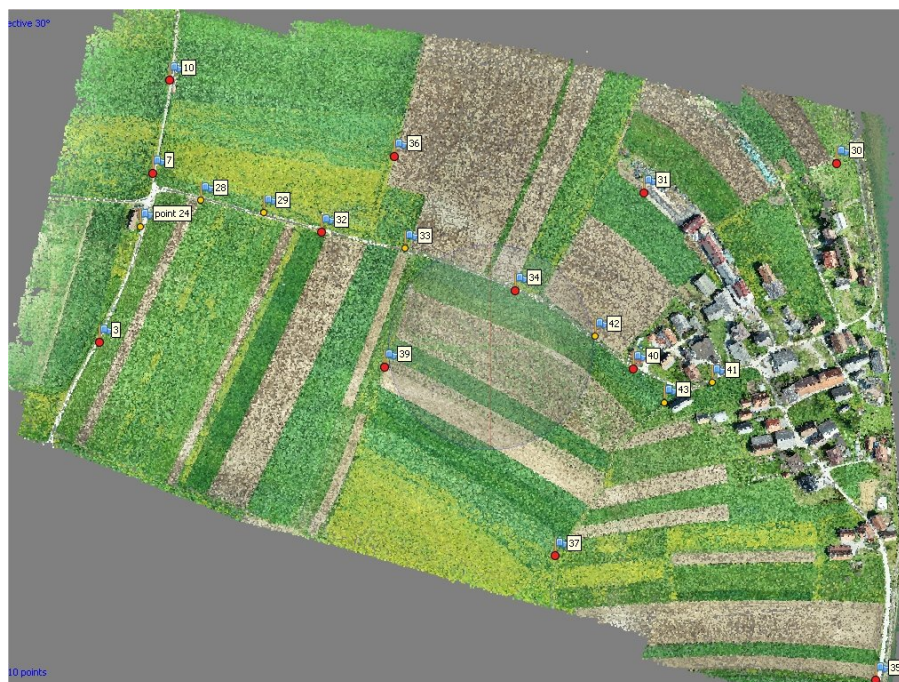
6.3 Študijsko območje Kompolje: obdelava podatkov

6.3.1 Študijsko območje Kompolje: fotogrametrična obdelava in izdelava oblaka točk

Podatke aerofotografiranj smo izvednotili s programsko opremo *Metashape* proizvajalca *Agisoft*. Osnovna obdelava je zajemala izravnavo fotogrametričnega bloka s postopkom grajenja strukture iz gibanja SfM (angl. *Structure from Motion*). V izravnavo v postopku SfM smo za pridobitev georeferenciranih izdelkov vključili slikovne koordinate oslonilnih točk. Po končani izravnavi smo s postopki gostega slikovnega ujemanja MVS (angl. *Multi-View Stereo*) izdelali goste oblake točk.

Oslonilne točke

Izravnavo fotogrametričnega bloka v postopku SfM je bila izvedena za dva primera, in sicer (i) z upoštevanjem meritev RTK na letalniku in upoštevanjem natančnosti določitve parametrov zunanje orientacije iz EXIF ter (ii) brez upoštevanja podatkov opazovanj RTK. Za oceno natančnosti orientacije fotogrametričnega bloka manjšega območja snemanja je bilo v izravnavo bloka fotografij vključenih 12 oslonilnih točk (rdeča barva na sliki 51) in 6 kontrolnih točk (rumena barva na sliki 51). Pred izdelavo gostega oblaka točk smo ponovili izravnavo bloka fotografij in vse referenčne točke uporabili kot oslonilne točke.



Slika 51: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na delovišču Kompolje – manjše območje snemanja (rdeče so oslonilne točke, rumene so kontrolne točke).

Rezultati fotogrametrične obdelave blokov za manjše območje so prikazani v preglednici (Preglednica 24). Presenetljivo je prišlo do velikih položajnih odstopanj v smeri koordinate n na točkah 41, 42 in 43 v bližini naselja, kar se kaže tudi na skupni oceni položajne kakovosti v obliki večjega položajnem odstopanju koordinat kontrolnih točk. Zanimivo je, da je ocenjena položajna točnost višja za primer fotografiranja z višine 110 m kot za fotografiranje z višine 55 m.

Pri primerjavi rezultatov izravnave blokov, kjer smo upoštevali opazovanja RTK, z rezultati, kjer smo upoštevali le oslonilne točke (iste) ugotavljamo, da je položajna natančnost oslonilnih točk primerljiva, pride pa do odstopanj pri kontrolnih točkah. Predvsem pri višinski komponenti ugotavljamo, da so odstopanja od referenčnih vrednosti manjša, če se uporablja opazovanja RTK letalnika. Razloga za odstopanje koordinat n v primeru, ko smo upoštevali opazovanja RTK letalnika, nismo odkrili.

Preglednica 24: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kompolje, manjše območje.

Datum izmere	Aerofotografiranje, višina leta	RMSE OT [m]			RMSE KT [m]		
		e	n	H	e	n	H
21. 4. 2021	55 m, nadirno snemanje (GSD ~1,5 cm), z upoštevanjem RTK	0,002	0,003	0,011	0,009	0,033	0,014
	110 m, nadirno snemanje (GSD ~3 cm), z upoštevanjem RTK	0,000	0,000	0,002	0,007	0,032	0,010
	55 m, nadirno snemanje (GSD ~1,5 cm), brez RTK	0,000	0,002	0,023	0,012	0,009	0,047
	110 m, nadirno snemanje (GSD ~3 cm), brez RTK	0,000	0,000	0,007	0,005	0,011	0,039

Ponovno se pokaže pravi pomen kontrolnih točk, na katerih je neodvisno ocenjena točnost izdelkov. Položajna odstopanja na kontrolnih točkah so primerljiva za 55 m in 110 m višine leta nad terenom. V vseh blokih smo dosegli pričakovana odstopanja na oslonilnih/kontrolnih točkah glede na prostorsko ločljivost fotografij, to je približno 1 x GSD za ravninski koordinati in 1,5 x GSD po višinski komponenti.

Upoštevanje opazovanj RTK pri izravnavi fotogrametričnih blokov, ob upoštevanju istih oslonilnih točk, ni znatno prispevala k položajni kakovosti ravninskih koordinat, kar pa ne moremo trditi za višine, kjer so odstopanja manjša. Nekoliko sicer izstopa položajno odstopanje kontrolnih točk po koordinatni komponenti n, a razloga za to odstopanje nismo uspeli odkriti.

Za širše območje delovišča Kopolje smo izvedli aerofotografiranje tudi za višino leta daljinsko vodenega letalnika nad terenom 150 m, kar ustreza približni prostorski ločljivosti 4,1 cm. V ta namen smo na terenu signalizirali 22 oslonilnih in kontrolnih točk (Slika 52). Območje je sicer razširjeno prvotno območje snemanja (razširitev v smeri severa).

Izravnavo fotogrametričnega bloka v postopku SfM je bila izvedena za (i) primer, ko smo upoštevali RTK meritve sprejemnika GNSS na letalniku, in za (ii) primer kot RTK opazovanj nismo upoštevali. V obeh primerih smo uporabili isto število oslonilnih in kontrolnih točk. Za oceno natančnosti orientacije fotogrametričnega bloka večjega območja snemanja je bilo v izravnavo fotogrametričnega bloka vključenih 13 oslonilnih točk (rdeča barva na sliki 52) in 9 kontrolnih točk (rumena barva na sliki 52). Pred izdelavo gostega oblaka točk smo ponovili izravnavo bloka fotografij in vse referenčne točke uporabili kot oslonilne točke.



Slika 52: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na delovišču Kopolje – večje območje snemanja (rdeče so oslonilne točke, rumene so kontrolne točke).

Pri primerjavi rezultatov izravnave blokov, kjer smo upoštevali opazovanja RTK, z rezultati, kjer smo upoštevali le oslonilne točke (iste) ugotavljamo, da je položajna natančnost oslonilnih točk primerljiva. Vsekakor ne moremo mimo opažanja, da so odstopanja na oslonilnih točkah nekoliko precenjena. Do odstopanj, podobno kot smo ugotovili na delovišču Budanje, pride predvsem pri višinski komponenti (Preglednica 25). Odstopanja na kontrolnih točkah so pričakovana glede na prostorsko ločljivost fotografij in so za ravninski komponenti znotraj 1 x GSD, za višinsko komponento pa pod 1,5 x GSD. Pri kontrolni točki ob vodni površini ni zaznati večjih odstopanj.

Preglednica 25: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kompolje, večje območje.

Datum izmere	Aerofotografiranje, višina leta	RMSE OT [m]			RMSE KT [m]		
		e	n	H	e	n	H
21. 4. 2021	110 m, nadirno snemanje (GSD ~4,1 cm), z upoštevanjem RTK	0,000	0,000	0,003	0,015	0,030	0,017
	110 m, nadirno snemanje (GSD ~4,1 cm), brez RTK	0,000	0,000	0,006	0,015	0,023	0,042

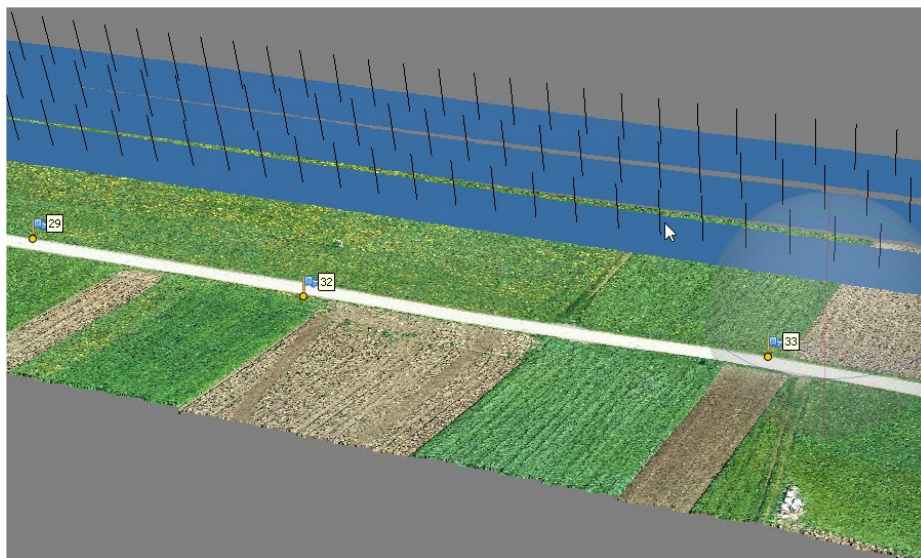
Odstopanja na kontrolnih točkah so pričakovana glede na prostorsko ločljivost fotografij in so za ravninski komponenti nižja od 1 x GSD, za višinsko komponento pa nižja od 1,5 x GSD. Pri kontrolni točki ob vodni površini ni zaznati večjih odstopanj.

Za primer manjšega linijskega objekta, to je cestnega odseka, smo izvedli še aerofotogrametrično snemanje v pasovih, in sicer za višini 35 m in 45 m, za katera smo izvedli skupno izravnavo. Na terenu smo signalizirali 11 oslonilnih in kontrolnih točk (Slika 53).



Slika 53: Razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk na delovišču Kompolje – območje linijskega objekta (rdeče so oslonilne točke, rumene so kontrolne točke).

Prvotna zamisel je bila, da cesto posnamemo v enem pasu na dveh različnih višinah. Zaradi omejitev programske opreme je bila cesta vsakič posneta v treh pasovih (Slika 54). Za namene analize položajne točnosti fotogrametričnega bloka smo izvedli izravnavo vseh treh pasov aerofotogrametričnega snemanja za višini leta 35 m in 45 m ter skupno izravnavo vseh treh pasov aerofotogrametričnega snemanja.



Slika 54: Aerofotografiranje ceste na delovišču Kompolje – območje linijskega objekta, snemanje na vsaki višini je bilo izvedeno v treh pasovih.

Izravnavo fotogrametričnega bloka v postopku SfM je bila izvedena z upoštevanjem meritev RTK na letalniku in upoštevanjem natančnosti določitve parametrov zunanje orientacije iz EXIF. Za oceno natančnosti orientacije fotogrametričnih blokov je bilo v izravnavo v postopku SfM vključenih 7 oslonilnih točk (rdeča barva na sliki 52) in 4 kontrolnih točk (rumena barva na sliki 52). Slabost blokov je bila, da so se oslonilne točke na začetku in koncu bloka videle le na 2-3 fotografijah. Na skrajnih koncih bloka bi bilo priporočljivo opraviti še krajša prečna preleta in s tem pridobiti dodatno število fotografij.

V preglednici (Preglednica 26) so podani rezultati izravnave fotogrametričnih pasov z upoštevanjem opazovanj RTK sprejemnika GNSS na letalniku, in sicer za (i) aerofotografije, zajete na približni višini leta 35 m, (ii) aerofotografije, zajete na približni višini leta 55 m, ter za (iii) aerofotografije, zajete na približni višini leta 35 m in 55 m (skupna izravnavo). V vseh primerih smo upoštevali isto razporeditev oslonilnih in kontrolnih točk.

Preglednica 26: Položajne točnosti fotogrametričnih blokov, ocenjene na podlagi izravnave – delovišče Kompolje, območje linijskega objekta.

Datum izmere	Aerofotografiranje, višina leta	RMSE OT [m]			RMSE KT [m]		
		e	n	H	e	n	H
21. 4. 2021	35 m, nadirno snemanje (GSD ~1 cm), z upoštevanjem RTK	0,000	0,000	0,008	0,012	0,008	0,007
	45, nadirno snemanje (GSD ~1,2 cm), z upoštevanjem RTK	0,000	0,000	0,005	0,013	0,007	0,016
	35 m in 45 m, nadirno snemanje, z upoštevanjem RTK	0,000	0,000	0,009	0,012	0,008	0,006

Odstopanja slikovnih koordinat na kontrolnih točkah v nekaterih primerih presegajo velikost piksla. Pri tem velja poudariti, da je prišlo tudi na nekaterih oslonilnih točkah do večjih odstopanj (T42), prav tako pri kontrolnih točkah, kjer je bilo na primer največje odstopanje pri točki T34, in sicer 0,020 m, kar presega velikost piksla.

Za zaključke glede priporočil snemanja linijskih objektov so potrebne nadaljnje raziskave, pomembno pa je vsekakor poudariti, da morajo biti oslonilne in kontrolne točke enakomerno prostorsko porazdeljene vzdolž celotnega pasu snemanja.

6.3.2 Študijsko območje Kompolje: zajem koordinat detajlnih točk

Za nadaljnjo analizo smo uporabili rezultate obdelave fotogrametričnih blokov, ki smo jih zajeli na dveh različnih višinah leta na prvotnem manjšem območju. V ta namen smo iz gostega oblaka točk izdelali digitalni model površja (DMP) v obliki poligonske 3D mreže in ortofoto s prostorsko ločljivostjo, ki je ustrezala prostorski ločljivosti aerofotografij. Tako pripravljene podatke smo nadalje uporabili za ročni oziroma pol-samodejni zajem podatkov o položaju točk tarč v testnih poljih (skupno 21). Pri tem smo se osredotočili le na podatke fotogrametrične izravnave, kjer smo upoštevali opazovanja RTK sprejemnika GNSS na letalniku. Koordinate detajlnih točk smo zajeli na temelju:

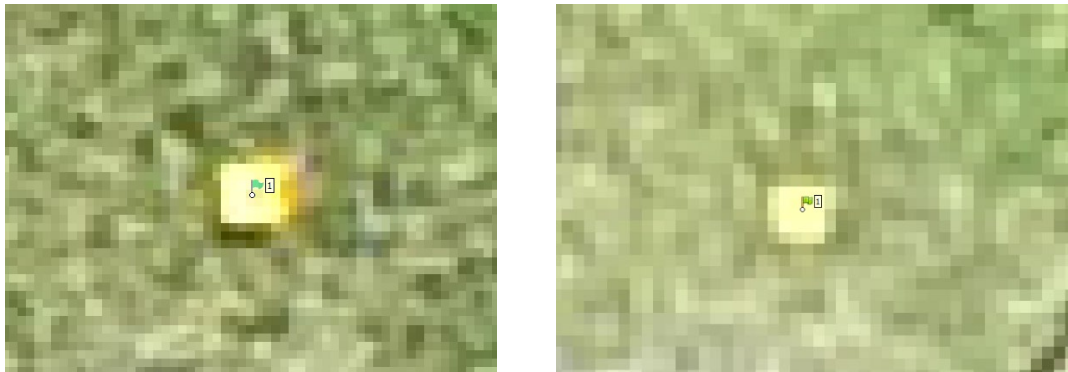
- prekrivajočih se georeferenciranih fotografij;
- ortofota, ki smo ga izdelali na temelju zajetih podatkov, ter
- georeferenciranega oblaka točk.

76

Metoda zajema in analize rezultatov so predstavljene že v poglavju, kjer predstavljamo rezultate za delovišče Kandrše. Za vsako detajlno točko smo torej izračunali odstopanja po koordinatnih sestavinah e , n in H ter opredelili vidnost tarče na fotografiji (Preglednica 27), računske podatke pa smo povezali s slikami tarč za lažjo analizo vidnosti tarč (Slika 55).

Preglednica 27: Rezultati analize položajne točnosti detajlnih točk na delovišču Kompolje za podatke z dne 21. 4. 2021, višina leta 55 m.

Polygo	Point Numb	Easting (true)	Easting (meas)	E true-meas	dx2	Northing (true)	Northing (meas)	N true-meas	dy2	Height (true)	Height (meas)	H true-meas	dz2	screenshot	visibility
TP1	1	519969,006	519969,031	-0,025	0,00060787	100235,588	100235,608	-0,020	0,00038095	235,423	235,463	-0,039	0,0015563	capture_1.jpg	1
TP1	2	519968,983	519969,009	-0,026	0,00069059	100236,428	100236,449	-0,021	0,00044062	235,404	235,422	-0,018	0,00031919	capture_2.jpg	2
TP1	4	519969,446	519969,467	-0,021	0,00043945	100236,283	100236,298	-0,015	0,00022943	235,381	235,405	-0,024	0,00055333	capture_4.jpg	2
TP1	5	519969,130	519969,148	-0,018	0,00032002	100237,117	100237,131	-0,014	0,00019307	235,383	235,412	-0,029	0,00081413	capture_5.jpg	2
TP1	6	519969,652	519969,671	-0,019	0,00037291	100237,032	100237,052	-0,020	0,00041812	235,369	235,379	-0,010	0,0001056	capture_6.jpg	2
TP1	8	519970,017	519970,041	-0,024	0,00057581	100237,426	100237,448	-0,022	0,00049217	235,315	235,323	-0,009	7,6213E-05	capture_8.jpg	2
TP1	9	519969,781	519969,795	-0,014	0,00019592	100238,024	100238,038	-0,014	0,00018873	235,350	235,351	-0,001	5,1409E-07	capture_9.jpg	2
TP1	11	519970,172	519970,184	-0,012	0,00014938	100238,223	100238,234	-0,011	0,00012259	235,295	235,291	0,004	1,3271E-05	capture_11.jpg	2
TP1	12	519969,966	519969,982	-0,016	0,00026037	100238,815	100238,833	-0,018	0,00032725	235,326	235,340	-0,014	0,00018893	capture_12.jpg	2
TP1	13	519970,439	519970,458	-0,019	0,00037947	100239,355	100239,369	-0,014	0,00019413	235,259	235,278	-0,019	0,00035453	capture_13.jpg	2
TP1	14	519970,158	519970,174	-0,016	0,00025265	100239,779	100239,794	-0,015	0,00022892	235,314	235,336	-0,022	0,00047589	capture_14.jpg	2
TP1	16	519970,447	519970,467	-0,020	0,00041927	100240,498	100240,511	-0,013	0,00016931	235,293	235,311	-0,018	0,00032447	capture_16.jpg	2
TP1	17	519970,951	519970,969	-0,018	0,00032562	100241,004	100241,018	-0,014	0,00019665	235,250	235,282	-0,032	0,00103375	capture_17.jpg	2
TP1	18	519972,303	519972,314	-0,011	0,00011052	100243,528	100243,546	-0,018	0,00031737	235,155	235,205	-0,050	0,00254036	capture_18.jpg	1
TP1	19	519974,982	519974,996	-0,014	0,00018849	100254,204	100254,215	-0,011	0,00011505	234,979	234,989	-0,010	0,00010636	capture_19.jpg	1
TP1	20	519966,612	519966,624	-0,012	0,00013287	100249,030	100249,030	-0,007	4,7087E-05	235,258	235,286	-0,028	0,00078115	capture_20.jpg	1
TP2	22	519978,605	519978,622	-0,017	0,00030576	100248,657	100248,669	-0,012	0,0001441	234,881	234,892	-0,011	0,00012643	capture_22.jpg	2
TP2	23	519979,282	519979,302	-0,020	0,00038142	100248,537	100248,552	-0,015	0,0002359	234,867	234,876	-0,009	7,3874E-05	capture_23.jpg	1
TP2	24	519979,756	519979,775	-0,019	0,00034812	100248,466	100248,480	-0,014	0,00020627	234,863	234,867	-0,004	1,4769E-05	capture_24.jpg	2
TP2	26	519980,249	519980,249	0,000	4,84E-10	100248,351	100248,351	0,000	1,21E-10	234,854	234,854	0,000	3,1684E-08	capture_26.jpg	2
TP2	27	519980,731	519980,731	0,000	9,61E-10	100248,268	100248,268	0,000	1,21E-10	234,847	234,847	0,000	1,4516E-07	capture_27.jpg	2



Slika 55: Primer tarče, označene s klasičnim mejnim znamenjem na fotografiji, zajeti na približni višini 55 m (levo) in višini 110 m (desno).

Rezultati analize položajne točnosti koordinat detajlnih točk (Preglednica 28) so ponovno pokazali, da ob ustreznem izboru parametrov leta, snemanja in fotogrametrične obdelave podatkov lahko zagotovimo tudi ciljno položajno kakovost detajlnih točk.

Preglednica 28: Srednja odstopanja po koordinatnih oseh in RMSE pri zajemu koordinat na podlagi georeferenciranih fotografij, ortofota in 3D oblaka točk v primerjavi z referenčnimi vrednostmi – delovišče Kompolje, z upoštevanjem opazovanj RTK.

Datum izmere	Višina leta nad vzletiščem	Pristop zajema koordinat	Št. vidnih točk	Odstopanja [m]			RMSE [m]	
				d _e	d _n	d _H	RMSE _{e,n}	RMSE _{e,n,H}
21. 4. 2021	110 m	Fotografije	21	0,014	0,018	0,023	2,3	3,3
	55 m	Fotografije	21	0,018	0,015	0,021	2,3	3,1
21. 4. 2021	110 m	Ortofoto	21	1,1	0,8	2,2	1,4	2,6
	55 m	Ortofoto	21	2,0	1,3	1,8	2,4	3,0
21. 4. 2021	110 m	3D oblak točk	15*	1,3	1,7	4,9	2,1	4,9
	55 m	3D oblak točk	15*	2,3	1,0	3,2	2,5	4,1

* Nekateri mejniki niso bili vidni (20, 22, 23, 24, 26, 27)

Rezultati analize položajne točnosti koordinat detajlnih točk, pridobljenih na podlagi primerjave koordinat ročnega zajema na georeferenciranih fotografijah, ortofotu in georeferenciranem oblaku točk, s koordinatami, določenih na podlagi neodvisnih tahimetričnih opazovanj (referenčne vrednosti), kažejo (Preglednica 28), da so ravninska položajna odstopanja v mejah pričakovanih in dopustnih odstopanj za namene zemljiškega katastra, do večjih odstopanj pa pride pri višinah v primeru, ko zajamejo podatke na podlagi georeferenciranega oblaka točk. Ugotovitve so podobne kot za delovišča Kandrše in Budanje.

Podobno kot za primer delovišča Budanje, tudi za delovišče Kompolje ugotavljamo, da lahko v primeru slabše prostorske ločljivosti (približno 3 cm) še vedno dosežemo zahtevano položajno točnost, ki jo določa zakonodaja na področju zemljiškega katastra – seveda ob upoštevanju vseh pravil kakovostnega UAV snemanja in obdelave podatkov, kot že predstavljeno v tem poročilu.

7 Ocena primernosti uporabe UAV fotogrametrije v katastru in priporočila

Na temelju rezultatov projektne naloge smo oblikovali usmeritve oziroma priporočila za uporabo fotogrametrične izmere mejnikov z uporabo daljinsko vodenih letalnikov. Priporočila podajamo v dveh delih, in sicer:

- Priporočila za uporabo daljinsko vodenih letalnikov za izmero katastrskih mejnikov (Naloga 4.1, Naloga 4.3); ter
- Priporočila za označevanje mej pravic na zemljiščih s stalnimi mejniki in začasnimi tarčami (Naloga 4.2) ter splošna priporočila za uporabo UAV-fotogrametrije v katastru (Naloga 4.3).

Priporočila oziroma usmeritve za uporabo UAV-fotogrametrije v katastru so oblikovana na osnovi pregleda literature, lastnih izkustev in rezultatov obsežnega eksperimentalnega dela, ki smo ga izvedli v okviru ciljnega raziskovalnega projekta V2-1934: *Ovrednotenje različnih načinov označitve katastrskih mejnikov za fotogrametrično izmero z letalnikom in analiza njihovega vpliva na položajno točnost oblaka točk in ortofota* iz obdobja 2019–2021. Osnovni cilj projekta je bil preučiti možnosti uporabe tako imenovane UAV fotogrametrije za namene zajema katastrskih prostorskih podatkov.

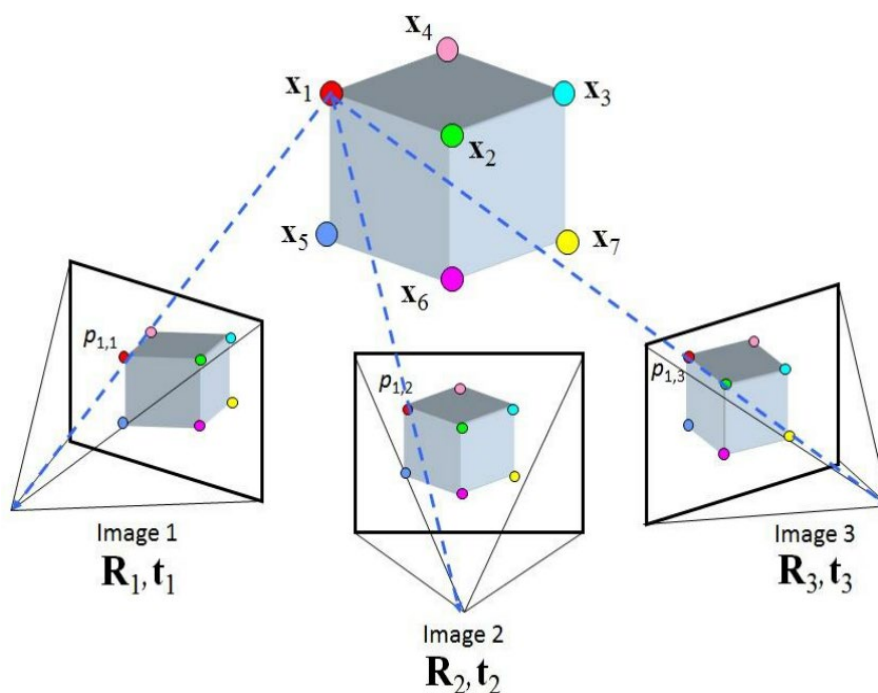
Poudarjamo, da so ta priporočila splošna. Izvajalcem projektov naj bi služila kot osnova pri načrtovanju in izvedbi projektov. Izvajalci, ki uporabljajo UAV fotogrametrijo za pridobivanje prostorskih podatkov, morajo dobro poznati teoretične osnove te tehnologije in poznati splošna pravila njene uporabe, imeti morajo tudi temeljna znanja iz klasične geodetske izmere, fotogrametrije in katastra. Zelo pomembno je, da se na koncu projekta oceni kakovost fotogrametričnih izdelkov v skladu z veljavnimi standardi in uveljavljeno metodologijo.

7.1 Kratek uvod

Pri uvajanju novih tehnologij in metod za zajem katastrskih prostorskih podatkov je treba preveriti njihovo zmožnost in potrebne pogoje za doseganje zahtevane točnosti izdelkov in opredeliti vse potrebne postopkovne korake. Fotogrametrični zajem katastrskih podatkov sicer ni novost v zemljiškem katastru, saj so se prvi projekti v Evropi in na širši mednarodni ravni pojavili že v 50-ih letih preteklega stoletja, predvsem v povezavi z razvojem tehnologij za optični zajem prostorskih podatkov z letali. Tudi v Sloveniji poznamo iz tega obdobja fotogrametrične projekte nove izmer. V raziskavi smo se ukvarjali z UAV fotogrametrijo, ki je dokaj nova tehnologija, in njeno uporabo za zajem parcelnih mejnikov.

Kratika UAV izhaja iz angleškega termina za daljinsko vodeni letalnik (angl. *unmanned aerial vehicle*, UAV), ki je nosilec senzorjev za zajem prostorskih podatkov. V nalogi smo se osredotočili na uporabo malih letalnikov, ki so opremljeni s fotoaparatom in merilnimi enotami za določanje položaja in orientacije. Ti so v vsakdanji praksi najbolj razširjeni. Fotografiranje se izvaja iz nižjih višin (do okvirno 150 m nad terenom), pri čemer se sosednje fotografije med seboj prekrivajo in jih v postopku obdelave obravnavano kot fotogrametrični blok.

Obdelava bloka fotografij poteka v programskih rešitvah, ki uporabljajo načela grajenja strukture iz gibanja SfM (angl. *structure from motion*) (Slika 56) in gostega slikovnega ujemanja (angl. *multi-view stereo*, MVS; *dense image matching*, DIM); področje se imenuje **SfM-MVS fotogrametrija**. Bistvo postopkov grajenja strukture iz gibanja, ki izhajajo iz področja računalniškega vida, je hkratno določanje parametrov notranje in zunanje orientacije fotoaparata ter geometrije 3D površja objekta (v obliki oblaka točk) iz zaporedja prekrivajočih se fotografij. UAV fotogrametrija je pod-področje SfM-MVS fotogrametrije, saj se osredotoča na obdelavo fotografij, ki so narejene z letalnikov. V splošnem pri SfM-MVS fotogrametriji ni pomembno, s katerih položajev fotografije zajamemo. Postopek obdelave fotografij v UAV fotogrametriji se razlikuje od tradicionalnih fotogrametričnih postopkov, zato UAV fotogrametrijo obravnavamo kot posebno fotogrametrično tehnologijo.



Slika 56: Koncept grajenja strukture iz gibanja (SfM).

(Vir: https://www.researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-process-is-illustrated-The-structure-in-the_fig2_269327935)

Priporočila se nanašajo na tehnični vidik UAV fotogrametrične izmere in temeljijo na analizi študija literature, rezultatih in ugotovitvah izvedenih testov v okviru te naloge ter naših izkušnjah s to tehnologijo. Poudarjamo, da ta priporočila niso dokončna, saj se področje UAV fotogrametrije tehnološko in aplikativno še pospešeno razvija.

7.2 Priporočila za fotogrametrično izmero mejnikov z uporabo daljinsko vodenih letalnikov

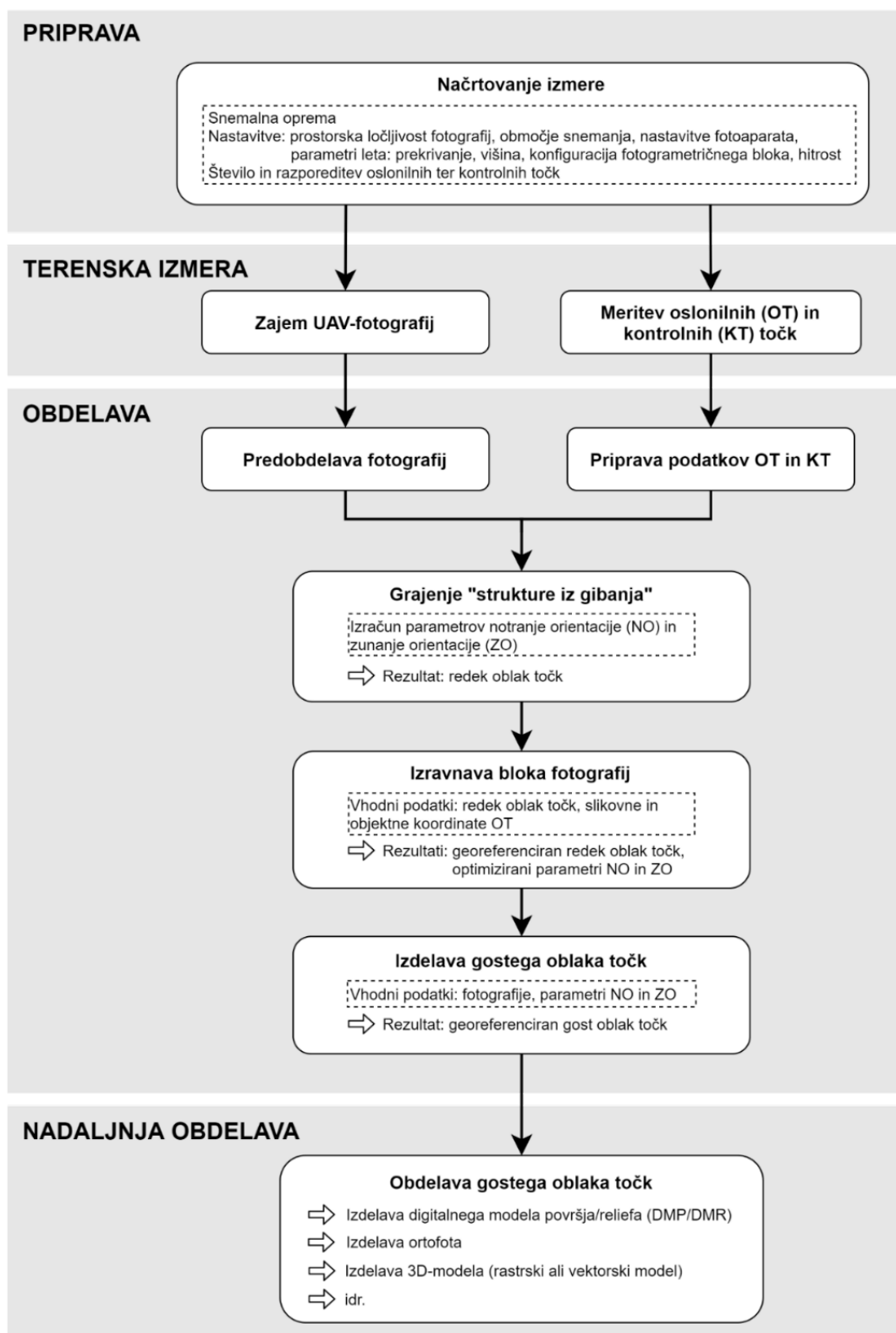
Kakovost izdelkov UAV fotogrametrije je rezultat številnih dejavnikov v celotnem postopku obdelave podatkov, ki jih je težko obravnavati ločeno. Analize kakovosti izdelkov se zato izvajajo eksperimentalno na testnih območjih, izvedba takšnih raziskav je zahtevna in dolgotrajna. V znanstvenih člankih so testna območja različnih velikosti, imajo različne topografske značilnosti, uporabljena je različna merilna oprema, prav tako metodologija obdelave podatkov itn. Rezultate raziskav je zato nemogoče neposredno primerjati. Kljub temu pa številne kakovostne objave različnih avtorjev v zadnjih letih omogočajo, da lahko iz njih izluščimo nekatera pomembna dognanja in predloge dobrih praks.

V tem delu priporočil smo strnili pomembne ugotovitve in izpostavili najbolj pomembne dejavnike, ki vplivajo na uspešnost izvedbe UAV fotogrametričnih projektov in visoko kakovost rezultatov. Najprej na kratko predstavimo in opišemo faze obdelave fotografij in vhodnih podatkov v UAV fotogrametriji, ne razlagamo pa podrobnosti, saj predpostavljamo, da izvajalci tehnologijo dobro poznajo. Nato predstavimo osnovna pravila za oceno kakovosti izdelkov, ki temeljijo na veljavnih standardih in uveljavljeni metodologiji. Sledijo pregled ključnih dejavnikov in opisi po posameznih vsebinah: prostorska ločljivost fotografij, konfiguracija fotogrametričnega bloka in prekrivanje fotografij, oslonilne in kontrolne točke, fotoaparati in kakovost fotografij. V zaključku strnemo ugotovitve in podamo nekaj predlogov za naprej.

7.2.1 Faze obdelave v UAV fotogrametriji

Na sliki 57 je prikazan splošen procesni model UAV fotogrametrije, ki v grobem obsega pripravljalne naloge, zajem fotografij in terenske meritve, osnovno obdelavo bloka fotografij po konceptu grajenja strukture iz gibanja ter nadaljnjo obdelavo do izdelave izdelkov (Drešček, 2021).

V fazi priprave izvedemo načrtovanje izmere, ki vključuje izbiro primerne snemalne opreme za zastavljen namen snemanja. Glede na namen uporabe zajetih fotogrametričnih podatkov se odločimo za ustrezen tip snemalnega sistema (na primer letalnike s fiksnimi krili/rotorji) s pripadajočimi senzorji za navigacijo in orientacijo letalnika ter enim ali več senzorji za zajem fotogrametričnih podatkov. Pri UAV fotogrametriji je to največkrat lažji nemerski fotoaparat za zajem posnetkov v spektru vidne svetlobe. V tej fazi postopka določimo tudi vhodne parametre snemanja, kot so območje snemanja, prostorska ločljivost, nastavitve fotoaparata (velikost odprte zaslone, čas ekspozicije, stopnja občutljivosti senzorja ISO ipd.) in parametre leta, ki bodo omogočili pridobitev rezultatov ustrezne kakovosti (prekrivanje fotografij, višina leta nad terenom, konfiguracija fotogrametričnega bloka, hitrost letalnika med letom). Hkrati v tej fazi določimo število oslonilnih točk in kontrolnih točk ter določimo njihovo razporeditev po snemalnem območju. Potrebne vhodne podatke vnesemo v program za načrtovanje letenja in fotografiranja (poleg komercialnih programov so na voljo tudi brezplačni in odprtokodni programi).



Slika 57: Splošen procesni model UAV fotogrametrije (Drešček, 2021).

Fazi načrtovanja sledi izvedba izmere na terenu, ki vključuje zajem fotogrametričnih podatkov, zajem dodatnih podatkov, kot so podatki o položajih oslonilnih in kontrolnih točk, ter druge kontrolne meritve.

Sledi obdelava zajetih podatkov, ki je sestavljena iz več korakov. Pred glavnim postopkom obdelave je treba v nekaterih primerih izvesti predobdelavo zajetih podatkov, kamor štejemo pretvorbo posnetkov v ustrezen datotečni format, radiometrično izboljšavo in maskiranje neželenih elementov na posnetkih. Prav tako uredimo podatke o položaju oslonilnih in kontrolnih točk s pretvorbo v ustrezno obliko ali s transformacijo v izbran prostorski referenčni koordinatni sistem. Sledi izvedba postopka grajenja strukture iz gibanja, v katerem s samodejnim postopkom iskanja ujemajočih točk med fotografijami hkrati določimo 3D-geometrijo zajetega območja, parametre notranje orientacije in približne parametre zunanje orientacije posnetkov v poljubnem prostorskem koordinatnem sistemu. Rezultat tega koraka obdelave je redek oblak točk. Temu koraku sledi izmera slikovnih koordinat oslonilnih in kontrolnih točk na posnetkih. Začetne vrednosti parametrov notranje in zunanje orientacije, slikovne koordinate oslonilnih točk in slikovne koordinate homolognih točk, iz katerih je bil izračunan prvotni redek oblak točk, so vhodni podatek v izravnavo bloka posnetkov. Z izravnavo bloka posnetkov pridobimo optimizirane parametre notranje in zunanje orientacije ter redek georeferenciran fotogrametrični oblak točk. Naslednji korak obdelave je postopek gostega slikovnega ujemanja (angl. *dense image matching*, DIM; oziroma angl. *multi-view stereo*, MVS), v katerem se izdelata gost georeferenciran fotogrametrični oblak točk.

Gost oblak točk je osnovni izdelek SfM-MVS postopka, ki ga nadalje lahko uporabimo za izdelavo drugih fotogrametričnih izdelkov, kot so digitalni model površja (DMP) in digitalni model reliefa (DMR), ortofoto, 3D-model prostora v rastrski ali vektorski obliki, kot so mreža nepravilnih trikotnikov TIN (angl. *triangulated irregular network*), ploskovni ali žični vektorski 3D-model itn. V vseh fazah obdelave je treba za doseg želenih končnih kakovosti izdelka spremljati kakovost vmesnih rezultatov: od izravnavo bloka posnetkov, gostega oblaka točk do kakovosti posameznih fotogrametričnih izdelkov.

7.2.2 Ocena položajne točnosti izdelkov UAV fotogrametrije

Za opis in oceno kakovosti prostorskih podatkov se uporablja mednarodni standard, sprejet tudi v Sloveniji, *SIST EN ISO 19157:2015 Geografske informacije – kakovost podatkov*. V tem standardu je kakovost prostorskih podatkov opredeljena kot stopnja, do katere značilnosti izdelkov in storitev ustrezajo predhodno določenim zahtevam. Standard vsebuje načela, kako opišemo kakovost prostorskih podatkov, opredeljuje elemente in merila kakovosti ter opisuje postopke vrednotenja in poročanja o kakovosti prostorskih podatkov. Ta standard je formalen in splošen, zato konkretnih postopkov in vrednosti o zahtevani stopnji kakovosti ne opredeljuje podrobno.

Standard opredeljuje šest osnovnih elementov kakovosti: popolnost, logična skladnost, položajna točnost, tematska točnost, časovna kakovost in element uporabnosti. Vsi osnovni elementi kakovosti, razen elementa uporabnosti, imajo definirane tudi podelemente. Tu se bomo osredotočili le na položajno točnost, ki je izpostavljena v kontekstu naše naloge.

Položajna točnost opredeljuje točnost položaja izbranega prostorskega podatka v okviru izbranega prostorskega (običajno referenčnega) koordinatnega sistema. Ločimo absolutno ali zunanjo točnost, relativno ali notranjo točnost in položajno točnost rastrskih podatkov.

Pomanjkljivo praktično uporabnost omenjenega standarda ISO nadgrajuje neformalen standard *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (2015), ki je prosto dostopen. Ta

standard podrobno opisuje postopke za ocenjevanje kakovosti ortofota ter digitalnih ravninskih in višinskih podatkov. Pri nas je za izvajalce obvezen pri izvedbi državnih fotogrametričnih projektov (npr. Ciklično aerofotografiranje Slovenije). Ta standard je namenjen izvedbi tradicionalnih fotogrametričnih in lidarskih projektov, vendar ga smiselno lahko uporabimo tudi za UAV fotogrametrične projekte.

APSRs standard kot osnovno mero za opis položajne točnosti opredeli **koren srednjega kvadratnega pogreška – RMSE** (angl. *root-mean-square error*). Določa razrede točnosti glede na mejne vrednosti RMSE, ki jim morajo izdelki ustrezati. Ravninska točnost je določena z izračunom vrednosti RMSE po posamezni koordinatni komponenti in v skupnem 2D-položaju ter z mejno vrednostjo intervala zaupanja s stopnjo zaupanja 95 %. Podobno je izračunana višinska točnost na območjih brez vegetacije, kjer se prav tako z izračunom RMSE in intervalom s 95-odstotno stopnjo zaupanja določi mejna vrednost odstopanja višin. Na poraščenih območjih je mejna vrednost odstopanja višin od prave vrednosti določena z vrednostjo 95. kvantila odstopanja.

Za oceno položajne točnosti (izračun *RMSE*) na kontrolnih točkah potrebujemo referenčne terenske koordinate in koordinate, izmerjene na izdelku (npr. digitalnem modelu reliefa oziroma površja, ortofotu, oblaku točk). V enačbah za izračun RMSE se v skladu s ISO standardom uporabljajo splošne oznake za prostorski koordinatni sistem (X, Y, Z).

Najprej izračunamo razlike koordinat po posameznih komponentah, pri čemer kot prave vrednosti uporabimo terensko izmerjene koordinat, ocenjene vrednosti so koordinate na izdelku;

$$\Delta x = x_{ocenjena} - x_{prava}, \Delta y = y_{ocenjena} - y_{prava}, \Delta z = z_{ocenjena} - z_{prava} \quad (1)$$

Iz teh razlik izračunamo RMSE po posamezni koordinatni komponenti, pri čemer je N število kontrolnih točk:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{N}}, RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{N}}, RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i^2}{N}}, \quad (2)$$

RMSE za 2D položaj (ravninski RMSE) izračunamo po enačbi:

$$RMSE_{2D} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (3)$$

Oziroma RMSE za 3D položaj izračunamo po enačbi:

$$RMSE_{3D} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2} \quad (4)$$

Za ortofoto lahko ocenimo le ravninsko točnost, saj ortofoto ne vsebuje višinskih podatkov. Kontrolne točke so običajno na terenu označene s tarčami, zato jih lahko dobro identificiramo tudi na ortofotu. V primeru ocene položajne točnosti oblaka točk enoličnosti parov točk ne moremo

zagotoviti, zato moramo za določitev položaja uporabiti interpolacijo, pri čemer moramo biti posebej pozorni na ustreznost metode.

Za ocenjevanje položajne točnosti izdelkov UAV fotogrametrije še ni standarda, ki bi vključeval posebnosti te tehnologije. V geodeziji se običajno predpostavlja, da so pogreški razporejeni v obliki normalne (Gaussove) krivulje, torej da v podatkovnem setu ni grobih in sistematičnih pogreškov. Pri UAV fotogrametriji pa se, zaradi uporabe nemerskih fotoaparátov in manj kakovostne opreme, lahko upravičeno pričakuje, da pogreški niso normalno porazdeljeni. V tem primeru je za oceno kakovosti izdelkov uporabiti večji vzorec točk oziroma ustrezne korekcijske faktorje in robustne statistične metode (Höhle in Höhle, 2009; Kosmatin Fras et al., 2016).

Poudarjamo, da je **edina objektivna metoda za oceno kakovosti izdelkov primerjava izdelka z referenčnimi podatki**. V praksi se dogaja, da izvajalci podajo oceno kakovosti izdelkov, ki temelji le na aposteriori oceni točnosti po izravnavi fotogrametričnega bloka. To ni pravi pokazatelj dejanske točnosti končnih izdelkov, ki je zelo verjetno slabša od teh vrednosti (Sanz-Ablanedo et al., 2018).

Za celostno razumevanje in opis kakovosti izdelkov je treba upoštevati, da ocena točnosti, ki temelji na vrednostih RMSE na kontrolnih točkah, ne odraža točnosti na detajlnih točkah izdelka, ki je praviloma slabša. Kontrolne točke so namreč dobro definirane in označene točke, detajlne točke pa so v naravi lahko slabše določljive. Zato je **za realno oceno kakovosti pomembno, da se preveri tudi položajno točnost na detajlih, ki nas v določenem projektu zanimajo** (npr. katastrskih mejnikov, parcelnih mejah, vogalih stavb ipd).

7.2.3 Pregled ključnih dejavnikov in njihovi vplivi na kakovost izdelkov

85

Veliko dejavnikov vpliva na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije, niso pa še vsi podrobno raziskani. Po vsebini jih lahko razvrstimo v tri glavne kategorije:

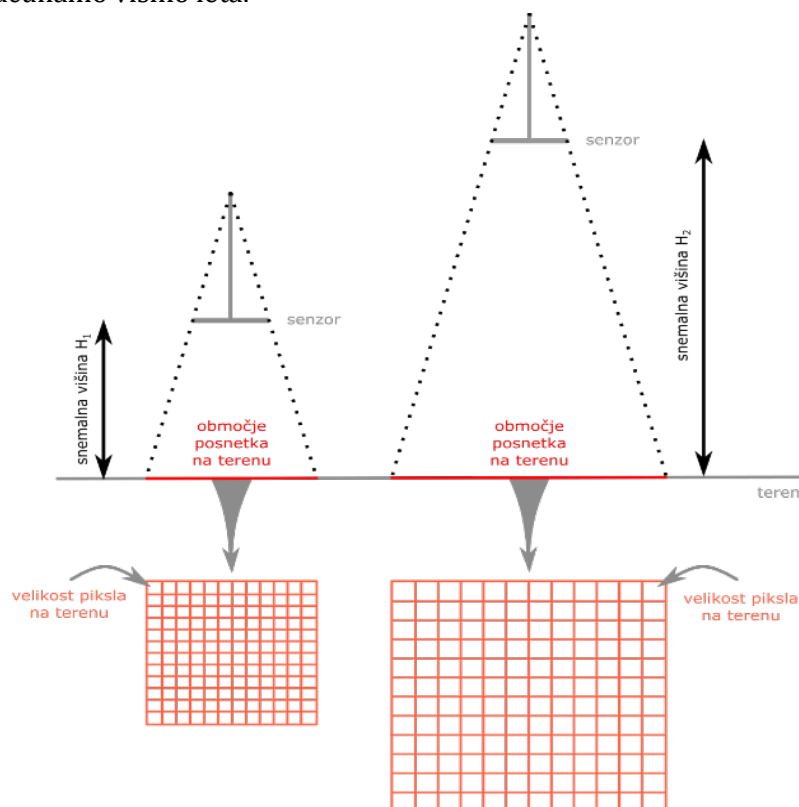
- (a) **dejavniki vpliva, ki so povezani z lastnostmi fotoaparata in kakovostjo fotografij:** uporaba nemerskih fotoaparátov, metode kalibracije, časovna stabilnost parametrov notranje orientacije, kakovost senzorja in objektiva, vrsta zaklopa, prostorska ločljivost in fotografska kakovost fotografij itn.;
- (b) **dejavniki vpliva, ki so povezani z načrtovanjem in izvedbo fotografiranja:** snemalna višina, vzdolžno in prečno prekrivanje fotografij, zgradba bloka fotografij itn.;
- (c) **dejavniki vpliva, ki so povezani s postopkom georeferenciranja:** pri posrednem načinu georeferenciranja predvsem število oslonilnih točk in njihova razporeditev na območju snemanja.

Dejavnike vpliva tu obravnavamo predvsem iz praktičnega vidika, na kaj moramo biti v fazi načrtovanja in pri izvedbi projektov čim bolj pozorni. **Podrobnejša analiza vpliva posameznih dejavnikov s pregledom iz literature je opisana v članku (Kosmatin Fras et al., 2020).** Tu smo dodali še nekaj novejših virov, ki v vmesnem poročilu in omenjenem članku niso bili obravnavani.

7.2.3.1 Prostorska ločljivost fotografij

Digitalno fotografijo sestavlja pravilna mreža (raster) pikslov. Prostorska ločljivost fotografije GSD (angl. *Ground Sample Distance*; slov. *dolžina talnega vzorca*) je pomemben dejavnik, ki vpliva na geometrično kakovost fotogrametričnih izdelkov. Definirana je kot razdalja v naravi med

središčema projekcije dveh sosednjih pikslov na tla in je odvisna od velikosti piksla na senzorju, goriščne razdalje objektiv in oddaljenosti med fotoaparatom ter objektom, ki ga fotografiramo (Slika 58). V literaturi avtorji kot pomemben parameter letenja velikokrat navajajo višino fotografiranja. Z vidika same izvedbe leta in fotografiranja je seveda to pomemben tehnični podatek, vendar le-tega izračunamo na osnovi želene prostorske ločljivosti fotografij in tehničnih karakteristik fotoaparata. Najprej moramo torej opredeliti prostorsko ločljivost, nato z ustreznim programom izračunamo višino leta.



Slika 58: Vpliv višine leta na prostorsko ločljivost fotografije ob uporabi iste fotografske opreme (Drešček, 2021).

Pri načrtovanju projekta je odločitev o prostorski ločljivosti fotografij eden ključnih parametrov. Prostorsko ločljivost moramo prilagoditi na eni strani velikosti najmanjših detajlov, ki jih želimo prepoznati in zajeti na fotografiji, in na drugi strani željeni geometrični točnosti izdelka. Objektov, ki so manjši od piksla, ne moremo prepoznati, po drugi strani pa tudi ni zagotovljeno, da bomo objekt velikosti piksla tudi ločili od okolice – govorimo o razločljivosti objektov. Na razločljivost pomembno vpliva oblika objekta in fotografska kakovost (pravilna osvetlitev, kontrast, svetlost, prisotnost senc, barve ipd.). Ko se torej odločamo o prostorski ločljivosti, moramo predvidevati oziroma realno oceniti tudi zunanje okoliščine za fotografiranje. Velikost piksla in uspešnost slikovnega ujemanja sta povezana, vendar ta povezava še ni dovolj raziskana.

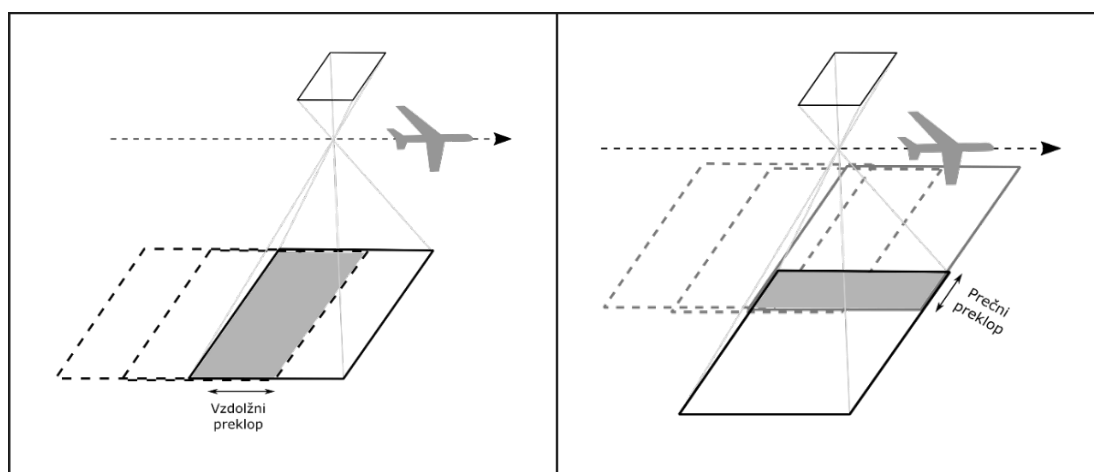
Povezava med prostorsko ločljivostjo fotografij in položajno točnostjo v splošnem ni linearna (boljša prostorska ločljivost ne pomeni apriori višje geometrične točnosti), ker GSD ni edini parameter, ki vpliva na končno kakovost. Predvsem pri fotografiranju z nižjih višin in posledično zelo majhni velikosti GSD to lahko negativno vpliva na slikovno ujemanje (npr. sence majhnih detajlov se hitro spreminjajo, kar ustvari različne svetlostne vrednosti istih detajlov). Kljub temu pa med velikostjo GSD in geometrično točnostjo lahko opazimo neko medsebojno odvisnost. Pri

načrtovanju lahko v grobem predvidevamo, da bomo lahko dosegli ravninsko točnost izdelkov velikosti okrog 1 GSD oziroma višinsko točnost izdelkov okrog 1,5 GSD, če imamo zelo kakovostno opremo in zelo skrbno izbrane ostale parametre in skrbno izvedeno obdelavo. Če pa imamo v celotnem procesu »šibke člene«, potem lahko pričakujemo, da bo točnost izdelkov 2 – 3 GSD, lahko seveda tudi slabše. Odločitev mora temeljiti na realnih okoliščinah, poznavanju opreme, ki jo uporabljamo, in izkušenj iz predhodnih projektov. Če gre za večji projekt, je primeren GSD smiselno najprej preveriti na manjšem območju.

Velikost GSD vpliva tudi na časovno izvedbo fotografiranja in čas obdelave, kar vpliva na stroške projekta. Manjši GSD pomeni nižjo višino fotografiranja (pri istem fotoaparatu), več snemalnih linij, več časa snemanja, več posnetkov, daljšo obdelavo itd. **Optimalen GSD je največji možni GSD, ki še izpolnjuje projektne zahteve (razločljivost detajlov za zajem in zahtevano geometrično točnost).**

7.2.3.2 Konfiguracija fotogrametričnega bloka in prekrivanje fotografij

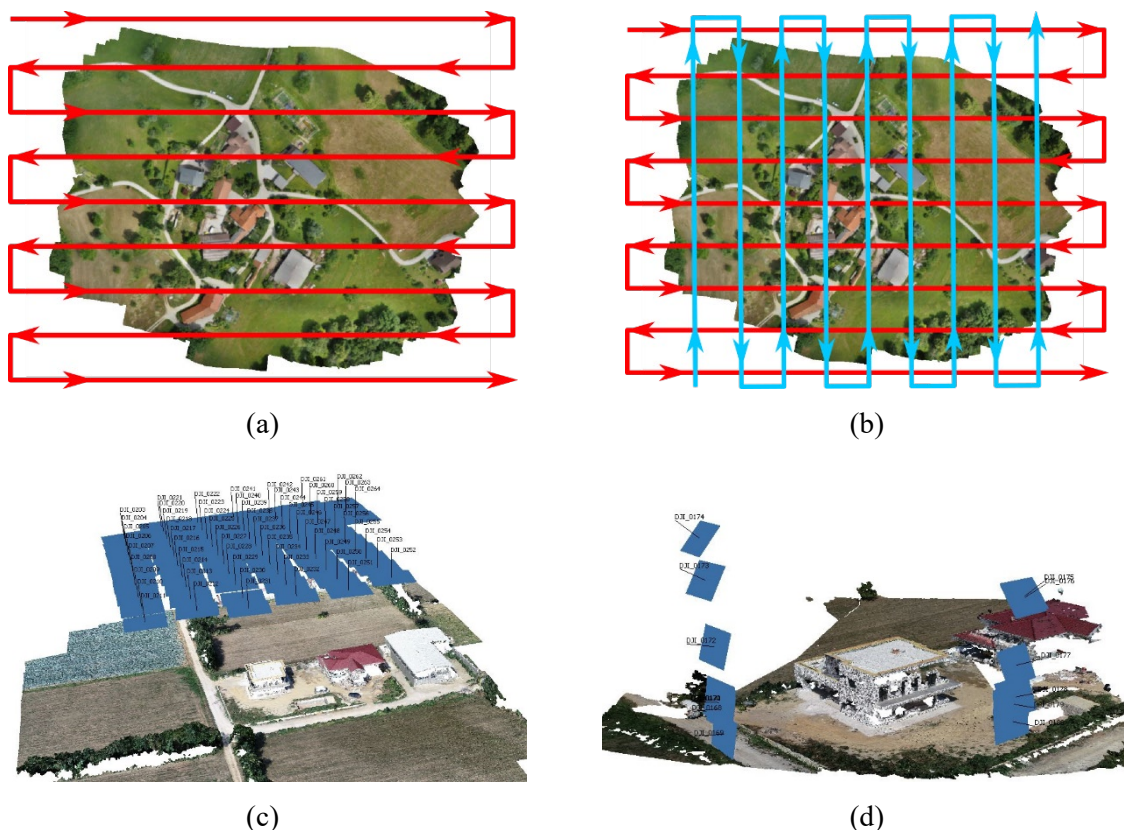
Konfiguracijo fotogrametričnega bloka opredeljuje oblika bloka ter razporeditev in usmerjenost fotografij v bloku. **Fotogrametrični blok je najpogostejše pravokotne oblike z več snemalnimi linijami.** Prekrivanje fotografij znotraj ene snemalne linije imenujemo vzdolžni preklop in ga izražamo v odstotkih prekrivajoče se površine. Prekrivanje fotografij med snemalnimi linijami imenujemo prečni preklop, ki ga enko izražamo v odstotkih prekrivajoče se površine (Slika 59).



Slika 59: Vzdolžno (levo) in prečno (desno) prekrivanje fotografij (Drešček, 2021).

Različne konfiguracije fotogrametričnega bloka so prikazane na sliki 60. Najbolj enostavna konfiguracija bloka je sestavljena iz snemalnih osi v eni smeri na isti višini (Slika 60a). V bloku so lahko dodane snemalne linije, ki so pravokotne na osnovno smer snemanja (prečne snemalne linije) in so običajno na drugi višini snemanja (Slika 60b). Takšna konfiguracija bloka po rezultatih nekaterih raziskav lahko izboljša orientacijo fotografij in zmanjša vpliv koreliranosti parametrov notranje orientacije pri uporabi postopka samokalibracije, vendar ta vpliv še ni dovolj raziskan (npr. kolikšna naj bo višinska razlika med smermi snemanja, kolikšen je odstotek izboljšanja ipd.). Takšen način podaljša čas fotografiranja, zaradi velikega števila fotografij je tudi čas obdelave daljši, kar seveda poveča stroške projekta.

Usmerjenost fotoaparata pri fotografiranju je navpično navzdol (nadirne fotografije; angl. *nadir images*; Slika 60c) ali v poševni smeri (poševne fotografije; angl. *oblique images*; Slika 60d). **Dodajanje poševnih fotografij v bloku je priporočljivo**, saj je utemeljeno že iz teoretičnih načel samokalibracije (boljši preseki slikovnih žarkov), kar potrjujejo tudi eksperimentalne raziskave. Fotogrametrični bloki so lahko tudi drugačnih oblik. Če gre za izmero izrazito dolžinskega objekta (npr. vzdolž ceste), je lahko blok sestavljen iz fotografij v eni ali nekaj linijah vzdolž območja.



Slika 60: Različni načini fotografiranja, ki določajo geometrijo fotogrametričnega bloka: (a) osnovna smer leta letalnika; (b) osnovnemu preletu letalnika je dodan prečni prelet na drugi višini; (c) geometrijo mreže sestavljajo zgolj nadirne fotografije; (d) nadirnim fotografijam dodamo poševne fotografije (Drešček, 2021).

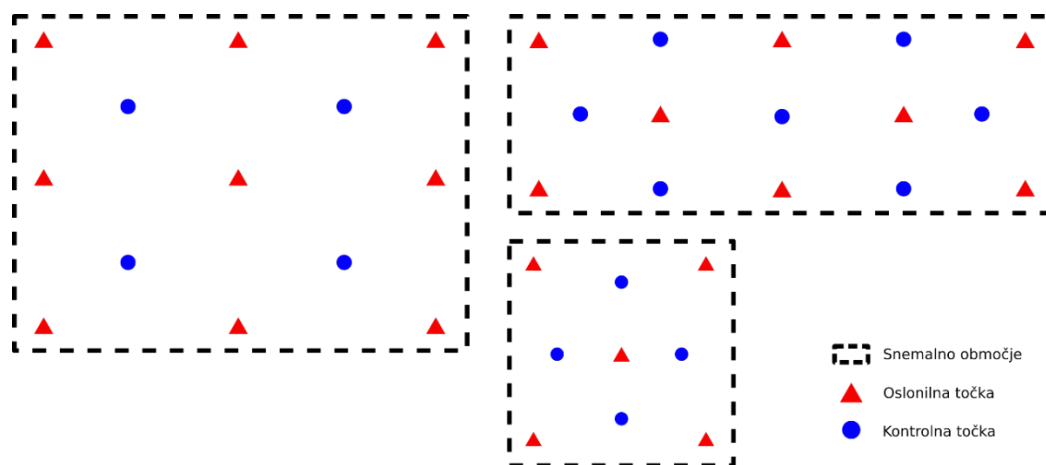
Pri načrtovanju leta je treba opredeliti **vzdolžni in prečni preklop** (vzdolžni % / prečni %). Številne raziskave so pokazale primernost izbire **80 % / 60–80 %**. Novejša raziskava (Gerke, 2020) je pokazala, da je treba izbrati večji prečni preklop (80 %), če je na območju fotografiranja veliko gozdnih in kmetijskih obdelovalnih površin, sicer s slikovnim ujemanjem ne dobimo dovolj veznih točk.

7.2.3.3 Oslonilne in kontrolne točke

Oslonilne in kontrolne točke so na terenu označene s tarčami. V okviru raziskave smo preizkusili tarče različnih oblik in velikosti. Oslonilne točke služijo za georeferenciranje fotogrametričnega bloka, kontrolne točke pa uporabimo za zunanjo oceno kakovosti izdelkov. Koordinate oslonilnih in kontrolnih točk izmerimo z ustrežno metodo in natančnostjo na terenu, izmerimo tudi njihove slikovne koordinate na fotografijah. **Okvirno pravilo za določitev koordinat oslonilnih in kontrolnih točk je, da naj bo njihova točnost vsaj trikrat (3x) boljša od zahtevane položajne točnosti izdelkov.**

V fazi načrtovanja projekta določimo tudi število oslonilnih in kontrolnih točk ter njihovo razporeditev znotraj fotogrametričnega bloka. Pri tem moramo upoštevati metodo georeferenciranja. V splošnem ločimo posredni in neposredni način georeferenciranja. V raziskavi smo se ukvarjali s posrednim načinom georeferenciranja, pri katerem se georeferenciranje izvede preko oslonilnih točk. Pri neposrednem načinu fotografije georeferenciramo na podlagi meritev položaja in orientacije (GNSS – globalni navigacijski satelitski sistem in INS – inercialni merilni sistem) med samim letom. Ta način zaenkrat še ne dosega dovolj visoke točnosti, ki jo na primer potrebujemo za katastrsko izmero. Če dodatno vključimo oslonilne točke, lahko tudi z njihovim manjšim številom dosežemo točnost izdelkov, ki je primerljiva s posrednim načinom georeferenciranja.

Veliko je objav avtorjev, ki so na eksperimentalni način preverjali potrebno število in razporeditev oslonilnih točk. Raziskave se razlikujejo po velikosti obravnavanih območjih, uporabljeni opremi, ločljivosti fotografij, konfiguraciji blokov ipd., zato jih ne moremo neposredno primerjati. Žal ni enostavnega načina ali enačbe, s katero bi lahko določili potrebno oziroma optimalno število oslonilnih točk. Iz rezultatov raziskav in tudi naših ugotovitev pa vseeno lahko izluščimo nekaj glavnih ugotovitev. Predvsem je pomembno, da so **oslonilne točke enakomerno razporejene po obodu in notranjosti območja** (Slika 61). Oslonilne točke znotraj območja pomembno vplivajo na izboljšanje višinske točnosti fotogrametričnega bloka. Tako ravninska in višinska točnost se ustalita pri določenem številu oslonilnih točk, pri čemer je potrebno število OT za višinsko točnost običajno višje.



Slika 61: Primeri enakomerne razporeditve oslonilnih in kontrolnih točk po snemalnem območju v odvisnosti od njegove velikosti in oblike. (Drešček, 2021)

Yu et al. (2020) so obravnavali tri različno velika območja, pri katerih so preverjali točnost izdelanih 3D oblakov točk in digitalnih modelov višin v odvisnosti od števila homogeno razporejenih oslonilnih točk. Za majhno (7 ha) ter srednje (39 ha) veliko območje so kot optimalno število določili 12 oslonilnih točk. Za veliko območje (342 ha) so kot optimalno določili 18 oslonilnih točk. V okviru naše raziskave (test Kandrše; višina fotografiranja 35 m nad terenom), smo določili kot optimalno število oslonilnih točk določili 8-10 točk za ravninsko točnost in 15–20 za višinsko točnost (Kosmatin Fras et al., 2020). Ti rezultati se skladajo z rezultati nekaterih drugih raziskav. Stöcker et al. (2020) priporočajo, da naj bo **najmanjše število oslonilnih točk 5** (4 točke v vogalih bloka in ena v sredini), tudi če je območje zelo majhno. Če fotografiranje izvedemo z letalnikom, ki ima RTK-podprto georeferenciranje, lahko dosežemo dobre rezultate tudi z manjšim številom oslonilnih točk.

Optimalno število oslonilnih točk je v različnih primerih lahko različno. Pomembno je tudi dejstvo, da z večjim številom oslonilnih točk lahko deloma kompenziramo sistematične pogreške samokalibracije (učinek kupole). Ti učinki so odvisni od kakovosti opreme (kakovost in geometrična stabilnost fotoaparata), kakovosti fotografij itd., zato je **priporočljivo, da kakovost svoje opreme predhodno preverimo. Kontrolne točke razporedimo predvsem po notranjosti bloka.** Njihovo število vpliva na stopnjo zaupanja ocene kakovosti izdelkov.

7.2.3.4 Fotoaparat in kakovost fotografij

Za fotografiranje z letalniki se najbolj pogosto uporabljajo nemerski kompaktni fotoaparati, ki pa imajo za fotogrametrične namene veliko pomanjkljivosti, kot npr. majhen senzor, pomični zaklop, geometrijsko nestabilnost parametrov notranje orientacije, nekateri so integrirani v ohišje letalnika ipd. Na tržišču so že dostopni merski fotoaparati, ki so primerni za namestitev na letalnik, vendar je njihova cena še dokaj visoka in njihova uporaba še ni razširjena.

V procesu obdelave potrebujemo **podatke o notranji orientaciji**, ki jih določimo s kalibracijo fotoaparata. Pri UAV fotogrametričnih projektih lahko uporabimo tri različne pristope za kalibracijo fotoaparata: predhodno kalibracijo s testnimi polji, samokalibracijo v okviru samega projekta, oziroma kombinacijo obeh pristopov. Po ugotovitvah nekaterih avtorjev predhodna kalibracija lahko izboljša kakovost končnih izdelkov, vendar pa zaradi potencialne nestabilnosti parametrov notranje orientacije (razen optične distorzije) takšen pristop v praksi ni zanesljiv in se zato tudi redkeje izvaja. Pri merskih fotoaparatih se izvede predhodna kalibracija oziroma potrebne podatke dobimo v kalibracijskem protokolu proizvajalca.

90

Pri uporabi nemerskih fotoaparatov se najbolj pogosto uporabi **metoda samokalibracije**, ki je že implementirana v postopkih SfM. Največja težava pri uporabi te metode je, kako zagotoviti dobre preseke slikovnih žarkov. Če karakteristike letalnika to omogočajo, je najboljša možnost, da se v blok fotografij vključi poševne posnetke. Če pa to ni možno, se geometrija bloka lahko utrdi s kombinacijo različnih konfiguracij fotografiranja, na primer snemanje na dveh višinah, snemanje v različnih smereh, kar smo omenili že pri konfiguraciji fotogrametričnega bloka. Pomembno je tudi, da se **goriščna razdalja objektiva na fotoaparatu med fotografiranjem ne spreminja** in tudi objekt fotografiranja se ne sme premikati. **Priporoča se izbira fotoaparata s fiksno goriščno razdaljo.**

UAV fotogrametrija temelji na zajemu podatkov o fizičnem površju Zemlje iz fotografij, zato je **dobra kakovost fotografij (ostrina, svetlost, kontrast, dinamični razpon itd.) temeljnega pomena.** Na kakovost fotografij vpliv veliko dejavnikov in sicer kakovost fotoaparata, nastavitve parametrov fotografiranja, svetlobne okoliščine (oblačno, sončno vreme) in drugi vremenski vplivi (predvsem veter). Za uspešnost samodejne določitve veznih točk in njihovega slikovnega ujemanja je zelo pomembna vsebina na fotografijah (vrsta pokrovnosti in pozidanosti območja). Prisotnost senc, zelo majhna velikost piksla ipd. lahko znatno poslabšajo kakovost slikovnega ujemanja (manjše število veznih točk in posledično slabša geometrična točnost ustvarjenega modela).

Pred fotografiranjem je treba **izbrati ustrezne vrednosti parametrov nastavitvev fotoaparata, to so predvsem čas osvetlitve, odprtino zaslone in občutljivost senzorja (ISO).** Da so slike ostre, povečamo globinsko ostrino z uporabo bolj zaprte zaslone, čas osvetlitve pa je določen z

elektroniko fotoaparata. Zaradi gibanja letalnika in tresljajev, ki so prisotni predvsem pri rotorskih letalnikih, so fotografije pogosto neostre, zato morajo biti časi osvetlitve kratki. Običajno se izbere fokusiranje na fotografsko neskončnost, s čimer zagotovimo ostrino fotografij ne glede na izbrano snemalno višino ali stopnjo razgibanosti terena. Poleg fotografskih nastavitvev na ostrino fotografij vplivajo tudi hitrost letalnika in višina leta, ter nagibi letalnika, ki nastanejo zaradi različnih zunanjih vplivov, na primer vetra. Pred obdelavo fotogrametričnega bloka je potrebno preveriti kakovost fotografij in odstraniti neostre fotografije, če imamo dovolj veliko prekrivanje, da s tem ne zmanjšamo geometrične stabilnosti bloka.

7.3 Usmeritve glede uporabe UAV fotogrametrije v katastru ter priporočila za označbe mejnikov za UAV fotogrametrično izmero

Pri načrtovanju projekta UAV fotogrametrične izmere v katastru je odločitev o prostorski ločljivosti aerofotografij eden ključnih parametrov, ki je v tesni povezavi z označevanjem oslonilnih točk in mejnikov ter njihove razločljivosti na aerofotografijah. Razločljivost je odvisna od kakovosti aerofotografij (osvetlitev, kontrast, svetlost, prisotnost senc), oblike objekta (standardizirana mejna znamenja in možnost izbire različnih sredstev za dodatno označevanje) in izbira okoliščin za terestrično izmero oslonilnih točk ter fotogrametrično izmero, na katere pa je mogoče vplivati.

Optimizacijski cilj UAV fotogrametrične izmere v katastru je zagotoviti takšne rezultate snemanja, ki bodo omogočili nedvoumno ali celo (pol)samodejno razpoznavanje oznak lomov mej na slikovnih gradivih. Kljub temu da se je kar nekaj tujih raziskav ukvarjalo z možnostjo uporabe UAV-fotogrametrije v katastru (Crommelinck et al., 2018; Stöcker et al., 2019a in 2019b; Stöcker et al., 2020; Šafář et al., 2021), nismo zasledili raziskav, ki bi se ukvarjala s položajno točnostjo določitve mejnikov ter s tem povezanim načinom označevanja teh detajlnih točk. Vsekakor je med navedenimi deli najbolj zanimivo delo čeških raziskovalcev (Šafář et al., 2021), ki so za namene optimizacije posodabljanja podatkov zemljiškega katastra vzpostavili več študijskih območij s polji za kalibracijo nemerskih kamer daljinsko vodenih letalnikov. Pri tem so se osredotočali na zajem pretežno vidnih katastrskih mej in podatkov (ograje, naravne topografske entitete, stavbe), manj pozornosti pa so namenili preučevanju možnosti zajema »nevidnih« parcelnih mej, ki jih je treba označiti z mejniki oziroma posebnimi tarčami.

Priporočamo, da se za UAV fotogrametrično izmero v katastru upošteva takšne dejavnike vplivanja na položajno točnost, ki omogočajo nekaj centimetrsko točnost izdelkov (koordinat ZK-točk). Lomi mej zemljišč se v stvarnosti označujejo s stalnimi oznakami na različne načine, oslonilne točke pa se označi začasno, za čas izvedbe fotogrametrične snemalne misije.

Glede označbe oslonilnih in kontrolnih točk je tudi nekaj tujih raziskav. Okvirno pravilo za določitev koordinat oslonilnih in kontrolnih točk je, da naj bo njihova položajna točnost vsaj 3x boljša od zahtevane položajne točnosti izdelkov. Za označbo točk za fotogrametrični zajem podatkov pa omenjamo delo Sanz-Ablanedo et al. (2018), ki izpostavljajo, da so tarče, ki na fotografijah merijo manj kot 10 x 10 pikslov, težko merljive. Slednje smo potrdili tudi v naši raziskavi, saj so bile tarče in industrijsko izdelane oznake v primerih, ko so bile manjše od 10 x 10 pikslov, slabo vidne, kar je še posebej ovira za (pol)samodejni zajem podatkov.

7.3.1 Označbe mejnikov za UAV fotogrametrično izmero

V okviru raziskave smo preučevali primernosti označb detajlnih točk (mejniov) za namene UAV fotogrametrično izmero v katastru, s poudarkom na določevanju položajev mejnikov, medtem ko zajema podatkov o rabi zemljišč v tej nalogi posebej nismo obravnavali. Pri študiji primernosti oziroma ustreznosti označevanja mejnikov smo tarče obravnavali v naslednjih skupinah (Slika 62):

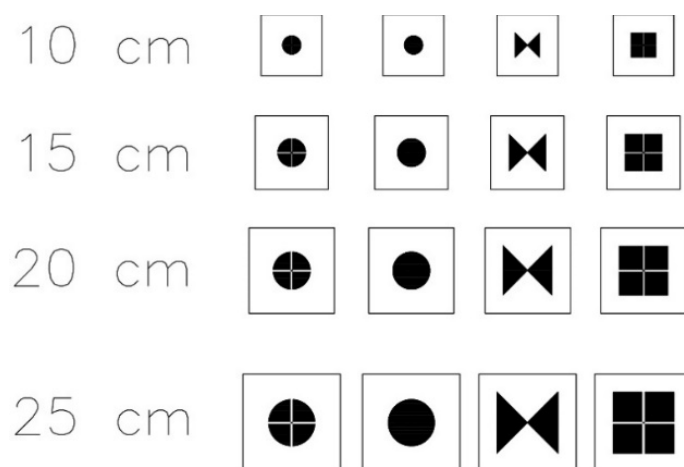
- Fotogrametrične tarče;
- Maske fotogrametričnih tarč za označitev točk na asfaltni ali betonski podlagi (Slika 63);
- Uveljavljena geodetska in katastrska mejna znamenja (industrijsko izdelane označbe).

Pri velikosti in obliki fotogrametričnih tarč (kot tudi mask za nanos tarč z razpršilom na trde površine) smo upoštevali priporočila:

- da so primerljive s standardno velikostjo mejnih znamenj v katastru 10 cm x 10 cm;
- da je treba uporabiti za oslonilne točke večje tarče, saj je od kakovosti določitve položajev oslonilnih točk odvisna kakovost rezultatov nadaljnje obdelave podatkov;
- da tarče ne smejo imeti prevelikega območja belega polja (nevarnost preosvetljenosti);
- da oblika (vzorec) tarče omogoča kakovostno določitev središča tarče na UAV-fotografiji.



Slika 62: Izbrane oblike tarč za testiranje – izsek iz testnega polja Kandrše.



Slika 63: Maske za vzpostavitev »tarč« na betonskih oziroma asfaltnih podlagah z nanosom barv na negative.

Pri strogem upoštevanju priporočil UAV fotogrametrične izmere in obdelave podatkov, kot predstavljeno v predhodnem poglavju, se je izkazalo, da so lastno izdelane tarče (tudi »fotogrametrične tarče«), ki nimajo prevelikih belih površin na mestu osrednje oznake, vse primerne, medtem ko so se pri industrijsko izdelanih oznakah bolje izkazale tiste, ki imajo večji barvni kontrast glede na barvo terenske podlage. Pri tem velja izpostaviti, da je bila vidnost tarč pri nižji prostorski ločljivosti ocenjena kot slaba.

Ker se v katastrski praksi v Sloveniji uporablja rumena mejna oznaka, smo posebej preučevali prepoznavnost rumenega mejnika na aerofotografijah. Rumena klasična oznaka mejnika se pri obravnavani kakovosti aerofotogrametričnega snemanja in izbrani prostorski ločljivosti aerofotografij (do 3 cm) izkaže kot prepoznavno in praviloma lahko dosežemo zahtevano položajno točnost koordinat mejnikov. Pri tem velja izpostaviti, da je bila vidnost rumenih mejnikov prav tako pri nižji prostorski ločljivosti ocenjena kot slaba.

Glede izbora tarč in izidov analiz, ki smo jih izvedli na relativno velikem vzorcu testiranih primerov tarč, prednostno priporočamo sicer uporabo tako imenovanih fotogrametričnih tarč za označbo detajlnih točk, velikost (minimalna dovoljena velikost) le-teh pa mora biti prilagojena izbrani prostorski ločljivosti aerofotografij. Kot predlagajo že Sanz-Ablanedo et al. (2018), morajo biti tarče na fotografijah velikosti najmanj 10 x 10 pikslov, sicer so težko prepoznavne in merljive.

7.3.2 Usmeritve/priložnosti glede uporabe UAV fotogrametrije v katastru

Želja stroke je, da se s sodobnimi tehnologijami optimizira zajem katastrskih podatkov. Z vidika optimizacije se seveda pojavi vprašanje, ali se s predlaganim pristopom UAV fotogrametrične izmere res časovno in finančno prihrani glede na klasično izvedbo katastrskih postopkov. Kakovostna izvedba UAV fotogrametrične izmere v katastru je seveda povezana s kakovostno vzpostavitevijo geodetske mreže (podobno kot pri klasični terenski izmeri), dodatno je potrebno vzpostaviti ustrezno mrežo oslonilnih in kontrolnih točk.

Glede reliefne razgibanosti terena priporočamo UAV fotogrametrično metodo izmere prednostno izvajati na enakomerno nagnjenih zemljiščih, oziroma ravnih zemljiščih, na katerih zagotovimo tudi enakomerno prostorsko porazdelitev tarč in vidnost mejnih oznak. Pri tem naj bodo mejne oznake prednostno izvedene v standardiziranih velikostih in barvah za lažje prepoznavanje na posnetkih. Kot predstavljeno, je priporočljivo, da se mejna znamenja označijo s posebej izdelanimi tarčami. Na ruralnih območjih zaradi boljše vidnosti tarč in primarnih mejnih oznak priporočamo predhodno izvedbo košnje, če gre za travniške površine. Če pa gre za njive, je priporočljivo, da za snemanje izberemo obdobje po spravilu pridelka. Glede na višino vegetacije, ki lahko značilno omeji vidnost oznak in tarč, je najboljše obdobje snemanja pred ozelenitvijo.

Za sam zajem koordinat mejnikov je optimizacija katastrskih postopkov nekoliko vprašljiva, toda pri zajemu podatkov za kataster moramo vedeti, da se velikokrat srečujemo tudi z vidnimi mejami (zidovi, ograje, stavbe). Z UAV fotogrametrijo nadalje dobimo pomensko zelo bogate podatke, ki med drugim omogočajo zajem podatkov o rabi zemljišč, izdelavo digitalnega modela reliefa ipd. S tega vidika je UAV fotogrametrična izmera zagotovo zelo zanimiva za večje projekte nove izmere in zemljiškega preurejanja, vključno s komasacijami. Veliko priložnosti uporabe UAV fotogrametrije za katastrske namene je nadalje pri večjih posegih v prostor, kjer potrebujemo podrobne topografske in katastrske podatke (geodetski načrt).

8 Viri in literatura

- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. (2017a). Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 143 (2). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206)
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. (2017b). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>
- ASPRS (2015). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 81, 3: A1–A26. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26>
- Bennett, R., van Oosterom, P., Lemmen, C., Koeva, M. (2020). Remote Sensing for land administration. *Remote Sensing*, 12 (15), 2497. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12152497>
- Bennett, R., Gerke, M., Cromptvoets, J., Ho, S., Schwering, A., Chipofya, M., Schultz, C., Biraro, M., Alemie, B., Wayumba, R., Crommelinck, S., Stöcker, C. (2017). Building third generation land tools: Its4land, smart sketchmaps, UAVs, Automatic feature extraction, and the geocloud. *Responsible Land Governance: Towards an Evidence Based Approach*. Washington DC: World Bank.
- Berk, S., Fabiani, N., Fajdiga, D., Oven, K., Komadina, Ž., Čeh, M., Lisec, A., Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. (2015). Verifikacija vsedržavnega modela transformacije med D48/GK in D96/TM. *Geodetski vestnik*, 59 (1), 159–167. http://www.geodetski-vestnik.com/59/1/gv59-1_berk.pdf, pridobljeno 15. 2. 2020.
- Cho, S. A., Lee, M., Kebede, S. (2019). Drone-based cadastral data acquisition methodology. *Catalyzing Innovation*. Washington DC.
- Colomina, I., Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Coveney, S., Roberts, K. (2017). Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for environmental applications: data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (8–10), 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1292074>
- Cramer, M., S. Bovet, M. Gültlinger, E. Honkavaara, A. McGill, M. Rijdsdijk, M. Tabor, Tournadre, V. (2013). On the use of rpas in national mapping - The Eurosdrr point of view. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W2*, 93–99. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-1-w2-93-2013>
- Cramer, M., Przybilla, H. J., Zurhorts, A. (2017). UAV cameras: Overview and geometric calibration benchmark. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII(September), 4–7. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017>
- Crommelinck, S., Bennett, R., Gerke, M., Nex, F., Yang, M. Y., Vosselman, G. (2016). Review of automatic feature extraction from high-resolution optical sensor data for UAV-based cadastral mapping. *Remote Sensing*, 8 (8). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8080689>

Crommelinck, S., Bennett, R., Gerke, M., Yang, M. Y., Vosselman, G. (2017). Contour detection for UAV-based cadastral mapping. *Remote Sensing*, 9 (2), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020171>

Crommelinck, S., Höfle, B., Koeva, M. N., Yang, M. Y., Vosselman, G. (2018). Interactive cadastral boundary delineation from UAV data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2*, 81–88. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-iv-2-81-2018>

Cunningham, K., Walker, G., Stahlke, E., Wilson, R. (2011). Cadastral audit and assessments using unmanned aerial systems. V: *ISPRS Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*, vol. XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-213-2011>

Dale, P. F. (1979). Photogrammetry and cadastral surveys within the Commonwealth. *The Photogrammetric Record*, 9 (53), 621–631.

Dandois, J. P., Olano, M., Ellis, E. C. (2015). Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. *Remote Sensing*, 7 (10), 13895–13920. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs71013895>

Delegirana Uredba Komisije (EU) 2019/945. Delegirana Uredba Komisije (EU) 2019/945 z dne 12. marca 2019 o sistemih brezpilotnega zrakoplova in operatorjih sistemov brezpilotnega zrakoplova iz tretjih držav.

Drešček, U., Kosmatin Fras, M., Tekavec, J., Lisec, A. (2021). Spatial ETL for 3D building modelling based on unmanned aerial vehicle data in semi-urban areas. *Remote sensing*, 12 (1972). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12121972>

Drešček, U. (2021). Konceptualni model za zagotavljanje kakovosti 3D-modelov stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk. Doktorska disertacija, 180 str., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=125471>

Drobež, P., Grigillo, D., Lisec, A., Kosmatin Fras, M. (2016). Remote sensing data as a potential source for establishment of the 3D cadastre in Slovenia (= Podatki daljinskega zaznavanja kot mogoč vir za vzpostavitev 3D-katastra v Sloveniji). *Geodetski vestnik*, 60 (3), 392–422. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2016.03.392-422>

El Meouche, R., Hijazi, I., Poncet, P. A., Abunemeh, M., Rezoug, M. (2016). UAV photogrammetry implementation to enhance land surveying, comparisons and possibilities. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W2:107–14*. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w2-107-2016>

Fetai, B., Oštir, K., Kosmatin Fras, M., Lisec, A. (2019). Extraction of visible boundaries for cadastral mapping based on UAV imagery. *Remote Sensing*, 11 (13), 1510. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11131510>

Fetai, B., Račič, M., Lisec, A. (2019). Visible Land Boundaries from UAV Imagery. *Remote Sensing*, 13 (11), 2077. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13112077>

Galván Rangel, M. J., Gonçalves, G. R., Pérez, J. A. (2018). The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. *International Journal of Remote Sensing*, 39 (21), 7154–7171. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1515508>

Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2016 (1), 17–30. DOI: <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>

Gindraux, S., Boesch, R., Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from Unmanned Aerial Vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*, 9 (2), 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020186>

Guo, X., Chen, Y., Wang, C., Cheng, M., Wen, C., Yu, J. (2016). Automatic shape-based target extraction for close-range photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-583-2016>

GURS (2007). Tehnično navodilo za uporabo novega koordinatnega sistema v zemljiškem katastru. Marec 2020. Geodetska uprava RS.

GURS (2020a). Opis strukture opisnih podatkov zemljiškokatastrskih točk v državnem koordinatnem sistemu D96/TM in D78/KG. Geodetska uprava RS.

GURS (2020b). Tehnične specifikacije z dne 15. 1. 2020. Geodetska uprava RS.

Harwin, S., Lucieer, A., Osborn, J. (2015). The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sensing*, 7(9), 11933–11953. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70911933>

Hastedt, H., Luhmann, T. (2015). Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL (1/W4), 321–328. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015>

van Hinsbergh, W.H., Rijdsdijk, M.J., Witteveen, W. (2013). UASs for cadastral applications. *GIM International* 27, 3.

Höhle, J., Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS journal of Photogrammetry and remote sensing*, 64, 398–406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003>

Izvedbena Uredba Komisije (EU) 2019/947. Izvedbena Uredba Komisije (EU) 2019/947 z dne 24. maja 2019 o pravilih in postopkih za upravljanje brezpilotnih zrakoplovov.

Jain, A., Mahajan, M., Saraf, R. (2019). Standardization of the Shape of Ground Control Point (GCP) and the Methodology for Its Detection in Images for UAV-Based Mapping Applications. V: Arai, K., Kapoor, S. (ur.), *Advances in Computer Vision. CVC 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. (str. 459–476). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-17795-9_34

James, M. R., Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39 (10), 1413–1420. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3609>

Kedzierski, M., Wierzbicki, D. (2015). Radiometric quality assessment of images acquired by UAV's in various lighting and weather conditions. *Measurement*, 76, 156–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.003>

Koeva, M., Bennett, R., Zevenbergen, J. (2019). Unmanned aerial system imagery, land data and user needs: A socio-technical assessment in Rwanda. *Remote Sensing*, 11, 1035. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11091035>

Koeva, M., Gasuku, O., Lengoiboni, M., Asiama, K., Bennett, R. M., Potel, J., Zevenbergen, J. (2021). Remote Sensing for Property Valuation: A Data Source Comparison in Support of Fair Land Taxation in Rwanda. *Remote Sensing*, 13 (18), 3563. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13183563>

Koeva, M., Muneza, M., Gevaert, C., Gerke, M., Nex, F. (2018). Using UAVs for map creation and updating. A Case Study in Rwanda. *Survey Review*, 50 (361), 312–325. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1268756>

Koeva, M., Stöcker, C., Crommelinck, S., Ho, S., Chipofya, M., Sahib, J., Bennett, R., Zevenbergen, J., Vosselman, G., Lemmen, C., Cromptoets, J., Buntinx, I., Wayumba, G., Wayumba, R., Odwe, P. O., Osewe, G. T., Chika, B., Pattyn, V. (2020). Innovative remote sensing methodologies for Kenyan land tenure mapping. *Remote Sensing*, 12 (2), 273. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020273>

Kosmatin Fras, M., Kerin, A., Mesarič, M., Peterman, V., Grigillo, D. (2016). Assessment of the quality of digital terrain model produced from unmanned aerial system imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 893–899. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-893-2016>

Kosmatin Fras, M., Drešček, U., Lisec, A., Grigillo, D. (2020). Analiza vplivov na kakovost izdelkov UAV fotogrametrije. *Geodetski vestnik*, 64 (4), 489–50. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.489-507

Kurczynski, Z., Bakuła, K., Karabin, M., Kowalczyk, M., Markiewicz, J. S., Ostrowski, W., Podlasiak, P., Zawieska, D. (2016). The possibility of using images obtained from the UAS in cadastral works. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B1*, 909–15. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b1-909-2016>

Luhmann, T., Fraser, C., Maas, H.-G. (2016). Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 37–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>

Luo, X., Bennett, R., Koeva, M., Lemmen, C., Quadros, N. (2017). Quantifying the overlap between cadastral and visual boundaries: a case study from Vanuatu. *Urban Science*, 1 (4), 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci1040032>

Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>

Manyoky, M., Theiler, P., Steudler, D., Eisenbeiss, H. (2011). Unmanned Aerial Vehicle in cadastral applications. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XXXVIII-1, 57–62. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-57-2011>

Martensson, S.-G., Reshetyuk, Y. (2017). Height uncertainty in digital terrain modelling with unmanned aircraft systems. *Survey Review*, 49 (355), 312–318. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1180754>

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.-J., García-Ferrer, A., Pérez-Porras, F.-J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of

ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, 1–10.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>

Meißner, H., Cramer, M., Piltz, B. (2017). Benchmarking the optical resolving power of UAV based camera. *XLII-2/W6*, 243–249. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-243-2017>

Mesas-Carrascosa, F. J., Notario-García, M. D., Meroño de Larriva, J. E., de la Orden, M.S., García-Ferrer Porras, A. (2014). Validation of measurements of land plot area using UAV imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 270–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.06.009>

Mesas-Carrascosa, F. J., Torres-Sanchez, J., Clavero-Rumbao, I., Garcia-Ferrer, A., Pena, J. M., Borra-Serrano, I., Lopez-Granados, F. (2015). Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management. *Remote Sensing*, 7 (10), 12793–12814. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs71012793>

Mesas-Carrascosa, F. J., Clavero Rumbao, I., Torres-Sánchez, J., García-Ferrer, A., Peña, J. M., López Granados, F. (2017). Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (8–10), 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1249311>

Mikrut, S. (2016). Classical photogrammetry and UAV - Selected aspects. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI(B1), 947–952. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLB1-947-2016>

MKGP (2020). Podatki o uvedenih komasacijah – agromelioracijah na območjih komasacije v okviru PRP 2014-2020.

Mosbrucker, A. R., Major, J. J., Spicer, K. R., Pitlick, J. (2017). Camera system considerations for geomorphic applications of SfM photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(6), 969–986. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4066>

Mumbone, M., Bennett, R., Gerke, M., Volkmann, W. (2015). Innovations in boundary mapping: Namibia, customary lands and UAVs. In *2015 World Bank Conference on Land and Poverty* (str. 1–22). DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1862.2882>

Muneza, M. J., Koeva, M. N., Gerke, M., Nex, F., Gevaert, C. (2015). A photogrammetric approach for map updating using UAV in Rwanda. *GeoTech Rwanda*. Kigali, Rwanda. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1268756>

Nasrullah, A. R. (2016). Systematic analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived product quality. Master's Thesis, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, Enschede.

Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6 (1), 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Saleri, R. (2013). Accuracy and block deformation analysis in automatic UAV and terrestrial photogrammetry - lesson learnt. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II (5/W1), 2–6. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-203-2013>

Oštir, K. (2006). Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU.

Pajares, G. (2015). Overview and current status of remote sensing applications based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(4), 281–330.

<https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>

Park, S., Song, A. (2020). Discrepancy analysis for detecting candidate parcels requiring update of land category in cadastral map using hyperspectral UAV images: A case study in Jeonju, South Korea. *Remote Sensing*, 12 (3), 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030354>

Pravilniku o evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru. Uradni list RS št. 48/2018, 51/2018 in 35/2019.

Puniach, E., Bieda, A., Ćwiakała, P., Kwartnik-Pruc, A., Parzych, P. (2018). Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for updating farmland cadastral data in areas subject to landslides. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 331. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7080331>

Ramadhani, S. A. (2016). Using unmanned aircraft system images to support cadastral boundary data acquisition in Indonesia. University of Twente. ITC Faculty of GeoInformation Science and Earth Observation.

Ramadhani, S. A., Bennett, R. M., Nex, F. C. (2018). Exploring UAV in Indonesian cadastral boundary data acquisition. *Earth Science Informatics*, 11 (1), 129–146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0314-6>

Reis, S., Torun, A. T., Bilgilioglu, B. B. (2015). Investigation of availability remote sensed data in cadastral works. *The World Cadastre Summit - Congress and Exhibition*. Istanbul, Turkey: FIG.

Reshetyuk, Y., Mårtensson, S.-G. (2016). Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles. *Photogrammetric Record*, 31 (154), 143–165. DOI: <https://doi.org/10.1111/phor.12143>

Rijsdijk, M., van Hinsbergh, W. H. M., Witteveen, W., ten Buuren, G. H. M., Schakelaar, G. A., Poppinga, G., van Persie, M., Ladiges, R. (2013). Unmanned Aerial Systems in the process of Juridical verification of cadastral border. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XL-1/W2, 325–331. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-325-2013>

Rock, G., Ries, J. B., Udelhoven, T. (2012). Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital elevation models (DEM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/(September), 69–73. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-69-2011>

Rosnell, T., Honkavaara, E. (2012). Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors*, 12 (1), 453–480. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120100453>

Rupnik, E., Nex, F., Toschi, I., Remondino, F. (2015). Aerial multi-camera systems: Accuracy and block triangulation issues. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101 (60), 233–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.020>

Santise, M., Fornari, M., Forlani, G., Roncella, R. (2014). Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL(5), 529–536. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-529-2014>

Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J., Rodríguez-Pérez, J., Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10 (1606), 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/RS10101606>

Shahbazi, M., Sohn, G., Theau, J., Menard, P. (2015). Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. *Sensors*, 15 (11), 27493–27524. DOI: <https://doi.org/10.3390/s151127493>

Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J. H. (2014). Influence of blur on feature matching and a geometric approach for photogrammetric deblurring. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3), 321–326. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-321-2014>

Sieberth, T., Wackrow, R., Chandler, J. H. (2015). UAV image blur-its influence and ways to correct it. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(1W4), 33–39. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-33-2015>

Sieberth, Till, Wackrow, R., Chandler, J. H. (2016). Automatic detection of blurred images in UAV image sets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.010>

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>

SIST EN ISO 19157:2015. Geografske informacije – Kakovost podatkov.

Suran, N. A., Shafri, H. Z. M., Shaharum, N. S. N., Radzali, N. A. W. M., Kumar, V. (2019). UAV-based hyperspectral data analysis for urban area mapping. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W16*, 621–626. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w16-621-2019>

Stöcker, C., Bennett, R., Nex, F., Gerke, M., Zevenbergen, J. (2017). Review of the Current State of UAV Regulations. *Remote Sensing*, 9 (5), 26. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9050459>

Stöcker, C., Koeva, M., Bennett, R. (2019). Evaluation of UAV-based technology to capture land rights in Kenya: Displaying stakeholder perspectives through interactive gaming. *Catalyzing Innovation*. Washington DC: World Bank.

Stöcker, C., Ho, S., Nkerabigwi, P., Schmidt, C., Koeva, M., Bennett, R., Zevenbergen, J. (2019a). Unmanned aerial system imagery, land data and user needs: A socio-technical assessment in Rwanda. *Remote Sensing*, 11 (9), 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11091035>

Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., Gerke, M. (2019b). UAV-based cadastral mapping: An assessment of the impact of flight parameters and ground truth measurements on the absolute accuracy of derived orthoimages. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 613–617. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-613-2019>

Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., Gerke, M. (2020). High-quality UAV-based orthophotos for cadastral mapping: guidance for optimal flight configurations. *Remote Sensing*, 12 (21), 3625. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12213625>

Strecha, C., Zoller, R., Rutishauser, S., Brot, B., Schneider-Zapp, K., Chovancova, V., ... Glassey, L. (2015). Quality Assessment of 3D Reconstruction Using Fisheye and Perspective Sensors. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3/W4(March), 215–222. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W4-215-2015>

Šafař, V., Potůčková, M., Karas, J., Tlustý, J., Štefanová, E., Jančovič, M., Cígler Žofková, D. (2021). The use of UAV in cadastral mapping of the Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10 (6), 380. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10060380>

Tonkin, T., Midgley, N. (2016). Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 8 (9), 786. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8090786>

Torres-Sanchez, J., Lopez-Granados, F., Borra-Serrano, I., Pena, J. M. (2017). Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture*, 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9502-0>

Triglav, J. (2015). Arhivi – skriti zakladi iz Murske Sobote. *Geodetski vestnik*, 59 (3), 609–618.

Udin, W. S., Ahmad, A. (2014). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation flying altitude using unmanned aerial vehicle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 18, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012027>

Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H. F., Chovancova, V., Glass, A., Strecha, C. (2016). Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III(3), 139–146. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsannals-III-3-139-2016>

Volkman, W., Barnes, B. (2014). Virtual surveying: Mapping and modeling cadastral boundaries using Unmanned Aerial Systems (UAS). *Engaging the Challenges - Enhancing the Relevance*. Kuala Lumpur, Malaysia: FIG.

Wayumba, R., Mwangi, P., Chege, P. (2017). Application of Unmanned Aerial Vehicles in improving land registration in Kenya. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 5 (5), 7.

Weissmann, K. (1971). Photogrammetry applied to cadastral survey in Switzerland. *The Photogrammetric Record*, 7 (37), 5–15.

Wierzbicki, D., Kedzierski, M., Fryskowska, A. (2015). Assesment of the influence of UAV image quality on the orthophoto production. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL(1/W4), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-1-2015>

Yu, J.J., Kim, D.W., Lee, E.J., Son, S.W. (2020). Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models. *Drones*, 4 (49), 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones4030049>

Priloga A: Ocena vidljivosti tarč za izvedenih 12 serij letov.

Let	Naklon	Višina [m] Pokritost [barva]	Svetlomer		Tarče 21 cm	Tarče 18 cm	Tarče 15 cm	Tarče 12 cm
1	0	80	1962		2	2	0	0
1	0	70	1962		2	2	1	0
1	0	60	1962		2	2	2	1
1	0	50	1962		2	2	2	2
1	0	40	1962		2	2	2	2
1	0	30	1962		2	2	2	2
1	0	20	1962		2	2	2	2
2	15	80	1967		2	1	0	0
2	15	70	1967		2	2	0	0
2	15	60	1967		2	2	1	0
2	15	50	1967		2	2	2	1
2	15	20	1967		2	2	2	2
3	30	80	2793		0	0	0	0
3	30	70	2793		0	0	0	0
3	30	60	2793		1	1	0	0
3	30	50	2793		1	1	0	0
3	30	40	2793		1	1	0	0
3	30	30	2793		2	2	1	1
3	30	20	2793		2	2	2	2
4	45	80	4371		0	0	0	0
4	45	70	4371		0	0	0	0
4	45	60	4371		0	0	0	0
4	45	50	4371		0	1	0	0
4	45	40	4371		2	2	0	0
4	45	30	4371		2	2	2	1
4	45	20	4371		2	2	2	2
5	0	80	4105		2	1	0	0
5	0	70	4105		2	2	1	0
5	0	60	4105		2	2	2	1
5	0	50	4105		2	2	2	1
5	0	40	4105		2	2	2	2
5	0	30	4105		2	2	2	2
5	0	20	4105		2	2	2	2
6	15	80	4351		0	0	0	0
6	15	70	4351		1	1	0	0
6	15	60	4351		1	1	0	0
6	15	50	4351		2	2	1	0
6	15	40	4351		2	2	2	1
6	15	30	4351		2	2	2	2
6	15	20	4351		2	2	2	2

<i>Let</i>	<i>Naklon</i>	<i>Višina [m] Pokritost [barva]</i>	<i>Svetlomer</i>		<i>Tarče 21 cm</i>	<i>Tarče 18 cm</i>	<i>Tarče 15 cm</i>	<i>Tarče 12 cm</i>
7	15o	80	2741		2	2	0	0
7	15o	70	2741		2	2	1	0
7	15o	60	2741		2	2	2	1
7	15o	50	2741		2	2	2	2
7	15o	40	2741		2	2	2	2
7	15o	30	2741		2	2	2	2
7	15o	20	2741		2	2	2	2
8	30	80	4607		0	0	0	0
8	30	70	4607		0	0	0	0
8	30	60	4607		0	0	0	0
8	30	50	4607		0	0	0	0
8	30	40	4607		0	1	0	1
8	30	30	4607		0	2	0	2
8	30	20	4607		0	2	0	2
9	30o	80	2821		2	2	1	0
9	30o	70	2821		2	2	1	0
9	30o	60	2821		2	2	2	1
9	30o	50	2821		2	2	2	2
9	30o	40	2821		2	2	2	2
9	30o	30	2821		2	2	2	2
9	30o	20	2821		2	2	2	2
10	45	80	4622		0	0	0	0
10	45	70	4622		0	0	0	0
10	45	60	4622		0	0	0	0
10	45	50	4622		1	0	0	0
10	45	40	4622		2	1	0	0
10	45	30	4622		2	2	1	1
10	45	20	4622		2	2	2	2
11	45o	80	3937		2	2	0	0
11	45o	70	3937		2	2	1	0
11	45o	60	3937		2	2	1	0
11	45o	50	3937		2	2	2	1
11	45o	40	3937		2	2	2	2
11	45o	30	3937		2	2	2	2
11	45o	20	3937		2	2	2	2
12	0 S	80	1099		2	2	1	0
12	0 S	70	1099		2	2	2	1
12	0 S	60	1099		2	2	2	2
12	0 S	50	1099		2	2	2	2
12	0 S	40	1099		2	2	2	2
12	0 S	30	1099		2	2	2	2
12	0 S	20	1099		2	2	2	2