



Uporaba brezpilotnih zrakoplovov za potrebe fotogrametrije in kartografije

IZVLEČEK

Brepilotni zrakoplovi (BPL) so razmeroma mlada in izredno pomembna tehnološka inovacija. Ob siloviti rasti prodaje cenovno dostopnih brezpilotnih zrakoplovov se v zadnjem desetletju poleg uporabe za rekreacijske namene povečuje tudi njihova uporabnost za znanstveno-raziskovalne namene, predvsem kot metoda daljinskega zaznavanja podatkov ob podpori geografskih informacijskih sistemov. V prispevku predstavljamo različne načine uporabe dostopnih brezpilotnih zrakoplovov, pregled obstoječe literature in zakonov ter prednosti in slabosti tovrstne geografske metode.

Ključne besede: fotogrametrija, brezpilotni zrakoplovi, kartografija, GIS, daljinsko zaznavanje

ABSTRACT

The Use of Unmanned Aerial Vehicles for the Needs of Photogrammetry and Cartography
Unmanned aerial vehicles (UAVs) are a relatively recent, yet a very important technological innovation. With the strong growth of affordable UAV sales in the past decade, there has been an increase of use for recreational purposes as well as use as a method of remote sensing with the support of geographic information systems in the line of scientific-research work. The paper presents various uses of accessible UAVs, a review of existing literature, laws, and the advantages and disadvantages of such geographical method.

Key words: photogrammetry, unmanned aerial vehicles, cartography, GIS, remote sensing

Razvoj okoljskih znanosti, med katerimi je tudi geografija, je bil močno pogojen z omejitvenimi dejavniki okolja in omejen le na določene sfere, na primer hidrosfero. Z razvojem tehnologije in prvih letalnih naprav pa je v iskanju odgovorov človeku postala dostopna tudi celotna Zemljina atmosfera, bodisi kot neposreden vir informacij bodisi kot prostor izvajanja daljinskega zaznavanja površja. Brezpilotni zrakoplovi, kot ena izmed sodobnejših tehnologij daljinskega zaznavanja, niso več le v domeni vojske, temveč postajajo vse bolj dostopni tudi širšemu krogu posameznikov. Vzporedno s tovrstnim tehnoloških napredkom smo ob podpori geografskih informacijskih sistemov priča razvoju prostorskih znanosti, kakršni sta kartografija in fotogrametrija, obenem pa, zaradi množične uporabe, tudi zaostrovanju zakonodaje.

Glede na razmeroma kratek čas širše dostopnosti te tehnologije, so ljudje z metodo daljinskega zaznavanja ob uporabi brezpilotnih zrakoplovov slabše seznanjeni, imajo pa morda tudi predsodke ali napačne informacije o zahtevnosti uporabe, zakonskih omejitvah in drugih vidikih, kar jih lahko odvrne od uporabe sicer zelo široko uporabne metode.

Namen raziskave je bil predstaviti način uporabe brezpilotnega zrakoplova pri izdelavi pravih ortofoto posnetkov z visoko prostorsko ločljivostjo za proučevanje hitrih sprememb v pokrajini (na primeru poplav), ki niso zajete v podatkih Geodetske uprave Republike Slovenije.

Brepilotni zrakoplov

Brepilotni zrakoplov (angleško unmanned aerial vehicle – UAV), tudi brezpilotni letalnik (BPL) ali dron, je v slovenski zakonodaji opredeljen kot daljinsko krmiljen, programiran ali avtonomen zrakoplov brez oseb na krovu, katerega namen je izvajanje letov (Uradni list RS 52/16 2016). Čeprav je bila še pred dobrim desetletjem njihova uporaba omejena le na vojaško industrijo in razmeroma maloštevilne navdušence letalskega modelarstva, smo sedaj priča razcvetu zasebne in komercialne uporabe (Bitenc 2015). Prva, morda celo najpomembnejša prednost v primerjavi s tradicionalnimi metodami daljinskega zaznavanja je, da med leti z visoko stopnjo nevarnosti ne ogrozamo življenja operaterja, pa tudi, da v primeru težav med letom (največkrat) nastane zgolj materialna škoda. Zaradi svoje majhnosti sodobni brezpilotni zrakoplovi omogočajo lažje manevriranje in dostop do sicer težko dostopnih območij. Prav tako lahko izpostavimo možnost zračnega vpogleda opazovanega območja s pomočjo prenosa slike na kraju samem (in-situ), najpogosteje na mobilni telefon ali drugo napravo (Eisenbeiss 2009).

Na sliki 1, ki kaže model fotografiji namenjenega brezpilotnega zrakoplova, so označeni njegovi najpomembnejši sestavni deli.

Navadno ima brezpilotni zrakoplov (vsaj) 4 elise oziroma propelerje z motorji

Avtorja besedila:

LUKA ZALETELJ,

diplomirani geograf (un.)

Gornji trg 37, 1000 Ljubljana

E-pošta: luka.zaletelj98@gmail.com

BLAŽ REPE, doktor geografije, docent

Oddelek za geografijo Filozofske

fakultete Univerze v Ljubljani,

Aškerčeva cesta 2, 1000 Ljubljana

E-pošta: blaz.repe@ff.uni-lj.si

COBISS 1.04 strokovni članek



Slika 1: Sestavni deli brezpilotnega zrakoplova (Avtor: Zaletelj 2020).

(tako imenovani kvadrokopter), kjer se jih polovica vrti v smeri urinega kazalca, ostali pa v obratni smeri, baterijo, senzorje bližine, kamero ali drug senzor, pritrjen na dvo- ali troosni stabilizator, v ohišju pa tudi globalni navigacijski satelitski sistem (GNSS) za določanje položaja s pomočjo do več deset priključenih satelitov ter sistem povezave med zrakoplovom in daljinskim upravljalnikom. V večini primerov gre za povezavo bodisi prek (izboljšane) Wi-Fi povezave bodisi radijske frekvence.

Poleg ali namesto navadne fotografske kamere je na brezpilotni zrakoplov mogoče namestiti tudi multi in hiperspektralne senzorje. Z razvojem tehnologije in dostopnosti brezpilotnih zrakoplovov smo priča tudi porastu njihove uporabe v intenzivnem tržnem kmetijstvu. Kmetovalcem omogoča vpogled v stanje nasadov

in lažjo optimizacijo načina pridelave za doseganje večje količine pridelka. Poleg osnovne barvne kamere (RGB) vse več proizvajalcev zrakoplovov omogoča razširitev zajema v nevidni spekter, najpogosteje v bližnji infrardeči spekter, kar omogoča izračun številnih vegetacijskih indeksov, na primer NDVI (angleško *normalized difference vegetation index*) in NDWI (angleško *normalized difference water index*) (Oštir 2006; Earth observing system 2020). Uporabnostni vidik podkrepi tudi napoved, da naj bi bilo med letoma 2015 in 2025 kar 80 % prodanih zrakoplovov uporabljenih za kmetijske namene (Montes de Oca s sodelavci 2018).

Veliko uporabno vrednost pa imajo tudi zrakoplovi s termalno kamero, ki zajemajo podatke v termičnem infrardečem spektru, v intervalu od 3 do 15 μm . Uporabljajo se za številne

naloge, kot sta na primer spremljanje naravnih nesreč (na primeru požarov – identifikacija vročih točk, kartiranje požganih površin) in opazovanje toplotnih anomalij kot posledica toplotnega onesnaževanja (na primer mestni toplotni otok).

Izpostavimo lahko še brezpilotne zrakoplove z nameščenim lidarskim senzorjem. LiDAR (angleško Light detection and ranging) je tehnologija laserskega zaznavanja in merjenja razdalj do objektov s pomočjo časovne razlike med oddajo in prejemom odboja laserskega pulza. Ti senzorji omogočajo pridobitev ažurnih višinskih podatkov visoke prostorske ločljivosti in izdelavo digitalnih modelov reliefa oziroma izoblikovanosti površja (Oštir 2006). Eden izmed glavnih omejitvenih dejavnikov širše uporabe teh zrakoplovov je visoka cena opreme.



Slika 2: DJI Mavic Air z daljinskim upravljalnikom (Avtor: Mitja Bergoč; povzeto po Zaletelj 2020).

Z razmahom cenovno vse bolj dostopnih brezpilotnih zrakoplovov v Sloveniji smo v naši državi konec julija 2016 sprejeli temeljno zakonodajo za to področje, imenovano Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov, ki je trenutno še vedno veljavna. Ta uredba pa ni edina, ki dovoljuje ali prepoveduje letenje na določenem območju, na kar moramo paziti tudi pri letenju. Operater brezpilotnega zrakoplova je pred letom dolžan zagotoviti tehnično brezhibnost naprave, med samim letom na za to primernih območjih pa znotraj vidnega polja upoštevati največjo razdaljo 500 m med zrakoplovom in operaterjem, največjo višino 150 m in predpisane varnostne razdalje od ljudi, skupine ljudi in ostalih objektov (Uradni list RS 52/16 2016). S 1. januarjem 2021 naj bi dobili novo uredbo, potrjeno s strani Evropske komisije, ki bo poenotila pravno podlago uporabe brezpilotnih zrakoplovov v državah, članicah EU, in spremenila dosedanja pravila (CAA 2020b).

Uporabljena oprema

Uporabili smo brezpilotni zrakoplov Mavic Air kitajskega proizvajalca DJI.

Gre za dober primer cenovno razmeroma dostopnega (manj kot 1000 €) in na trgu zelo prepoznavnega modela brezpilotnega zrakoplova. Tehta le 430 gramov in je opremljen s kamero, nameščeno na triosni stabilizator (angleško gimbal), ter s senzorji bližine na sprednji, zadnji in spodnji strani zrakoplova. Zmogljivost baterije zadošča za 15–17 minut letenja (DJI 2018).

Skupaj z brezpilotnim zrakoplovom smo na terenu uporabili tudi dve brezplačni aplikaciji za načrtovanje letov. Aplikacija DroneDeploy, usmerjena v izdelavo 3D-zemljevidov, je manj intuitivna, podpira manj modelov zrakoplovov, a omogoča izvedbo kompleksnejših in lažjo izvedbo daljših letov z možnostjo uporabe več baterij znotraj enega projekta ter rabo varnostnih sistemov brezpilotnega zrakoplova. Nasprotno aplikacija Pix4Dcapture podpira več modelov, je bolj intuitivna in ponuja več vrst načrtov, natančneje tudi dvorazsežnostnega zemljevida (tako imenovani popolni ortofoto posnetek) in 3D-modela (večja natančnost ob enem, manjšem objektu) (Pix4Dcapture 2020; DroneDeploy 2020).

Po izvedenem terenskem delu so sledili analiza, interpretacija in predstavitev podatkov s pomočjo fotogrametričnih programov in programov GIS. Uporabili smo Metashape Professional, program ruskega proizvajalca Agisoft. Velja kot eden boljših za samodejno obdelavo fotografij in izdelavo oblakov točk, ki so predpogoj za izdelavo kakovostnih ortofoto posnetkov in digitalnih modelov površja. V kolikor zajete slike vsebujejo metapodatke o lokaciji, avtomatično poteka tudi georeferenciranje. Pri analizi in kartografskem prikazu smo uporabili tudi programa ArcScene in ArcMap 10.7.1.

Ortofoto in njegova izdelava

Ortofoto posnetek je zračna fotografija površja, narejena v centralni projekciji in pretvorjena v ortogonalno projekcijo. Razlikujemo navaden in popoln oziroma pravi ortofoto posnetek (angleško *true orthophoto*). Slednji se od prvega razlikuje po večji položajni natančnosti objektov na posnetku, kar dosežemo z zajemom več prekrivajočih se posnetkov (Oštir 2006; GURS 2020b).

Terensko delo je potekalo v občini Brezovica, na Podpeškem jezeru, ki je v poletnih mesecih priljubljena rekreativna destinacija. Voda v 51 m globoko jezero okrogle oblike, z daljšim premerom 135 in krajšim 121 m, priteka iz številnih kraških izvirov. Okrog jezera je obsežna zamočvirjena ravnica, ki je v primeru poplav (najpogostejše so v jesenskem in spomladanskem času po obilnih padavinah) pod vodo (Hrvatini 2010).

Izhodišče našega terenskega dela je stanje oziroma površina jezera v normalnem stanju, zajeta ob 11. uri 6. maja 2020, ko so bile ustrezne vremenske razmere za letenje (hitrost vetra 9 km/h in druge). Glede na to, da aprila in na začetku maja ni bilo obilnejših padavin, lahko na podlagi terenskega oglada z veliko verjetnostjo sklenemo, da je zajeta površina jezera normalna (nepoplavljeno stanje). Za zagotavljanje kakovostnega rezultata smo v nastavitvah leta v aplikaciji Pix4Dcapture nastavili 80-odstotno prekrivanje vzdolž poti in 75-odstotno med vzporednicami leta na višini 40 m od vzletne točke. Glede na podatke iz aplikacije je to dober kompromis med dolžino trajanja leta in kakovostjo slik ter skladno s priporočili programske opreme o vsaj 80-odstotnem prekrivanju vzdolž poti in vsaj 70-odstotnem med vzporednicami letenja (Agisoft LLC 2019).

Pomemben vidik pri uporabi brezpiilotnega zrakoplova za izdelavo ortofoto posnetkov je površina ozemlja, ki ga lahko zajamemo v določeni časovni enoti. Omejeni smo namreč s časom letenja in zmogljivostjo baterije. Z eno baterijo Mavic Air-a (okrog 15 minut) in z uporabo zgornjih nastavitvev lahko zajamemo kvadratno območje površine 3,5 ha. Za zajem enega hektarja potrebujemo torej nekaj več kot 4 minute.

Analizo, katere postopki so predstavljeni na sliki 3, smo začeli v programu Metashape Pro in nadaljevali v ArcMap. Za primerjavo končnega izdelka in trenutnih podatkov smo pridobili tudi ustrezen list državnega ortofoto posnetka. Njegova starost je več kot dve leti, kar je za ciklično snemanje državnega ozemlja zadovoljivo, vendar kot podpora za preučevanje hitrih sprememb v pokrajini ne zado-

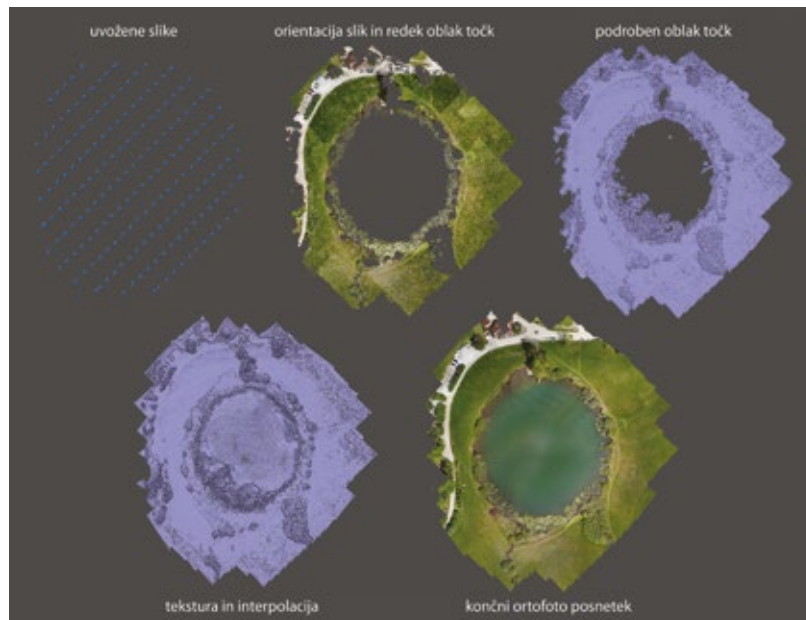
stuje (GURS 2019). Ustvarjeni ortofoto posnetek ima prostorsko ločljivost 1,33 cm na piksel, kar je občutno več od državnih posnetkov s 50 cm na piksel.

Na sliki 4 lahko že od daleč vidimo, da je v dveh letih med nastankom obeh posnetkov prišlo do nekaterih večjih sprememb, tudi odstranitve pomolov. Zaradi večje prostorske ločljivosti pa lahko opazujemo tudi manjše spremembe, ki neposredno vplivajo na nam zanimivo površino jezera. Poleg občasnih poplav, na površino po vsej verjetnosti vpliva tudi dolgoletna erozija brežin; kjer gre za območja vstopa in izstopa iz vode, lahko to pripisemo kopalcem.

Pri določanju površine jezera smo, ker gre zgolj za barvno sliko, območje z vodo ročno vektorizirali v merilu 1 : 60. Na območjih rastlinja, ki sega nad gladino jezera, je bil potek jezerske obale neviden, kar je zagotovo slabost uporabljene metode. Kot površino jezera smo vektorizirali le površine, na katerih je nedvoumno prisotna voda. S tem smo seveda dobili le približek dejanske površine. Vektorizirana površina jezera v normalnem stanju je približno 1,2 ha, kar je skladno s podatkom na informativni table ob jezeru.

Drugi del terenskega dela smo izvedli 16. maja 2020, po nekajdnevem deževju, ko je po podatkih z meteorološke postaje Ljubljana v štirih dneh od 12. do 15. maja padlo 23,8 mm dežja in do jutra 16. maja še dodatnih 30,7 mm (ARSO 2020). Pri načrtovanju leta smo prilagodili oziroma razširili

Slika 3: Postopek izdelave ortofoto posnetka v Metashape Pro (Avtor: Zaletelj 2020).





Slika 4: Primerjava prostorske ločljivosti ortofoto posnetkov (GURS 2019; Zaletelj 2020).

območje zajema v južni oziroma jugovzhodni smeri, ostali parametri leta so bili enaki kot pri prvem; spremenila se je torej le površina zajema.

S pomočjo ustvarjenega ortofoto posnetka poplavljenega jezera smo v enakem merilu kot prej vektorizirali površino jezera, ki je bila tokrat 1,76 ha, to je 0,56 ha oziroma 46,6 % več kot na dan prve faze terenskega dela.

Na terenu smo od ribiča izvedeli, da je bila še pred 24-imi urami površina jezera povsem normalna, kar še dodatno potrjuje, da gre za izredno hitre spremembe v naravi, ki jih trenutni podatki praviloma ne zajamejo. To seveda govori v prid uporabnosti brez-pilotnih zrakoplovov za opazovanje tovrstnih dogodkov.

Digitalni model površja (DMP) in njegova izdelava

Poleg ortofoto posnetka uporabljeni zrakoplov omogoča izdelavo digitalnega modela površja (DMP). Gre za 3D-zemljevid dejanskega stanja površja, vključno z vsem rastlinstvom in drugimi objekti (Oštir 2006). Na končnem izdelku dobimo navpične razdalje med ravnino vzletne točke zrakoplova in točkami na površju, pri čemer lahko s poznavanjem nadmorske višine vzletne točke ugotovimo nadmorske višine tudi na tamkajšnjih golih površinah, na primer cestah.

Terensko delo je potekalo 8. maja 2020 na območju opuščenega kamnoloma s površino 1,44 ha, ki leži na meji naselij Orle in Lavrica v občini Škofljica. Ker je kamnolom na ob-

močju, kjer je za določene zrakoplove obvezna uporaba odzivnika, gre za tako imenovano območje TMZ (angleško *transponder mandatory zone*), je največja višina leta omejena na 50 m nad vzletno točko, kar smo dosledno upoštevali (CAA 2020a). Postopek terenskega dela je podoben kot pri izdelavi popolnega ortofoto posnetka, pri čemer smo za načrtovanje leta uporabili digitalnemu modelu površja prilagojeno aplikacijo DroneDeploy. V njej smo pred letom nastavili 80-odstotno prekrivanje vzdolž poti in 70-odstotno med vzporednicami letenja na višini 50 m in tako z dvema porabljenima dvema baterijama izdelali 365 posnetkov.

Postopek izdelave DMP-ja je podoben tistemu za izdelavo ortofoto posnetka,

vendar z nekaterimi bistvenimi spremembami. Prva je, da smo zajeli še enkrat več slik kot za ortofoto, kar je treba upoštevati pri analizi v programu Metashape. Ob poskusu uporabe enakih nastavitvev kot v prejšnjem poglavju (to je visoka kakovost obdelave oziroma angleško *high quality preset*), je zaradi pomanjkljive zmogljivosti računalnika prišlo do sicer predvidenega večdnevnega časovnega trajanja analize. S to omejitvijo smo bili, vsaj pri izdelavi podrobnega oblaka točk, kar je časovno najzahtevnejšega dela analize, primorani uporabiti nastavitve srednje kakovostne obdelave. Prav tako smo na tej stopnji skladno s priporočili proizvajalca programa morali prilagoditi oziroma zmanjšati nastavitve filtriranja globin, glede na to, da nas zanimajo podrobne višinske razlike (Agisoft LLC 2019).

Kot pri ortofotu je tudi v tem primeru pomemben čas letenja. Ob zgoraj navedenih kriterijih v 24 minutah za-

jamemo kvadratno območje velikosti 2 ha, torej hektar v 12 minutah. To pomeni, da z uporabo ene baterije Mavic Air-a lahko zajamemo približno 1,25 ha veliko območje.

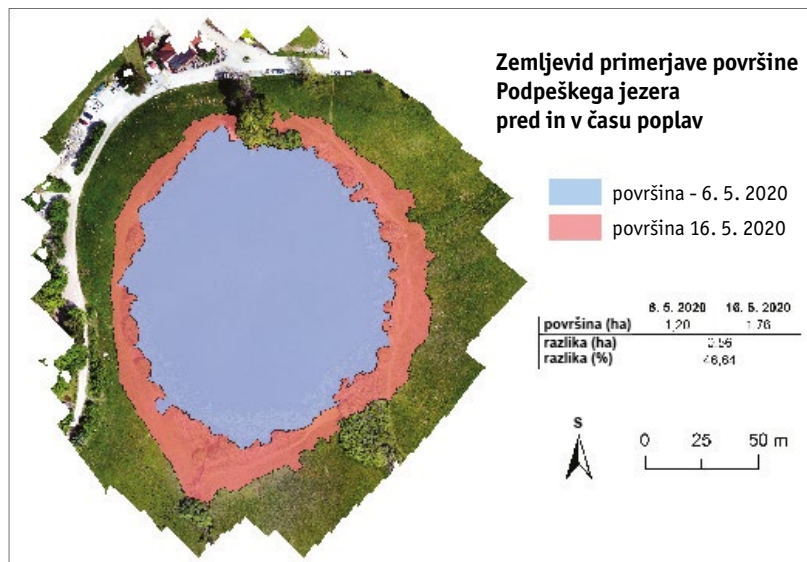
Da bi izračunali približno količino materiala, ki so ga v kamnolomu odstranili, smo morali najprej ustvariti podatkovni sloj poteka reliefa, če kamnoloma ne bi bilo. Pri delu smo si pomagali z že uporabljenim rastrskim DMNV-jem lidarskega skeniranja površja, pretvorjenega v točkovni vektorski sloj s pomočjo ukaza "Raster to Point", iz katerega smo izbrisali točke na območju kamnoloma, in z metodo rastrske interpolacije sosedstva (angleško *natural neighbour*) dosegli približen potek reliefa. Z uporabo senčenega lidarskega sloja smo ustvarili poligon za namen raziskave, ustrezne meje kamnoloma in s pomočjo ukaza "Extract by mask" na to območje obrezali podatkovna sloja z zrakoplovom ustvarjenega DMP-ja ter z interpo-

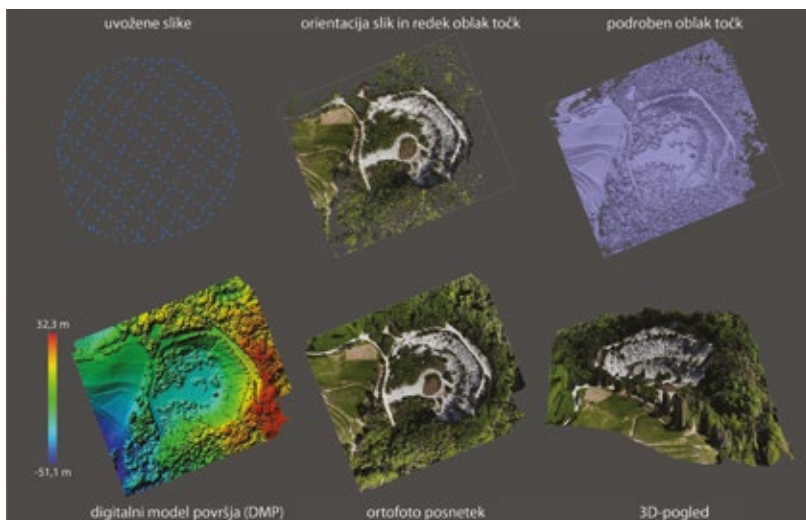
lacijo ustvarjenega površja. Postopek poizvedbe razlike v prostornini je bil preprost. Najprej smo z orodjem "Raster calculator" odšteli en rastrski sloj od drugega, zatem pa z orodjem "Surface volume" dobili prostornino izkopanega kamninskega gradiva, ki ga je bilo skoraj 204.000 m³.

Da bi rezultat izboljšali, smo odstranili rastlinski pokrov. Sprva smo ustvarili nov vektorski sloj, kjer smo s poligoni na območju kamnoloma omejili vidne sklenjene površine rastlinja. DMP smo pretvorili v točke in izbrisali tiste, ki so bile na območju rastlinstva. S tem smo dobili območje kamnoloma brez njega, vmesne prazne prostore pa zapolnili s pomočjo interpolacije. Površina območij z rastlinstvom je bila 0,51 ha oziroma 35,2 % od celotne površine kamnoloma, kar pomeni, da je bilo vstavljene malo več kot tretjina točk, kar ni optimalno in je zagotovo slabost uporabljene metode. Če bi bilo terensko delo izvedeno v hladnem delu leta, ko na drevju ni listov, sklepamo, da bi bil problem manjši, saj bi več točk doseglo gola tla. Preostanek analize je enak prejšnjemu. Ocenili smo, da je bilo na območju kamnoloma po odstranitvi rastlinskega pokrova odstranjenih skoraj 212.000 m³ gradiva, kar je za približno 8000 m³ več kot pri prvotnem rezultatu.

Primerjalno smo prostornino izračunali na podlagi državnih lidarskih podatkov, s čimer smo dobili oceno nekaj več kot 207.000 m³ odstranjenega gradiva. Rezultat je približno na sredini med obema prej izračunanima vrednostma z brezpilotnim

Slika 5: Zemljevid primerjave površine Podpeškega jezera.





Slika 6: Postopek izdelave digitalnega modela površja v Metashape Pro (Avtor: Zaletelj 2020).

zrakoplovom ustvarjenega podatkovnega sloja (ARSO 2015). Izračunana vrednost z rastlinskim pokrovom od lidarske odstopa za 1,66 %, medtem, ko vrednost brez rastlinstva odstopa za 2,09 %. Odstopanje je pričakovano, saj gre za različne prostorske ločljivosti, obenem pa je bilo pri ustvarjenem podatkovnem sloju brez rastlinstva razmeroma velik delež vre-

dnosti interpoliranih. Kljub temu se je metoda izkazala za primerljivo s trenutnimi razpoložljivimi/dostopnimi državnimi podatki.

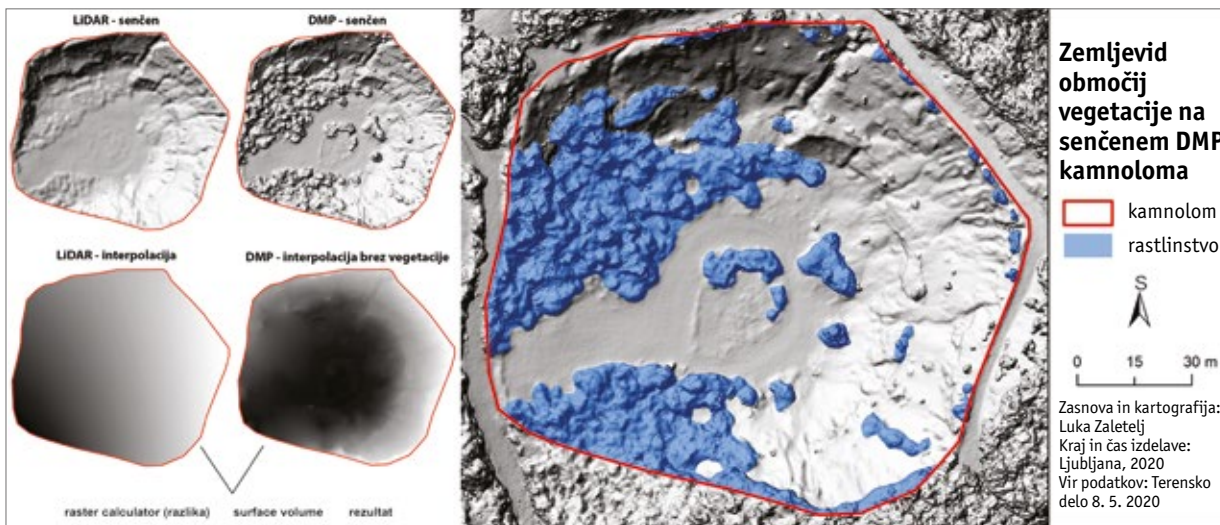
3D-model objekta in njegova izdelava

Pri izdelavi 3D-modela objekta z brez-pilotnim zrakoplovom lahko potegnemo številne vzporednice z izdelavo

digitalnega modela površja, vendar v praksi obstaja kar nekaj ključnih razlik. Prva je praviloma drugačna krivulja leta. Pri izdelavi DMP-ja se črte leta sekajo med seboj pod pravim kotom, pri izdelavi 3D-modela pa gre praviloma za kroženje okrog objekta. Druga razlika je namen. Pri izdelavi 3D-modela je naš interes pogosto ta, da je končni izdelek čimbolj točen. Drugače povedano, med analizo je čimveč podatkov pridobljenih neposredno iz posnetkov in s tem je manj izračunanih oziroma interpoliranih vrednosti. Tretja razlika je večja natančnost. Vzrok za to je predvsem osredotočenost na en, praviloma manjši objekt, kakršen je na primer hiša. Zajem 3D-modela je tudi hitrejši in nam poleg vizualizacije služi tudi kot pomembna podlaga za prostorsko načrtovanje in druge prostorske stroke.

Terensko delo je potekalo 26. maja 2020 na vzpetini Sveta Ana med naseljema Jezero in Podpeč, na kateri stoji istoimenska razgledna cerkev. Namen

Slika 7: Zemljevid območij rastlinstva na območju kamnoloma med Orlami in Laurico.





Slika 8: 3D-model cerkve in prikaz opornih točk za določanje višine objekta.

raziskave je bil zajeti 3D-model cerkvenega objekta. Z aplikacijo Pix4D-capture ustvarjeni model smo primerjali s trenutnim DMNV-jem in dobili višinska odstopanja zajetega modela od reliefa. Postopek izdelave je enak kot pri izdelavi digitalnega modela površja.

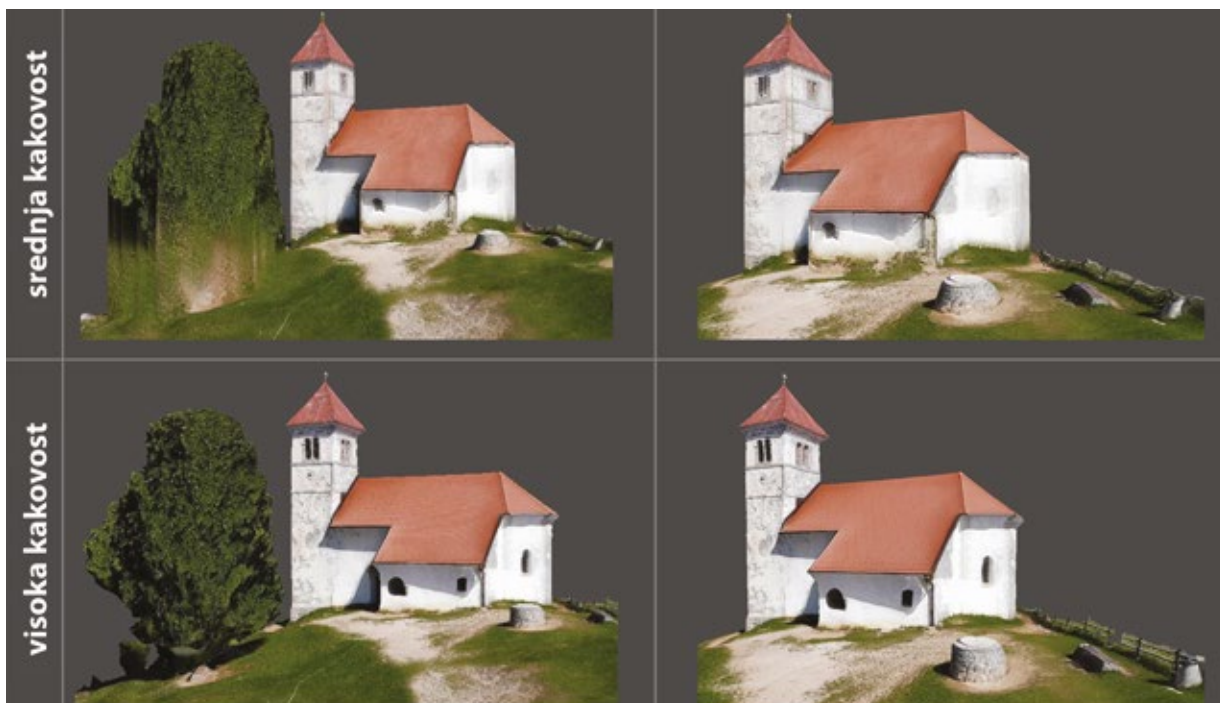
Z uporabljenimi metodami smo želeli določiti višino objekta. Na ustvarjenem modelu smo iskali razlike v višini točk na zvoniku, slemenu strehe in tlemi ob vhodu v cerkev. Nadmorska višina slednje točke je 482,93 m (ARSO 2015). Iz podatkov katastra stavb izvememo, da je najvišji del stavbe (zvonik) na absolutni nadmorski višini 499,90 m. Podatki iz ustvarjenega 3D-modela pa kažejo, da je nadmorska višina vrha zvonika 500,52, razlika med obema meritvama je torej približno 62 cm (GURS 2020a). Vzrokov zanj je lahko več. Gre ali za napako ustvarjenega podatkovnega sloja ali pa je do razlike prišlo pri opravljenih dveh meritvah najvišjega dela stavbe.

Na vrhu zvonika je namreč križ, ki ga ustvarjeni 3D-model vključuje kot dodatno višino, vprašanje pa je, ali so ga upoštevali tudi pri terenski meritvi za kataster stavb. Našo domnevo podpre tudi na oblaku točk preverjeno dejstvo, da je višina križa 64 cm, kar je precej podobno številki odstopanja podatkovnih slojev. V kolikor to vrednost odštejemo, je nadmorska višina najvišjega dela stavbe 499,88 m, kar je le 2 cm manj od uradne terenske meritve opisnih podatkov katastra stavb. Iz tega lahko izračunamo, da je najvišja točka na križu od tal pri vhodu v cerkev oddaljena 17,59 m.

Da bi določili nadmorsko višino glavnega slemena strehe, smo uporabili alternativno metodo. Sprva smo ustvarjen podatkovni sloj senčili z uporabo orodja "Hillshade", s katerim je bilo sleme bolj vidno. Ustvarili smo nov linijski vektorski sloj, ki smo ga umestili na sleme in z ukazom "Stack Profile" v preglednici dobili točke in pripadajoče nadmorske višine vzdolž

linijskega sloja. Na slemenu je bilo ustvarjenih 141 točk s pripadajočimi vrednostmi nadmorskih višin v intervalu od 492,25 do 492,31 m (razpon je torej 6 cm), povprečna višina pa je bila 492,27 m. S to povprečno vrednostjo lahko izračunamo, da je glavno sleme od talne točke pri vhodu oddaljeno 9,34 m.

Za potrebe primerjave smo izdelali še model, ki se od prvega razlikuje po tem, da so bile nastavitve izdelave oblaka točk večje kakovosti (več ustvarjenih točk). Na sliki 9 vidimo primerjavo obeh modelov. Opazimo lahko, da je spodnji model zaradi večjega števila ustvarjenih točk natančnejši in zaradi manjše potrebe po interpolaciji vsebuje več podrobnosti, kar je na modelu najbolj vidno ob primerjavi drevesne krošnje. Razlika je opazna tudi pri manjših objektih na desnem paru slik, kjer na primer sivi kamniti objekt zaradi interpolacije na zgornjem delu slike ni pravilne oblike. Iz tega lahko sklepamo, da je



Slika 9: Grafična primerjava ustvarjenih modelov (Avtor: Zaletelj 2020)

uporaba boljših nastavitvev zagotovo priporočljiva, če to le dopušča strojna oprema.

Sklep

Brezpilotni zrakoplovi, nekdanj zgolj vojaška tehnologija, doživljajo hitro rast razširjenosti uporabe, kar odpira možnost vse več posameznikom, da jih uporabijo tudi v znanstveno-raziskovalne namene. Z brezpilotnim zrakoplovom smo uspešno izdelali tako imenovane popolne ortofoto posnetke, digitalni model površja in 3D-model objekta.

V primerjavi s trenutnimi državnimi podatki so bili z brezpilotnim zrakoplovom ustvarjeni podatki večje prostorske ločljivosti, obenem pa nam metoda omogoča, da podatke zajamemo, kadar jih potrebujemo, oziroma, kadar nam to ustreza in s tem nismo

omejeni le na javno dostopne podatke. Možnosti uporabe brezpilotnih zrakoplovov za potrebe fotogrametrije in kartografije so številne, uporabimo jih lahko v kmetijstvu, geomorfologiji, za namene klimatoloških študij, pri prostorskem načrtovanju in v številnih drugih strokah (Bitenc 2015). Kljub nekaterim pomanjkljivostim so trenutne aplikacije za načrtovanje letov celostno gledano intuitivne, uporabnikovim potrebam prilagodljive in varne za uporabo, saj med terenskim delom ni prišlo do nobenih nevarnih dogodkov, kar je pomembno, saj avtor aplikacij ni proizvajalec brezpilotnega zrakoplova. Pri manjših količinah slik (< 100) za analizo v sprejemljivem času zadostuje tudi strojna oprema nižjega cenovnega ranga.

Kot operater brezpilotnega zrakoplova sem bil omejen le na območja brez

izrazite prisotnosti in posegov človeka, kar onemogoča preučevanje večine družbenogeografskih procesov. Ob ustreznem usposabljanju in pridobljenih dovoljenjih je ta problem praktično brezpredmeten. Druga slabost je dokaj omejena uporabnost brezpilotnih zrakoplovov. Čeprav so lahko kartografski izdelki brezpilotnih zrakoplovov za določene namene zadovoljivi, pa so v primeru znanstvenih raziskav večinoma uporabni le brezpilotni zrakoplovi višjega cenovnega razreda, saj je le z njimi mogoče doseči najvišjo možno natančnost in objektivnost pridobljenih podatkov. Poleg kakovosti izdelka je lahko problematičen tudi razmeroma kratek čas letenja (med 10 in 30 minut na baterijo), predvsem na območjih brez dostopa do elektrike, kjer smo pri uporabi zrakoplova omejeni s številom baterij. Prav izboljšanje baterije je pomembna

smernica trenutnega razvoja zrakoplovov, saj se proizvajalci že približujejo 40-minutnemu času trajanja poleta z eno baterijo.

Za izdelavo digitalnega modela površja in obdelavo aerofotografij z brezpilotnega zrakoplova je potrebna tudi precej zmogljivejša strojna oprema, kot smo jo imeli na razpolago. Tudi to lahko označimo kot slabost metode, saj smo čas analiz in obdelave merili v dnevih. Če bi uporabili nastavitve

višje kakovosti (več ustvarjenih točk, manj posploševanja in interpolacije vrednosti ...) predvidevamo, da bi bili tudi rezultati bolj kakovostni. Vse več plačljive programske opreme za analizo posnetkov že ponuja tako imenovano oblačno analizo, ki razbremenjuje uporabnikovo strojno opremo.

Brezpilotni zrakoplovi zagotovo ne spadajo več na področje znanstvene fantastike. Gre za uporabno tehnologijo daljinskega zaznavanja v števil-

nih dejavnostih, kakršna je na primer kmetijstvo, ki bo v prihodnosti, poleg vojske, nedvomno glavna tržna niša za nakup brezpilotnih zrakoplovov. Za zdaj je tako tovrstna metoda še vedno premalo izkoriščena, znanje za njeno uporabo pa je vendarle izredno cenjeno. To je lahko pomembna motivacija geografov z naprednimi računalniškimi znanji, da prevzamemo pobudo in to metodo nadalje razvijamo, s tem pa krepimo geografsko vedo in njen pomen.

Viri in literatura

1. Agisoft LLC 2019: Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5. Medmrežje: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf (17. 4. 2020).
2. ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje) 2020: Klimatološke vrednosti za preteklih 30 dni na postaji Ljubljana. Medmrežje: http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/graph/sl/by_location/ljubljana/last30days_ljubljana.txt (16. 5. 2020).
3. Atlas okolja ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje) 2015: Lidar podatki po listih v projekciji D48GK (1 km²). Medmrežje: http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso (5. 5. 2020).
4. Bitenc, M. 2014: Brezpilotni letalniki – od igrače do večnamenskih robotov. Geodetski vestnik 58-1. Medmrežje: <http://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:doc-SGL7S9PW/0e548d79-4534-40d5-8cd9-bc3fb5252882/PDF> (8. 3. 2020).
5. CAA (Javna Agencija Republike Slovenije za civilno letalstvo) 2020b: Nova skupna EU ureditev. Medmrežje: <https://www.caa.si/nova-skupna-eu-ureditev.html> (17. 4. 2020).
6. CAA (Javna Agencija Republike Slovenije za civilno letalstvo) 2020a: Karta območij omejitve letenja brezpilotnih zrakoplovov. Medmrežje: <https://caa-slovenia.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=1136c5f0c19346238db3112c5ddf011e> (15. 3. 2020).
7. DJI 2018: Mavic Air user manual v1.2. Medmrežje: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic%20Air/201911um/Mavic_Air_User_Manual_v1.2_en.pdf (3. 12. 2019).
8. DroneDeploy. Medmrežje: <https://www.dronedeploy.com/product/mobile/> (26. 4. 2020).
9. Eisenbeiss, H. 2009: UAV photogrammetry. Doktorsko delo, ETH Zürich. Zürich. Medmrežje: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005939264> (19. 4. 2020).
10. GURS (Geodetska uprava Republike Slovenije) 2019: Zbirka podatkov daljinskega zaznavanja DOF050. Medmrežje: <https://egp.gu.gov.si/egp/> (5. 5. 2020).
11. GURS (Geodetska uprava Republike Slovenije) 2020a: Grafični in opisni podatki katastra stavb. Medmrežje: <https://egp.gu.gov.si/egp/> (29. 5. 2020).
12. GURS (Geodetska uprava Republike Slovenije) 2020b: Ortofoto. Medmrežje: <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/topografski-in-kartografski-podatki/ortofoto/> (9. 4. 2020).
13. Hrvatin, M. 2010: Podpeško jezero. Digitalna enciklopedija naravne in kulturne dediščine (DEDI). Medmrežje: <http://www.dedi.si/dediscina/384-podpesko-jezero> (6. 4. 2020).
14. Montes de Oca, A., Arreola L., Flores, A., Sanchez, J., Flores, G. 2018: Low-cost multispectral imaging system for crop monitoring. 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Dallas. Medmrežje: https://www.researchgate.net/publication/325094094_Low-cost_multispectral_imaging_system_for_crop_monitoring (28. 2. 2020).
15. NDWI. Earth observing system 2020. Medmrežje: <https://eos.com/ndwi/> (5. 4. 2020).
16. Oštir, K. 2006: Daljinsko zaznavanje. Ljubljana. Medmrežje: <https://iaps.zrc-sazu.si/sites/default/files/9616568728.pdf> (11. 3. 2020).
17. Pix4Dcapture. Medmrežje: <https://www.pix4d.com/> (26. 4. 2020).
18. Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov. Uradni list Republike Slovenije 52/16. Ljubljana.
19. Zaletelj, L. 2020: Uporaba brezpilotnih zrakoplovov za potrebe fotogrametrije in kartografije. Zaključna seminarska naloga, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani. Ljubljana.