

Zajem geografsko označenih meritev z brezpilotnim zrakoplovom

Aleks Gabrič, Peter Miklavčič, Aljaž Blatnik, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: aleks.gabric5@gmail.com

Capturing geographically-tagged measurements using an unmanned aircraft

Abstract. *In recent years, aerial drones have become accessible to the average user due to miniaturization, integrated circuit development, and the open-source community. By employing various sensors, they offer a cost-effective way of acquiring geo-tagged measurements while in flight. Primarily, global navigation satellite systems (GNSS) and barometric altimeters are used. The flight controller can also provide IMU-corrected and Kalman-filtered estimations, much faster than a GNSS receiver's location-fix rate.*

This paper presents an attempt at capturing geo-tagged measurements using an unmanned aircraft, focusing on the analysis of altitude measurements. It concludes with a basic evaluation of usability of such aircraft as a measurement platform in the air.

1 Uvod

Brepilotni zrakoplovi (angl. unmanned aerial vehicles – UAV), v nadaljevanju tudi droni, so v zadnjih letih zaradi miniaturizacije, razvoja integriranih vezij in vgrajenih sistemov, nizke cene sestavnih delov ter odprtokodne skupnosti, postali dostopni širši javnosti.

V zadnjem času pogosto omenjan razvoj poteka v smeri avtonomnosti pri dostavi poštnih paketov [1], ter kot pojasnjuje Kim J., vzpostaviti nizkokcenovnih geolokacijskih markerjev. Opravljanje poštnih storitev je zgolj ena izmed možnosti. Tako L. Apvrille skupaj z ekipo raziskuje možnost uporabe brezpilotnih letalnikov pri preiskavi nesreč v gorah [2]. Majhno in lahko plovilo lahko ponudi hiter pregled iz zraka in po prednastavljeni trasi opravlja tudi naloge iskanja pogrešane osebe. Pri tem je pomembna orientacija plovila v prostoru za zagotavljanje sistematičnega preleta celotnega območja. Vizualni pregled na višini zahtevajo tudi daljnovidni visokonapetostnih sistemov, kjer so z uporabo brezpilotnih letalnikov stroški znatno nižji. Pri letu po vnaprej določeni poti izziv predstavlja predvsem nenadna izguba signala GNSS ali morebiten trk v daljnovod [3].

Izogib trkom je ključnega pomena tudi pri iskanju min oziroma čiščenju le-teh iz obstoječih minskih polj. Zaradi kratkega dometa talnega radarja mora brezpilotno plovilo leteti blizu tlem, se izogibati oviram in biti odporno na motnje ter izpad signala GNSS (zaradi morebitnih nebo-zastirajočih ovir). J. Colorado kot ključnega pri zagotavljanju točne geolokacije navaja načrtovanje paralelnega sistema, ki podatke pridobiva od številnih senzorjev in jih tudi ovrednoti [4].

M. Kan in M.A. Dinesh navajata, da za zagotavljanje avtonomnosti dronov zadostuje sistem GPS (angl. Global Positioning System) oziroma ustrezna konkurenčna različica, skupaj z barometrom, pospeškometrom, žiroskopom in kompasom ter ustrezno obdelavo [5] [6].

Namen prispevka je prikazati poskus zajema geoznačenih meritev na nizkokcenovnem brezpilotnem zrakoplovu, s fokusom analize na meritvah višine. Podana je tudi groba ocena uporabnosti zrakoplova kot merilne platforme za izvajanje meritev v zraku.

2 Določanje položaja plovila

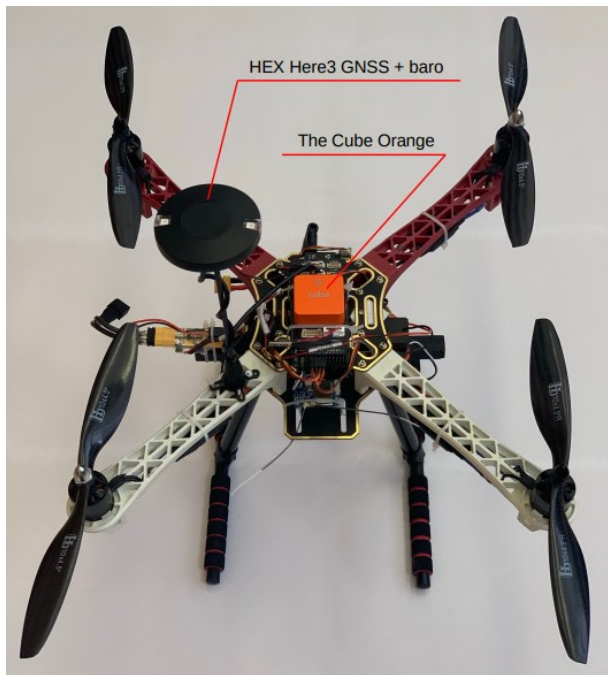
Brepilotni zrakoplovi s pripadajočo senzoriko lahko omogočijo cenovno učinkovit način zajemanja geografsko označenih meritev v zraku [7]. Pri tem so ključnega pomena globalni navigacijski satelitski sistemi (angl. global navigation satellite systems – GNSS). GNSS je sistem umetnih zemeljskih satelitov, ki omogoča precej zanesljiv način določanja položaja na Zemlji in v tanki plasti zračnega prostora. Trenutno na globalnem nivoju delujejo štirje navigacijski sistemi:

- ameriški GPS,
- ruski GLONASS,
- evropski Galileo,
- kitajski BeiDou.

GNSS deluje na principu meritev razlik oddaljenosti od radijskih svetilnikov (hiperbolični sistem), ki jih predstavljajo sateliti v zemeljski tirnici [8]. Ti se nahajajo na višini okrog 20.000 km nad Zemljo in oddajajo pakete podatkov z informacijo o času oddaje ter lokaciji satelita. Iz sprejetih navigacijskih signalov uporabniška naprava izmeri razlike v časih med posameznimi svetilniki. Sprejemnik sprejme relativne čase posameznih radijskih svetilnikov in izračuna svojo lokacijo. Zaradi uporabe časa kot glavnega načina merjenja razdalje morajo biti oddajniki in sprejemniki zelo dobro sinhronizirani. To na oddajni strani zagotavljajo zelo stabilne atomske ure. Zaradi stabilnega časovnega vira je GNSS možno uporabljati tudi kot časovno referenco. GPS ima uro z natančnostjo 10 ns, za sprejemnike na Zemlji pa se ta v praksi izkaže od 100 ns do 1 μ s [9]. Za izračun polne lokacije (zemljepisna širina, dolžina ter višina, tako imenovani *3D fix*) je potrebno prejemati in obdelovati signal vsaj štirih satelitov, z več sateliti pa zagotovimo manjšo napako meritve. Sodobni GNSS lahko s pomočjo dodatnih popravkov (angl. real-time kinematics - RTK) dosežejo tudi nekajcentimetrsko natančnost.

3 Platforma za zajemanje geografsko označenih meritev

Osnova za zajemanje meritev je brezpilotni letalnik domače izdelave, ki ga prikazuje slika 1. Zrakoplov ima maso 1400 g in v zmernem vetru lahko v zraku ostane do 15 minut. Za stabilizacijo, navigacijo in avtomatsko letenje uporablja odprtokodni krmilnik leta The Cube Orange [10] z nameščeno odprtokodno programsko opremo ArduPilot Copter [11] različice 4.0.7.



Slika 1. Brezpilotni letalnik.

Celoten sistem vsebuje več senzorjev in je prikazan z blokovno shemo na sliki 2. Za letenje in zajem geoznačenih meritev so pomembni:

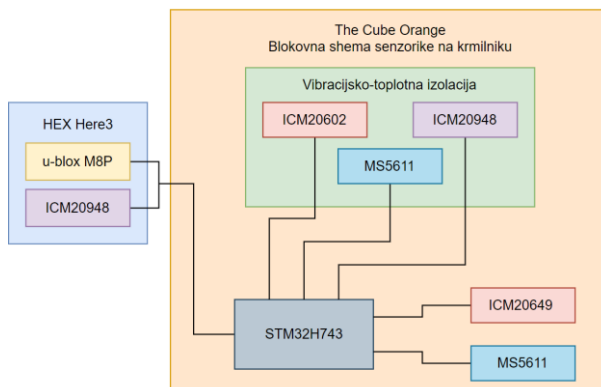
- Tri triosni integrirani pospeškometri in žiroskopi ICM20649, ICM20602 in ICM20948
- Triosni merilnik zemeljskega magnetnega polja (magnetometer) ICM20948,
- Dva senzorja tlaka (barometra) MS5611,
- Sprejemnik GNSS u-blox M8P z dodatnim magnetometrom ICM20948.

Pospeškometri, žiroskopi ter magnetometer so v sistem vključeni redundantno, kar pomeni, da drug drugega nadomeščajo v delovanju. Programska oprema se med letom odloča, kateri senzor bo uporabljen za stabilizacijo in navigacijo glede na kvaliteto zajetih meritev posameznega senzorja.

Dva pospeškometra in en senzor tlaka so vibracijsko in toplotno izolirani ter ogrevani na konstantno temperaturo 45°C, kar bistveno zmanjša vpliv okolice. Letalnik za stabilizacijo uporablja pospeškometer ter žiroskop, kar v praksi ni dovolj za navigacijo po prostoru, saj zaradi seštevanja napak opazimo časovno lezenje izračunanih vrednosti. Uporabno točen položaj lahko merita približno 10 sekund. Za točnejšo navigacijo je

uporabljen sprejemnik GNSS Here3 proizvajalca HEX [12], ki uporablja široko dostopen modul u-blox M8P. S krmilno enoto ta komunicira po vodilu CAN (angl. Controller Area Network) [13].

Po podatkih proizvajalca naj bi tak sprejemnik zagotavljal natančnost lokacije do 2,5 m. S sočasnim sprejemom dveh različnih satelitskih navigacijskih sistemov GNSS (GPS ter GLONASS) v praksi opazimo natančnost pod enim metrom v horizontalni ravnini. Modul u-blox M8P sprejema GPS, GLONASS ter BeiDou, a le dva sočasno.

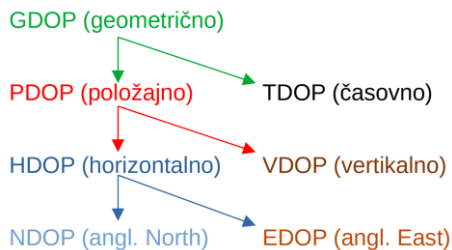


Slika 2. Blokovni načrt krmilnika leta skupaj s senzorji.

4 Priprava na zajem meritev

Natančnost izmerjene lokacije je primarno odvisna od položaja satelitov GNSS v prostoru. Kakovost položaja satelitov se podaja z vrednostjo redčenja natančnosti (angl. dilution of precision – DOP) [14]. Glede na željen merilni rezultat poznamo različne oblike redčenja natančnosti, ki jih prikazuje slika 3:

- GDOP (angl. Geometric Dilution Of Precision) – geometrično redčenje natančnosti, celotna točnost,
- PDOP (angl. Positional Dilution Of Precision) – položajno redčenje natančnosti, položajna točnost,
- TDOP (angl. Time Dilution Of Precision) – časovno redčenje natančnosti, časovna točnost,
- HDOP (angl. Horizontal Dilution Of Precision) – horizontalno redčenje natančnosti, horizontalna točnost,
- VDOP (angl. Vertical Dilution Of Precision) – višinsko redčenje natančnosti, višinska točnost.

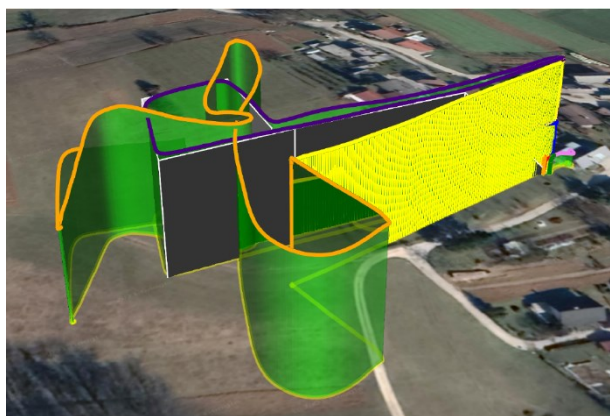


Slika 3. Redčenje natančnosti GPS/GNSS.

GNSS sistemi so zelo dobri za zajemanje zemljepisne širine in dolžine (meritev v horizontalni ravnini), nekoliko manj točni pa so pri določanju višine (vertikalne koordinate). Zaradi tega se za merjenje višine uporabljajo dodatni senzori, kot na primer radar, lidar ali barometer. Radar in lidar višino določita z meritvijo zakasnitve odboja od tal ter ustrezne obdelave podatkov. Sta precej uporabna načina merjenja razdalje, a oba pomenita opazno dodatno težo in večji strošek končnega sistema. Poleg tega njune meritve motijo tresljaji in nehomogen in/ali absorptiven teren (na primer rastje), kar privede do večje merilne negotovosti.

Kot cenovno ugodna rešitev se na dronih navadno uporabljajo senzori tlaka (barometri), ki v izvedbah za splošno uporabo ponujajo približno decimetrsko natančnost. Ker propelerski pogon zrakoplova v svoji okolici povzroča hitre spremembe zračnega tlaka, je za zanesljivo delovanje barometra potrebno presejanje vrednosti. ArduPilot uporablja razširjeno Kalmanovo sito (angl. extended Kalman filter – EKF), ki obdeluje podatke vseh senzorjev na krmilniku in vsako iteracijo izračuna optimalen podatek o lokaciji in orientaciji naprave glede na uporabljeno senzoriko. Krmilna zanka teče s frekvenco 400 Hz, zbiranje njenih meritev pa z 10 vzorci na sekundo za pospeškometre, žiroskope, magnetometer in barometer ter s 5 vzorci na sekundo za lokacijo, pridobljeno z GNSS.

Za ovrednotenje meritev smo načrtovali ustrezno pot poleta, ki jo prikazuje slika 4. Testni polet smo opravili v dobrih 15 minutah, kolikor je tudi avtonomija drona. Prvi del poleta smo opravili z avtopilotom, drugega pa ročno. V času poleta je bilo zabeleženih približno 4500 vzorcev lokacije. Pri skupni višinski razliki 40 m se ta z večjimi in manjšimi spremembami ter vmesnimi pristanki in letenjem na konstantni višini spremeni 15-krat.



Slika 4. Prikaz testnega poleta v programu Google Earth.

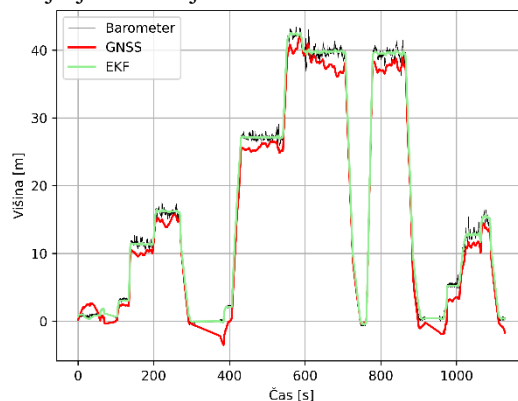
5 Prikaz merilnih rezultatov

Pri analizi meritev smo se osredotočili na primerjavo višinskih profilov, izmerjenih z barometrom in sprejemom GNSS. Zmogljivost GNSS v horizontalni ravnini je dobro raziskana in poleg samih pogojev sprejema v praksi najbolj odvisna od zmogljivosti sprejemnika, ki si ga lahko privoščimo glede na fizikalne in finančne omejitve.

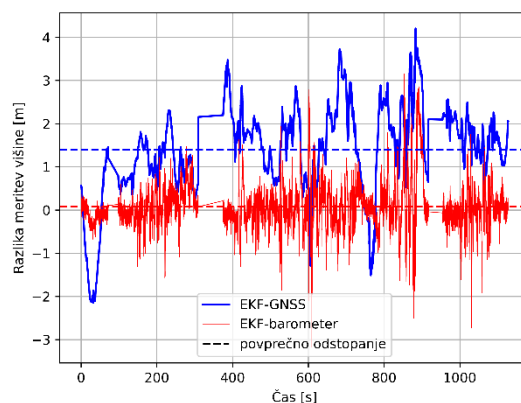
Zaradi manjše občutljivosti GNSS v vertikalni smeri ($VDOP > HDOP$) se za meritev višine primarno

uporablja senzorje zračnega tlaka, Kalmanovo sito pa poleg tega lahko upošteva tako sprejemnik GNSS, kakor tudi ostale prej naštetje senzori. Vprašanje je, ali s tem doseže natančnost, primerljivo s HDOP. Povprečna vrednost HDOP med letom je znašala 0,74 m.

Primerjava med višinskim profilom, pridobljenim iz surovih barometriških podatkov ter iz lokacij GNSS in EKF je vidna na sliki 5. Če preverimo ali vsaj privzamemo uspešno ohranjanje konstantne višine v intervalih med njenimi spremembami, lahko hitro opazimo predvidevanja iz teorije: visoka korelacija vrednosti barometra kot primarnega sensorja višine in izhoda EKF, manjši točnost in natančnost GNSS glede na barometer/EKF in tudi manjša točnost barometriške višine glede na vrednost, presejano z EKF. Poleg tega lahko opazimo uspešno detekcijo vmesnih pristankov s hitro rekalkulacijo sita, kjer se vrednost izhoda EKF vsakič uspešno umiri na začetno vrednost. Zanimiva pa je tudi močnejša valovitost na višinah, ki jo pripisujemo tamkajšnjim močnejšim vetrovom.



Slika 5. Višinski profili, izmerjeni z barometrom, sprejemnikom GNSS ter Kalmanovim sitom.

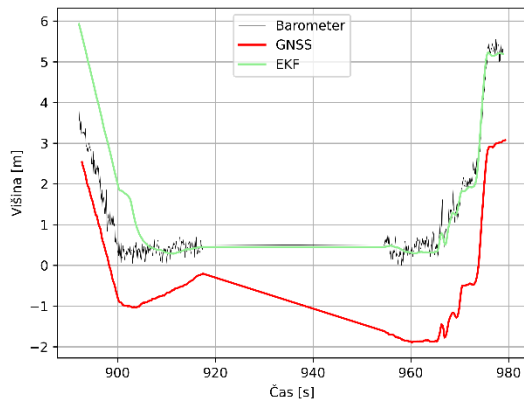


Slika 6. Razliki višin EKF-barometer in EKF-GNSS.

Na sliki 6 sta prikazani razliki med referenčno višino, za katero smo privzeli izhod EKF ter višinama, izmerjenima z barometrom in sprejemom GNSS. Višina po GNSS je precej nenatančna, saj opazimo tudi do 4 m odstopanja (10% pri višini 40 m). Barometriška višina je natančnejša, a vseeno potrebuje kar nekaj procesiranja, da je zagotovljen verodostojen in uporaben rezultat. Tudi na tem grafu lahko na krivulji EKF-GNSS opazimo višjo valovitost pri vzdrževanju visoke višine, zelo verjetno

kot posledico vetrov. Standardni odklon razlik meritev EKF-GNSS znaša 1,06 m, EKF-barometer pa 0,56 m.

Na sliki 7 so prikazani enaki višinski profili kot na sliki 5 približno minuto dolgega postanka na tleh. Vidno je odstopanje meritev GNSS tudi pod začetno višino tal. Med postankom je bil približno 40 sekund izklopljen pogon, kar je lepo vidno z umiritvijo izhoda barometra. Rekalibracija EKF je potekala med $t = 900$ s in $t = 915$ s.



Slika 7. Višinski profili med postankom na tleh.

6 Zaključek

Med testiranjem se je brezpilotni zrakoplov izkazal za dober način geografskega označevanja meritev. Sprejemnik GNSS v kombinaciji z barometrom in ostalimi senzorji omogoča dovolj natančno lociranje po vseh treh koordinatah prostora za marsikatero aplikacijo. Z uporabo popravkov GPS RTK bi natančnost lahko izboljšali do nekajcentimetskega območja, vendar so primeri uporabe, ki zahtevajo takšno natančnost redkejši (na primer geodetske meritve).

Največjo omejitev predstavlja teža merilne opreme. Z dodajanjem bremen letalnik hitro izgublja okretnost in avtonomijo, prav tako ni prav visoka zgornja meja nosilnosti. Z večanjem baterije ne pridemo daleč, ker s tem opazno večamo skupno maso, kar za sabo potegne potrebo po motorjih večje moči, in tako naprej, podobno kot pri raketni enačbi. Trenutno razmerje teža-potisk je približno 1:2, kar je blizu spodnje meje uporabnosti takšnega drona. Vseeno lahko zaključimo, da je za nizkocenovni brezpilotni zrakoplov natančnost meritev nad pričakovanji.

Zahvala

Delo je nastalo pod okriljem programa NATO Znanost za mir, projekta CLARIFIER - SPS.MYP G5888. *This research is supported by CLARIFIER, NATO multi-year project Project CLARIFIER - SPS.MYP G5888.*

Literatura

- [1] J. Kim, „Autonomous flight system using marker recognition on drone,“ *2015 21st Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV)*, str. 1-4, 2015.
- [2] L. Apvrille, T. Tanzi in J.-L. Dugelay, „Autonomous drones for assisting rescue services within the context of natural disasters,“ *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, str. 1-4, 2014.
- [3] M. Morita, H. Kinjo, S. Sato, T. Sulyyon in T. Anezaki, „Autonomous flight drone for infrastructure (transmission line) inspection (3),“ v *2017 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)*, Okinawa, Japan, 2017.
- [4] J. Colorado, C. Devia, M. Perez, I. Mondragon, D. Mendez in C. Parra, „Low-altitude autonomous drone navigation for landmine detection purposes,“ v *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, 2017.
- [5] Masataka Kan et al., „Development of Drone Capable of Autonomous Flight Using GPS,“ v *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018 Vol II*, Hong Kong, 2018.
- [6] Dinesh M.A. et al., „Development of an Autonomous Drone for Surveillance Application,“ *International Research Journal of Engineering and Technology*, Izv. 5, št. 8, str. 331-333, 2018.
- [7] J. Jeziorska, „UAS for Wetland Mapping and Hydrological Modeling,“ *Remote Sensing*, Izv. 11, št. 17, 2019.
- [8] D. M. (ur.), *Uporaba vesoljskih tehnologij*, Radovljica: Didakta, 1996.
- [9] „GPS time accuracy“. Dostopno: <https://www.atomic-clock.galleon.eu.com/support/gps-time-accuracy.html>. [Dostopano 20.07.2021].
- [10] „The Cube Orange autopilot“. Dostopno: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-thecubeorange-overview.html>. [Dostopano 20.07.2021].
- [11] „ArduPilot Copter“. Dostopno: <https://ardupilot.org/copter/>. [Dostopano 20.07.2021].
- [12] „Here3 sprejemnik GNSS“. Dostopno: <https://docs.cubepilot.org/user-guides/here-3/here-3-manual>. [Dostopano 20.07.2021].
- [13] Dewesoft, „What Is CAN Bus (Controller Area Network) and How It Compares to Other Vehicle Bus Networks,“ Dewesoft, 17 02 2021. Dostopno: <https://dewesoft.com/daq/what-is-can-bus>. [Dostopano 25.07.2021].
- [14] J. Konečnik, *Integracija sistemov GPS in GLONASS v geodetski izmeri*, Ljubljana: Diplomaska naloga, 2008.