

UDK 528:681.586:528.089.6:004.6

Stručni članak

Direktno georeferenciranje senzorom POS AV510

Davor MILAS – Osijek¹

SAŽETAK. Članak obrađuje osnove direktnog georeferenciranja, posebno je objašnjeno direktno georeferenciranje senzorom POS AV510. Detaljno se obrađuje kalibracija senzora, planiranje rada sa senzorom te inicijalizacija cijelog sustava. Na kraju se opisuje obrada podataka prikupljenih u radu sa senzorom.

Ključne riječi: direktno georeferenciranje, integrirani sustavi, inercijalni sustavi, GPS.

1. Uvod

Zbog sve veće primjene tehnologije GPS-a (Global Positioning System) i razvoja satelitske geodezije pokazala se potreba integracije GPS-a s inercijalnim mjernim sustavom (IMU – Inertial Measuring Unit). Glavna je prednost integracije tih sustava njihovo nadopunjavanje. Slabosti jednog sustava ujedno su i prednosti drugog sustava. Mane su inercijalnih sustava gomilanje pogreške s proteklom vremenom i prijednim putom, što nije slučaj s GPS-sustavom. S druge strane mana je GPS-sustava nemogućnost mjerenja u uvjetima u kojima signal sa satelita nije dostupan. U takvim situacijama dolazi do izražaja IMU-sustav.

ABGPS (Airborne Global Positioning System) je kratica za korištenje GPS-tehnologije u svrhu smanjenja broja orijentacijskih točaka potrebnih za aerotriangulaciju.

Korištenje takvih sustava u osnovi uklanja potrebu za aerotriangulacijom i orijentacijskim točkama osim za kalibriranje sustava.

2. Direktno georeferenciranje

Georeferenciranje ili orijentacija snimaka definirana je transformacijom između slikovnog koordinatnog sustava i referentnog koordinatnog sustava u kojem se kartira.

¹ Davor Milas, ing. geod., Geodetski zavod d.d. Osijek, Jegerova 4, 31000 Osijek, e-mail: davor.milas@gmail.com.

Taj postupak zahtijeva poznavanje elemenata unutrašnje orijentacije (glavna točka kamere, konstanta kamere i ADP) i elemenata vanjske orijentacije za svaku pojedinu snimku. Elementi vanjske orijentacije (*exterior orientation parameters – EOP*) definiraju položaj i orijentaciju kamere u trenutku ekspozicije prema referentnom koordinatnom sustavu.

Kod tradicionalnog načina računanja elementi vanjske orijentacije dobivaju se aerotriangulacijom. Za aerotriangulaciju je potrebno na terenu odrediti određeni broj orijentacijskih točaka. Njihove koordinate potrebno je odrediti u referentnom koordinatnom sustavu.

Transformacija između slikovnoga koordinatnog sustava i referentnoga koordinatnog sustava prema El-Sheimy (1996) definirana je izrazom (1):

$$r_p^m = r_{pc}^m(t) + sR_i^m(t)r_p^i, \quad (1)$$

gdje su:

r_p^m – vektor koordinata točke p u referentnom koordinatnom sustavu

r_{pc}^m – vektor koordinata projekcijskog središta u referentnom koordinatnom sustavu

R_i^m – rotacijska matrica između slikovnog i referentnoga koordinatnog sustava

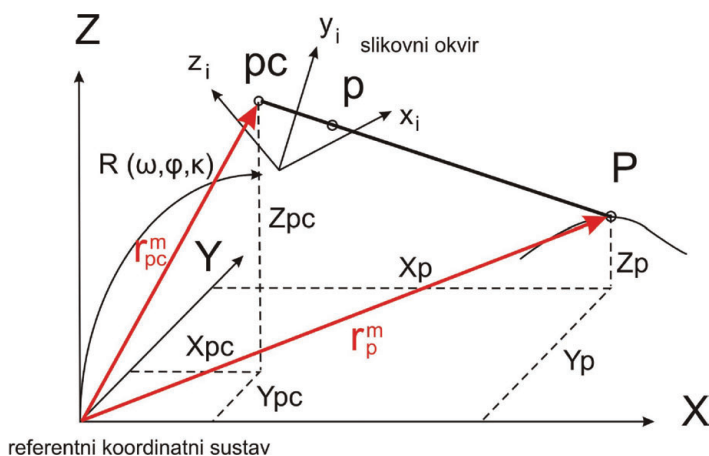
r_p^i – vektor koordinata točke p u slikovnom koordinatnom sustavu

t – vrijeme ekspozicije

s – scale faktor.

U navedenom izrazu i je slikovni koordinatni sustav, a m referentni koordinatni sustav.

Parametri vanjske orijentacije predstavljeni su izrazima $r_{pc}^m(t)$ (tri translacije) i $R_i^m(t)$ (tri rotacije). Slika 1 prikazuje odnos slikovnog i referentnoga koordinatnog sustava.



Slika 1. Odnos slikovnog i referentnoga koordinatnog sustava.

Uvođenjem GPS i INS senzora dolazimo do modela direktnog georeferenciranja, koji je definiran izrazom (2):

$$r_p^m = r_{GPS/INS}^m(t) + R_b^m(t)(sR_i^b r_p^i - a_1^b - a_2^b), \quad (2)$$

gdje su:

r_p^m – vektor koordinata točke p u referentnom koordinatnom sustavu

$r_{GPS/INS}^m(t)$ – vektor koordinata GPS-antene u referentnom koordinatnom sustavu nakon procesiranja i interpolacije GPS/IMU podataka

$R_b^m(t)$ – rotacijska matrica između IMU koordinatnog sustava i referentnoga koordinatnog sustava

s – scale faktor

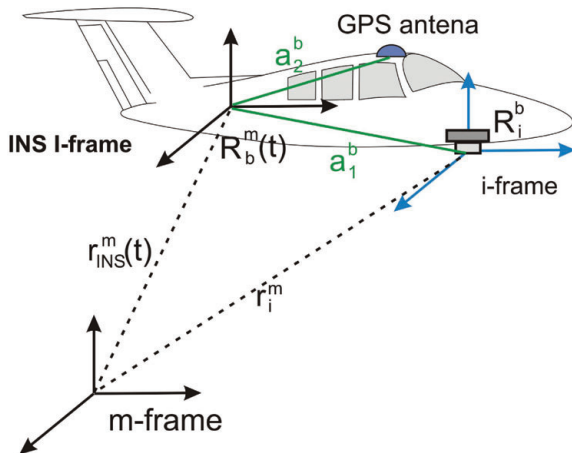
R_i^b – rotacijska matrica između IMU koordinatnog sustava i slikovnoga koordinatnog sustava

r_p^i – vektor koordinata točke p u slikovnom koordinatnom sustavu

a_1^b – odstupanje po osima (lever arm) između IMU koordinatnog sustava i slikovnoga koordinatnog sustava

a_2^b – odstupanje po osima (lever arm) između IMU koordinatnog sustava i GPS-antene.

Koncept direktnog georeferenciranja prikazan je na slici 2.



Slika 2. Direktno georeferenciranje (El-Sheimy 1996).

3. POS AV510

3.1. Komponente sustava

POS AV tvrtke Applanix je hardverski i softverski sustav posebno dizajniran za direktno georeferenciranje (URL 1). Koristi se integriran uz analogne i digitalne aerofotogrametrijske kamere i LIDAR – laserske skenere za skeniranje iz zraka te za podvodna skeniranja.

Konkretni su primjeri korištenja takvih sustava izrada topografskih karata, digitalnih modela terena, ortofoto planova, zatim prikupljanje batimetrijskih podataka, podataka za izradu različitih GIS-sustava i dr.

POS AV koristi integraciju INS i GPS sustava za direktno računanje položaja i orijentacije svake pojedine snimke pri aerofotogrametrijskom snimanju u lokalnom geodetskom datumu.

Važnost te tehnologije posebno dolazi do izražaja kod novih senzora kao što su SAR (Synthetic Aperture Radar) i LIDAR (Light Detection and Ranging), kod kojih se vanjska orijentacija ne može dobiti aerotriangulacijom.

Senzor POS AV510 sastoji se od (slika 3):

- **PCS** (POS Computer System) – računalni dio sustava
- **IMU** – inercijalni mjerni sustav
- **GPS** dvofrekvencijski uređaj s pripadajućom antenom
- **POSPac** – Post-processing softverski paket.



Slika 3. Senzor POS AV510 (URL 1).

PCS (računalni dio sustava) nalazi se integriran u zajedničkom kućištu s GPS-uređajem.

GPS je 12-kanalni dvofrekvencijski (L1/L2) uređaj tvrtke Trimble, kao i pripadajuća antena.

Na kućištu uređaja nalazi se serijski port, mrežno sučelje i priključak za PCMCIA-kartice.

IMU-sustav sastoji se od tri žiroskopa i tri akcelerometra. Žiroskopi služe za određivanje kutnog pomaka, tj. rotacije po osima, i stabilizaciju sustava. Akcelerometri služe za određivanje ubrzanja gibanja iz kojeg se računa prijedeni put.

Frekvencija podataka inercijalnog sustava je 200 Hz.

Karakteristike senzora POS AV510 s različitim metodama računanja dane su u tablici 1.

Nama je najzanimljivija kolona PP s karakteristikama sustava u postprocesiranju.

Tablica 1. *Karakteristike senzora POS AV510 (URL 1).*

POS AV 510	C/A GPS	DGPS	RTK	PP
pozicija (m)	4,0–6,0	0,5–2,0	0,1–0,5	0,05–0,30
brzina (m/s)	0,050	0,050	0,010	0,005
uzd. i pop. nagib (°)	0,008	0,008	0,008	0,005
azimut (°)	0,070	0,050	0,040	0,008

3.2. Kalibracija

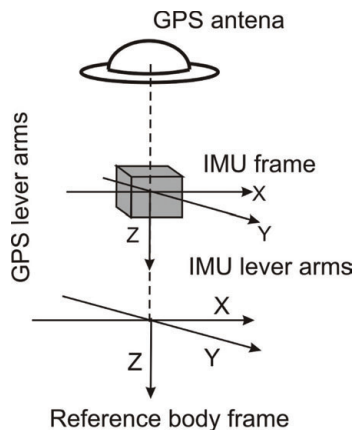
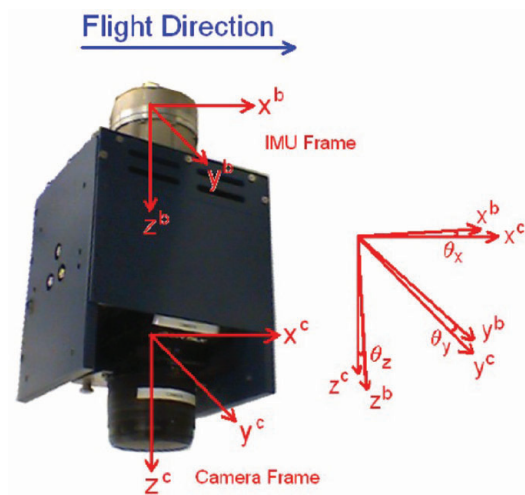
U kombiniranim mjerenjima s više integriranih senzora prema Skaloud (1999) posebnu pozornost treba obratiti na smještaj senzora, sinkronizaciju podataka i tehniku filtriranja.

Senzori na platformi (zrakoplov) smješteni su na različite lokacije. Kamera je smještena na donju stranu zrakoplova iz dobro poznatih razloga. Ostali senzori postavljaju se tako da se smanji utjecaj pogrešaka položaja tih senzora u odnosu na kameru. Inercijalni senzor postavlja se u posebno za to pripremljeno mjesto u tijelu kamere. Time se razlika ishodišta IMU koordinatnog sustava (IMU frame) i slikovnoga koordinatnog sustava (*i* frame) svodi samo na jednu veličinu (razlika po osi Z) koja je unaprijed određena. GPS-antena se također postavlja ako uvjeti to dopuštaju na istu vertikalnu os iznad kamere.

Razlika položaja (lever arms) GPS-antene i kamere izmjeri se klasičnim geodetskim metodama. Međusobni odnos GPS-antene, inercijalnog senzora i kamere u takvom slučaju prikazan je na slici 4. Pozitivan smjer osi X ide prema prednjoj strani zrakoplova, pozitivan smjer osi Y prema desnoj strani zrakoplova, a pozitivan smjer osi Z prema dolje.

Boresight odstupanje je kutno neslaganje između IMU inercijalnoga koordinatnog sustava (IMU frame) i slikovnoga koordinatnog sustava (*i* frame). Boresight odstupanje redovito je mala kutna veličina (slika 5)

Uvriježen način dobivanja tih kutnih odstupanja je boresight kalibracija, koja se izvodi na unaprijed pripremljenom polju za kalibraciju. Na kalibracijskom polju odredi se određeni broj dobro raspoređenih orijentacijskih točaka. Softverski dio paketa POSpac kojim se računaju kutna odstupanja je CalQC. Polje za kalibraciju

Slika 4. *Lever arms.*Slika 5. *Boresight (URL 1).*

snima se iz dvije visine leta zrakoplova i s pomoću aerotriangulacije se dolazi do potrebnih kutnih odstupanja.

Primjer kalibracijskog polja Geodetskog zavoda u Osijeku prikazan je na slici 6.

Sinkronizacija podataka vrlo je važna kod integriranih senzora. GPS-uređaj, inercijalni uređaj i kamera rade sa svojim vremenima i frekvencijama. GPS-uređaj radi po GPS-vremenu, inercijalni uređaj ima integriran vremenski modul ili je sinkroniziran s GPS-om. Kamere su povezane s GPS-uređajem i sinkronizirane s Pulse Per Second (PPS) signalom iz GPS-a.

Tehnika filtriranja i objedinjavanja podataka iz GPS i IMU senzora riješena je uporabom Kalmanova filtra.



Slika 6. Kalibracijsko polje Geodetskog zavoda.

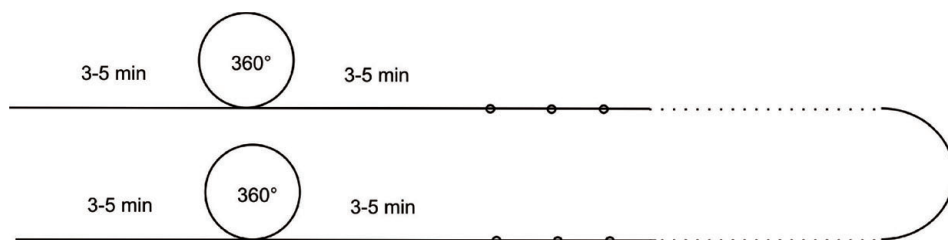
3.3. Planiranje i inicijalizacija

Posebnu pozornost u radu s POS AV senzorom treba posvetiti planiranju. Prilikom planiranja zadatka treba voditi računa o smještaju zemaljskih baznih stanica. Tijekom snimanja osim GPS-uređaja u samom zrakoplovu potrebno je u blizini zadatka imati i GPS-uređaj na zemlji. Za zemaljske bazne stanice koriste se geodetske točke s poznatim GPS-koordinatama. Udaljenost bazne stanice od zrakoplova koji snima ne bi trebala biti veća od 30 km ako želimo fiksna rješenja ambiguiteta. GPS-uređaj mora biti dvofrekvencijski, s mogućnošću registracije podatka od 1 sekunde. U slučajevima velikih zadataka, područje zadatka potrebno je pokriti s više uređaja. Također treba planirati snimanje kada je nebo prekriveno s dovoljnim brojem satelita i kada je PDOP što manji.

Kao zemaljske bazne stanice najbolje je koristiti točke 10-kilometarske GPS-mreže ili u budućnosti podatke s točaka CROPOS-sustava.

Inicijalizacija cijelog sustava je također važna za pravilan rad. Inicijalizacija GPS komponente sustava može se izvesti na zemlji neposredno prije polijetanja i u zraku. Inicijalizacija na zemlji izvodi se tako što se nakon startanja GPS-uređaja zrakoplov ostavi 3 do 5 minuta u stanju mirovanja. Isti se postupak izvodi i nakon slijetanja. Inicijaliziranje u zraku svodi se na 3 do 5 minuta pravocrtnog leta konstantnom brzinom. Postupak se također ponavlja nakon snimanja.

Inicijalizacija IMU-senzora izvodi se okretom u zraku za 360° , kako je prikazano na slici 7.



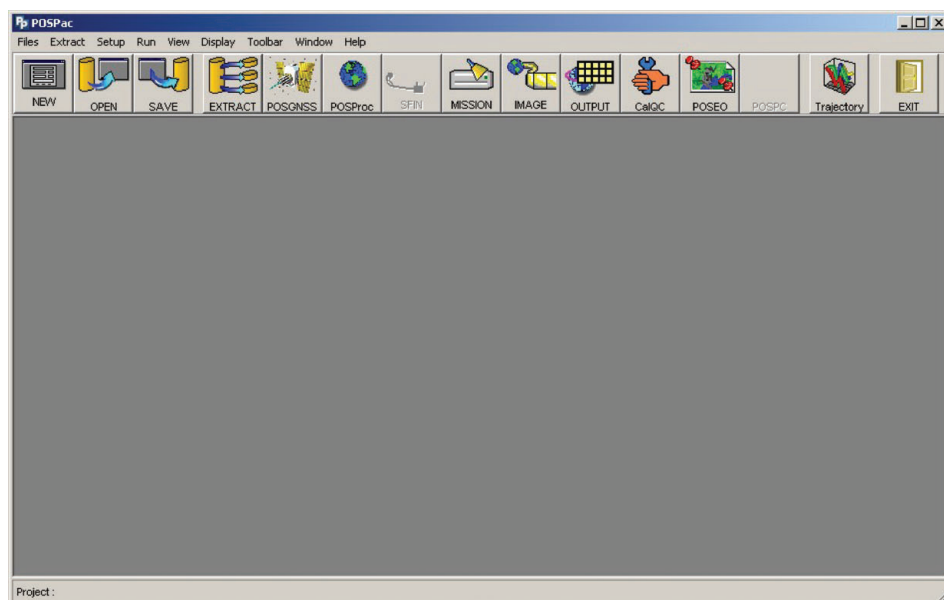
Slika 7. *Primjer leta zrakoplova za IMU-inicijalizaciju (URL 1).*

4. Obrada podataka

POSPac (Post-processing softverski paket) sastoji se od nekoliko modula. Uz već spomenuti CalQC, koji služi za računanje boresight kalibracije, spomenut ćemo PosGNSS modul, zatim POSProc i PosEO modul.

Pokretanjem programa POSPac otvara se sučelje kao na slici 8.

Nakon formiranja novog projekta potrebno je sve “sirove” podatke iz senzora, koji se nalaze u zajedničkim datotekama, ekstrahirati.

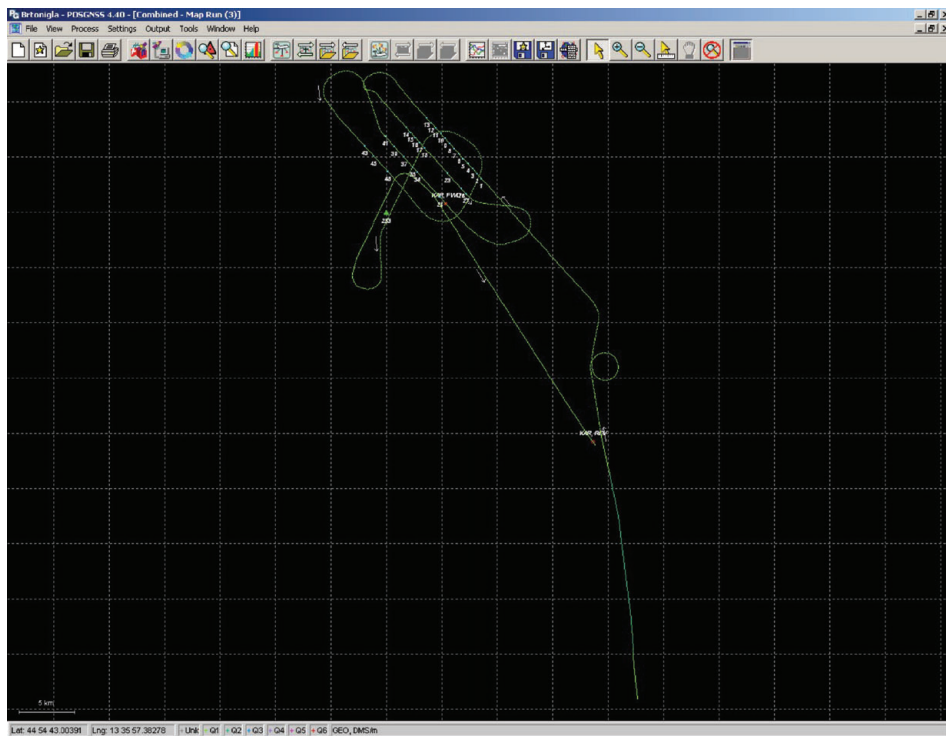


Slika 8. *Glavno sučelje programskog paketa POSPac.*

Nakon postupka ekstrakcije podataka posebno treba analizirati datoteku `extract_01.log`.

U toj datoteci nalaze se podaci od vremenima i frekvencijama pojedinih senzora, zatim podaci o vrsti i modelu pojedinog senzora, lever arms podaci itd.

Pozivanjem POSGNSS-modula otvara se sučelje programa za obradu GPS-mjerenja. Iza imena POSGNSS krije se dobro poznati program GrafNav tvrtke Waypoint (slika 9).



Slika 9. Sučelje programa POSGNSS.

U tom programskom modulu izvode se standardni postupci obrade GPS-mjerenja.

Nakon konverzije podataka u GPB-format učitavaju se GPS-podaci s baznih točaka (master files) i GPS-podaci iz GPS-uređaja u zrakoplovu (remote file), fiksiraju koordinate baznih točaka u epohu mjerenja i učitaju precizne efemeride satelita. Prije procesiranja učitava se datoteka s brojevima i vremenima ekspozicije.

Ako u postupku procesiranja podataka dobijemo fiksna rješenja, epohe mjerenja kao i točke ekspozicije prikazuju se svijetlozelenom bojom na karti.

Kada smo zadovoljni postignutim rješenjima exportiramo podatke u programski modul POSProc. Taj modul objedinjuje GPS i IMU podatke, kao što je prije spomenuto, uporabom Kalmanova filtra. Prije procesiranja podataka treba provjeriti

i upisati podatke kao što su lever arms koordinate, GPS–UTC vremenski ofset, izabrati tip POS i IMU senzora te metodu računanja (PP ili RTK). Nakon uspješnog postupka procesiranja ostaje programski modul PosEO. U tom modulu treba prije računanja izabrati ili upisati podatke o boresight kalibraciji, podatke o kameri (unutarnja orijentacija, distorzija kamere i dr.), zatim definirati ili odabrati koordinatni sustav izlaznih podataka, parametre transformacije u HDKS.

Prije samog računanja potrebno je izabrati format izlaznih podataka. Osim standardnog applanix formata, može se izabrati još desetak poznatih formata, među kojima su ZI Imaging, ORIMA, a postoji i mogućnost formiranja novih izlaznih formata. Slijedi primjer standardnog applanix formata:

```
POS/AV Computed Data at Camera Perspective Centre
```

```
Grid: HDKS ;Zone: 6 ;Datum: Bessel 1841 ;Local Transformation: Boros ;
```

```
Record Format:
```

```
ID, # EVENT, TIME (s), EASTING, NORTHING, ELLIPSOID HEIGHT, OMEGA, PHI,  
KAPPA, LAT, LONG
```

```
(position in Meters, orientation in Degrees, lat, long in Deg)
```

```
4 562671.618739 6527686.216 5065178.021 1092.000 -1.32764 1.21589  
75.68153 45.72980679 18.35057475  
5 562675.690088 6527401.918 5065294.362 1088.977 -1.47599 1.28027  
75.40762 45.73086480 18.34692856  
6 562679.773414 6527118.588 5065413.653 1087.454 -1.21567 1.28762  
73.51343 45.73194921 18.34329484
```

Kao što je vidljivo iz primjera, nakon tog dugotrajnog postupka dobivamo jednostavnu ASCII datoteku. Sadržaj datoteke je broj snimke, vrijeme ekspozicije, lokalne koordinate i najvažnije omega, phi i kappa za svaku pojedinačnu snimku.

5. Zaključak

Visokosofisticirane tehnologije, a ujedno i relativno skupa tehnološka rješenja sve više nalaze primjenu u različitim granama znanosti, pa tako i u geodeziji. Glavni su razlozi takvoga trenda velike financijske uštede te uštede u vremenu potrebnom za složene projektne zadatke. Uporaba integriranih senzora u geodeziji svakako pripada toj skupini visokosofisticiranih i skupih rješenja. Kao što je spomenuto u ovom izlaganju, korištenjem takvih metoda georeferenciranja postignuta je znatna ušteda u smanjenoj potrebi za postavljanjem i određivanjem velikog broja orijentacijskih točaka. Ta je ušteda vremenska i financijska.

Još jedan način uštede je korištenje podataka s točaka CROPOS-sustava, čime se eliminira potreba za instrumentarijem i ljudima potrebnim za prikupljanje podataka sa zemaljskih baznih stanica.

Kao što je već napomenuto, posebno značenje te metode je primjena sa senzorima (SAR i LIDAR), kod kojih se vanjska orijentacija ne može dobiti klasičnim metodom, kao i kod aerofotogrametrijskog snimanja nepristupačnih, osobito miniranih terena.

Literatura

- El-Sheimy, N. (1996): The Development of VISAT-A Mobile Survey System for GIS Applications, Ph.D Thesis, UCGE Report #20101, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada,
http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/KPS/96.20101.NEI-Sheimy.pdf.
- Skaloud, J. (1999): Problems in Direct-Georeferencing by IMU/DGPS in the Airborne Environment, ISPRS Commission III, WG III/1 Barcelona, Spain, Nov 25–26,
<http://topo.epfl.ch/personnes/jsk/Papers/problems.pdf>.
- URL 1: Applanix, <http://www.applanix.com/>, (11.11.2009.).

Direct Georeferencing by the POS AV510 Sensor

ABSTRACT. The article elaborates on the basics of direct georeferencing. In particular, direct georeferencing by the POS AV510 sensor is explained. Sensor calibration is elaborated in detail, as well as planning of work with the sensor and the initialisation of the whole system. At the end, the elaboration of the data collected during the work with sensor is described.

Keywords: direct georeferencing, integrated systems, inertial systems, GPS.

Prihvaćeno: 2009-11-17