

# VREDNOTENJE POSTOPKOV ZA OCENJEVANJE TOČNOSTI GEOREFERENCIRANJA GEODETSKIH NAČRTOV

# VALIDATION OF GEOREFERENCING ACCURACY ESTIMATION TECHNIQUES FOR GEODETTIC PLANS

*Nedim Tuno, Admir Mulahusić, Jusuf Topoljak, Dušan Kogoj*

UDK 528.1  
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01  
Prispelo: 8. 6. 2017  
Sprejeto: 17. 8. 2017

DOI: 10.15292//geodetski-vestnik.2017.03.373-386  
SCIENTIFIC ARTICLE  
Received: 8. 6. 2017  
Accepted: 17. 8. 2017

## IZVLEČEK

V raziskavi so kritično obravnavane tri tehnike za vrednotenje ocene položajne točnosti georeferenciranja, s čimer smo želeli oceniti možnosti ugotavljanja in odpravljanja geometrijskih deformacij rastrskih slik. Postopki vrednotenja, zasnovani na popravkih veznih točk, metodi testnega vzorca in navzkrižnem preverjanju, so izvedeni v programskem paketu PlanTra. Cenilke točnosti, pridobljene z navedenimi postopki ob uporabi različnih funkcionalnih modelov, so natančno raziskane na značilnem testnem območju. Dokazano je, da daje tehnika navzkrižnega preverjanja veliko zanesljivejše ocene točnosti kot standardni pristop, ki temelji na popravkih veznih točk.

## ABSTRACT

Three validation techniques for performing positional accuracy assessments in georeferencing were critically reviewed in this study, with an aim of estimating the possibilities of identifying and removing the geometric deformations of raster images. A validation technique based on the residuals of tie points, Hold-Out and the Cross-Validation technique was implemented within PlanTra software. Accuracy indicators, obtained through these techniques, using different functional transformation models, were thoroughly tested on a typical area. It has been proven that the Cross-Validation technique produces a much more reliable estimation of accuracy in comparison to the standard approach based on the residuals of tie points.

## KLJUČNE BESEDE

ocena položajne točnosti, georeferenciranje, navzkrižno preverjanje, RMSE

## KEY WORDS

positional accuracy assessment, georeferencing, Cross-Validation, RMSE

## 1 UVOD

Osnovna zahteva uporabnikov vsakega proizvoda je poznavanje njegove sestave in kakovosti, s čimer se pravzaprav določa njegova uporabna vrednost. Od leta 1980 vse bolj raste zanimanje za prepoznavanje realne kakovosti prostorskih podatkov. K temu je najbolj pripomogel razvoj tehnologije GIS in daljinskega zaznavanja (Manzano-Agugliari in sod., 2014). Po standardu ISO 19157 (2013) *Geographic information – Data quality* (Geografske informacije – kakovost podatkov) se kakovost prostorskih podatkov opisuje s šestimi elementi: popolnost, logična doslednost, položajna točnost, časovna točnost, tematska točnost in uporabnost. Med temi elementi največjo pozornost v znanstvenih krogih in širši skupnosti proizvajalcev in uporabnikov GIS-a vzbuja položajna točnost. Opredeljena je kot razlika med položajem izbranega objekta v modelu prostora in pravim položajem tega objekta na terenu, oziroma položajem, ki je določen iz drugega vira večje točnosti (Tucci in Giordano, 2011). Številne uradne institucije so objavile standarde in smernice za oceno kakovosti prostorskih podatkov (npr. STANAG 2215, 2002; Guidelines for Best ..., 2008), v katerih so opisani postopki preizkušanja, razporeditev in število kontrolnih točk, način opisovanja in prikazovanja položajne točnosti in podobno.

Podatki, ki se nanašajo na pozicioniranje objekta v okviru geoinformacijskih sistemov, so najpogosteje pridobljeni iz zračnih posnetkov (satelitskih ali aerofotogrametričnih – letalskih) in razpoložljive kartografske dokumentacije. Upoštevanje geometrijskih popravkov in georeferenciranje rastrskih digitalnih slik (zračni posnetki ali skenirano karografsko gradivo) sta osnovna pogoja, ki zagotavljata pridobitev kakovostnih geometrijskih podatkov o prostoru. Kakovost prostorskih podatkov je torej odvisna od upoštevanja geometrijskih popravkov in kakovosti georeferenciranja rastrskih slik (Cuartero in sod., 2010; Manzano-Agugliari in sod., 2014).

Oceno položajne točnosti zračnih posnetkov, načrtov in kart na podlagi neodvisnih kontrolnih točk so v svojih raziskavah uporabili Božić in Radojčić (2011), Govedarica in Borisov (2011), Kosmatin Fras in sod. (2014), Mesas-Carrascosa in sod. (2014) ter mnogi drugi avtorji. V teh delih je kakovost rastrskih podatkov ocenjena po izvedenem postopku georeferenciranja. Analizo položajne točnosti pa je nujno izvesti že v fazi priprave na georeferenciranje. Z izbiro ustreznega modela transformacije, ki bo zagotovil odstranitev lokalnih geometrijskih distorzij, bo dosežen najugodnejši rezultat. Za ta namen je najbolje uporabiti postopke vrednotenja kakovosti transformacijskih modelov, zasnovanih na kontrolnih točkah. Čeprav dajejo taki postopki najboljše rezultate, je v primerih, ko pogosto ni na voljo dovolj veliko število točk, njihova uporaba otežena.

Za geometrijsko korekcijo in georeferenciranje rastrskih prikazov kartografskih prikazov, pridobljenih s skeniranjem, ter zračnih posnetkov se uporabljajo vezne točke. Z veznimi točkami vzpostavimo zvezo med izvornim in ciljnim koordinatnim sistemom. Vezne točke morajo biti enakomerno razporejene po celotnem območju transformacije. Priporoča se, da jih je vsaj dvakrat več od minimalnega števila točk za izračun izbranega transformacijskega modela (Brovelli in Zamboni, 2006). Za uspešno transformacijo običajno potrebujemo veliko veznih točk. Pogosto uporabimo vse razpoložljive točke z znanimi koordinatami v izvornem in ciljnem koordinatnem sistemu. Iz niza vezanih točk ni mogoče izločiti kontrolnih točk, ki bi jih uporabili za oceno položajne točnosti georeferenciranja. Zaradi tega se položajna točnost georeferenciranih posnetkov ali kart oceni samo na podlagi preostalih odstopanj oziroma popravkov globalne transformacije na vseh veznih točkah. McGwire (1996) opozarja, da ima ta postopek niz pomanjkljivosti in da je tako

pridobljena ocena položajne točnosti nerealna. Zato je predlagal, da se ocena točnosti satelitskih posnetkov, georeferenciranih s polinomsko transformacijo, opravi s postopkom navzkrižnega preverjanja. Navzkrižno preverjanje je svojevrsten hibrid postopkov, zasnovanih samo na kontrolnih in samo na veznih točkah. Ta postopek so kasneje pri obdelavi satelitskih posnetkov uporabili Giannone (2006), Brovelli in sod. (2008), Jeong in Bethel (2010) itd. Raziskavo kakovosti transformacije skenogramov starih katastrskih načrtov grafične izmere z navzkrižnim preverjanjem so izvedli Herrault in sod. (2013) ter Follin in sod. (2016).

Z raziskavo smo želeli preveriti sposobnost izbranih postopkov za vrednotenje ocene 2D- (horizontalne) točnosti georeferenciranja skeniranih geodetskih načrtov Bosne in Hercegovine (BiH), ki so nastali v novjšem času s terestrično numerično izmero in fotogrametrično izmero. Po vedenju avtorjev celovite raziskave, ki bi obravnavale to problematiko, še niso bile objavljene. Poseben poudarek v raziskavi je preveriti, s kolikšno zanesljivostjo dobljene cenilke točnosti diagnosticirajo odpravo distorzij, ki so posledica deformacije nosilca načrta in nepravilnosti skeniranja glede na uporabljeni model transformacije. Pri tem so obravnavani transformacijski algoritmi, ki so vgrajeni v danes najbolj uporabne programske rešitve CAD in GIS za geometrijsko obdelavo rastrskih digitalnih slik, ki jih ponujajo Autodesk (2009), ESRI (2016) in drugi. Z analizo dobljenih cenilk točnosti skušamo poiskati način, s katerim bomo za potrebe izgradnje geoinformacijskih sistemov na podlagi obstoječega analognega kartografskega gradiva zagotovili zanesljivo diagnostiko položajne kakovosti prostorskih podatkov. Raziskava izhaja iz potrebe po spremembi sedanje geometrijske obdelave skeniranih načrtov, saj se v BiH intenzivno izvaja georeferenciranje obstoječih geodetskih načrtov (Federalna uprava za ..., 2016).

## 2 METODE IN RAZISKOVALNO GRADIVO

### 2.1 Postopki ocene položajne točnosti

Za oceno položajne točnosti se uporabljajo različni statistični kazalniki, kot so standardni pogrešek (angl. *standard error* – *SE*), standardna deviacija (angl. *standard deviation* – *SD*), povprečni pogrešek (angl. *mean error* – *ME*), srednji standardizirani pogrešek (angl. *mean standardized error* – *MSE*), koren srednjega kvadratnega standardiziranega pogreška (angl. *root mean square standardized error* – *RMSS*) itd. (Soycan, 2013). Najpogosteje uporabljena cenilka položajne točnosti je koren srednjega kvadratnega pogreška (angl. *root mean squared error* – *RMSE*) (Congalton in Green, 2008). *RMSE* je kvadratni koren srednje vrednosti vsote kvadratov razlik transformiranih koordinat točk, izmerjenih v skupini, katere točnost se ocenjuje, in odgovarjajočih pravih vrednosti koordinat. Če obravnavamo 2D-podatke, dobimo na podlagi vrednosti razlik koordinat v smeri koordinatnih osi  $y$  in  $x$  horizontalni *RMSE* celotnega obravnavanega vzorca (Tuno in sod., 2017). Vrednost *RMSE* se določi na več načinov, ki so predstavljeni v nadaljevanju.

#### 2.1.1 *RMSE* popravkov veznih točk

Standardni postopek ocene kakovosti zmanjšanja geometrijskih distorzij rastrskih kartografskih grafičnih prikazov zahteva določitev *RMSE* na podlagi popravkov (preostalih odstopanj transformacije) veznih točk, ki so uporabljene za transformacijo (McGwire, 1996). Popravki v smeri koordinatnih osi ( $r_y$  in  $r_x$ ) so rezultat izravnave po metodi najmanjših kvadratov, katere cilj je določitev parametrov transformacije na podlagi nadštevilnih veznih točk. *RMSE* je tu mera za odstopanje vrednosti transformiranih koordinat veznih točk od njihovih teoretičnih vrednosti:

$$RMSE_{res} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{xy_i}^2}; r_{xy} = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} \quad (1)$$

Postopek ocene je enostaven, programske rešitve za georeferenciranje običajno omogočajo prikaz vrednosti  $RMSE_{res}$ , njegovih komponent po koordinatnih oseh in popravke na posameznih točkah takoj po vnosu koordinat vseh veznih točk itd. (slika 1). V nekaterih državah uradni tehnični normativi za georeferenciranje katastrskih načrtov predpisujejo merila točnosti transformacije (Mađarac, 2017), ki temeljijo na popravkih veznih točk. Predpisi in programska oprema za georeferenciranje običajno spodbujajo k izločanju točk, pri katerih so vrednosti popravkov nesprijemljivo velike, iz transformacijskega modela. Na prvi pogled se to lahko zdi razumna rešitev, vendar z njo velikokrat dosežemo nasprotni učinek. Z izločanjem točk se namreč pogosto zmanjša kakovost prilaganja transformacijske ravnine v okolici izločene točke (Mather, 2004). Pomanjkljivost tega postopka je tudi, da vezne točke niso neodvisne od koeficientov transformacije (McGwire, 1996), še bolj problematično pa je, da postopka ni mogoče uporabiti za oceno točnosti globalnih lokalno občutljivih transformacij in lokalnih transformacij (McGwire, 1998).

Control	On	Base System		Uncorrected System		Residuals:			
Point #		X	Y	X	Y	X	Y	XY	
2	X	6535300.0000	4855500.0000	6535300.1050	4855499.9870	0.0296	0.0117	0.0318	
3	X	6535400.0000	4855500.0000	6535400.1720	4855499.9900	0.0922	0.0244	0.0954	
4	X	6535500.0000	4855500.0000	6535500.0470	4855499.9270	-0.0223	-0.0324	0.0393	
5	X	6535600.0000	4855500.0000	6535599.9230	4855499.9290	-0.1267	-0.0283	0.1298	
6	X	6535700.0000	4855500.0000	6535699.9910	4855499.9300	-0.0356	-0.0301	0.0466	
7	X	6535800.0000	4855500.0000	6535800.1220	4855499.9310	0.1164	-0.0378	0.1224	
<b>On/Total:</b>		54 / 54				<b>Root Mean Square Error</b>	0.0688	0.0609	0.0918

Slika 1: Programsko okolje orodja za georeferenciranje s prikazanimi vrednostmi  $RMSE$  in preostalim odstopanjem na veznih točkah po transformaciji.

## 2.1.2 $RMSE$ odstopanj koordinat kontrolnih točk

Položajno točnost najzanesljiveje ocenimo na podlagi kontrolnih točk. Koordinate teh točk določimo s terensko izmero ali pa jih prevzamemo iz drugih neodvisnih baz podatkov. Določene so z večjo točnostjo kot podatki, ki jih testiramo; obravnavamo jih kot referenčne, pogojno točne. Velikost vzorca kontrolnih točk mora zagotavljati statistično zanesljiv rezultat, ob večjem vzorcu bo zanesljivost ocene večja. Običajno se zahteva 20 enakomerno razporejenih kontrolnih točk na enem listu karte ali posnetka (Congalton in Green, 2008).

V statistiki je ta postopek ocene poznan kot metoda testnega vzorca (angl. *hold-out validation* – HOV). Skupino razpoložljivih točk z znanimi koordinatami v izvornem in ciljnem koordinatnem sistemu razdelimo na dve med seboj neodvisni podskupini z naključno razdelitvijo točk: podskupino točk za učenje modela (vezne točke) in podskupino točk za testiranje modela (kontrolne točke). Pri tem v posamezni skupini poskušamo zagotoviti enakomerno razporejenost točk po celotnem območju. Skupino veznih točk uporabimo za določitev parametrov transformacijskega modela, njegovo točnost pa ocenimo z nizom

kontrolnih točk. Vrednost  $RMSE$  dobimo na podlagi razlik vrednosti transformiranih in referenčnih koordinat kontrolnih točk  $d_y$  in  $d_x$ :

$$RMSE_{HOV} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{xy_i}^2}; d_{xy} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \tag{2}$$

Ocena HOV je zelo enostavna in preprosta za računanje, vendar daje slabe rezultate, če je elementov v skupini podatkov za testiranje (kontrolnih točk) malo (Giannone, 2006).

### 2.1.3 RMSE na podlagi navzkrižnega preverjanja

Postopek  $k$ -kratnega navzkrižnega preverjanja (angl. *k-fold cross validation* – CV) zahteva, da  $n$  primerov v skupini podatkov  $S$  razdelimo na  $k$  podskupin enake velikosti. Algoritem za učenje učimo na  $k - 1$  podskupinah, testiramo pa na eni preostali. To se ponovi  $k$ -krat, vsakič s testiranjem na drugi podskupini. S tem pridobimo  $k$  ocen, njihovo povprečje pa predstavlja končno vrednost cenilke položajne točnosti (Brovelli in sod., 2008). Po Japkowitzu in Shahu (2011) je psevdokoda navzkrižnega preverjanja videti takole:

```
Razdeli razpoložljivo skupino podatkov  $S$  velikosti  $n$  na  $k$  podskupin  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ 
velikosti približno  $n/k$  i brez prekrivanja;
Inicializiraj  $i = 1$ ;
Ponavljaj, dokler je  $i \leq k$ ;
    Označi  $i$ -to podskupino  $S_i$  kot testno skupino;
    Za testno skupino  $S_i$  generiraj komplement trening skupine  $S_i$ , ki vsebuje vse
    primere iz  $S$  razen tistih v  $S_i$ ;
    Treniraj algoritem učenja na  $S_i$  in testiraj na  $S_i$ ;
    Izračunaj empirično tveganje  $R_{emp}(f_i)$  klasifikatorja  $f_i$ ;
    Povečaj za 1;
Izračunaj povprečni  $R_{emp}(f_i)$  za vse  $i$ , tako da dobiš  $R_{emp}(f)$ , povprečno empirično tveganje
 $k$ -kratnega CV;
Prikaži  $R_{emp}(f_i)$ ;
```

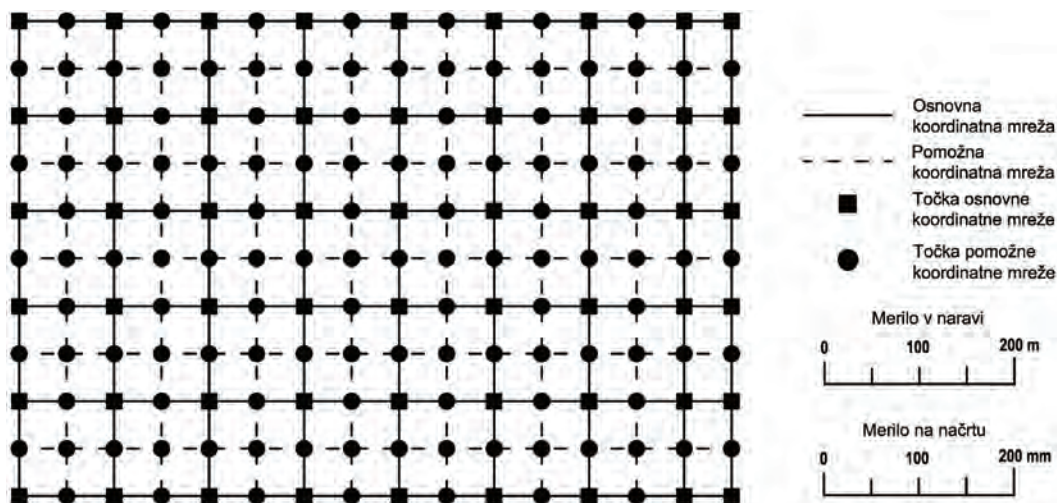
Mejni primer CV za  $k = n$  je posamezno navzkrižno preverjanje (angl. *leave-one-out-cross-validation* – LOOCV). Pri tej oceni se model generira z uporabo  $n - 1$  elementov skupine  $S$ , testira pa se na enem preostalem elementu. Postopek se ponavlja  $n$ -krat, tako da se vsak element originalnega vzorca uporabi enkrat kot element za testiranje (Giannone, 2006). Vrednost  $RMSE$  za oceno točnosti georeferenciranja se določi iterativno. Postopek se prične z izločitvijo prve vezne točke iz transformacijskega modela in računanjem parametrov transformacije na podlagi vseh preostalih točk. Na podlagi dobljenih parametrov se izračunajo transformirane koordinate prve točke in njihova odstopanja od teoretičnih vrednosti. Prva točka, ki je bila uporabljena kot psevdokontrolna točka v prvi iteraciji, se vrača v model in opisani postopek se ponovi za vse preostale vezne točke (McGwire, 1996). Skupna točnost georeferenciranja na podlagi ocene LOOCV znaša:

$$RMSE_{LOOCV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f(\hat{x}_i) - x_i)^2}{n}} \tag{3}$$

kjer je referenčna vrednost  $i$ -te točke in  $f(\hat{x}_i)$  transformirana vrednost  $i$ -te točke na podlagi transformacijske funkcije, izračunane ob izločitvi  $i$ -te točke (Chuvieco, 2016). Postopek navzkrižnega preverjanja LOOCV je robusten in zanesljiv, ni odvisen od izbire skupin točk in omogoča, da je vsaka vezna točka hkrati kontrolna točka (Brovelli in sod., 2008).

## 2.2 Testno gradivo – geodetski načrti

V raziskavi so obdelani skenirani listi geodetskih načrtov merila 1 : 1000, na katerih je prikazan del ožjega mestnega območja Sarajeva, BiH. Načrti so izdelani s fotogrametrično (aerofotogrametrija) in numerično ortogonalno metodo. Izmero je leta 1968 izvedel tedanji Geodetski zavod Sarajevo. Podroben opis načrtov mesta Sarajeva so predstavili Tuno in sod. (2015). Za analizo položajne točnosti je izbranih 14 listov načrtov, ki poleg mreže s kvadrati dimenzij 100 mm × 100 mm in pravokotniki dimenzij 50 mm × 100 mm vsebujejo pomožno koordinatno mrežo s kvadrati dimenzij 50 mm × 50 mm (slika 2). Točke koordinatne mreže imajo znane koordinate v izvornem koordinatnem sistemu skeniranega načrta in teoretične koordinate v državnem koordinatnem sistemu. Na podlagi teh točk se v uradnih projektih digitalizacije georeferencirajo bosansko-hercegovski katastrski načrti (Tuno in sod., 2017). Ravno zato sta formiranje transformacijskih modelov in raziskava položajne točnosti v naši raziskavi izvedena prav na podlagi točk koordinatne mreže. V izračune je vključeno skupaj 4172 točk (1708 točk osnovne koordinatne mreže in 2464 točk pomožne koordinatne mreže).

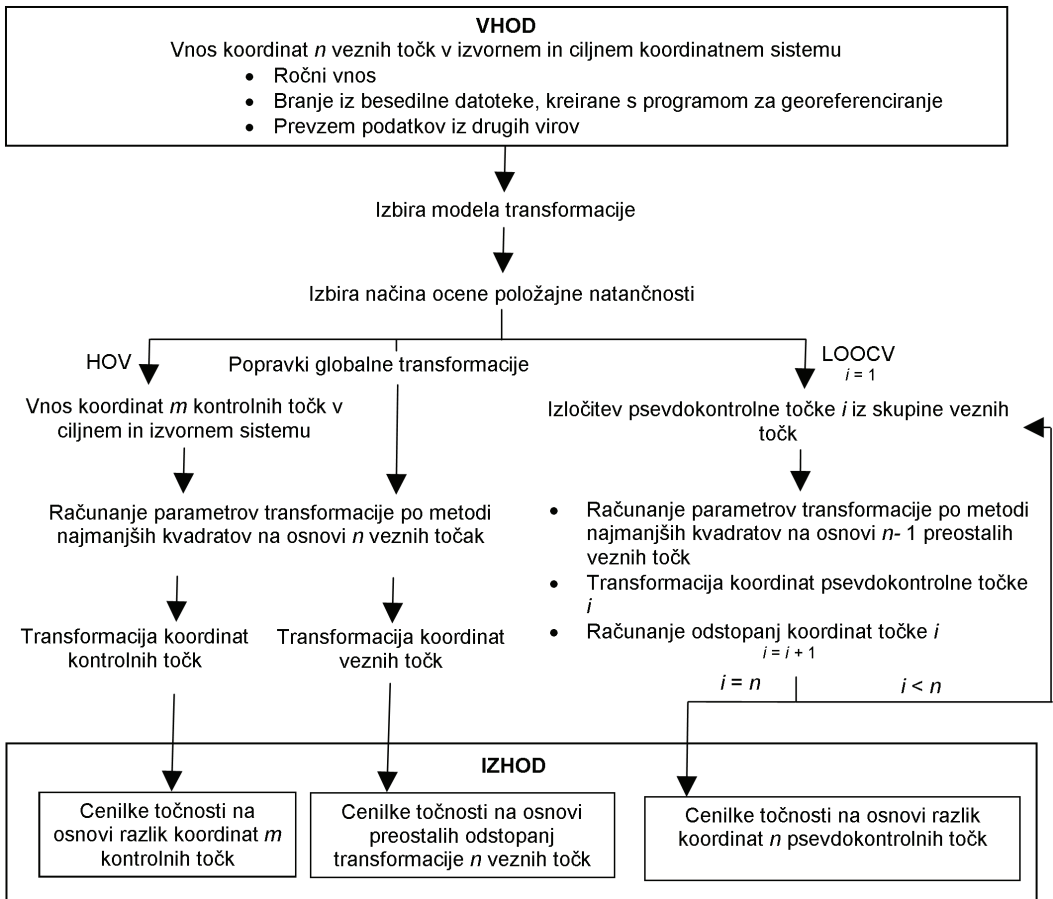


Slika 2: Osnovna in pomožna koordinatna mreža na listu načrta v merilu 1 : 1000.

## 2.3 Programska rešitev v PlanTra

Danes obstaja veliko posebnih programskih rešitev, ki omogočajo oceno točnosti georeferenciranja rastrskih podatkov s HOV in LOOCV, na primer programski paket SISAR, razvit v Italiji (Brovelli in sod., 2008). Ker avtorji za namen te raziskave niso imeli dostopa do teh programskih paketov, je bilo treba nadgraditi obstoječi programski paket PlanTra, ki je bil razvit na Gradbeni fakulteti Univerze v Sarajevu (Tuno in sod., 2015 in 2017). PlanTra je namenjen podpori za georeferenciranje s standardnimi programskimi paketi (Autodesk Raster Design, Bentley Descartes, Esri ArcGIS in podobno). Nadgrajeni PlanTra omogoča oceno točnosti uporabljenih transformacijskih modelov s postopkoma HOV in LOOCV.

Programi za georeferenciranje omogočajo, da se po določitvi identičnih točk rastra v izvornem koordinatnem sistemu njihove koordinate zapišejo v posebno tekstovno datoteko. To datoteko prebere program PlanTra, ki izračuna vse ustrezne cenilke položajne točnosti georeferenciranja (slika 3).



Slika 3: Diagram poteka programske rešitve ocene HOV in LOOCV v PlanTra.

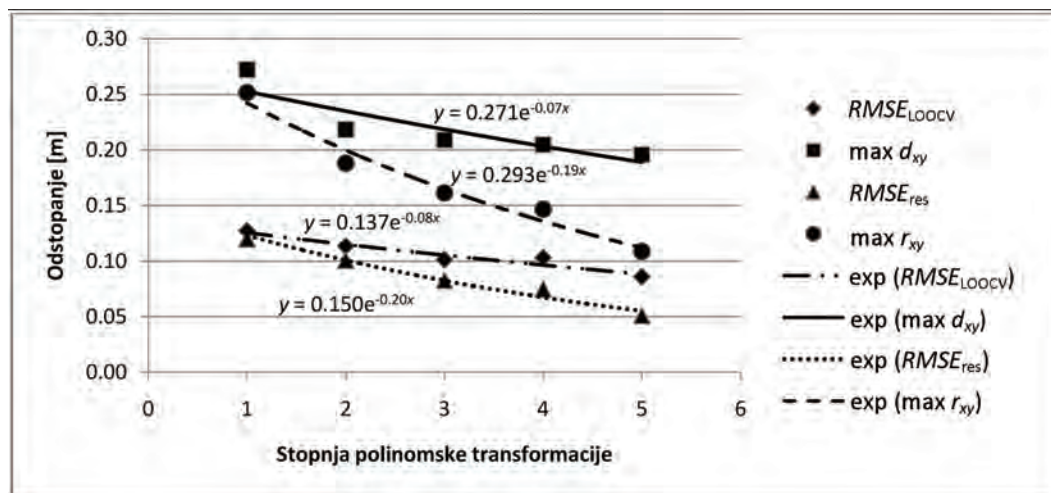
### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

V obravnavani raziskavi so uporabljeni modeli Helmertove, afine in projektivne transformacije, polinomskih transformacij višjih stopenj ter transformacije po načelih tankoslojnega zleпка (angl. *thin plate spline* – TPS). Navedene transformacije so uporabljene na vsakem izmed 14 listov izbranih načrtov. Pri tem so transformacijski parametri opredeljeni na podlagi veznih točk osnovne koordinatne mreže (54 točk na vsakem listu načrta). Točke osnovne koordinatne mreže so bile uporabljene za oceno točnosti georeferenciranja po postopku preostalega odstopanja transformacije (popravljen) in postopku LOOCV. Ocena točnosti postopka HOV je izvedena z uporabo kontrolnih točk pomožne koordinatne mreže (122 točk na vsakem listu načrta). To je smiselno, saj sta pri izdelavi načrta glavna in pomožna koordinatna mreža kartirani hkrati in z enako točnostjo. Obseg tega članka ne dopušča prikaza in razlage vseh dobljenih cenilk točnosti, zato v prispevku analiziramo le vrednosti  $RMSE_{res}$ ,  $RMSE_{LOOCV}$  in  $RMSE_{HOV}$ , popravke veznih točk ter razlike koordinat psevdokontrolnih in kontrolnih točk.

### 3.1 Cenilke položajne točnosti georeferenciranja načrtov z uporabo globalnih transformacij

Pri globalnih transformacijah eliminacija ali zmanjševanje geometrijskih distorzij vsebine načrta poteka po istih pravilih, to je z uporabo istih parametrov transformacije za celotno površino lista. Uporabljene so bile enostavne transformacije (Helmertova, projekтивna in afina), pa tudi polinomske transformacije 2., 3., 4. in 5. stopnje. Teorija uporabljenih transformacijskih modelov je opisana v strokovni literaturi, na primer v P. Yadav in A. Yadav (2009).

Teoretične vrednosti koordinat točk koordinatne mreže so prave vrednosti, razlike s transformiranimi vrednostmi koordinat lahko zato obravnavamo kot prave pogreške. To je temelj za oceno točnosti. Primerjava cenilk točnosti georeferenciranja, pridobljenih na podlagi popravkov in postopka LOOCV, je za polinomske modele transformacij prikazana na sliki 4.

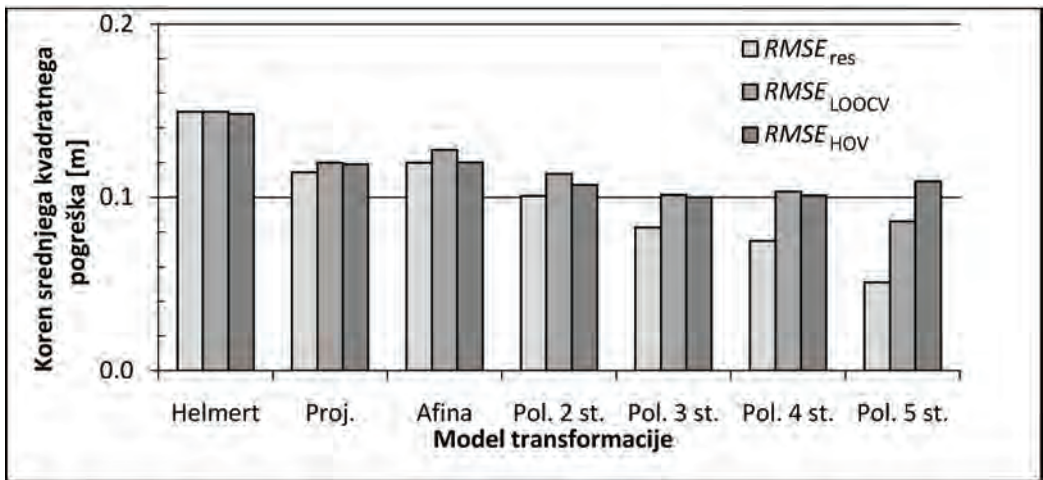


Slika 4: Trendi povprečnih vrednosti  $RMSE$  in največjih položajnih odstopanj, pridobljenih iz ocene točnosti na podlagi popravkov in s postopkom LOOCV, za izbrane stopnje polinomske transformacije.

S slike 4 je razvidno, da je mogoče trend sprememb povprečnih vrednosti  $RMSE$  in največjega odstopanja dobro modelirati z eksponentnimi funkcijami. Kadar so cenilke točnosti dobljene na podlagi popravkov veznih točk, se s povečanjem stopnje polinoma izrazito zmanjšajo vrednosti obravnavanih cenilk. To je najbolj opazno pri največjih popravkih. Pri vseh obravnavanih listih načrtov so zato doseženi najboljši rezultati z uporabo polinomske transformacije 5. stopnje.

V nasprotju z oceno točnosti transformacije na podlagi popravkov, kjer se zaradi povečanja stopnje polinoma vrednost  $RMSE_{res}$  zmanjša za približno 2,5-krat, pri oceni LOOCV očitno ni tako. Povprečne vrednosti  $RMSE_{LOOCV}$  so mnogo bolj izenačene in se gibljejo v intervalu od 86 mm do 127 mm. Podoben trend opisujejo vrednosti največjih popravkov. V tem primeru se povečanje stopnje polinoma odraža v minimalnem izboljšanju točnosti transformacije. Večanje stopnje polinoma povzroči vse večje neskladje vrednosti  $RMSE_{res}$  in  $RMSE_{LOOCV}$ . Tako so vrednosti  $RMSE_{res}$  afine transformacije (polinomska transformacija 1. stopnje) v povprečju manjše od ustreznih vrednosti  $RMSE_{LOOCV}$  za 5 %, pri polinomske transformaciji 5. stopnje pa ta razlika znaša kar 40 %.





Slika 5: Povprečne vrednosti  $RMSE$ , dobljene z različnimi načini vrednotenja za različne modele globalnih transformacij.

Slika 5 prikazuje povprečne vrednosti cenilk točnosti vseh uporabljenih transformacijskih modelov in vseh izvedenih načinov ocene točnosti. Razvidno je, da dajejo vsi uporabljeni postopki ocene pri enostavnih transformacijah zelo podobne rezultate. Izrazite razlike se pojavijo pri polinomskih transformacijah višjih stopenj, največje neskladje pa je očitno pri transformacijskem modelu, zasnovanem na polinomu 5. stopnje. Ob upoštevanju razporeditve, števila in točnosti kontrolnih točk lahko trdimo, da so najboljobjektivnejše cenilke točnosti georeferenciranja v raziskavi dosežene s postopkom HOV.

Iz primerjave povprečnih vrednosti cenilk točnosti polinomske transformacije 5. stopnje je razvidno, da je vrednost  $RMSE_{res}$  za 53 %, vrednost  $RMSE_{LOOCV}$  pa za 21 % manjša od vrednosti  $RMSE_{HOV}$ . Pri polinomskih transformacijah 3. in 4. stopnje je  $RMSE_{res}$  prav tako manjša od  $RMSE_{HOV}$ , so pa vrednosti  $RMSE_{LOOCV}$  in  $RMSE_{HOV}$  skoraj enake. To kaže, da je mogoče s postopkom LOOCV pri teh transformacijskih modelih pridobiti zelo realne cenilke točnosti georeferenciranja, kar pa ne velja za polinomske transformacije 5. stopnje.

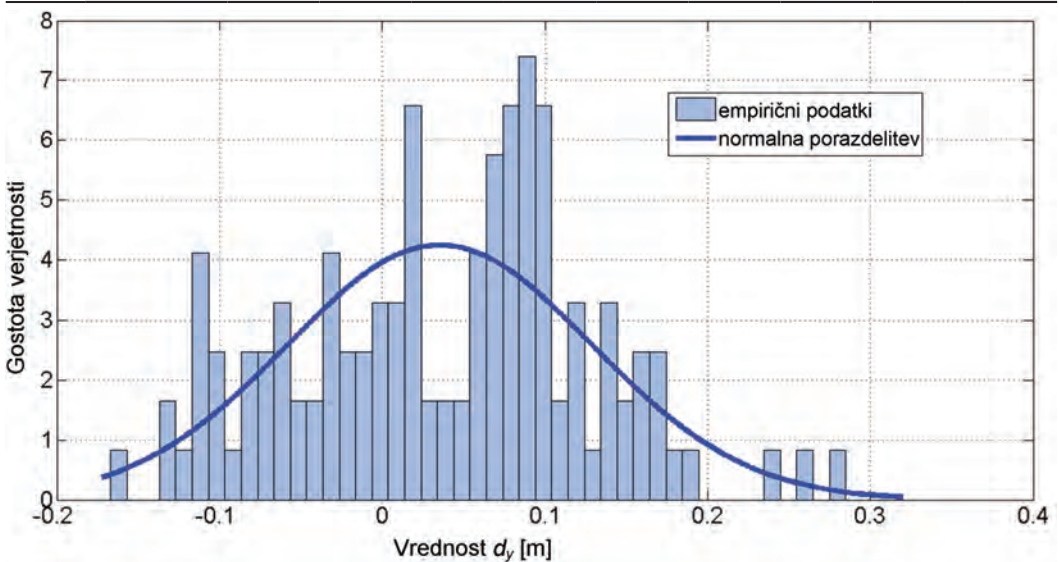
Primerjava točnosti globalnih transformacij, ocenjenih s postopkom HOV, vseh listov načrtov kaže, da so pri načrtih z izrazitejšimi deformacijami najboljši rezultati doseženi s polinomske transformacije 4. stopnje, pri načrtih z manjšimi deformacijami pa najboljše rezultate daje afina transformacija. Niti v enem primeru ni polinomske transformacije 5. stopnje zagotovila najboljših rezultatov, prav ta transformacijski model pa je uporabljen za georeferenciranje obravnavanih listov načrtov v okviru uradnega državnega projekta digitalizacije (Angermeier Sarajevo, 2006).

Z georeferenciranjem načrtov v uradnih državnih projektih poskušamo izpolniti predpisano merilo, ki velja za katastrske načrte v postopku georeferenciranja. Vrednost  $RMSE_{res}$  mora biti manjša od  $0,10 \text{ mm} \times M$ , kjer je  $M$  modul merila kartiranja načrta (Tuno in sod., 2017). Ker polinomske transformacije 5. stopnje najbolj izpolnjuje zahtevano merilo, je bil za georeferenciranje načrtov sprejet ta model. Z natančnejšim vpogledom v rezultate te transformacije pa ugotovimo, da z njeno uporabo na posameznih listih načrta izzovemo velika položajna odstopanja, kar se pri drugih modelih transformacije ne zgodi. Veliko boljše rezultate lahko dosežemo z uporabo drugih transformacijskih modelov. Tako na primer statistične cenilke

točnosti za list načrta SA170 (preglednica 1), pridobljene s postopkoma LOOCV in HOV, jasno kažejo, da je po izvedeni transformaciji po polinomskem modelu 5. stopnje opazno prisotna nehomogena točnost vsebine georeferenciranega načrta. Distorzije sistematičnega izvora niso odpravljene. To potrjuje tudi histogram preostalih distorzij v smeri osi  $y$ , kot tudi ustrezna krivulja normalne porazdelitve, ki ustrežajo empiričnim podatkom, pridobljenim z oceno HOV (slika 6). Na sliki se jasno vidi zamik krivulje normalne porazdelitve zaradi preostalih sistematičnih pogreškov, ki jih glede na točnost izdelave koordinatne mreže ni mogoče zanemariti. Cenilke točnosti, dobljene z oceno točnosti na podlagi popravkov (preglednica 1), več kot očitno kažejo zelo popačeno sliko o dejanski točnosti transformiranega načrta.

Preglednica 1: Statistike odstopanj za list načrta SA170, pridobljene s polinomsko transformacijo 5. stopnje

Cenilka	Popravki			LOOCV			HOV			
	$r_y$	$r_x$	$r_{xy}$	$d_y$	$d_x$	$d_{xy}$	$d_y$	$d_x$	$d_{xy}$	
Minimum [m]	-0,183	-0,052	0,002	-0,293	-0,088	0,004	-0,320	-0,131	0,012	
Sredina [m]	0,000	0,000	0,073	-0,009	0,002	0,121	-0,035	0,014	0,107	
Maksimum [m]	0,169	0,068	0,184	0,281	0,112	0,300	0,172	0,175	0,321	
Razpon [m]	0,352	0,120	0,181	0,574	0,201	0,296	0,492	0,306	0,310	
RMSE [m]	0,085	0,024	0,089	0,139	0,039	0,144	0,100	0,066	0,120	
Porazdelitev odstopanj %	0–5  cm	44,4	94,4	40,7	22,2	75,9	22,2	28,7	54,1	12,3
	5–10  cm	31,5	5,6	33,3	31,5	22,2	27,8	40,2	31,1	36,9
	10–15  cm	13,0	0,0	14,8	18,5	1,9	18,5	20,5	13,9	32,8
	15–20  cm	11,1	0,0	11,1	7,4	0,0	9,3	7,4	0,8	12,3
	20–25  cm	0,0	0,0	0,0	13,0	0,0	14,8	0,8	0,0	3,3
	> 25  cm	0,0	0,0	0,0	7,4	0,0	7,4	2,5	0,0	2,5



Slika 6: Histogram in krivulja normalne porazdelitve razlik teoretičnih in transformiranih  $y$ -koordinat točk pomožne koordinatne mreže lista načrta SA 170.

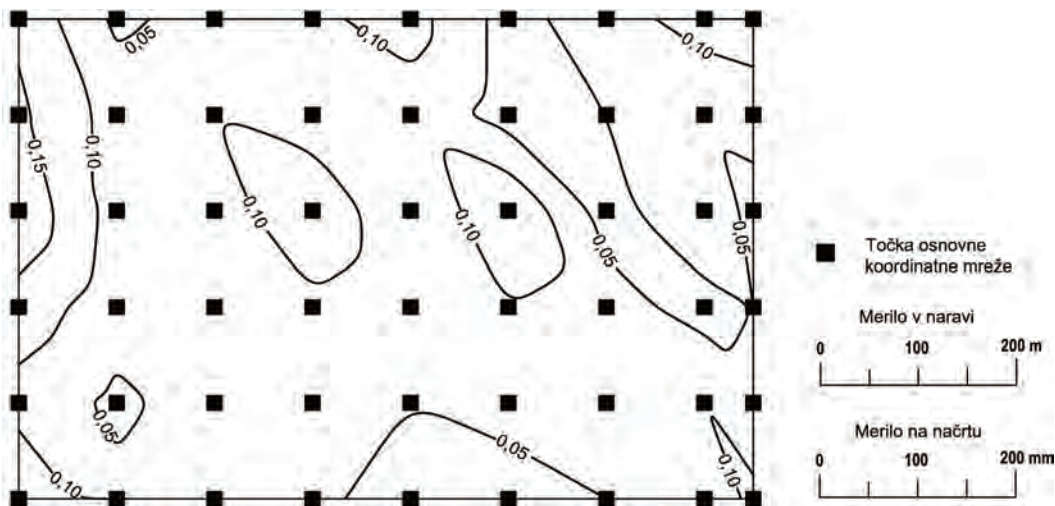
### 3.2 Položajna točnost georeferenciranja načrtov z lokalno občutljivo transformacijo

Pri lokalno občutljivih transformacijah vezne točke po transformaciji ohranijo svoje teoretične vrednosti koordinat, zato za oceno položajne točnosti ni mogoče uporabiti ocene na podlagi popravkov. Tako sta v tej raziskavi za oceno točnosti lokalnih transformacij uporabljena postopka LOOCV in HOV, raziskan pa je transformacijski model TPS. Podrobneje so ga predstavili Tuno in sod. (2017). Rezultati ocene točnosti transformacije TPS s pomočjo psevdokontrolnih in kontrolnih točk koordinatne mreže so prikazani v preglednici 2. Rezultati ocene HOV kažejo, da daje transformacija TPS v povprečju boljše rezultate kot globalne transformacije. Če obravnavamo kakovost transformacij v okviru posameznih listov načrtov, ugotovimo, da dosežemo z uporabo transformacije TPS najboljšo točnost za 86 % načrtov, za preostale liste pa daje boljše rezultate afina transformacija. S postopkom navzkrižnega preverjanja v primerjavi z uporabo kontrolnih točk pridobimo bolj optimistično oceno položajne točnosti. Povprečna vrednost  $RMSE_{LOOCV}$  je za 8 % manjša od povprečne vrednosti  $RMSE_{HOV}$ , največje položajno odstopanje pa je pri oceni LOOCV manjše za 22 %. Z navzkrižnim preverjanjem je torej mogoče dovolj zanesljivo napovedati točnost georeferenciranja načrtov z modelom TPS.

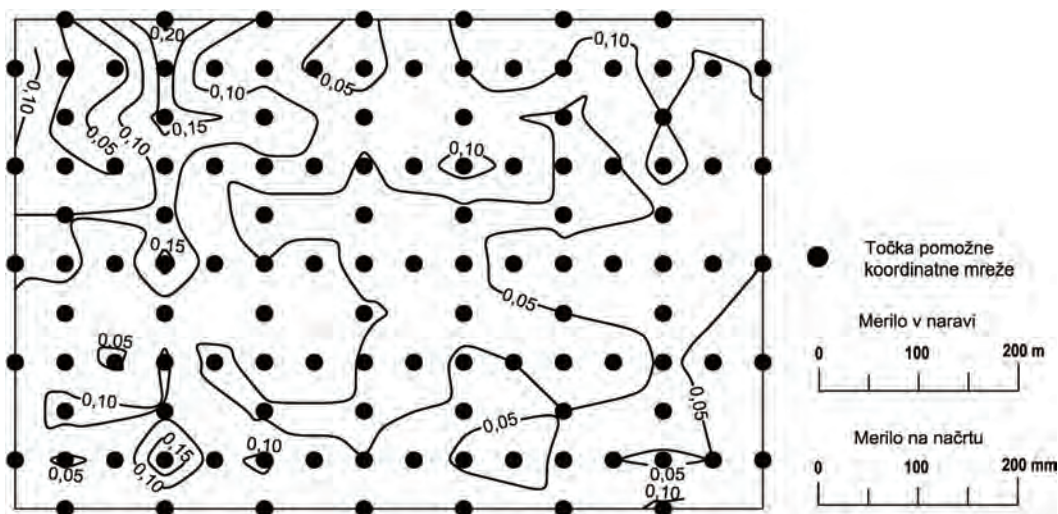
Preglednica 2: Cenilke točnosti georeferenciranja načrtov z uporabo transformacijskega modela TPS.

Oznaka lista načrta	LOOCV						HOV					
	RMSE <sub>y</sub>	max d <sub>xy</sub>	Porazdelitev d <sub>xy</sub> [%]				RMSE <sub>y</sub>	max d <sub>xy</sub>	Porazdelitev d <sub>xy</sub> [%]			
			[cm]	0 - 10  cm	10 - 20  cm	20 - 30  cm			> 30  cm	[cm]	0 - 10  cm	10 - 20  cm
SA 111	9,8	17,8	59,3	40,7	0,0	0,0	9,4	21,5	75,4	23,0	1,6	0,0
SA 112	6,7	13,1	87,0	13,0	0,0	0,0	7,7	19,5	82,0	18,0	0,0	0,0
SA130	7,2	14,4	87,0	13,0	0,0	0,0	8,5	20,8	77,9	21,3	0,8	0,0
SA 131	9,0	19,3	77,8	22,2	0,0	0,0	8,0	22,2	82,0	16,4	1,6	0,0
SA 132	8,7	19,4	75,9	24,1	0,0	0,0	8,1	17,2	77,0	23,0	0,0	0,0
SA 149	6,6	18,9	92,6	7,4	0,0	0,0	8,6	21,7	73,0	25,4	1,6	0,0
SA 150	8,0	14,7	77,8	22,2	0,0	0,0	8,9	25,5	79,5	18,0	2,5	0,0
SA 168	9,4	18,5	64,8	35,2	0,0	0,0	8,8	33,8	77,9	21,3	0,0	0,8
SA 169	9,7	18,3	68,5	31,5	0,0	0,0	11,5	29,7	58,2	32,8	9,0	0,0
SA 170	11,0	26,7	64,8	29,6	5,6	0,0	9,4	19,4	63,1	36,9	0,0	0,0
SA 189	8,9	18,6	79,6	20,4	0,0	0,0	8,4	21,2	78,7	19,7	1,6	0,0
SA 190	9,2	18,2	74,1	25,9	0,0	0,0	8,2	22,9	84,4	13,1	2,5	0,0
SA 211	7,7	14,8	81,5	18,5	0,0	0,0	12,5	25,5	46,7	45,1	8,2	0,0
SA 212	6,8	17,6	83,3	16,7	0,0	0,0	10,8	20,7	60,7	38,5	0,8	0,0
<b>Povprečje</b>	<b>8,5</b>	<b>17,9</b>	<b>76,7</b>	<b>22,9</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>9,2</b>	<b>23,0</b>	<b>72,6</b>	<b>25,2</b>	<b>2,2</b>	<b>0,1</b>

Grafična predstavitev kakovosti transformacije TPS (sliki 7 in 8) z izolijnami enakih preostalih odstopanj  $d_{xy}$  daje možnost za oceno ravninske porazdelitve geometrijske točnosti georeferenciranja, določene s postopkoma LOOCV in HOV.



Slika 7: Preostale deformacije  $d_{yx}$  na listu SA189, ocenjene s postopkom LOOCV (izolinije z ekvidistanco 0,05 m).



Slika 8: Preostale deformacije  $d_{yx}$  na listu SA189, ocenjene s postopkom HOV (izolinije z ekvidistanco 0,05 m).

Porazdelitev preostalih odstopanj  $d_{xy}$ -točk kontrolne mreže kaže, da so po transformaciji na načrtu prisotne neenakomerne in neenakomerno porazdeljene lokalne distorzije, katerih velikost je v mejah pričakovanih vrednosti. V predstavljenem primeru ponuja ocena HOV boljše možnosti za opis realnih lokalnih geometrijskih lastnosti transformiranega načrta kot ocena LOOCV. Prikaz lokalnih distorzij je pri oceni HOV podrobnejši. Razlog za to je večje število identičnih točk, vključenih v oceno (LOOCV 54 točk, HOV 122 točk).

#### 4 SKLEP

Zelo pomemben segment georeferenciranja skeniranih geodetskih načrtov je ocena položajne točnosti transformirane vsebine načrta. Kakovost transformacije se običajno opisuje z vrednostjo  $RMSE_{res}$ ,

izraunano iz popravkov veznih toak v okviru postopka georeferenciranja. Predstavljena raziskava je pokazala, da daje ta naain ocene v nekaterih primerih neobjektivne rezultate. To se zgodi predvsem, ae so uporabljene polinomske transformacije višjih stopenj ali ae so na skeniranem naarču prisotne lokalno hitro spreminjajoae se distorzije. Z globalnim transformacijskim modelom v tem primeru ne moremo zajeti kompleksne porazdelitve sistematiainih vplivov.

Rezultati raziskave nedvoumno kaaejo, da je mogaae s postopkom LOOCV zagotoviti veliko realnejšo oceno poloajne toainosti. Postopek LOOCV ponudi kakovostnejši vpogled v uainke razliainih stopenj polinomskih transformacij, kjer je mogaae slediti spremembam vrednosti popravkov na psevdokontrolnih toakah v odvisnosti od uporabljene stopnje polinoma. Zelo pomembno je, da lahko s postopkom LOOCV ocenjujemo poloajno toainost tudi ob uporabi lokalnih transformacij.

Algoritem za raunanje  $RMSE_{LOOCV}$  in odstopanj koordinat psevdokontrolnih toak obiajno ni vkljuen v standardno programsko opremo za obdelavo rastrskih slik. Najzanesljivejši naain za ocenjevanje kakovosti georeferenciranja naarfov je zasnovan na postopku HOV, ae obstaja dovolj kontrolnih toak. Zaradi obsega dela in dodatnih materialnih stroškov se ta naain ocene v praski uporablja redkeje. Zato se kot sprejemljivejši postopek vrednotenja horizontalne toainosti georeferenciranja naarfov ponuja ocena LOOCV. Z njo pridobimo cenilke toainosti za vsak list naarfa. S tem je omogaeno dovolj zanesljivo sprejemanje odloaitev o izbiri funkcionalnega modela transformacije, izloaanju grobo pogrešanih veznih toak in podobno.

## Zahvala

Alanek je rezultat raziskav v okviru projekta *Poboljšanje infrastrukture prostornih informacija optimalnim transformacijama geopodataka* (koda projekta: 1000065), ki je bil izveden s podpora Ministrstva za šolstvo in znanost Federacije Bosne in Hercegovine.

## Literatura in viri:

- Angermeier Sarajevo (2006). Projekt izvedenog stanja DGP Stari Grad Sarajevo. Sarajevo: Angermeier Sarajevo.
- Autodesk (2009). Autocad Raster Design 2010: Features and Benefits. <https://directives.sc.gov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=29596.wba>, pridobljeno 1. 4. 2017.
- Božić, B., Radojčić, S. (2011). Horizontal Accuracy of 1:50 000 Digital Topographic Maps. *Survey Review*, 43 (319), 94–104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/003962611X12894696204740>
- Brovelli, M. A., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Giannone, F., Realini, E. (2008). Accuracy assessment of high resolution satellite imagery orientation by leave-one-out method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63 (4), 427–440. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjrs.2008.01.006>
- Brovelli, M. A., Zamboni, G. (2006). The usability of vectorization and a new point matching procedure as first step in conflating raster and vector maps. V: M. Hampe (ur.), M. Sester (ur.) in L. Harrie (ur.), Multiple representation and interoperability of spatial data. *Proceedings of the WG II/3, II/6 Workshop. ISPRS Archives*, 36 (2/W40), 85–91.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. 2nd ed. Boca Raton, ZDA: CRC Press.
- Congalton, R. G., Green, K. (2008). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practice*. 2nd ed. Boca Raton, ZDA: CRC Press.
- Cuartero, A., Felicísimo, A. M., Polo, M. E., Caro, A., Rodríguez, P. G. (2010). Positional Accuracy Analysis of Satellite Imagery by Circular Statistics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76 (11), 1275–1286. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.76.11.1275>
- ESRI (2016). *Fundamentals of georeferencing a raster dataset*. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm>, pridobljeno 13. 4. 2017.
- Federalna uprava za geodetske i imovinsko pravne poslove (2016). *Trogodišnji plan rada, 2017–2019 godina*. <http://www.fgu.com.ba/ba/trogodisnji-plan-rada-2017-2019.html>, pridobljeno 21. 2. 2017.
- Follin, J., Fahrasmene, M., Simonetto, É. (2016). An open-source based toolchain for the georeferencing of old cadastral maps. *PeerJ Preprints*, 4:e2222v1. DOI:

- <https://dx.doi.org/10.7287/peerj.preprints.2222v1>
- Giannone, F. (2006). A rigorous model for High Resolution Satellite Imagery Orientation. Doktorska disertacija. Rim: Sapienza Università di Roma.
- Govedarica, M., Borisov, M. (2011). The Analysis of Data Quality on Topographic Maps. *Geodetski vestnik*, 55 (4), 713–725. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2011.04.713-725>
- Guidelines for Best Practice and Quality Checking of OrthoImagery, Issue 3.0 (2008). European Commission, Joint Research Centre. Luksemburg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Herrault, P.-A., Sheeren, D., Fauvel, M., Monteil, C., Paegelow, M. (2013). A comparative study of geometric transformation models for the historical „Map of France“ registration. *Geographia Technica*, 8 (1), 34–46.
- ISO 19157:2013, Geographic information — Data quality (2013). Ženeva: International Organization for Standardization.
- Japkowitz, N., Shah, M. (2011). Evaluating learning algorithms: A Classification Perspective. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jeong, I. S., Bethel, J. (2010). A study of trajectory models for satellite image triangulation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76 (3), 265–276. DOI: <https://dx.doi.org/10.14358/PERS.76.3.265>
- Kosmatin Fras, M., Fabiani, N., Triglav Čekada, M. (2014). Kakovost državnega ortofota v različnih letnikih njegove izdelave. *Geodetski vestnik*, 58 (4), 695–709. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.04.695-709>
- Mađarac, Lj. (2017). Reprodukcijska katastarskih planova i digitalni katastarski plan. *Geodetska služba*, 122, 37–42.
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., San-Antonio-Gómez, C., López-Márquez, S., Aguilera, M. J., Gil, C. (2014). The Assessment of Evolutionary Algorithms for Analyzing the Positional Accuracy and Uncertainty of Maps. *Expert Systems with Applications*, 41 (14), 6346–6360. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.04.025>
- Mather, P. M. (2004). Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. West Sussex: John Wiley & Sons.
- McGwire, K. C. (1996). Cross-Validated Assessment of Geometric Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62 (10), 1179–1187.
- McGwire, K. C. (1998). Mosaicking Airborne Scanner Data with the Multiquadratic Rectification Technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64 (6), 601–606.
- Mesas-Carrascosa, F. J., Rumbao, I. C., Berrocal, J. A. B., Porras, A. G.-F. (2014). Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms. *Sensors*, 14 (12), 22394–22407. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s14122394>
- Soycan, M. (2013). Analysis of geostatistical surface model for GPS height transformation: A case study in Izmir territory of Turkey. *Geodetski vestnik*, 57 (4), 702–718. DOI: <https://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.04.702-718>
- Standardization Agreement (STANAG) 2215 (2002). Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data. Bruselj: NATO Standardization Agency.
- Tucci, M., Giordano, A. (2011). Positional accuracy, positional uncertainty, and feature change detection in historical maps: Results of an experiment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35 (6), 452–463. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbusys.2011.05.004>
- Tuno, N., Mulahusić, A., Kogoj, D. (2015). Vrednotenje modelov transformacije geodetskih načrtov. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 736–751. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.736-751>
- Tuno, N., Mulahusić, A., Kogoj, D. (2017). Improving the Positional Accuracy of Digital Cadastral Maps through Optimal Geometric Transformation. *Journal of Surveying Engineering*, 143 (3), 1–12. DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000217](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000217)
- Yadav, P., Yadav, A. (2009). Digital Image Processing. New Delhi in Boston: University Science Press.



Tuno N., Mulahusić A., Topoljak J., Kogoj D. (2017). Vrednotenje postopkov za ocenjevanje točnosti georeferenciranja geodetskih načrtov. *Geodetski vestnik*, 61 (3), 373–386. DOI: [10.15292/geodetski-vestnik.2017.03.373-386](https://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2017.03.373-386)

**Doc. dr. Nedim Tuno, univ. dipl. inž. geod.**  
Univerza v Sarajevu, Gradbena fakulteta  
Patriotske lige 30  
BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
e-naslov: [nedim\\_tuno@gf.unsa.ba](mailto:nedim_tuno@gf.unsa.ba)

**Izr. prof. dr. Admir Mulahusić, univ. dipl. inž. geod.**  
Univerza v Sarajevu, Gradbena fakulteta  
Patriotske lige 30  
BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
e-naslov: [admir\\_mulahusic@gf.unsa](mailto:admir_mulahusic@gf.unsa)

**Doc. dr. Jusuf Topoljak, univ. dipl. inž. geod.**  
Univerza v Sarajevu, Gradbena fakulteta  
Patriotske lige 30  
BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
e-naslov: [jusuf\\_topoljak@gf.unsa.ba](mailto:jusuf_topoljak@gf.unsa.ba)

**Izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.**  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2  
SI-1000 Ljubljana, Slovenija  
e-naslov: [dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si](mailto:dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si)