



Упоредна анализа примене *RTK* и *PPK* метода у поступку *uav* фотограметрије

Comparative Analysis Of The Application Of Rtk And Ppk Methods In Uav Photogrammetry Process

Филип Димитријевић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОИНФОРМАТИКА

Кратак садржај – У оквиру овог рада реализовано је поређење две методе прикупљања просторних података уз помоћ беспилотне летелице - метода са оријентационим тачкама *GCP* (енг. *Ground Control Point*) и кинематичка метода са накнадном обрадом *PPK* (енг. *Post Processing Kinematic*). Урађена је комплетна фотограметријска обрада прикупљених података, укључујући генерисање облака тачака и дигиталног модела терена. За сваки метод извршена је анализа тачности добијених резултата, посебно у погледу хоризонталне и вертикалне тачности. Добијени подаци су упоређени и критички анализирани са аспекта тачности, ефикасности и применљивости у различитим условима.

Кључне речи: Беспилотна летелица, фотограметрија, *GCP*, *RTK*, *PPK*

Abstract – As part of this master's thesis, a comparison was conducted between two methods of spatial data collection using an unmanned aerial vehicle (UAV): the method involving ground control points (GCPs) and the kinematic method with post-processing (PPK). A complete photogrammetric processing of the collected data was performed, including the generation of point cloud and a digital terrain model. For each method, the accuracy of the obtained results was analyzed, especially in terms of horizontal and vertical accuracy. The obtained data were compared and critically analyzed from the aspect of accuracy, efficiency and applicability in different conditions.

Keywords: Unmanned aircraft, photogrammetry, *GCP*, *RTK*, *PPK*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био ванр. проф Марко Марковић

1. УВОД

У савременој геодезији и фотограметрији, беспилотне летелице све чешће се користе за прикупљање просторних података високе резолуције. Прецизност добијених модела у великој мери зависи од начина

геореференцирања, односно од примене одговарајуће методе позиционирања. Циљ овог истраживања је упоредна анализа тачности и применљивости методе са оријентационим тачкама (*GCP*) и кинематичке методе са накнадном обрадом (*PPK*) у фотограметријској обради података прикупљених беспилотном летелицом. На основу извршене обраде прикупљених података на терену у *Pix4D* и *Emlid studio* софтверима израђена су два облака тачака, при чему је један израђен уз примену *GCP* тачака, док је други креиран применом *PPK* методе без укључивања оријентационих тачака у самој обради. Кроз поређење добијених резултата у смислу положајне и висинске тачности, овај рад настоји да пружи увид у предности и ограничења обе методе за њихову примену у зависности од услова и циљева конкретнoг пројекта.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

2.1. Беспилотне летелице

У енглеском језику *UAV* (енг. *Unmanned Aerial Vehicle*) је општеприхваћени назив за ваздухоплове који немају пилота у самој летелици. Основни захтеви које беспилотне летелице морају задовољити да би се могле користити за фотограметријско снимање су: могућност извођења пројектованог плана лета са високом тачношћу, могућност носивости опреме за снимање и навигацију, аутономија лета летелице и смањене вибрације и остали спољашњи утицаји током лета. Основне компоненте система су летелица, сензори, погонски систем (серво мотори и батерије), системи за детекцију и избегавање препрека, систем за комуникацију (контролна станица, радио предајник), софтвер за планирање лета, мапирање, полетање и слетање и софтвер за обраду података. Функционисање *UAV* система се може објаснити кроз три фазе. У првој фази потребно је извршити припрему лета, дефинисати подручје снимања, резолуцију снимања и детаље лета. Детаљи лета и његови параметри морају се пажљиво размотрити, укључујући висину лета, оријентацију лета, брзину лета, подручје снимања, оријентацију снимања, проценат преклапања снимака и брзину снимања. Дефинисање оријентационих/контролних тачака и калибрација представљају другу фазу функционисања система. Системи тог типа опремљени су камерама високе

резолюције, па се трећа фаза односи на процесирање добијених података. UAV системи могу произвести густе облаке тачака (густина тачака и до неколико милиметара) користећи SIFT (енг. *Scale Invariant Feature Transform*) и SfM (енг. *Structure form Motion*) технике у комбинацији са фотограметријском методом [1].

2.2 Фотограметријска метода

Фотограметрија је наука и технологија добијања поузданих информација о објектима и простору на основу фотографија кроз прецизно мерење и анализу снимака. Циљ фотограметрије је одређивање облика, положаја и димензија објеката у тродимензионалном простору коришћењем фотографских снимака. Излазни резултати могу бити 3Д модел, дигитални модел рељефа, ортофото карта као и облак тачака. Основни математички модели у фотограметрији приказани су формулама 1, ..., 5:

Модел централне пројекције:

$$\frac{x}{x-x_0} = \frac{y}{y-y_0} = \frac{f}{z-z_0} \quad (1)$$

где су:

x, y – координате тачке на слици;

X, Y, Z – просторне координате тачке у реалном свету;

X_0, Y_0, Z_0 – координате центра пројекције (положај камере);

f – жижна даљина објектива.

Одређивање размере слике:

$$m = \frac{f}{H-h} \quad (2)$$

где су:

m – размера слике;

f – жижна даљина;

H – висина лета летелице или висина камере;

h – просечна надморска висина терена.

Претварање мерења са слике у стварне димензије:

$$L = l * \frac{H-h}{f} \quad (3)$$

где су:

L – реална (теренска) дужина;

l – дужина измерена на слици;

f – жижна даљина;

H – висина лета летелице или висина камере;

h – просечна надморска висина.

Паралакса и висинска разлика:

$$\Delta h = \frac{p*H}{B} \quad (4)$$

где су:

Δh – висинска разлика;

p – паралакса;

H – висина лета;

B – базна дужина односно растојање између две позиције камере.

Одређивање дубине објекта:

$$Z = \frac{f*B}{x_L-x_R} \quad (5)$$

где су:

x_L, x_R – координате пројекције тачке на левој и десној слици;

B – базна дужина;

f – жижна даљина;

Z – дубина тачке у простору.

2.3 Глобални навигациони сателитски системи

Основна идеја одређивања положаја тачке на Земљи на основу мерења растојања до сателита заснива се на трилатерационој методи. Позиција GNSS пријемника одређује се на основу мерења дужина до три или више сателита. Сателити емитују кодиране навигационе поруке које садрже:

- тачну позицију сателита у време емитовања поруке и
- тачно време емитовања поруке.

У оквиру овог мастер рада реализовано је поређење две методе прикупљања просторно-географских података уз помоћ беспилотне летелице – методе са оријентационим тачкама (GCP) и кинематичке методе са накнадном обрадом (PPK). Извршена је комплетна фотограметријска обрада прикупљених података, укључујући генерисање облака тачака и дигиталног модела терена. За сваку методу анализирана је тачност добијених резултата, посебно у погледу хоризонталне и вертикалне прецизности. Добијени подаци су упоређени и критички анализирани са аспекта тачности, ефикасности и применљивости у различитим условима. У случају апсолутног позиционирања положај се одређује у глобалном елипсоидном координатном систему који је везан за планету Земљу, док се код релативног позиционирања положај одређује у односу на неку тачку, која је усвојена за почетак локалног координатног система [3]. Генерално, грешке GNSS система могу се сврстати у три категорије:

- грешке сателитског порекла;
- грешке простирања сигнала;
- грешке пријемника.

Грешке сателитског порекла обухватају неколико типова грешака:

- грешке због лоше геометрије сателита;
- грешке ефемерида;
- грешке часовника у сателиту;
- грешке теорије релативитета.

Са становишта кретања електромагнетних таласа који имају GNSS фреквенције, Земљина атмосфера дели се на јоносферу и тропосферу. Ова два атмосферска слоја карактеристична су по томе што се у њима GNSS сигнали различито понашају. Доминантне грешке које се јављају приликом простирања сигнала су тада:

- грешке јоносферског кашњења сигнала и
- грешке тропосферског кашњења сигнала.

У грешке пријемника најчешће се убрајају:

- грешке услед шума у пријемнику;
- грешке синхронизације часовника пријемника;

- грешке ексцентрицитета фазног и геометријског центра [4].

2.4 Перманентне станице

Позиционирање помоћу једног *GNSS* пријемника подложно је утицају разних извора грешака. Како би се грешке елиминисале или барем умањиле развијен је метод позиционирања помоћу два или више *GNSS* пријемника који истовремено врше опажања. Барем један пријемник је стационаран и позициониран на тачки чије су координате познате. Разлика између познатих и мерених координата тачке се назива диференцијална корекција, систем у коме се поред сигнала са сателита користе и диференцијалне корекције, диференцијални *GNSS*. Диференцијални *GNSS* омогућује повећање тачности мерења у два правца:

- грешке које се јављају и на непокретним и на покретним пријемницима се готово у потпуности елиминишу и
- могуће је фазно мерење јер се може разрешити фазна неодређеност.

Српска просторна референтна мрежа (СРЕФ) имплицитно дефинише званични национални координатни систем, којим управља Републички геодетски завод. Мрежу СРЕФ чини 838 тачака, које су трајно стабилизване и равномерно распоређене на територији Републике Србије, на просечној удаљености од 10 km. Теренска *GNSS* мерења на тачкама мреже СРЕФ изведена су методом релативног статичког позиционирања [5].

2.5 Pix4D i Emlid studio

Pix4D је дизајниран да ради са најновијом генерацијом беспилотних летелица и врши трансформацију великог броја фотографија снимљених беспилотним летелицама у прецизне облаке тачака, дигиталне моделе површи и ортомозаике. То је софтвер за обраду фотографија који се заснива на аутоматском проналажењу хиљаде заједничких тачака између фотографија. Свака карактеристична тачка која се налази на фотографији назива се кључна тачка. Када се утврди да су две кључне тачке на две различите фотографије исте, то су подударне кључне тачке [6].

Emlid Studio је десктоп апликација за више платформи дизајнирана посебно за накнадну обраду података са базе станице. Апликација има пет токова рада: кинематичка обрада, статичка обрада, обрада података беспилотном летелицом, *Stop & Go* са *Emlid flow* и конвертује евиденцију у *RINEX* [7].

3. ПРАКТИЧНИ ПРИМЕР И ДИСКУСИЈА

У практичном делу вршено је поређење постигнуте тачности применом две врсте мапирања беспилотном летелицом, где су израђена два облака тачака исте локације у К.О Инђија на парцели 7505/21. Коришћено је 416 фотографија са беспилотне летелице, 4 *GCP* тачке и *RINEX* подаци са базе станице. Код методе са оријентационим тачкама (*GCP*) вршено је учитавање фотографија и координата *GCP* тачака у софтвер *Pix4D*. Пре самог учитавања у софтвер картезијанске координате *GCP* тачака снимљених на терену су

трансформисане у Гаус - Кригерову пројекцију и у систем висина ТРСТ помоћу апликације ГРИДЕР. Након извршене комплетне обраде и израде облака тачака као коначан резултат је добијена глобална тачност геореференцирања модела од 1 cm (Слика 1).

Images	median of 67918 keypoints per image	✓
Dataset	416 out of 416 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	1.93% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 35844.4 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean RMS error = 0.01 m	✓

Слика 1. Тачност геореференцирања

Процес обраде података код кинематичке методе са накнадном обрадом (*PPK*) је започет, тако што је узета аритметичка средина картезијанских координата базе станице која је снимљена *GNSS* уређајем 3x30 s и та вредност је унета за координату базе станице у заглављу *MRK* фајла. Након тога је приступљено обради *RINEX* података у софтверу *Emlid studio*, где се помоћу опције *Drone data processing* извршило учитавање обсервационих фајлова са беспилотне летелице (ровера) и базе, навигациони фајл са беспилотне летелице и *MRK* фајл. Као резултат процесирања добијен је излазни фајл са екстензијом *.pos* у коме се налазе поправљене картезијанске координате центара за сваку фотографију снимљену са беспилотне летелице. Затим је у апликацији ГРИДЕР извршена трансформација координата као и код предходне методе у Гаус –Кригерову пројекцију и систем висина ТРСТ. Са поправљеним координатама центара фотографија извршено је учитавање фотографија у *Pix4D* софтвер и извршена комплетна израда облака тачака без коришћења оријентационих тачака. Тачке које су се код методе са оријентационим тачкама (*GCP*) користиле као оријентационе тачке и учествовале у изради модела сада нису коришћене при изради облака тачака у *Pix4D* – у, већ су се накнадно учитавале као *check – point*, односно контролне тачке на којима је вршено поређење координата контролних тачака снимљених на терену и истих тих тачака чије су координате добијене мануелним маркирањем на моделу у чијој обради нису коришћене оријентационе тачке, где је као резултат добијен извештај у облику табеларног приказа одступања по координатним осама за сваку контролну тачку (Слика 2). Из приказаног извештаја може се видети да се положајна тачност креће до 4 cm, док код висинске тачности постоје значајно већа одступања која износе око 20 cm.

Geolocation Details

Ground Control Points

0 out of 4 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
gcp5004	0.034	-0.000	-0.182	0.424		14 / 14
gcp5005	0.033	-0.018	-0.203	0.539		17 / 17
gcp5006	0.009	-0.028	-0.178	0.455		18 / 18
gcp5007	0.024	0.018	-0.207	0.581		17 / 17
Mean [m]	0.024923	-0.007328	-0.192532			
Sigma [m]	0.010172	0.017559	0.012555			
RMS Error [m]	0.026919	0.019026	0.192941			

Localization accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Слика 2. Табеларни приказ одступања по осама

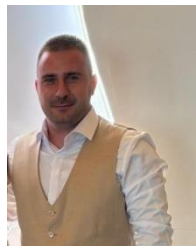
4. ЗАКЉУЧАК

У поређењу две методе прикупљања података помоћу беспилотних летелица и *GNSS* технологије, може се закључити да обе имају своје предности и ограничења, зависно од захтева пројекта и услова на терену. Метода са оријентационим тачкама обезбеђује високу прецизност, како у хоризонталном тако и у вертикалном смислу. Захваљујући директној вези између оријентационих тачака и фотограметријског модела, овај приступ је веома поуздан када је потребна центиметарска тачност. Међутим, главни недостатак ове методе је временска и логистичка захтевност теренског рада, посебно у тешко приступачним подручјима, као и зависност од стабилне *GNSS* везе или интернет конекције за добијање корекција. Са друге стране, кинематичка метода са накнадном обрадом (*PPK*) представља ефикаснију алтернативу за мапирање у условима, где није могуће поставити оријентационе тачке или где не постоји интернет сигнал. Ова метода омогућава прикупљање података на великим удаљеностима од базне станице и знатно скраћује време боравка на терену. Ипак, њен недостатак се огледа у смањеној прецизности вертикалне компоненте модела, што је чини мање погодном за пројекте који захтевају висинску тачност. Избор методе зависи од конкретних потреба пројекта, расположиве опреме, теренских услова и жељене тачности финалног модела. У пракси се често примењује комбинација обе методе ради постизања оптималног баланса између ефикасности и тачности.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://hrcak.srce.hr/file/121452>. (приступљено у марту 2025.)
- [2] М. Говедарица, Фотограметрија, материјал са предавања, 2025.
- [3] http://geodezija.ftn.uns.ac.rs/wp-content/uploads/2024/12/9_UuG_GNSS.pdf. (приступљено у марту 2025.)
- [4] В. Булатовић, Методе прецизних геодетских мерења – скрипта, други део испита, 2012.
- [5] В. Булатовић, Активне геодетске референтне мреже, материјал са предавања, 2025.
- [6] <http://www.gisandbeers.com/GeoBazar/Tutoriales%20y%20manuales/Manual-Pix4D-Mapper.pdf>. (приступљено у априлу 2025.)
- [7] <https://emlid.com/emlid-studio/>. (приступљено у априлу 2025.)

Кратка биографија:



Филип Димитријевић рођен 27. новембра 1996. године у Пожаревцу. Мастер рад на Факултету техничких наука у Новом Саду студијски програм Геодезија и геоинформатика уџа научна област Геодезија одбранио је 2025. године.

Контакт: fica-012@live.com