

Aerofotografavimo iš bepilotės skraidyklės techninė specifikacija ir fotografinių vaizdų savybės

Lina Kuklienė, Dainora Jankauskienė*, Indrius Kuklys, Birutė Ruzgienė

Klaipėdos valstybinė kolegija, Technologijų fakultetas, Aplinkos ir statybos inžinerijos katedra

Bijūnų g. 10, Klaipėda, tel. 8 46 3803639,

El. paštas: l.kukliene@kvk.lt, d.jankauskiene@kvk.lt, i.kuklys@kvk.lt, b.ruzgiene@kvk.lt

(Gauta 2022 m. kovo mėn.; atiduota spaudai 2022 m. kovo mėn.; prieiga internete nuo 2022 m. gegužės 6 d.)

Anotacija

Straipsnyje pateikiami aerokartografavimo parametrai, kuriais remiantis gali būti rengiama aerofotogrametrijos darbų techninė specifikacija bei projektų realizacija. Remiantis dviejų aerofotografavimo projektų, kai vietovė aerofotografuota iš skirtingo tipo skraidyklių ir fotokamerų, fotogrametriniais duomenimis išanalizuotos fotografinių vaizdų savybės bei jų sąsajos su aerokartografavimo darbų tikslumo reikalavimais.

Reikšminiai žodžiai: UAV-fotogrametrija, aerokartografavimas, fotografinių vaizdų savybės, fotogrametriniai parametrai.

Abstract

This paper presents aerial mapping parameters that can be used as a basis for the development of technical specifications for aerial photogrammetric works and the realisation of projects. Based on photogrammetric data from two aerial photography projects, where the terrain was aerial photographed from different types of unmanned aerial vehicles and cameras, the characteristics of the photographic images were analysed and their correlation with the accuracy requirements of the aerial mapping work was presented.

Key words: UAV-photogrammetry, aerial mapping, photographic image properties, photogrammetric parameters

Įvadas

Pastaruoju metu skaitmeninėse viešosiose erdvėse vis plačiau naudojami kartografiniai produktai, kuriems sukurti taikomi fotogrametrijos metodai. Daugelis aerofotonuotraukų (fotografinių vaizdų), saugomų geoinformacinėse sistemose (GIS) yra ortofotografinės nuotraukos. Ortofotografija yra geometriškai koreguotas (rektifikuotas), neiškraipytas vietovės fotografinis vaizdas, kurio visame plote mastelis yra pastovus dydis. Skaitmeninis ortofotografinis žemėlapis yra susietas su geografinė bei referencinė koordinatų sistema, todėl fotografinio vaizdo kiekvieno vaizdo elemento (pikslio) padėtys gali būti nustatomos (Konecny, 2003; Linder, 2009).

Fotografiniams vaizdams gauti bei vietovės objektams kartografuoti vis dažniau taikoma UAV-fotogrametrijos technologija, kai vietovė ar kitas objektas fotografuojamas skaitmenine fotokamera įmontuota bepilotėje skraidyklėje (UAV- *Unmanned Aerial Vehicle*) skrendančioje nedideliame aukštyje, o fotografiniai vaizdai apdorojami specialia programine įranga. Lengvas skrendantis aparatas su kompiuterizuota aerofotografavimo sistema ir automatizuotu skrydžių valdymu yra efektyvi priemonė fotogrametrijai duomenims kaupti. Aerokartografavimo sistema sudaro bepilotę skraidyklę (dar vadinama *dronu*) su valdymo įranga, įvairaus tipo fotokameros, globalinė padėties nustatymo sistema (GPNS), lazerinis skeneris bei fotografinių vaizdų apdorojimo programinis paketas. UAV-fotogrametrijos technologija taikoma įvairiems objektams kartografuoti. Aerofotografuojami paviršiai uždengti medžių lapija, siauri linijiniai objektai (kelių tinklas, jūros pakrantė, kt.), aukštuminiai statiniai, kultūrinio paveldo objektai, kadastrinės vietovės, fiksuojamos elektros tinklų linijos ir kt. Aerofotografavimo iš nedidelio aukščio ir gautų fotografinių vaizdų apdorojimo technologija vis dažniau keičia tradicinius geodezinių bei fotogrametrijos matavimų būdus, taikomus vietovėms kartografuoti. Fotogrametriniai duomenys gaunami realiuoju laiku, kartografiniai produktai, atitinkantys keliamus tikslumo reikalavimus, sukuriama greitai, lengvai



aerofotografuojamos neprieinamos bei sudėtingo reljefo teritorijos, o aerokartografavimo darbų kaina yra nedidelė ir vis mažėjanti (Eisenbeiss, 2009; Haala ir kt., 2011; Ruzgienė, Jankauskienė ir kt., 2020; Neitzel ir kt., 2011).

Taikant UAV-fotogrametrijos technologiją, sukuriama erdviniai paviršių modeliai bei generuojami skaitmeniniai ortofotografiniai žemėlapiai. Gautieji produktai gali būti pateikiami vartotojams interaktyviuoju būdu, o reljefo (DEM) bei paviršiaus modeliai (DSM) įvairia vizualizavimo forma. Fotografiniams vaizdams apdoroti vis plačiau taikoma inovatyvi programinė sistema *Pix4Dmapper*, kuri apjungia kompiuterinio matymo, geoinformacinių sistemų ir tradicinės fotogrametrijos technologijas bei efektyviai palengvina vartotojo darbą. Ši programinė įranga – tai skaitmeninė fotogrametrinė darbo stotis, kuria generuojami aerokartografiniai produktai bei modeliuojamas objektų paviršius. Programinė sistema gali apdoroti tūkstančius fotografinių vaizdų, gautų fotografuojant iš artimų nuotolių, bepiločių skraidymo aparatų bei orlaivių. Sukuriama tikslius georeferenciniai 2D/ 3D paviršiaus modeliai bei taškų debesys (Ruzgienė, Berteška ir kt., 2015; Rock ir kt., 2011; Pix4D Support, 2021; Watts, 2012).

Kartografinių produktų, gautų fotogrametriniu būdu, kokybė priklauso nuo tinkamai parengtos aerokartografavimo darbų techninės specifikacijos, aerofotografavimo projekto realizavimo sąlygų bei vykdomų fotogrametrinių procesų efektyvumo. Fotografinių duomenų taikymo žemėlapiams sudaryti procedūros yra reglamentuojamos fotogrametriniais reikalavimais (Rudinskas, 2011; Manual, 2004).

Sparčiai populiarėjant žemai skrendančių nedidelių bepiločių skraidymo aparatų panaudojimas fotogrametriniams duomenims kaupti, tampa vis aktualesnis poreikis tirti fotografinių vaizdų savybes ir jų sąsajas su aerofotogrametrinių projektų techninės specifikacijos rengimu, siekiant gauti kuo efektyvesnius, tikslesnius ir kokybiškesnius aerokartografinius produktus.

Tyrimo *tikslas* – išanalizuoti fotografinių vaizdų savybes, siejant su aerokartografavimo darbų tikslumo reikalavimais bei aerofotografavimo projekto specifikacijos parengimu.

Tyrimo objektas – fotogrametriniai duomenys, gauti vietovę aerofotografuojant iš skirtingo tipo skraidyklių ir fotokamerų.

Tyrimų metodika

Tyrimų metodika apima šiuos pagrindinius darbų etapus.

- Išnagrinėjus kartografuojamųjų objektų tipus, techninių priemonių savybes, reikalavimus skrydžių realizavimui, fotografinių vaizdų parametrus, pateikiami specifikacijos duomenys aerofotografavimo darbų projektui parengti.
- Aerofotografavimo priemonių parametrų nustatymas, remiantis jų technine dokumentacija.
- Aerofotonuotrukų, gautų fotografuojant dviejų tipų fotokameromis iš dviejų skirtingo tipo bepiločių skraidyklių, savybės nustatomos remiantis pateiktais duomenimis, gaunamais iš fotografinio vaizdo **jpg Properties* bei programine sistema *IrfaView*.
- Analizuojamos sąsajos tarp fotografavimo priemonių techninių parametrų, fotografinių vaizdų skiriamosios gebos, mastelio ir aerokartografavimo produktų tikslumo.

Aerokartografavimo techninės specifikacijos duomenys. Aerofotografuojamasis objektas. Pradinėje specifikacijos rengimo stadijoje apibūdinamas aerofotografuojamasis objektas, aprašomas reljefas bei nurodomas objekto tipas.



Išskiriami šie kartografuojamųjų objektų tipai:

- bendrieji – aerofotografuojamoji vietovė nėra miškinga, ežerai bei dirbamos žemės laukai užima nedidelę teritorijos dalį;
- sudėtingieji – didžiąją dalį teritorijos dengia miškas, tanki augmenija ir dirbamos žemės laukai, reljefas yra lygus;
- specialieji – aerofotografuojami sniego, smėlio, vandens paviršiai (jūros, ežerai, upės, kt.);
- linijiniai – kelių tinklas, upių pakrantės ir kt.;
- užstatytos teritorijos;
- įvairūs erdviniai (3D) statiniai;
- aukštuminiai – bokštai, vėjo jėgainės ir kt.;
- pastatų interjeras.

Techninės priemonės. Techninių priemonių (bepilotės skraidyklės ir fotokameros) parametrai reikalingi projektiniams aerofotografavimo duomenims nustatyti. Bepilotė skraidyklė fotografiniams vaizdams gauti paprastai skrenda nedideliu greičiu (apie 30-60 km/val.), o skrydžio aukštis gali siekti nuo 30 iki 750 m (ir daugiau). Fotokamerų, integruojamų į bepilotę skraidyklę, pagrindinės charakteristikos yra židinio nuotolis, fotokameros skiriamoji geba (pikselių kiekis – kadro formatas), jutiklio (sensoriaus) pikselio dydis, sensoriaus dydis.

Skrydžių realizavimo (aerofotografavimo) parametrai.

Fotografinio vaizdo elemento dydis vietovėje. Pikselio dydis vietovėje (aerofotografuojamajame objekte) *GSD* (*Ground Sample Distance*) nustatomas, atsižvelgiant į aerokartografavimo produktų, gaunamų apdorojus UAV fotografinius vaizdus, reikiamą tikslumą. Taikoma ši apibendrinta taisyklė: *GSD* turi būti du kartus mažesnis nei planimetrinių koordinatų tikslumas, o altitudžių – tris kartus, pvz., jei reikalaujamas planimetrinių koordinatų (*X* ir *Y*) tikslumas – 5 cm, o aukščių (*Z*) – 7 cm, tai $GSD = 2,5-3,5 \text{ cm}$. Fotografinio vaizdo elemento dydis vietovėje (*GSD*) apskaičiuojamas pagal formulę (Ruzgienė, Kuklienė ir kt., 2011):

$$GSD = pix \frac{H}{c} \quad (1),$$

čia: *pix* – fotokameros jutiklio vaizdo elemento (pikselių) dydis, μm ; *H* – aerofotografavimo aukštis, m; *c* – fotokameros židinio nuotolis, mm.

Fotografinių vaizdų sanklota (%). Atsižvelgiant į tai, kad UAV sistema aerofotografavimo metu yra nestabili ir priklauso nuo vėjo gūsių, fotografinių vaizdų sanklota rekomenduojama 70-80 %.

Bepilotės skraidyklės skrydžio aukštis apskaičiuojamas pagal (1) formulę.

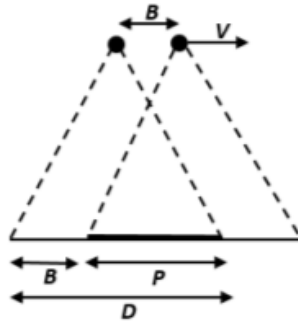
Aerofotografavimo bazė ir laiko tarpas tarp ekspozicijų. Norint pasiekti reikiamą fotografinių vaizdų sanklotą, reikia žinoti laiko tarpą tarp ekspozicijų (fotografinių vaizdų įrašymo laiko intervalą) (*t*), kuris priklauso nuo skraidyklės skrydžio greičio (*v*), fotografinio vaizdo elemento dydžio vietovėje (*GSD*) ir fotokameros skiriamosios gebos (jutiklio vaizdo elementų kiekio).

Laiko tarpas (*t*) tarp dviejų ekspozicijų apskaičiuojamas pagal formulę (Pix4D Support, 2021):

$$t(s) = \frac{B}{v} \quad (2),$$

čia: *B* – aerofotografavimo bazė (atstumas tarp ekspozicijų momentų), m; *v* – skrydžio greitis, m/s (1 pav.).





1 pav. Aerofotografavimo parametrai: atstumas tarp dviejų aerofotokameros padėčių (B), skrydžio greitis (v), aerofotonuotraukų sanklota (P) ir aerofotonuotraukos dydis (D) vietovėje

Figure 1. Aerial photography parameters: distance between two aerial camera positions (B), speed of flight (v), overlap of aerial photographs (P) and size of aerial photographs (D) on the terrain

Šaltinis: Pix4D Support, 2021

Aerofotografavimo bazė apskaičiuojama pagal formulę:

$$B = D - P \quad (3).$$

$$D(m) = \frac{d(px) \times GSD}{100} \quad (4).$$

$$P = p \times D \quad (5),$$

čia: $d(px)$ – fotografinio vaizdo plotis/ aukštis (pikseliai); p – fotografinių vaizdų sanklotos procentinė dalis, pvz., jei sanklota 75 %, tai $p = 0,75$.

Įstačius į trečią formulę D ir P elementus, apskaičiuojamas atstumas tarp 2-jų ekspozicijų momentų:

$$B(m) = D - (p \times D) = D \times (1 - p) = \frac{d(px) \times GSD}{100 \times (1 - p)} \quad (6).$$

Įstačius į antrą formulę B elementą, apskaičiuojamas laiko tarpas tarp ekspozicijų:

$$t = ((d(px) \times GSD / 100 \times (1 - p)) / v) = B / v \quad (7).$$

Pavyzdys. Fotografinio vaizdo pikselio dydis vietovėje $GSD = 5$ cm, fotografinio vaizdo plotis $d = 4000$ pikselių (jei fotokameros skiriamoji geba – 4000×3650 pikselių, tai imama didesnė reikšmė), UAV skrydžio greitis $v = 30$ km/val. = $8,33$ m/s, fotografinių vaizdų sanklota 75% ($p = 0,75$). Aerofotografavimo bazė ir laiko tarpas tarp ekspozicijų, apskaičiuojami pagal ketvirtą ir penktą formules:

$$B(m) = \frac{(4000 \times 5)}{100 \times (1 - 0,75)} = 50(m) \quad (8),$$

$$t = \frac{50}{8,3} = 6(s).$$

Aerofotonuotraukos skiriamoji geba/ pikselio dydis. Vienas iš pagrindinių fotografinio vaizdo parametrų – skiriamoji geba (*Resolution*, žr. *Properties*) pateikiama pikselių kiekiu viename colyje (dpi - dots per inch), $1 \text{ colis} = 2,54$ cm. Vieno pikselio dydis fotonuotraukoje apskaičiuojamas: $2,54$ (cm) / skiriamoji geba (dpi).

Aerofotonuotraukos kadro dydis. Fotonuotraukos vieno kadro matmenys (plotis ir aukštis) apskaičiuojamas pikselio dydį padauginus iš fotokameros skiriamosios gebos (aerofotonuotraukos kadro dydžio, pikseliai).

Aerofotonuotraukos kadro dydis vietovėje = $GSD \times$ fotonuotraukos kadro dydžio (pikseliai).

Fotografinio vaizdo mastelis. Įvertinant fotonuotraukos detalumą ar kokybę, gali būti nustatomas mastelis: pikselio dydis fotonuotraukoje / pikselio dydis vietovėje arba fotonuotraukos kadro dydis / fotonuotraukos kadro dydis vietovėje.

Aerokartografinių produktų mastelis ir tikslumas. Klasikinėje fotogrametrijoje aerofotonuotraukos ir aerokartografinio produkto (aerofototopografinės nuotraukos) mastelių santykis yra 1:2-5, t.y. aerofotonuotraukos mastelis smulkinamas nuo 2-jų iki 5-ių kartų (Ruzgienė, 2008). Apytikris aerokartografinių produktų planimetrinis tikslumas siejamas su mastelio tikslumu – 0,1-0,09 mm × mastelio vardiklio.

Skaitmeninio aerokartografavimo produktų tikslumui įvertinti *Trimble* korporacija deklaruoja šiuos vertinimo kriterijus: planimetrinių koordinačių vidutinė ir maksimali paklaidos – $1,0 \times GSD$ ir $1,6 \times GSD$, o altitudžių – $1,6 \times GSD$ ir $2,5 \times GSD$. Pavyzdžiui, jei $GSD = 2,4$ cm, tai vidutinė ir maksimali paklaidos X ir Y kryptimis yra – 2,4 cm ir 3,8 cm; Z kryptimi – 3,8 cm ir 6,0 cm.

Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas: fotografinių vaizdų savybių palyginamoji analizė

Skrydžių realizavimo ir fotografinių vaizdų savybėms tirti analizuojamos fotonuotraukos, gautos aerofotografuojant dviejų tipų fotokameromis (*Sony Nex-5T* ir *DJI Zenmuse X5*) iš bepiločių skraidyklių fiksuoto sparno *TRIMBLE UX5* ir sraigtasparnio *DJI MATRICE 600 PRO*. Šių bepiločių skraidyklių ir fotokamerų pagrindinės charakteristikos pateiktos 1-oje ir 2-oje lentelėse.

1 lentelė. Bepiločių skraidyklių pagrindinės savybės

Table 1. Key features of unmanned aerial vehicles

<i>TRIMBLE UX5</i>	<i>DJI MATRICE 600 PRO</i>
Sparnų ilgis – 1,0 m, svoris 2,5 kg.	Svoris su šešiomis <i>TB47S</i> baterijomis – 9,5 kg.
Greitis – iki 80 km/val.	Maks. greitis – 65 km/val.
Gali išsilaikyti skrydyje iki 50 min, esant silpnam vėjui.	Atsparus vėjui, kai vėjo greitis iki 8 m/s.
Skrydžio maks. atstumas – apie 60 km.	Sklandymo laiko trukmė – 32 min.
Maks. ryšio ir kontrolės atstumas – iki 5 km.	Skrydžio kontrolės sistema - <i>A3 Pro</i> .
Pakilimo aukštis – 75-750 m.	Gali pakilti iki 2500 m virš jūros lygio.
Pikselio dydis (<i>GSD</i>) – nuo 2,4 cm iki 24 cm.	Veikia, esant temperatūrai nuo 10° iki 40° C.
UAV valdymas – visiškai automatinis, pusiau automatinis ir rankinis.	Sklandymo/ kybojimo tikslumas: vertikalus $\pm 0,5$ m, horizontalus $\pm 1,5$ m.
Skrydžių planavimo programa <i>Trimble Aerial Imaging</i> leidžia optimaliai valdyti skrydį.	

Šaltinis: sudaryta autorių; *Trimble UX5*, 2021; *MATRICE 600 PRO*, 2021

Source: compiled by authors; *Trimble UX5*, 2021; *MATRICE 600 PRO*, 2021

2 lentelė. Fotokamerų *Sony Nex-5T* ir *DJI Zenmuse X5*, integruotų į UAV, pagrindinės charakteristikos

Table 2. Main characteristics of the *Sony Nex-5T* and *DJI Zenmuse X5* cameras integrated in the UAV

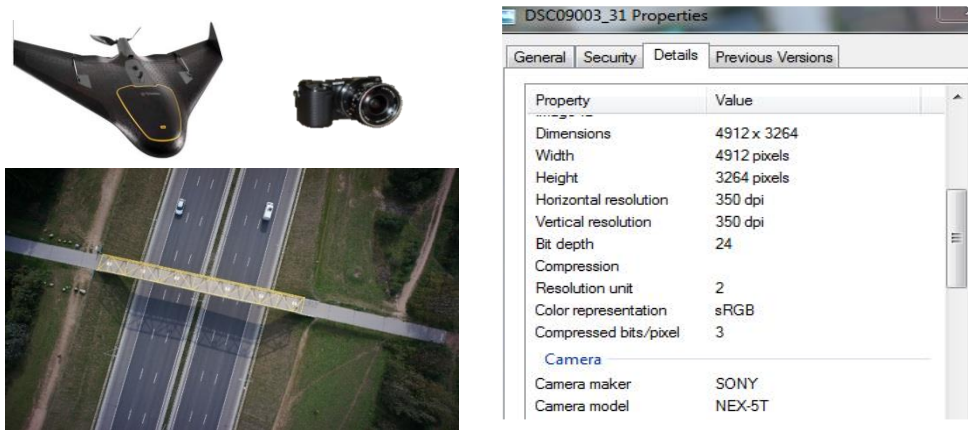
Fotokameros parametrai	<i>Sony Nex-5T</i>	<i>DJI Zenmuse X5</i>
Židinio nuotolis, mm	15	15
Fotokameros skiriamoji geba, pikseliai	16 mln.	16 mln.
Sensoriaus dydis:		
• plotis ir aukštis, pikseliai	4912×3264	4608 × 3456
• plotis ir aukštis, mm	23,4×15,6	17,3×13,0
Jutiklio pikselio dydis, μm	4,8	3,7

Šaltinis: sudaryta autorių; *Trimble UX5*, Camera specification, 2021; *Zenmuse X5*, 2021

Source: compiled by authors; *Trimble UX5*, Camera specification, 2021; *Zenmuse X5*, 2021

Fotonuotraukų, gautų fotokameromis *Nex-5T* ir *Zenmuse X5* iš žemai skrendančių skraidyklių, savybių (*Properties*) ištraukos pateiktos 2 ir 3 pav.

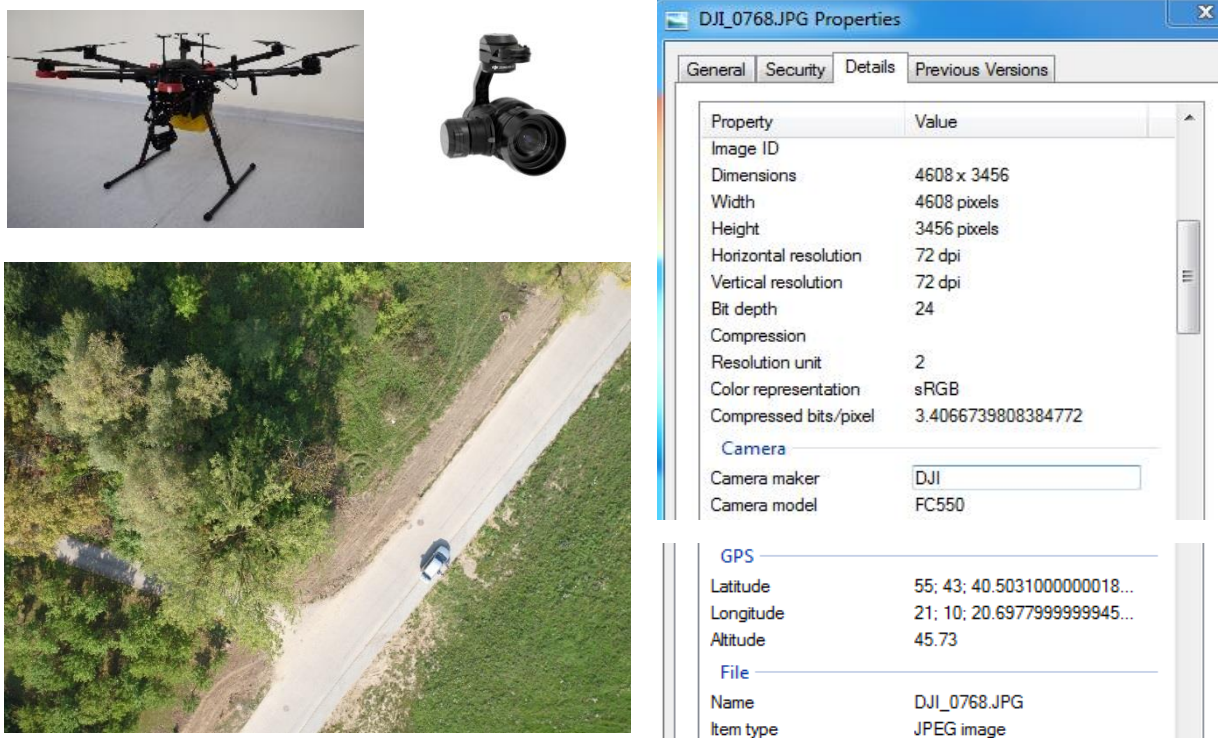




2 pav. Fotografinių vaizdų, gautų fotokamera Nex-5T, pagrindinės savybės: kadro dydis (plotis ir aukštis), skiriamoji geba (dpi - dots per inch)

Figure 2. Main parameters of photographic images acquired with the Nex-5T: frame size (width and height), resolution (dpi - dots per inch)

Šaltinis: sudaryta autorių
Source: compiled by authors



3 pav. Fotografinių vaizdų, gautų fotokamera Zenmuse X5, pagrindinės savybės: kadro plotis ir aukštis, skiriamoji geba (dpi), geodezinės koordinatės, skrydžio aukštis

Figure 3. Main parameters of photographic images acquired with the Zenmuse X5: frame width and height, resolution (dpi), geodetic coordinates, flight altitude

Šaltinis: sudaryta autorių
Source: compiled by authors

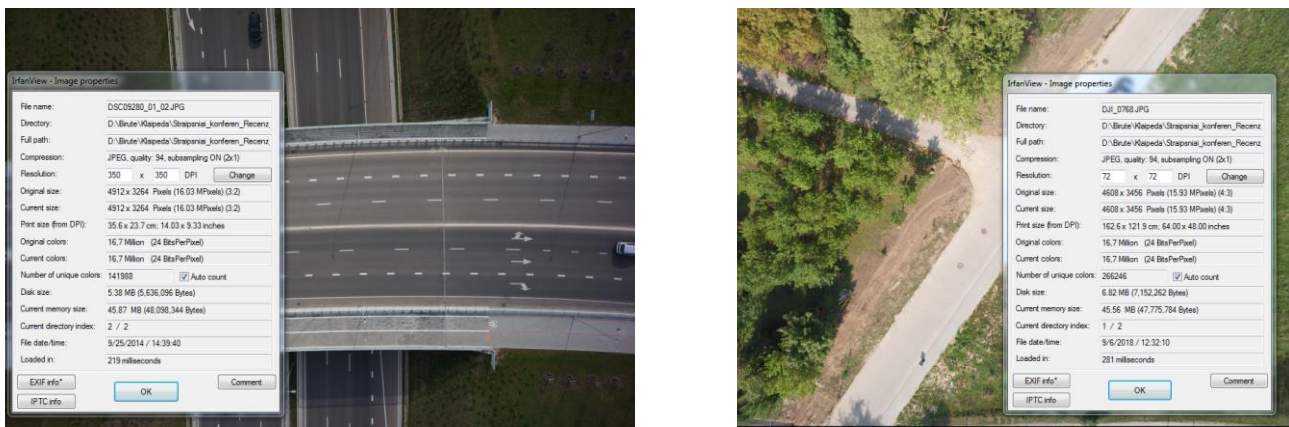
Fotografinių vaizdų skiriamoji geba (*Resolution*) apibūdinama pikselių (vaizdo elementų) kiekiu viename colyje (vienas colis (*inch*) = 2,54 cm), tai, atitinkamai, vieno pikselio dydis, kai skiriamoji geba 350 ir 72 dpi (1 ir 2 pav.), yra 0,0726 ir 0,3528 mm. Fotografinių vaizdų savybės ir skrydžių realizavimo duomenys pateikti 3-oje lentelėje.

3 lentelė. Fotografinių vaizdų ir skrydžių realizavimo pagrindiniai parametrai
Table 3. Basic parameters of photographic image and flight realisation

Fotografinių vaizdų savybės ir skrydžių duomenys	Fotokamera Sony Nex-5T (UX5 TRIMBLE)	Fotokamera DJI Zenmuse X5 (MATRICE 600 PRO)
Aerofotonuotraukos kadro dydis, pikseliai	4912 × 3264	4608 × 3456
Skiriamoji geba, dpi	350	72
Pikselio dydis, mm	0,0726	0,3528
Fotonuotraukos kadro dydis, mm: plotis	356,47 × 236,87	1626 × 1219
aukštis	356,47 (0,0726×4912) 236,87 (0,0726×3264)	1626 (0,3528×4608) 1219 (0,3528×3456)
Aerofotonuotraukų sanklota, %	80	80
Skrydžio greitis, km/val.	80	50
Skrydžio aukštis, m	75	45
Pikselio dydis vietovėje (<i>GSD</i>) (žr.1 formulę), mm	24 (0,0048×75000/15)	11 (0,0037×45000/15)
Aerofotonuotraukos kadro dydis vietovėje, m	117,89 × 78,34 (0,024×4912; 0,024×3264)	50,69 × 38,02 (0,011×4608; 0,011×3456)
Aerofotonuotraukos mastelis (<i>GSD</i> / pikselio dydžio)	1:330 (24 / 0,0726)	1:30 (11 / 0,3528)

Šaltinis: sudaryta autorių
Source: compiled by authors

Naudojantis *IrfanView* programa fotografinių vaizdų savybės pateiktos 4 pav.



4 pav. Fotonuotraukų kadro dydis (*Print size from DPI*): 35,6 × 23,7 cm ir 162,6 × 121,9 cm
Figure 4. *Print size from DPI*: 35.6 × 23.7 cm and 162.6 × 121.9 cm

Šaltinis: sudaryta autorių
Source: compiled by authors

Aerofotografuojant fotokameromis *Sony Nex-5t* ir *DJI Zenmuse X5*, fotografinio vaizdo pikselio dydžio vietovėje (*GSD*) sąsaja su skrydžio aukščiu (*H*), aerofotonuotraukos kadro dydžiu ir masteliu, pateikta 4-oje lentelėje.



4 lentelė. Fotografinio vaizdo pikselio dydžio vietovėje (*GSD*) sąsaja su skrydžio aukščiui, kadro dydžiu ir aerofotonuotraukos masteliu

Table 4. Relationship of photographic pixel size in terrain (*GSD*) with flight altitude, frame size and aerial image scale

<i>GSD</i> , cm	Skrydžio aukštis, m		Aerofotonuotraukos/ kadro dydis vietovėje, m		Aerofotonuotraukos mastelis	
	<i>NEX-5T</i>	<i>ZENMUSE X5</i>	<i>NEX-5T</i>	<i>ZENMUSE X5</i>	<i>NEX-5T</i>	<i>ZENMUSE X5</i>
1,1	34	44	54,0 × 35,9	50,7 × 38,0	1:150	1:30
2,0	62	80	98,2 × 65,3	92,1 × 46,1	1:280	1:57
2,4	75	97	117,8 × 78,3	110,6 × 83,0	1:330	1:68
3,0	94	122	147,3 × 97,9	138,2 × 103,7	1:410	1:85
5,0	156	202	245,6 × 163,2	230,4 × 172,8	1:690	1:140
10,0	312	405	491,2 × 326,4	460,8 × 345,6	1:1380	1:280
20,0	625	811	982,4 × 652,8	921,6 × 691,2	1:2750	1:570
24,0	750	973	1178,9 × 783,4	1105,9 × 829,4	1:3310	1:680

Šaltinis: sudaryta autorių
 Source: compiled by authors

Aerokartografinio produkto (aerofototopografinės nuotraukos) apytikris tikslumas siejamas su mastelio tikslumu – 0,1 mm×M. Skaitmeninio aerokartografavimo produktų tikslumui įvertinti apibendrintai priimama, kad aerokartografinės produkcijos (planimetrinių koordinačių ir aukščių) tikslumas *GSD* padauginus iš dviejų.

Išvados

1. Atsižvelgiant į fotografinių vaizdų savybes bei UAV skrydžių realizavimo sąlygas, vietovės aerokartografavimo darbų specifikacijoje pateikiami šie pagrindiniai duomenys bei projektiniai aerofotografavimo parametrai: techninių priemonių (skraidyklės ir fotokameros) savybės, fotografinio vaizdo elemento dydis vietovėje, aerofotonuotraukų sanklotos dydis, skrydžio aukštis, aerofotografavimo bazė ir laiko tarpas tarp ekspozicijų, aerofotonuotraukos skiriamoji geba ir kadro dydis (fotografijoje ir vietovėje), aerokartografinių produktų tikslumas.
2. Eksperimentinių objektų (linijinio ir plotinio) fotografiniai vaizdai, gauti fotografuojant vietovę iš skirtingo aukščio ir skirtingomis fotokameromis, apibūdinami šiais svarbiausiais skrydžių realizavimo parametrais: fotokameros jutiklio pikselio dydžiu, aerofotonuotraukos kadro dydžiu, skiriamąja geba bei pikselio dydžiu fotonuotraukoje ir vietovėje (žr. 2 ir 3 lenteles).
3. Išanalizavus fotografinio vaizdo pikselio dydžio vietovėje (*GSD*) sąsajas su skrydžio aukščiui, kadro dydžiu ir aerofotonuotraukos masteliu galima teigti, kad didžiausią įtaką fotonuotraukos masteliui daro fotonuotraukos skiriamoji geba. Skrydžio aukštis aerofotografuojant fotokamera *Zenmuse X5* yra 1,3 kartus didesnis nei su fotokamera *Nex-5T* dėl skirtingų jutiklio pikselio dydžio (3,8 ir 4,8 μm). Aerofotnuotraukų mastelis skiriasi apie 5 kartus dėl skirtingos fotografinių vaizdų skiriamosios gebos (*Nex-5T* – 350 dpi (0,0726 mm)), *Zenmuse X5* – 72 dpi (0,3528 mm)) (žr. 4 lentelę).
4. Atsižvelgiant į apytikrį tikslumo įvertinimą pagal mastelio tikslumą ir pagal deklaruojamą skaitmeninių aerokartografinių produktų tikslumo apibendrintą vertinimo kriterijų (2×*GSD*), aerofotografavimo fotokamera *Nex-5T* rezultatai atitinka tikslumo reikalavimus, o fotokamera *Zenmuse X5* yra pertekliniai, dėl fotografinių vaizdų skiriamosios gebos dydžio – 72 dpi.
5. Aerofotografuojant teritorijas iš neaukštai skrendančios priemonės, vietovių kartografavimo tikslams rekomenduotinas pikselio dydis vietovėje – nuo 5 iki 20 cm.



Literatūra

1. Eisenbeiss, H. (2009). *UAV photogrammetry*. Dissertation. Federal Institute of Technology (ETH), Institute of Geodesy and Photogrammetry. Zurich, Switzerland, Mitteilungen. 235 p.
2. Haala, N.; Cramer, M.; Weimer, F.; Trittler, M. (2011). Performance Test on UAV-Based Photogrammetric Data Collection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 38-1/C22: 7-12.
3. Konecny, G. (2003). *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic information system*. Taylor and Francis. 248 p.
4. Linder, W. 2009. *Digital Photogrammetry. A practical Course*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 33- 73, 121-131 p.
5. *Manual of Photogrammetry* (Edited by J. Chris McGlone). (2004). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Maryland, USA. 959-963 p.
6. MATRICE 600 PRO. Available from Internet: <https://www.dji.com/lt/matrice600-pro> (April 20, 2021).
7. Neitzel, F.; Klonowski, J. 2011. Mobile Mapping with Low-Cost UAV System, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38-1/C22: 1–6.
8. Pix4D Support. Available from Internet: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf-#gsc.tab=0>. (February 19, 2021).
9. Rock, G.; Ries, J. B.; Udelhoven, T. (2011). Sensitivity Analysis of UAV-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 38-1/C22: 1-5.
10. Rudinskas, D. (2011). Bepiločių orlaivių skrydžio parametrų matavimų duomenų perdavimo saugos metodikos sukūrimas. Daktaro disertacija. VGTU. Vilnius: Technika. 85 p.
11. Ruzgienė, B. (2008). *Fotogrametrija*. VGTU. Vilnius: Technika. 203 p.
12. Ruzgienė, B.; Berteška, T.; Gečytė, S.; Jakubauskienė, E.; Aksamitauskas, V., Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*. Oxford: Elsevier Ltd. Vol. 73, p. 619-627.
13. Ruzgienė, B.; Jankauskienė, D.; Kuklys, I.; Kuklienė, L.; Danielienė, J. (2020). KVK studies: scanning and 3D modelling using remote sensing and UAV technologies. *International Journal of Grid and Distributed Computing*. Science and Engineering Research Support Society. Vol. 13, no. 2, p. 361-365.
14. Ruzgienė, B.; Kuklienė L.; Dainora Jankauskienė, D.; Kuklys, I.; Vrubliauskienė, R. (2017). Fotogrametrijos reikalavimai, keliami aerokartografavimui: UAV-Fotogrametrija // *Inžinerinės ir edukacinės technologijos = Engineering and educational technologies*. Kaunas: Kauno technikos kolegija. Nr. 2, p. 21-28.
15. Trimble UX5 Unmanned Aircraft System. Available from Internet: https://www.trimble.com/Industries/Mining/Aerial_Surveying.aspx. (April 20, 2021).
16. Trimble UX5 Aerial Imaging Solution: Camera specification. Available from Internet: https://help.trimblegeospatial.com/TALegacy/Help%20Files/AI_2_2_3/en/UX5%20Aerial%20Imaging%20User%20Guide.pdf (May 15, 2021).
17. Zenmuse X5. Aerial Imaging Evolved. Available from Internet <https://www.dji.com/lt/zenmuse-x5/info>. (May 26, 2021).
18. Watts, A. C.; Ambrosia, V. G.; Hinkey E. A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific. Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing* 4(6). 1671-1692 p.

Technical Specification for Aerial Photography from an Unmanned Aerial Vehicle and Properties of Photographic Images

(Received in March, 2022; Accepted in March, 2022; Available Online from 6th of May, 2022)

Summary

The use of unmanned aerial vehicles with integrated imaging and GPNS equipment for mapping of various objects is rapidly gaining popularity. The quality of cartographic products obtained by photogrammetric method depends on the properly prepared technical specification of aerial mapping works, the conditions of realization of the aerial photography project and the efficiency of the performed photogrammetric processes.

The specification of aerial mapping works of experimental objects (linear and area) provides the following basic data and design parameters of aerial photography: parameters of technical means (unmanned aerial vehicles and cameras), flight speed, flight altitude. The main characteristics of cameras integrated in an unmanned aerial vehicle are the focal length, the resolution of the camera (number of pixels - frame format), the pixel size of the sensor, the size of



the sensor. The study interfaces the photographic pixel area (GSD) with flight altitude, frame size, and aerial photography scale. The analysis shows that the flight altitude of the Zenmuse X5 with aerial photography is 1.3 times higher than with the Nex-5T due to the different sensor pixel sizes (3.8 and 4.8 μm). Aerial photos are scaled about 5 times due to the different resolution of the photographic images (Nex-5T - 350 dpi (0.0726 mm)), Zenmuse X5 - 72 dpi (0.3558 mm).

The Nex-5T aerial photography camera meets the accuracy requirements and the Zenmuse X5 is redundant with a resolution of 72 dpi due to the approximate accuracy rating based on the zoom accuracy and the declared generalized accuracy criterion for digital aerial cartographic products ($2 \times \text{GSD}$).

When aerial photography of areas is from a low-flying vehicle, a pixel size of 5 to 20 cm in the area is recommended for terrain mapping purposes.

