



Aspekty aerotriangulacji zdjęć cyfrowych pozyskanych kamerą niometryczną zamontowaną na pokładzie bezzałogowego statku latającego

DAMIAN WIERZBICKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Instytut Geodezji, Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, dwierzbicki@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przeanalizowano możliwości pozyskiwania zdjęć za pomocą amatorskiej, niometrycznej kamery zamontowanej na pokładzie miniaturowego bezzałogowego statku latającego. W ramach prac badawczych przeprowadzono analizę dokładności aerotriangulacji z uwzględnieniem wpływu dodatkowych parametrów na wzrost dokładności wyrównania dla dwóch testowych bloków zdjęć o nieregularnej geometrii. Do oceny dokładności pierwszego i drugiego bloku wykorzystano odpowiednio 17 i 13 niezależnych punktów kontrolnych. Fotopunktami i punktami kontrolnymi były szczegóły terenowe. W toku badań przeprowadzono sześć niezależnych wyrównań każdego z bloków. Pierwsze wyrównanie nie uwzględniało wpływu dodatkowych parametrów. Natomiast pozostałe wyrównania uwzględniały kolejno modele dodatkowych parametrów opracowane przez Bauera, Jacobsena, Ebnera, Browna oraz Model Dystorsji Obiektywu. Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu dodatkowych parametrów na dokładności aerotriangulacji stwierdzono, że poprawne wyrównanie testowanych bloków wymaga zastosowania większej liczby fotopunktów niż w przypadku opracowania tradycyjnych zdjęć lotniczych. Ponadto, uwzględnienie w wyrównaniu dodatkowych parametrów może w zauważalny sposób zwiększyć dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów. W stosunku do wyników wyrównania przeprowadzonego bez uwzględniania parametrów dodatkowych, wyrównanie z zastosowaniem Modelu Dystorsji Obiektywu pozwoliło na podwyższenie dokładności aerotriangulacji o 56% i 31% odpowiednio dla pierwszego i drugiego bloku. Wykorzystanie Modelu Ortogonalnego Ebnera w pierwszym przypadku nieznacznie podniosło dokładność wyrównania (o 9%), natomiast dla bloku drugiego zaobserwowano zmniejszenie dokładności aerotriangulacji (o 2%). Jest to spowodowane faktem, że model ten pierwotnie przeznaczony był dla opracowań zdjęć pozyskanych kamerami analogowymi.

Słowa kluczowe: fotogrametria lotnicza, aerotriangulacja, bezzałogowy statek latający, analiza dokładności, dodatkowe parametry, wyrównanie

1. Wstęp

Od kilkunastu lat nieustannie rośnie zainteresowanie wykorzystaniem bezałogowych statków latających (BSL) w zastosowaniach fotogrametrycznych i teledetekcyjnych. Problematyką tą zajęła się międzykomisyjna grupa robocza ICWG I/V (ang. *Unmanned Vehicle Systems (UVS) for Mapping and Monitoring Applications*) Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji [9]. Miniaturowe bezałogowe statki latające mogą stanowić tanią i efektywną alternatywę dla zdjęć pozyskiwanych metodami klasycznej fotogrametrii lotniczej, ale także w realizacji badań teledetekcyjnych z wykorzystaniem miniaturowych kamer wielospektralnych [3, 4, 8].

Prowadzenie badań, związanych z wykorzystaniem bezałogowych statków latających w poruszanych zagadnieniach, niewątpliwie pozwoli dokonać oceny celowości i zasadności wykorzystania tego typu środka w odniesieniu do jakości pozyskiwanych danych w kontekście ich późniejszego opracowania pod względem fotogrametrycznym. W tym przypadku pod pojęciem jakości zdjęć należy rozumieć możliwe do uzyskania niewielkie kąty nachylenia zdjęć, ich jednolitą skalę oraz równomierne wzajemne pokrycie. Uzyskanie wyżej wymienionych parametrów zdjęć jest w praktyce stosunkowo problematyczne. Spowodowane jest trudnością w zapewnieniu prawidłowej stabilności lotu w tego rodzaju platformach. Niska stabilność lotu objawia się najczęściej nagłymi zmianami kierunku lub wysokości — przyczyną jest m.in. oddziaływanie wiatru. Tego typu problemy prowadzą do otrzymania bloków zdjęciowych o niskiej jakości geometrii.

Jednym z aspektów prowadzonych badań jest określenie wpływu dodatkowych parametrów na dokładność wyrównania. Przedstawione poniżej wyniki badań pozwolą ocenić dokładność aerotriangulacji, jaką można uzyskać, pozyskując dane z pokładu miniaturowego bezałogowego statku latającego pozbawionego systemu GPS/INS.

2. Pozyskanie i opracowanie danych

2.1. Charakterystyka bezałogowego statku latającego

Nalot wykonano przy pomocy bezałogowego statku latającego. Wykorzystana platforma stanowi typ wielowirnikowca i można ją zakwalifikować do kategorii mini BSL [2]. Pomimo że na rynku obecnych jest wiele rozwiązań komercyjnych oraz *open source* platform BSL, to w praktyce niewiele z nich dedykowanych jest do zastosowań fotogrametrycznych.

Wykorzystany w badaniach mikrokoopter charakteryzuje się budową modułową, dzięki czemu możliwe jest zamontowanie na nim dodatkowego wyposażenia w postaci układu GPS/INS oraz dowolnej kamery pod warunkiem, że jej waga nie będzie

przekraczała 500 g. Budowę systemu można podzielić zasadniczo na cztery moduły. Pierwszy z nich to moduł komunikacji radiowej składający się z dwóch niezależnych sterowników radiowych, a także radiomodemu zamontowanego na pokładzie platformy, który jest odpowiedzialny za odbiór sygnałów. Dzięki temu możliwe jest sterowanie mikrośmigłowcem. Drugi sterownik radiowy służy do wyzwolenia migawki w kamerze. Kolejny komponent bezzałogowej platformy reprezentuje moduły elektroniki odpowiedzialne za kontrolę sześciu elektrycznych silników wirnikowych oraz za monitorowanie poziomu naładowania akumulatorów zasilających. Ze względu na ograniczoną nośność BSL zamontowany akumulator pozwala na wykonanie lotu tylko 15-minutowego. Moduł kontroli lotu i awioniki związany jest z mikroprocesorem zamontowanym w centralnej części maszyny. Stanowi on kluczowy element odpowiedzialny za zapewnienie poprawnej fizyki lotu. Platforma została wyposażona w kompaktową kamerę Panasonic DMC GF-2, zamontowaną na metalowym podwieszeniu. W tabeli 1 zamieszczono podstawowe dane techniczne BSL wykorzystanego do pozyskania danych obrazowych.

TABELA 1
Podstawowe dane techniczne BSL

Masa startowa	do 2 kg
Rozpiętość	0,5 m
Długość	0,5 m
Prędkość lotu	do 5 m/s
Pułap praktyczny	do 200 m
Zasięg lotu	do 500 m
Czas lotu	do 15 min
Udźwig	0,5 kg



Rys. 1. Wykorzystany w badaniach bezzałogowy statek latający typu heksakopter

2.2. Kalibracja niemetrycznej kamery cyfrowej

W celu wyznaczenia elementów orientacji wewnętrznej konieczne było wykonanie kalibracji niemetrycznej kamery PANASONIC DMC-GF2, zamontowanej na pokładzie bezzałogowego statku latającego. Parametry ekspozycji zdjęć zostały zamieszczone w tabeli 2. Ten typ aparatu dzięki swojej niewielkiej wadze (265 g), wymiennej optyce i stosunkowo prostej budowie zewnętrznej stanowił jedno z najlepszych rozwiązań do pozyskiwania zobrazowań z BSL.

Arkusz kalibracyjny o wymiarze 841×594 mm składał się łącznie z 145 punktów, w tym 5 znaków standardowych, oznaczonych na teście kwadratami. Zdjęcia testu wykonano z takimi samymi ustawieniami ekspozycji, jakie były ustawione w trakcie lotu.

Kalibrację aparatu zrobiono na podstawie dziesięciu serii zdjęć testu kalibracyjnego, a otrzymane wyniki uśredniono (tab. 3). Kalibrację oraz niezbędne obliczenia wykonano za pomocą oprogramowania *Image Master Calib*.

TABELA 2
Parametry ekspozycji zdjęć

Wartość przysłony	$f/6.3$
Czas ekspozycji	1/320 s
Czułość ISO	ISO-125

TABELA 3
Wyniki kalibracji kamery PANASONIC DMC-GF2

Parametr	Oznaczenie	Wartość	σ
Ogniskowa obiektywu	f [mm]	13,990	$\pm 0,017$
Położenie punktu głównego	x_0 [mm]	8,378	$\pm 0,087$
	y_0 [mm]	6,241	$\pm 0,120$
Dystorsja radialna	K1	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1,1 \cdot 10^{-5}$
	K2	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$\pm 6,4 \cdot 10^{-8}$
Dystorsja tangencjalna	P1	$-2,0 \cdot 10^{-5}$	$\pm 3,6 \cdot 10^{-6}$
	P2	$-5,4 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1,1 \cdot 10^{-6}$

2.3. Pozyskanie danych obrazowych

2.3.1. Wybór rejonu fotografowania

Tereny Bemowa zaliczane są do terenów płaskich. Dlatego, w celu uzyskania odpowiednich deniwelacji niezbędnych do kompleksowego określenia dokładności opracowania, nalot wykonano nad obszarem boiska położonego na terenie ośrodka sportowego Wojskowej Akademii Technicznej. Na obszarze tym istotnym obiektem był wał ziemny o wysokości około czterech metrów położony za trybuną.

Teren objęty zdjęciami obejmował powierzchnię ok. 5800 m² i miał kształt prostokąta o wymiarach 145 × 40 m. Wysokość trybuny wynosiła 10% wysokości fotografowania, co można uznać za wartość wystarczającą do określenia wpływu deniwelacji na dokładność opracowania.



Rys. 2. Obszar nalotu podlegający opracowaniu

2.3.2. Plan nalotu

Opracowanie projektu nalotu jest podstawą do wykonania zdjęć lotniczych. Dostarcza ono szczegółowych informacji na temat samego nalotu. W tabeli 4 zawarto podstawowe parametry projektowanego nalotu.

TABELA 4

Podstawowe parametry projektowanego nalotu

Projektowana skala zdjęć	1 : 3000
Ogniskowa obiektywu	14 mm
Rozmiar piksela	4,2 × 4,2 μm
Rozdzielczość	4 000 × 3 000 pikseli
Projektowana wysokość nalotu	40 m
Projektowane pokrycie podłużne	$p = 70\%$
Projektowane pokrycie poprzeczne	$q = 40\%$
Odstęp między osiami szeregów	$B_p = 15,12 \text{ m}$
Długość bazy podłużnej	$B_q = 11,34 \text{ m}$

2.3.3. Realizacja nalotu

Realizacja nalotu oraz wyzwalanie migawki kamery były realizowane manualnie przez operatora. Dlatego pozyskane zdjęcia charakteryzowały się stosunkowo dużymi kątami nachyleń oraz nierównomiernym pokryciem podłużnym i poprzecznym.

Ponadto niektóre zdjęcia charakteryzowały się zauważalnym rozmyciem, spowodowanym nagłymi podmuchami wiatru oraz zmianą kierunku lotu. Ze wszystkich pozyskanych zobrazowań wybrano 37 i z nich utworzono dwa bloki testowe.



Rys. 3. Przykładowe, wybrane do opracowania zdjęcie pozyskane kamerą Panasonic DMC-GF2

2.4. Pomiar osnowy fotogrametrycznej

Ze względu na fakt, iż nalot odbywał się na wysokości około czterdziestu metrów, na opracowywanym obszarze konieczne było zaprojektowanie dużej liczby równomiernie rozmieszczonych fotopunktów, celem wykonania prawidłowej orientacji zdjęć o zróżnicowanej skali, wchodzących w skład opracowywanych bloków.

Na obszarze opracowania zaprojektowano i pomierzono 101 fotopunktów. W projekcie zastosowano osnowę sygnalizowaną. Projektując lokalizację poszczególnych punktów, zwracano szczególną uwagę na to, aby wybrane szczegóły w terenie dobrze kontrastowały z otoczeniem i były jednoznacznie identyfikowalne zarówno na zdjęciu, jak i w terenie. Lokalizacja fotopunktów obejmowała przeważnie narożniki chodników, środki geometryczne studzienek kanalizacyjnych, czy przerwy między krawężnikami.

Wszystkie punkty zostały pomierzone z wykorzystaniem techniki pomiaru kinematycznego *GPS RTK*. Przy wyborze tej techniki pomiaru kierowano się przede wszystkim szybkością i łatwością pomiaru. Ponadto należało mieć na uwadze to, że pomiar tak dużej liczby fotopunktów przy zastosowaniu klasycznych metod pomiarowych byłby dużo bardziej skomplikowany i czasochłonny. Współrzędne X, Y, Z fotopunktów zostały wyznaczone z błędem średnim $\pm 0,05$ m. Przy oczekiwanej dokładności opracowania 0,2 m dokładność wyznaczenia współrzędnych można uznać za wystarczającą.

3. Metodyka orientacji bloków

W pierwszej kolejności spośród kilkuset zdjęć wyselekcjonowano dwie grupy. Obrazy wchodzące w skład każdej grupy charakteryzowały się zbliżonymi parametrami. Posiadały one w miarę możliwości zbliżoną skalę, kąty nachylenia oraz pokrycie podłużne i poprzeczne. Z tak wybranych grup zostały utworzone dwa bloki testowe. Pierwszy blok testowy składał się z dwóch szeregów, drugi był blokiem jednoszeregowym. Dla każdego bloku zakładano niezależny projekt roboczy w środowisku *Leica Photogrammetry Suite*.

3.1. Aerotriangulacja z uwzględnieniem dodatkowych parametrów

W projekcie roboczym po zdefiniowaniu parametrów początkowych wyrównania, takich jak: elementy orientacji wewnętrznej, układ odniesienia oraz wartości dokładności pomiaru fotopunktów, przystąpiono do zasadniczego opracowania poszczególnych bloków. Dokonano manualnego pomiaru na zdjęciach fotopunktów, punktów kontrolnych oraz półautomatycznego pomiaru punktów wiążących. W celu zapewnienia niezawodności sieci, szczególną uwagę zwracano na poprawne

zaprojektowanie i pomierzenie punktów wiążących w każdym punkcie Grubera. Przed przystąpieniem do procesu wyrównania zdefiniowano jego parametry z uwzględnieniem poszczególnych modeli dodatkowych parametrów.

Dodatkowe parametry stanowią rozszerzenie modelu matematycznego, opisującego zależności pomiędzy przestrzenią obrazową a przestrzenią przedmiotową. Wartości współczynników dodatkowych parametrów to niewiadome, które wyznaczane są jako wartości dodatkowe w procesie wyrównania [10]. Dodatkowe parametry pozwalają niwelować wpływ błędów systematycznych, będących wynikiem dystorsji obiektywu, nieprawidłowej geometrii bloku zdjęć, a także wpływu refrakcji atmosferycznej na jakość obrazów. Przy czym, w tym przypadku, wpływ refrakcji atmosferycznej na dokładność wyrównania można uznać za zanedbywalny.

Podczas prowadzonych analiz uwzględnionych zostało pięć modeli dodatkowych parametrów [1, 5, 7]:

Prosty Model Bauera (3)

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x(r^2 - r_0^2) + a_2 x \\ \Delta y &= a_1 y(r^2 - r_0^2) - a_2 y + a_3 x;\end{aligned}\tag{1}$$

Prosty Model Jacobsena (4)

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x(r^2 - r_0^2) + a_2 x + a_3 y \\ \Delta y &= a_1 y(r^2 - r_0^2) - a_2 y + a_3 x + a_4 x^2;\end{aligned}\tag{2}$$

Model Ortogonalny Ebnera (12)

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x + a_2 y - a_3 \left(2x^2 - \frac{4b^2}{3} \right) + a_4 xy + a_5 \left(y^2 - \frac{2b^2}{3} \right) + a_7 x \left(y^2 - \frac{2b^2}{3} \right) \\ &+ a_9 y \left(x^2 - \frac{2b^2}{3} \right) + a_{11} \left(x^2 - \frac{2b^2}{3} \right) \left(y^2 - \frac{2b^2}{3} \right) \\ \Delta y &= -a_1 y + a_2 x + a_3 xy - a_4 \left(2y^2 - \frac{4b^2}{3} \right) + a_6 \left(x^2 - \frac{2b^2}{3} \right) + a_8 y \left(x^2 - \frac{2b^2}{3} \right) \\ &+ a_{10} x \left(y^2 - \frac{2b^2}{3} \right) + a_{12} \left(x^2 - \frac{2b^2}{3} \right) \left(y^2 - \frac{2b^2}{3} \right);\end{aligned}\tag{3}$$

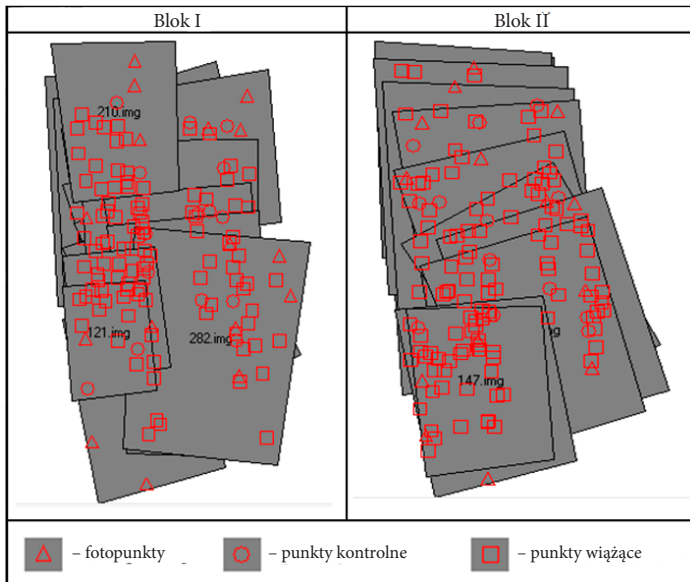
Fizyczny Model Browna (14)

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5x^2y + a_6xy^2 + a_7x^2y^2 \\
 &+ a_{13}\frac{x}{f}x^2y^2 + a_{14}x(x^2 + y^2) \\
 \Delta y &= a_8xy + a_9x^2 + a_{10}x^2y + a_{11}xy^2 + a_{12}x^2y^2 \\
 &+ a_{13}\frac{x}{f}x^2y^2 + a_{14}y(x^2 + y^2);
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Model Dystorsji Obiektywu (2)

$$\Delta x = k_1xr^2 + k_2xr^4, \quad \Delta y = k_1yr^2 + k_2yr^4,
 \tag{5}$$

gdzie: x, y — współrzędne obrazowe;
 r — odległość radialna;
 r_0 — odległość pomiędzy środkiem zdjęcia a najdalej położonym fotopunktem;
 $\Delta x, \Delta y$ — przyrosty zniekształceń w kierunku x i y w płaszczyźnie obrazowej;
 $a_1 \dots a_n$ — wartości parametrów dodatkowych;
 b — średnia wartość bazy pomiędzy zdjęciami;
 f — ogniskowa;
 $k_1 \dots k_2$ — wartości parametrów dodatkowych.



Rys. 4. Analizowane bloki testowe

4. Analiza wyników dokładności aerotriangulacji

Analizę dokładności aerotriangulacji z uwzględnieniem dodatkowych parametrów przeprowadzono dla obu bloków testowych. Pierwszy blok składał się z 23 zdjęć i charakteryzował się wyjątkowo nieregularnym kształtem. Na zdjęciach pomierzono łącznie 18 fotopunktów, 17 punktów kontrolnych oraz 100 punktów wiążących. Drugi blok składał się z 14 zdjęć, na których pomierzono 14 fotopunktów, 13 punktów kontrolnych i 116 punktów wiążących. W obu przypadkach niezależna liczba punktów kontrolnych była wystarczająca do oceny rezultatów aerotriangulacji w poszczególnych wariantach.

TABELA 5
Zestawienie wyników wyrównania z uwzględnieniem dodatkowych parametrów — blok I

	Wyrównanie bez dodatkowych parametrów	Prosty Model Bauera (3)	Prosty Model Jacobsena (4)	Model Ortogonalny Ebnera (12)	Fizyczny Model Browna (14)	Model Dystorsji Obiektywu (2)	
Liczba zdjęć	23						
Liczba fotopunktów	18						
Liczba punktów kontrolnych	17						
Liczba punktów wiążących	100						
σ_o [μm]	5,0	4,2	4,2	4,9	4,2	4,2	
σ_o [pix]	1,2	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	
Wartość odchylenia standardowego apriori fotopunktów i punktów kontrolnych [m]	dla współrzędnych X		dla współrzędnych Y		dla współrzędnych Z		
	0,05		0,05		0,05		
RMS fotopunktów [m]	X	0,12	0,04	0,04	0,09	0,04	0,03
	Y	0,21	0,05	0,05	0,19	0,04	0,05
	Z	0,22	0,04	0,04	0,21	0,04	0,04
RMS punktów kontrolnych [m]	X	0,08	0,03	0,03	0,06	0,04	0,02
	Y	0,12	0,04	0,03	0,10	0,04	0,03
	Z	0,35	0,05	0,05	0,33	0,06	0,05
MX_0 [m]	0,15	0,13	0,13	0,15	0,13	0,13	
MY_0 [m]	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	
MZ_0 [m]	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	

cd. tabeli 5

$M\omega$ [°]	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15
$M\varphi$ [°]	0,22	0,19	0,19	0,22	0,19	0,19
$M\kappa$ [°]	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07

W wyniku sześciu niezależnych wyrównań pierwszego bloku błąd średni typowego spostrzeżenia σ_0 ukształtował się w granicach 4,2-5,0 μm . Wyniki wyrównań z modelami parametrów dodatkowych Bauera, Jacobsena oraz Browna ukształtowały się na zbliżonym poziomie. Ich uwzględnienie w kolejnych wyrównaniach w zauważalny sposób (średnio o 24%) podniosło dokładność aerotriangulacji w stosunku do wyrównania bez uwzględniania parametrów dodatkowych. Wspomniane modele parametrów dodatkowych dedykowane były głównie dla kompensacji większości liniowych i nieliniowych zniekształceń powstałych na zdjęciach lotniczych. Ich zadaniem była również kompensacja wpływu dystorsji obiektywu na zniekształcenia powstałe na zdjęciach. W tradycyjnym podejściu do aerotriangulacji celem wykorzystania Modelu Ortogonalnego Ebnera była kompensacja błędów systematycznych powodowanych przez deformacje filmu światłoczułego, a także zniekształceń obrazu powstałych na skutek wpływu dystorsji obiektywu. Wyniki wyrównania z wykorzystaniem tego modelu poprawiły tylko nieznacznie (średnio o 9%) dokładność wyrównania.

Dla wyrównania, w którym wykorzystano Model Dystorsji Obiektywu, wartości błędów średniokwadratowych zmniejszyły się czterokrotnie w stosunku do wyrównania nieuwzględniającego wpływu parametrów dodatkowych. Otrzymane wyniki potwierdzają efektywność tego modelu w podniesieniu dokładności aerotriangulacji zobrażeń pozyskanych kamerą cyfrową.

TABELA 6

Zestawienie procentowej zmiany dokładności wyników wyrównania z uwzględnieniem dodatkowych parametrów — blok I

Nazwa Modelu	Wzrost dokładności [%]								
	σ_0	Fotopunkty			Punkty kontrolne			Środki rzutów	Elementy kątowe
		RMS X	RMS Y	RMS Z	RMS X	RMS Y	RMS Z	MX_0, MY_0, MZ_0	$M\omega, M\varphi, M\kappa$
Model Bauera	16	69	77	82	62	68	86	11	9
Model Jacobsena	16	69	79	82	60	70	86	10	9
Model Ebnera	3	23	10	3	23	12	6	1	0
Model Browna	17	68	80	84	54	68	84	8	7
Model Dystorsji Obiektywu	16	76	78	80	70	75	87	9	10

Przedstawione w powyższej tabeli wyniki stanowią względną procentową zmianę dokładności poszczególnych wyrównań z wykorzystaniem dodatkowych parametrów w stosunku do wyników wyrównania nieuwzględniającego ich wpływu.

Rozważając podniesienie dokładności wyrównania, pod uwagę była brana ocena wartości błędu σ_0 , wyznaczenia współrzędnych terenowych dla fotopunktów i niezależnych punktów kontrolnych, a także elementy orientacji zewnętrznej. W tym zestawieniu największy wzrost dokładności nastąpił przy uwzględnieniu Modelu Dystorsji Obiektywu, gdzie średni wzrost dokładności ukształtował się na poziomie aż 56%. Najmniej korzystne rezultaty uzyskano stosując Model Ortogonalny Ebnera. W tym przypadku średni wzrost dokładności wyniósł zaledwie 9%.

TABELA 7
Zestawienie wyników wyrównania z uwzględnieniem dodatkowych parametrów — blok II

	Wyrównanie bez dodatkowych parametrów	Prosty Model Bauera (3)	Prosty Model Jacobsena (4)	Model Ortogonalny Ebnera (12)	Fizyczny Model Browna (14)	Model Dystorsji Obiektywu (2)	
Liczba zdjęć	14						
Liczba fotopunktów	14						
Liczba punktów kontrolnych	13						
Liczba punktów wiążących	116						
σ_0 [μm]	3,6	3,0	3,0	3,5	2,9	2,9	
σ_0 [pix]	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	
Wartość odchylenia standardowego apriori fotopunktów i punktów kontrolnych [m]	dla współrzędnych X		dla współrzędnych Y		dla współrzędnych Z		
	0,05		0,05		0,05		
RMS fotopunktów [m]	X	0,07	0,06	0,07	0,08	0,06	0,05
	Y	0,11	0,06	0,06	0,10	0,06	0,06
	Z	0,19	0,08	0,08	0,18	0,07	0,08
RMS punktów kontrolnych [m]	X	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03
	Y	0,07	0,06	0,07	0,08	0,05	0,06
	Z	0,31	0,13	0,12	0,31	0,11	0,13
MX_0 [m]	0,22	0,19	0,19	0,23	0,19	0,18	
MY_0 [m]	0,21	0,18	0,18	0,22	0,19	0,18	
MZ_0 [m]	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	

cd. tabeli 7

$M\omega$ [°]	0,33	0,28	0,28	0,34	0,29	0,28
$M\varphi$ [°]	0,43	0,37	0,37	0,45	0,38	0,36
$M\kappa$ [°]	0,11	0,10	0,10	0,12	0,10	0,09

Na podstawie analizy powyższej tabeli można zauważyć, że uzyskane niskie wartości błędu σ_0 są niewątpliwie odzwierciedleniem wykorzystania dość dużej liczby punktów wiążących, koniecznej do przeprowadzenia orientacji tak nietypowego bloku.

Podobnie jak w przypadku wyrównania pierwszego bloku, wyniki wyrównań z modelami parametrów dodatkowych Bauera, Jacobsena oraz Browna ukształtowały się na zbliżonym poziomie — średnie podniesienie dokładności wyrównania o 24%. W odniesieniu do wyników wyrównania uwzględniającego Model Ortogonalny Ebnera potwierdzają one fakt, że stosowanie tego modelu do poprawy dokładności aerotriangulacji obrazowań pozyskanych kamerą cyfrową z pokładu bezzałogowego statku latającego jest nieuzasadnione. Natomiast wyniki wyrównania z wykorzystaniem Modelu Dystorsji Obiektywu potwierdzają skuteczność uwzględniania parametrów dodatkowych tego typu modelu w procesie aerotriangulacji obrazów pozyskanych kamerą cyfrową.

TABELA 8

Zestawienie procentowej zmiany dokładności wyników wyrównania z uwzględnieniem dodatkowych parametrów — blok II

Nazwa Modelu	Wzrost dokładności [%]								
	σ_0	Fotopunkty			Punkty kontrolne			Środki rzutów	Elementy kątowe
		RMS X	RMS Y	RMS Z	RMS X	RMS Y	RMS Z	MX_0, MY_0, MZ_0	$M\omega, M\varphi, M\kappa$
Model Bauera	16	14	40	57	-11	11	57	12	13
Model Jacobsena	16	3	39	59	-14	5	61	12	13
Model Ebnera	1	-4	1	4	-2	-10	0	-5	-5
Model Browna	17	20	40	61	-9	27	64	9	11
Model Dystorsji Obiektywu	18	28	43	57	23	17	57	15	17

Podobnie jak przy wyrównaniu pierwszego bloku, tak i w tym przypadku największy wzrost dokładności nastąpił przy uwzględnieniu Modelu Dystorsji Obiektywu — średnie podniesienie dokładności ukształtowało się na poziomie 31%. Natomiast w wyniku implementacji Modelu Ortogonalnego Ebnera zaobserwowano

średni spadek dokładności o 2% w stosunku do wyrównania bez uwzględniania dodatkowych parametrów. Otrzymane wyniki obniżenia dokładności aerotriangulacji dla Modelu Ortogonalnego Ebnera spowodowane są tym, że ów model był pierwotnie projektowany dla kompensowania zniekształceń powstających w czasie wykonywania zdjęć kamerami analogowymi [1, 6].

5. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że niska stabilność trajektorii lotu bezzałogowego statku latającego miała negatywny wpływ na geometrię bloków zdjęciowych. Badania pokazały również, że poprawne wyrównanie testowanych bloków wymaga zastosowania większej liczby fotopunktów niż w przypadku opracowania tradycyjnych zdjęć lotniczych. Natomiast uwzględnienie w procesie aerotriangulacji dodatkowych parametrów może w zauważalny sposób zwiększyć dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów.

W odniesieniu do wyników aerotriangulacji przeprowadzonej bez uwzględniania parametrów dodatkowych, wyrównanie z zastosowaniem Modelu Dystorsji Obiektu pozwoliło na podwyższenie dokładności aerotriangulacji odpowiednio o 56% i 31% dla pierwszego i drugiego bloku. Natomiast wykorzystanie Modelu Ortogonalnego Ebnera w pierwszym przypadku nieznacznie podniosło dokładność wyrównania (o 9%), natomiast dla bloku drugiego zaobserwowano zmniejszenie dokładności aerotriangulacji (o 2%).

Obecny stan prac badawczych dotyczących wykorzystania bezzałogowego statku latającego do pozyskiwania geodanych nie spełnia wszystkich założeń dokładnościowych w odniesieniu do zastosowań fotogrametrycznych. Dotyczy to w szczególności zbyt dużych wartości kątowych elementów orientacji zewnętrznej poszczególnych zobrazowań — wartości odchyłań standardowych wyniosły $1,93^\circ$ i $1,29^\circ$ odpowiednio dla kątów ω oraz φ .

W przyszłości planowane jest zamontowanie na bezzałogowym statku latającym stabilizowanego podwieszenia kamery, którego zadaniem będzie kompensacja nagłych nachyleń BSL spowodowanych niestabilnością lotu, a także przeprowadzenie badań nad automatyzacją rejestracji liniowych i kątowych elementów orientacji zewnętrznej.

LITERATURA

- [1] H. EBNER, *Self Calibrating Block Adjustment*, XIII Congress of the International Society for Photogrammetry, Invited Paper of Commission III, Helsinki, Finland, 1976, 1-17.
- [2] H. EISENBEISS, *UAV Photogrammetry*, Dis. ETH No. 18515 ETH, Zurich, 2009.
- [3] J. EVERAERTS, *The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, 2008, 1187-1191.

- [4] G.J. GRENZDÖRFFER, A. ENGEL, B. TEICHERT, *The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 31(B3), 2008, 1207-1214.
- [5] K. JACOBSEN, *Experiences in blunder detection for Aerial Triangulation*, ISPRS 15th Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 1984, 440-447.
- [6] H. KLEIN, *New Results of Bundle Block Adjustment with Additional Parameters*, Schriftenr. des Inst. f. Photogr., Stuttgart, 6, 1979, 13-30.
- [7] Leica Geosystems, *Leica Photogrammetry Suite Project Manager*, Section II: Photogrammetric Theory, Georgia, 2006, 330-333.
- [8] A. LUCIEER, S. ROBINSON, D. TURNER, S. HARWIN, J. KELCEY, *Using a micro-UAV for ultra-high resolution multi-sensor observations of Antarctic moss beds*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIX-B1, 2012 XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 2012.
- [9] P. SAWICKI, *Bezzałogowe Aparaty Latające (UAV) w fotogrametrii i teledetekcji — stan obecny i kierunki rozwoju*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 23, Wrocław, 2012, 365-376.
- [10] J. ZIÖBRO, *Skuteczność dodatkowych parametrów wyrównania w aerotriangulacji*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 16, 2006, 619-626.

D. WIERZBICKI

Some aspects of aerialtriangulation of digital images from a non metric camera taken from an unmanned aerial vehicle

Abstract. This article raises a problem of acquiring digital images from an amateur non metric camera on board an unmanned aerial vehicle. Within the research work on chosen blocks of images, an accuracy analysis of the aerialtriangulation allowing for the influence of additional parameters to increase accuracy adjustment was made. In the course of research, six independent adjustments were made. The first adjustment did not include additional parameters. The other adjustments included five additional parameters' models: Bauer's Simple Model, Jacobsen's Simple Model, Ebner's Orthogonal Model, Brown's Physical Model and Lens Distortion Model, respectively.

The legitimacy of using these additional parameters was determined by the low flight level in the range of tens of meters. The unfavourable dependence in this case is that the accuracy of the coordinates of the control points is much lower than the ground sampling distance on the images. In the course of research, an assumption was made that in the realization of these studies, in many cases the ground sampling distance is equal to or smaller than the accuracy of the coordinates of control points. On the basis of research concerning the accuracy of aerialtriangulation as well as the influence of additional parameters, it was found that correct adjustment of tested blocks required the use of a larger number of control points, when working with traditional airborne images. Moreover, the use of additional parameters adjustment can visibly increase accuracy of the determined point coordinated. Compared to the results of the alignment performed without taking into account additional parameters alignment using lens distortion model allowed us to increase the accuracy of aerial triangulation by 56% and 31% for the first and second block. However, the use of orthogonal model Ebner'a in the first case, slightly increased the accuracy of the alignment (about 9%), while the second block resulted in reduced accuracy of aerial triangulation (about 2%). This is due to the fact that this model was originally designed for studies images acquired analog cameras.

Keywords: aerial photogrammetry, aerialtriangulation, unmanned aerial vehicle, accuracy analysis, additional parameters, adjustment

