

JAN ZIOBRO

## SKUTECZNOŚĆ DODATKOWYCH PARAMETRÓW W AEROTRIANGULACJI

*ZARYS TREŚCI:* Przedstawiono wyniki badań skuteczności dodatkowych parametrów w aerotriangulacji na przykładzie bloków opracowanych w kraju w kilku ostatnich latach. Zamieszczono wyniki badania 20 bloków, podzielonych na cztery grupy, różniące się skalą zdjęć, liczbą zdjęć w bloku oraz występowaniem pomiaru środków rzutów.

Skuteczność dodatkowych parametrów pokazano jako wzrost dokładności uzyskanej dla punktów kontrolnych, w odniesieniu do dokładności otrzymanej w wyrównaniu bez dodatkowych parametrów.

### 1. WSTĘP

Dodatkowe parametry są rozszerzeniem matematycznego modelu rzutu środkowego i mają na celu skompensowanie jego niedoskonałości, gdyż jest on tylko dobrym przybliżeniem zależności między przestrzenią obrazową a przestrzenią przedmiotową. Parametry te są niewiadomymi wyznaczanymi w procesie wyrównania bloku i są przedstawiane jako dodatkowa dystorsja obrazu.

Elementami rzeczywistości nieopisywanymi przez model lub opisywanymi tylko w przybliżeniu, są:

- deformacje filmu lotniczego powstające podczas wykonywania zdjęć i obróbki laboratoryjnej;
- parametry kalibracji laboratoryjnej kamery lotniczej, np. zmiany temperaturowe parametrów;
- refrakcja atmosferyczna, do której korekcji stosowany jest jej standardowy model;

- różnice między układem współrzędnych prostokątnych, w którym sformułowano matematyczny model rzutu środkowego, a krajowymi układami współrzędnych poziomych i pionowych.

Na świecie badania nad dodatkowymi parametrami są prowadzone od lat 60. ubiegłego stulecia i trwają do chwili obecnej. Obecnie prowadzone badania są ściśle związane z metodami bezpośredniego pomiaru orientacji obrazów lotniczych i satelitarnych za pomocą technik GPS i INS.

W programach wyrównania aerotriangulacji wykorzystywane są najczęściej dwa modele dodatkowych parametrów: 12-parametrowy model opracowany przez H. Ebnera oraz 44-parametrowy model opracowany przez A. Gruena.

W badaniach, których wyniki są przedstawione w kolejnych punktach tego artykułu, wykorzystano program wyrównania BINGO, zawierający 24-parametrowy model dodatkowych parametrów oparty na pracach H. Bauera, J. Muellera oraz K. Jacobsena. Model ten został udoskonalony przez E. Krucka, który jest autorem programu wyrównania BINGO.

Pierwszym celem badań było określenie wielkości wzrostu dokładności wyników aerotriangulacji z dodatkowymi parametrami w odniesieniu do aerotriangulacji bez nich. Badania oparto na dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów kontrolnych.

Drugim celem badań było wyjaśnienie dużych niezgodności wzrostu dokładności uzyskanego dla fotopunktów ze wzrostem otrzymanym dla punktów kontrolnych. W kilku blokach niezgodności mają wielkość nawet kilkudziesięciu procent błędu średniego współrzędnej fotopunktu.

## 2. PRZEBIEG BADAŃ

Dla badań wybrano 20 bloków aerotriangulacji posiadających punkty kontrolne. Bloki podzielono na cztery grupy różniące się skalą zdjęć i ich liczbą oraz istnieniem lub nie pomiaru środków rzutów.

Bloki te zostały wyrównane dwukrotnie: bez dodatkowych parametrów i z dodatkowymi parametrami. W trakcie wyrównań eliminowane były odstające obserwacje oraz weryfikowane założenia co do wag obserwacji. W wyrównaniach z dodatkowymi parametrami program eliminował w kolejnych iteracjach, na podstawie testów statystycznych, te parametry, które były silnie skorelowane z pozostałymi lub których wielkość była nieistotna.

Ponizej podano krótką charakterystykę każdej z czterech grup bloków oraz dokładność uzyskaną dla współrzędnych fotopunktów w wyrównaniach bez dodatkowych parametrów – błąd średniokwadratowy współrzędnych fotopunktów, liczony z poprawek wyrównawczych do tych współrzędnych (RMSE). Bloki zamieszczone w trzech pierwszych grupach pochodzą z terenu Polski i zostały opracowane w ciągu kilku ostatnich lat.

Grupa I obejmuje 8 bloków opracowanych dla terenów rzek ze zdjęć w skali 1:26 000. Bloki mają od 50 do 113 zdjęć i bardzo nieregularny kształt – granice bloku mają wiele załamania. Bloki nie mają obserwacji środków rzutów, natomiast mają dużo punktów osnowy. W wyrównaniach bez dodatkowych parametrów RMSE współrzędnych fotopunktów: dla współrzędnych X i Y znajduje się w granicach od 0.34 do 0.70, a dla rzędnej Z znajduje się w granicach 0.11 do 0.42.

W grupie II znajdują się 4 bloki opracowane dla numerycznego modelu terenu i ortofotomap. Skala zdjęć wynosi 1:26 000, a bloki mają regularny kształt – prostokąta lub do niego zbliżony, o małej liczbie załamania granic bloku. Bloki te mają od 384 do 1077 zdjęć i nie mają obserwacji środków rzutów. W wyrównaniach bez dodatkowych parametrów RMSE współrzędnych fotopunktów: dla współrzędnych X i Y znajduje się w granicach od 0.27 do 0.57, a dla rzędnej Z znajduje się w granicach 0.27 do 0.54.

W grupie III jest 5 bloków opracowanych dla numerycznego modelu terenu i ortofotomap. Skala zdjęć wynosi 1:13 000, a bloki mają regularny kształt. Bloki te mają od 888 do 2263 zdjęć i mają obserwacje środków rzutów dla około 90% wszystkich zdjęć w bloku. W wyrównaniach bez dodatkowych parametrów RMSE współrzędnych fotopunktów: dla współrzędnych X i Y znajduje się w granicach od 0.18 do 0.52; dla rzędnej Z znajduje się w granicach 0.16 do 0.45 oraz dla współrzędnych X, Y i Z środków rzutów w granicach od 0.05 do 0.16.

W grupie IV są 3 bloki zdjęć w dużych skalach – od 1:4300 do 1:8200 oraz liczbie zdjęć od 93 do 241. Dwa z tych bloków mają pomiary środków rzutów. Bloki mają nieregularny kształt. Nie podano ogólnej oceny dokładności wyników tych bloków ze względu na różnice w skali zdjęć.

W celu określenia wzrostu dokładności wartości błędów otrzymane z wyrównania z dodatkowymi parametrami znormalizowano poprzez podzielenie ich przez odpowiadający im błąd z wyrównania bez dodatkowych parametrów. Następnie otrzymane wartości odjęto od wartości 1.0 i pomnożono przez 100%.

Wartości te są więc względną, procentową zmianą dokładności wyników wyrównania z dodatkowymi parametrami w odniesieniu do wyników wyrównania bez nich. Wartości dodatnie oznaczają wzrost dokładności, a zdarzające się wartości ujemne oznaczają jej spadek.

Tabela 1. Wyniki uzyskane w I grupie bloków

Lp.	Dane bloku	Wzrost dokładności [%]				
		$\sigma_0$	fotopunkty		punkty kontrolne	
			RMSE X/Y	RMSE Z	RMSE X/Y	RMSE Z
1	2	3	4	5	6	7
1	RZ-3 Odra-Oława, 99 zdjęć, 2 kamery, 71 fotopunktów, 20 punktów kontrolnych	+5	+42	+60	+32	+9
2	RZ-6 Odra-Zabelków, 61 zdjęć, 1 kamera, 74 fotopunkty, 24 punkty kontrolne	+2	+2	+31	+1	+8
3	RZ-7A Odra-Nysa, 113 zdjęć, 2 kamery, 100 fotopunktów, 35 punktów kontrolnych	+2	+22	+31	+20	+11
4	RZ-13 Nowe Brzesko, 61 zdjęć, 2 kamery, 72 fotopunkty, 36 punktów kontrolnych	+2	+4	+7	<b>-9</b>	+3
5	RZ-14 Szczurowa, 100 zdjęć, 1 kamera, 98 fotopunktów, 33 punkty kontrolne	+3	+26	+41	+3	+24
6	RZ-15 Połaniec, 50 zdjęć, 1 kamera, 44 fotopunkty, 20 punktów kontrolnych	+2	+10	+58	+4	+40
7	RZ-87 Szczecin, 62 zdjęcia, 1 kamera, 55 fotopunktów, 20 punktów kontrolnych	+12	+26	-20	+37	<b>-14</b>
8	RZ-90 Malbork, 100 zdjęć, 1 kamera, 63 fotopunkty, 28 punktów kontrolnych	0	+8	+38	<b>-10</b>	+11

Wyniki badań zamieszczono w czterech tablicach odpowiadających grupom bloków. W tablicach podano główne cechy bloków atriangulacji i procentowe zmiany wielkości następujących błędów:

- błędu średniego typowego spostrzeżenia;

- błędu średniokwadratowego współrzędnej fotopunktu, liczonego z poprawek wyrównawczych do tych współrzędnych;
- błędu średniokwadratowego współrzędnej punktu kontrolnego, liczonego z różnic między współrzędną wyznaczoną w aerotriangulacji a współrzędną wyznaczoną pomiarem terenowym;
- błędu średniokwadratowego współrzędnej środka rzutów, liczonego z poprawek wyrównawczych do tych współrzędnych.

W kolumnach 4 i 6 podano średnią wartość wzrostu dokładności dla współrzędnych X i Y. W kolumnie 8 podano średnią wartość wzrostu dokładności dla współrzędnych X, Y i Z środków rzutów (jeżeli istniały w bloku).

Tabela 2. Wyniki uzyskane w II grupie bloków

Lp.	Dane bloku	Wzrost dokładności [%]				
		$\sigma_0$	fotopunkty		punkty kontrolne	
			RMSE X/Y	RMSE Z	RMSE X/Y	RMSE Z
1	2	3	4	5	6	7
1	48-1, 1077 zdjęć, 2 kamery, 466 fotopunktów, 54 punkty kontrolne	+5	+25	+18	+26	+8
2	48-2, 1014 zdjęć, 2 kamery, 260 fotopunktów, 32 punkty kontrolne	+22	+14	+4	+6	+11
3	48-3, 540 zdjęć, 1 kamera, 116 fotopunktów, 20 punktów kontrolnych	+4	+14	+13	+15	+1
4	48-7, 384 zdjęć, 1 kamera, 161 fotopunktów, 34 punkty kontrolne	+4	+6	+13	-1	<b>-16</b>

Tabela 3. Wyniki uzyskane w III grupie bloków

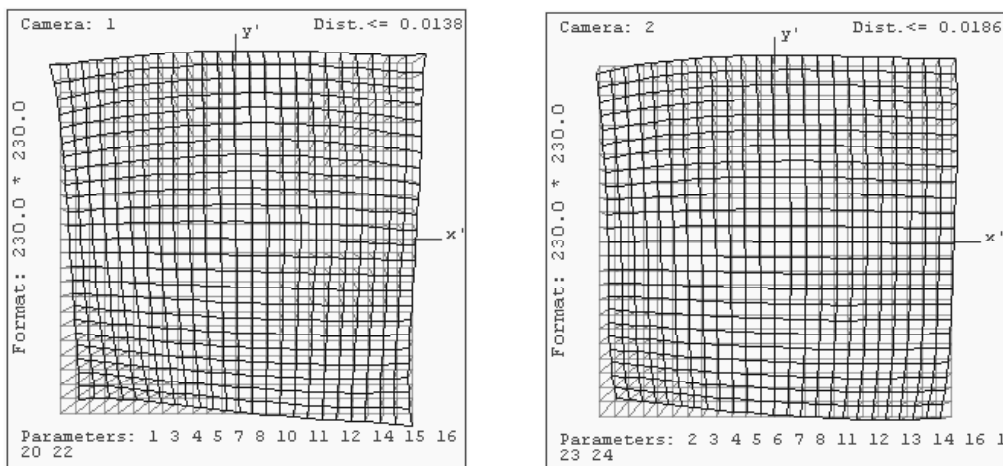
Lp.	Dane bloku	Wzrost dokładności [%]					
		$\sigma_0$	fotopunkty		punkty kontrolne		środki rzutu
			RMSE X/Y	RMSE Z	RMSE X/Y	RMSE Z	RMSE X/Y/Z
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4-68, 2168 zdjęcia, 2 kamery, 232 fotopunkty , 30 punktów kont.	+9	+42	+1	+34	+11	-1
2	5A-68, 888 zdjęć, 1 kamera, 83 fotopunkty, 35 punktów kont.	+12	+49	+1	+52	+5	+2
3	5B-68, 1022 zdjęcia, 2 kamery, 99 fotopunktów, 36 punktów kont.	+6	+22	+32	+34	+24	+3
4	7-68, 2263 zdjęcia, 2 kamery, 151 fotopunktów, 33 punkty kont.	+9	+72	+1	+70	+3	+23
5	8-68, 1970 zdjęć, 2 kamery, 151 fotopunktów , 24 punkty kont.	+4	+28	-6	+19	+5	+3

Tabela 4. Wyniki uzyskane dla IV grupie bloków

Lp.	Dane bloku	Wzrost dokładności [%]					
		$\sigma_0$	fotopunkty		punkty kontrolne		środki rzutu
			RMSE X/Y	RMSE Z	RMSE X/Y	RMSE Z	RMSE X/Y/Z
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Homberg, 1:4 300, 100 zdjęć, 1 kamera, 21 fotopunktów, 21 punktów kontrolnych	+5	+48	+38	+28	+28	+6
2	Lengenfeld, 1:6 400, 241 zdjęć, 1 kamera, 56 punktów , 18 punktów kontrolnych	+5	+46	-1	+25	<b>-8</b>	-2
3	Metz, 1:8 200, 93 zdjęcia, 1 kamera, 41 fotopunktów, 20 punktów kontrolnych	+2	+45	-12	+34	+4	brak pomiaru

### 3. ANALIZA WYNIKÓW

Wpływ dodatkowych parametrów na geometrię zdjęcia można zobaczyć na wykresie utworzonym przez funkcję ADPLO programu BINGO (rys. 1). Dla wszystkich badanych bloków i użytych w nich kamer wpływ ten nie ma charakteru radialnego, ani też nie daje się dostrzec jakiegokolwiek symetrii względem osi zdjęcia. Wpływ ten pokazany na rysunku 1, w jednym z narożników zdjęcia kamery 2, ma wielkość 19 mikrometrów.



Rys.1. Wykresy dystorsji obrazu kamer którymi zrobiono zdjęcia bloku 7-68

Pierwszy cel badań – określenie wielkości wzrostu dokładności wyników aerotriangulacji – przedstawiają wartości w kolumnach o numerach 6 i 7, gdzie podany jest wzrost dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów kontrolnych. Dodatkowo wartości w obu kolumnach oznaczają, że użycie dodatkowych parametrów zwiększyło dokładność wszystkich trzech współrzędnych. Taki właśnie efekt wystąpił w 15 blokach na 20 wszystkich zbadanych.

Największy wzrost dokładności wystąpił w III grupie, którą tworzą bloki o dużej liczbie zdjęć, mające obserwacje środków rzutów. Wzrost dokładności jest szczególnie duży dla współrzędnych poziomych i osiąga nawet 70% (blok 7-68).

W 5 blokach otrzymano spadek dokładności dla współrzędnych poziomych lub współrzędnej pionowej.

Przyczyny spadku dokładności, dotyczące 3 bloków z I grupy i 1 bloku z IV grupy, należy upatrywać w bardzo nieregularnym kształcie tych bloków. Nieregularny kształt bloku (duża liczba załamania granic bloku) powoduje, że znaczna liczba fotopunktów jest obserwowana tylko na dwóch zdjęciach (do 50% punktów osnowy). Należy zauważyć, że spadek dokładności wystąpił mimo dużej liczby fotopunktów w tych blokach.

Spadek dokładności rzędnej Z w bloku 48-7 (z grupy II, gdzie bloki są regularne) wynika z nietypowego charakteru osnowy. Na 161 punktów osnowy w tym bloku, 106 to fotopunkty Z, przy czym 49 fotopunktów jest obserwowanych tylko na dwóch zdjęciach. Ponadto prawie połowa (16 na 34) punktów kontrolnych była obserwowana tylko na dwóch zdjęciach. Świadczy to o pewnej słabości projektu osnowy tego bloku.

Drugi cel badań – wyjaśnienie dużych niezgodności wzrostów dokładności dla fotopunktów i punktów kontrolnych – próbowano osiągnąć poprzez analizę wyników w poszczególnych grupach bloków.

Dla bloków grupy II i III, o regularnych kształtach, niezgodności – różnice wartości podanych w kolumnach 4 i 6 oraz 5 i 7 – nie są większe niż 12% (poza przypadkiem bloku 48-7, który został opisany wcześniej).

Dla bloków grupy I i IV, o nieregularnych kształtach, zdarzają się niezgodności znacznie większe, sięgające nawet 51% (blok RZ-3). Różnice we wzroście są szczególnie widoczne dla współrzędnej Z. Można sądzić, że jest to skutek nieregularnego kształtu bloków i wynikającej z tego niekorzystnej osnowy, o czym wspomniano wcześniej.

#### 4. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie dwóch wniosków:

- zastosowanie dodatkowych parametrów może znacząco zwiększyć dokładność wyznaczenia punktów; wymaga to jednak przestrzegania reguł projektowania i wykonania aerotriangulacji;
- w blokach o nieregularnym kształcie lub nietypowej osnowie użycie dodatkowych parametrów może powodować nawet spadek dokładności, dla takich bloków niezbędna jest weryfikacja zasadności użycia dodatkowych parametrów za pomocą punktów kontrolnych.



## LITERATURA

- Bauer H., Mueller J., 1972, *Height Accuracy of Blocks and Bundle Adjustment with Additional Parameters*, Presented Paper for the 12. International Congress for Photogrammetry, Ottawa.
- Cramer M., 2003, *Integrated GPS / inertial and digital aerial triangulation - recent test results*, in Fritsch (Ed.): "Photogrammetric Week '03", Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 161–172.
- Cramer M., Stallmann D., 2002, *System Calibration for Direct Georeferencing*, International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing IAPRS, Volume XXXIV, Com. III, Part A, pages 79–84, ISPRS Commission III Symposium, Graz, September 2002.
- Greening W.J.T., Schickler W., Thorpe A.J., 2000, *The Proper Use of Directly Observed Orientation Data: Aerial Triangulation Is Not Obsolete*, 2000 ASPRS Annual Conference, Washington, DC, May 22–26, 2000.
- Jacobsen K., 1982, *Programmgesteuerte Auswahl zusätzlicher Parameter*, Bildmessung und Luftbildwesen, 50 (1982) Heft 6.
- Jacobsen K., 2002, *Calibration Aspects in Direct Georeferencing of Frame Imagery*, ISPRS, Commission I, Conference Proceedings, Denver 2002, IntArchPhRS (34), Part1 Com I, pp 82–89.
- Kruck E., 2004, *BINGO 5.1, User's Manual*, Geoinformatics & Photogrammetric Engineering.

*JAN ZIOBRO*

EFFICIENCY OF ADDITIONAL PARAMETERS  
IN AEROTRIANGULATION

S u m m a r y

Author presented in the article results of examinations related to efficiency of applying additional parameters in aerotriangulation, using for this study blocks prepared in Poland during last years. Results of examinations of 20 blocks were included; they were divided into four groups, different in photo scale, number of photographs within block and appearance of the measured projection center.

Efficiency of additional parameters was demonstrated as increase of accuracy obtained for check points, in reference to accuracy achieved in adjustment without additional parameters.

Translation: Zbigniew Bochenek