

niezawodność współrzędnych tłowych w aerotriangulacji

THE RELIABILITY OF PHOTOCOORDINATES IN AERIAL TRIANGULATION

Jan Ziobro

Instytut Geodezji i Kartografii, Zakład Fotogrametrii

SŁOWA KLUCZOWE: aerotriangulacja, projektowanie, współrzędne tłowe, precyzja, niezawodność

STRESZCZENIE: Niezawodność pomiaru jest drugim po precyzji pomiaru składnikiem jego jakości i zbyt niski jej poziom powoduje gorszą wykrywalność i lokalizację błędów grubych oraz nadmiernie duży wpływ błędów poszczególnych pomiarów na wynik. Problem niezawodności jest ściśle związany nie tylko z wykrywaniem błędów grubych w pomiarach, ale również z innymi celami projektowania takimi jak dokładność wyznaczanych niewiadomych i homogeniczność tej dokładności. W aerotriangulacji współrzędne tłowe są najdokładniejszą i najliczniejszą grupą pomiarów – do 95% wszystkich pomiarów, tak, więc ich precyzja i niezawodność w zasadniczy sposób wpływają na dokładność wyników aerotriangulacji i niezawodność innych grup pomiaru w niej występujących. Celem opisywanych badań było określenie precyzji pomiaru współrzędnych tłowych, ich niezawodności oraz dokładności wyników aerotriangulacji uzyskiwanych w krajowej produkcji fotogrametrycznej. Do badań wybrano 25 aerotriangulacji opracowanych w kraju w latach 2002 do 2007, z fotopunktami naturalnymi i pomierzonymi środkami rzutów. Ze względu na to, że aerotriangulacje te wykonano kilkoma różnymi systemami pomiaru i wyrównania, przeprowadzono ponowne opracowanie wyników pomiarów za pomocą programu Bingo, w celu kontroli poprawności wyrównania i ujednoczenia ocen statystycznych. Analizowano niezawodność pomiaru współrzędnej tłowej punktu wiążącego w zależności od liczby pomiarów na zdjęciach, jak również przeciętną w bloku niezawodność współrzędnych tłowych. Wnioski z badań, w zakresie precyzji i niezawodności pomiaru oraz dokładności wyznaczenia punktów wiążących, zostały uwzględnione w projekcie nowego standardu aerotriangulacji.

1. MOTYWACJE I CELE BADAŃ

Motywy dla podjęcia badań były spostrzeżenia poczynione podczas kontroli produkcyjnych aerotriangulacji wykonanych w kraju w latach 2002–2007¹. Zasadnicze spostrzeżenie dotyczyło braku odpowiednich standardów zarówno w wykonawstwie jak i w kontroli jakości produktu. Ogólnym celem badań była ocena projektowania aerotriangulacji wykonanych w tym czasie.

Pierwszym szczegółowym celem badań było określenie niezawodności aerotriangulacji. Niezawodność pomiaru jest drugim po precyzji składnikiem jego jakości i zbyt niski jej

¹ Badania wykonano w ramach projektu nr N526 009 32/1082 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

poziom powoduje gorszą wykrywalność i lokalizację błędów grubych oraz nadmiernie duży wpływ błędu poszczególnych pomiarów na wyniki aerotriangulacji. Porównanie przeciętnego poziomu globalnej niezawodności wewnętrznej grup pomiarów z progowymi wartościami teoretycznymi może stanowić przesłankę do wprowadzenia zmian w technologii projektowania aerotriangulacji, mających za cel wzrost dokładności wyników i niezawodności sieci, bądź obniżenie kosztów.

Drugim celem badań było określenie faktycznie uzyskiwanej precyzji trzech grup pomiarów w aerotriangulacjach produkcyjnych, to jest precyzji: współrzędnych tłowych punktów wiążących, współrzędnych fotopunktów i współrzędnych środków rzutów. Wiarygodne określenie rzeczywistych precyzji poszczególnych grup pomiaru ma zasadnicze znaczenie dla projektowania aerotriangulacji. Wyniki badań dotyczących środków rzutów i fotopunktów przedstawiono w publikacji (Ziobro J., 2008a), a w tym artykule przedstawiono badania precyzji i niezawodności pomiaru punktów wiążących na zdjęciach. Wyniki badań stanowiły również podstawę dla komputerowych symulacji aerotriangulacji, które miały za cel rozwiązanie występujących w praktyce problemów projektowania bloków z fotopunktami niesygnalizowanymi, a rezultaty zostały opublikowane w (Ziobro J., 2008b). Należy zauważyć, że w praktyce produkcyjnej możliwości stosowania innych precyzji niż te, które dają istniejące technologie są niewielkie, gdyż wymagałoby to użycia nowych technik pomiaru. Natomiast wzrost niezawodności pomiaru i wzrost dokładności wyniku można uzyskać w istotnym stopniu poprzez zmianę konstrukcji sieci – poprzez zwiększenie liczby punktów wiążących lub ich efektywniejszy pomiar, czy też lepsze rozmieszczenie fotopunktów.

2. OPIS BLOKÓW TESTOWYCH

Do badań wybrano 25 bloków o trzech skalach zdjęć: 1:13 000, 1:19 000 i 1:26 000. Bloki opracowano w kraju w latach 2002 do 2007. Kryteria określające wybór bloków do badania wynikły głównie z wykonywanej w tym czasie produkcji, a należy zauważyć, że w tym okresie zastosowano po raz pierwszy w Polsce w szerokim zakresie pomiar środków rzutów. Liczebność bloków była ograniczona dostępnością danych i reprezentatywnością dla danej skali zdjęć, gdyż założono, że bloki powinny tworzyć próby statystyczne o całym szeregu cech wspólnych, a mianowicie:

- wybrane bloki miały zdjęcia z pomierzonymi środkami rzutów – przeciętnie miało je około 90% zdjęć bloku,
- wykonano je kamerami o odległości obrazu 152 mm, za wyjątkiem bloków 1_68, 13_30 i 5B_68, w których niewielki fragment bloku został zrobiony kamerą o odległości obrazu 211 mm i o równoleżnikowym kierunku szeregów,
- zdjęcia skanowano pikselem o wielkości 14 μ m,
- pokrycie podłużne wynosiło 60%, pokrycie poprzeczne 30%,
- osnową były niesygnalizowane fotopunkty, których współrzędne pomierzono techniką GPS,
- współrzędne tłowe punktów wiążących pomierzono metodą półautomatyczną lub automatyczną,
- wyrównanie bloku przeprowadzono metodą wiązek,
- bloki miały punkty kontrolne, również niesygnalizowane, pomierzone przez wykonawcę aerotriangulacji oraz pomierzone przez kontrolera przy odbiorach robót,

- czas między wykonaniem zdjęć a identyfikacją i pomiarem fotopunktów w terenie był stosunkowo krótki.

Utworzone w ten sposób próby statystyczne można dodatkowo scharakteryzować w następujący sposób:

- próba bloków o skali zdjęć 1:13 000 zawiera 10 bloków. Bloki mają regularny kształt – zbliżony do prostokąta, o małej liczbie załamania granic, o liczbie zdjęć z przedziału 888÷2263. Zdjęcia są czarno-białe, loty wykonano w kierunku północ-południe,
- próba bloków o skali zdjęć 1:19 000 zawiera 4 bloki. Bloki mają nieregularny kształt, gdyż zdjęcia wykonano dla potrzeb projektowania dróg, o liczbie zdjęć z przedziału 136÷364. Zdjęcia są barwne, dla bloków oznaczonych G_1, G_2, G_3 loty wykonano w kierunku wschód-zachód, a dla bloku J_20 północ-południe,
- próba bloków o skali zdjęć 1:26 000 zawiera 11 bloków. Bloki mają regularny kształt zbliżony do prostokąta, o liczbie zdjęć z przedziału 272÷3042. Zdjęcia są czarno-białe, loty wykonano w kierunku północ-południe.

3. ANALIZA BLOKÓW TESTOWYCH

Aerotriangulacje wstępnie analizowano pod kątem spełnienia podstawowych warunków poprawności opracowania. Do realizacji poszczególnych aerotriangulacji użyto różnych systemów pomiaru i wyrównania, jak również były one wykonywane przez wiele firm fotogrametrycznych. Znaczna część opracowań miała wady wynikające z niesprecyzowanych warunków projektowania oraz z niedoskonałości stosowanych technologii, a mianowicie:

- wyrównanie bloku bez użycia dodatkowych parametrów kompensujących niemoodelowane błędy systematyczne, co jest sprzeczne z powszechnie stosowanymi standardami,
- brak weryfikacji podziału pomiaru środków rzutów na profile GPS, (na ciągi pomiarów, co do których zakłada się, że mają te same błędy systematyczne), co powodowało systematyczne obciążenie wyniku,
- wyrównanie krótkich profili GPS z parametrami *drift*, co niepotrzebnie osłabiało sieć,
- brak weryfikacji wprowadzonych do wyrównania precyzji pomiarów, (błędów średnich *a priori*), a jest to podstawowym warunkiem poprawności wyrównania,
- wykrywanie błędów grubych w pomiarach jedynie w oparciu o poprawki wyrównawcze, co było niewystarczające.

W celu usunięcia tych wad oraz dla ujednoczenia ocen statystycznych pomiarów i wyników aerotriangulacji ponownie opracowano pomiary za pomocą programu Bingo przy użyciu następujących parametrów:

- użyto 24-parametrowego modelu dodatkowych parametrów wyrównania,
- zweryfikowano podział środków rzutów na profile GPS z zastosowaniem metody i oprogramowania opracowanego przez autora artykułu, (Ziobro J., 2006),

- krótkie profile GPS, krótsze niż osiem środków rzutów, wyrównano tylko z parametrem *shift*,
- weryfikowano wielkość wprowadzonych do wyrównania precyzji pomiarów za pomocą testu *aposteriori / a priori*, aż do uzyskania 5% zgodności w teście,
- wykrywanie błędów grubych w pomiarach przeprowadzono za pomocą metody *data snooping* W. Baardy.

Wyniki wyrównania uzupełniono dodatkowymi obliczeniami:

- obliczeniem przeciętnego dla bloku wskaźnika lokalnej nadliczbowości współrzędnej tłowej punktu wiążącego,
- obliczeniem liczby punktów wiążących szeregi przypadającej na jedno zdjęcie w bloku, dwukrotnie: – raz na podstawie liczby punktów wiążących obserwowanych na 4 lub więcej zdjęciach, (4+) i drugi raz na podstawie liczby punktów wiążących obserwowanych na 5 lub więcej zdjęciach, (5+),
- obliczeniem przeciętnej liczby punktów wiążących obserwowanych na zdjęciu.

Wyniki wyrównań bloków i wyniki dodatkowych obliczeń przedstawiono w tabeli 1. Wyniki zamieszczone w kolumnach od 6 do 14 są wartościami przeciętnymi w bloku.

4. ANALIZA NIEZAWODNOŚCI WSPÓLRZĘDNYCH TŁOWYCH PUNKTÓW WIĄŻĄCYCH

4.1. Kryteria oceny niezawodności pomiarów w aerotriangulacji

Niezawodność w sieciach geodezyjnych określa zdolność do wykrywania i lokalizacji błędów grubych w pomiarach. W projektowaniu sieci geodezyjnych, w tym aerotriangulacji, powszechnie stosowana jest teoria niezawodności pomiarów opracowana przez prof. W. Baarda. Wśród publikacji o niezawodności sieci fotogrametrycznych, znanych profesorów jak F. Ackerman (Ackerman, 1981), A. Gruen (Gruen, 1980), najczęściej jest cytowana obszerna publikacja prof. W. Foerstnera (Foerstner, 1985), gdyż zawiera klasyfikację poziomu niezawodności. Klasyfikacja ta była stosowana w wielu badaniach niezawodności aerotriangulacji (Barrot et al., 1994), (Ebadi, 2006), (Li et al., 1989).

W tej klasyfikacji dobremu poziomowi niezawodności wewnętrznej, odpowiada wartość wskaźnika lokalnej nadliczbowości pomiaru większa od 0.50. Cecha dobrej niezawodności przypisana do lokalnej nadliczbowości większej niż 0.50 wynika z faktu, że przy tej nadliczbowości reakcja sieci na zaburzenie wywołane błędem grubym będzie większa w obserwacji obciążonej tym błędem, niż w innych obserwacjach sieci (Prószyński et al., 2002), (Prószyński, 1994), (Nowak E., 1986). W klasyfikacji podanej w (Foerstner, 1985), jako akceptowalny poziom niezawodności podany jest przedział wartości lokalnej nadliczbowości $0.10 \div 0.50$. Natomiast w podręczniku (Kruck, 2006) autor podkreśla, że w projektowaniu należy dążyć do tego, aby lokalne nadliczbowości pomiarów były nie mniejsze od 0.25.

Tab. 1. Precyzja i niezawodność współrzędnej tlowej punktu wiążącego

Skala zdjęć	L p.	Nazwa bloku	Liczba zdjęć	Precyzja	Poprawka		Globalna nadlicz- bowość współrzę- dnej tlowej	Liczba wiązań na zdjęciu	Liczba wiązań 4+ na zdjęcie	Liczba wiązań 5+ na zdjęcie	Dokładność współrzędnej terenowej punktu wiążącego [cm]			
				współrzę- dnej tlowej [μm] mx / my	do współrzę- dnej tlowej [μm] vx vy						rx / ry	MX	MY	MZ
					5	6								
1: 13 000	1	1_68	2080	4.5	3.5	3.5	0.6	27	4.1	3.5	5	5	15	
	2	3_68	1992	3.6	2.3	2.6	0.48	50	3.4	1.9	6	6	16	
	3	4_68	2168	5.2	3.5	3.8	0.5	43	3.5	2	9	8	18	
	4	5A_68	888	3	2	2	0.48	49	3.5	1.4	5	5	14	
	5	5B_68	1022	3.1	2	2.2	0.47	55	3.8	2.3	7	6	17	
	6	7_68	2263	4.2	3	3.1	0.53	36	3.5	2.7	5	5	13	
	7	8_68	1970	4.5	3.4	3.1	0.53	22	2.5	2	6	5	15	
	8	9_68	2338	4	2.4	3	0.48	52	3	1.8	6	5	13	
	9	10_30	1896	7.3	4.8	5	0.47	18	2	1.7	11	11	27	
	10	13_30	1059	5	3.4	3.8	0.51	20	2.2	1.9	6	6	14	
Średnia arytmetyczna				4.4	3	3.2	0.51	37	3.2	2.1	6.6	6.2	16.2	
1: 19 000	1	G_3	137	5.2	3.6	3.8	0.51	29	2.9	2.2	9	10	20	
	2	G_1	305	4.5	3.5	3.1	0.55	24	3	2.6	10	10	27	
	3	G_2	136	5.2	3.8	3.7	0.51	40	4.2	2.6	10	10	20	
	4	J_20	364	6.8	5.2	4.9	0.54	14	3.1	1.7	11	11	22	
	Średnia arytmetyczna				5.4	4	3.9	0.53	29	3.3	2.3	10	10.2	22.2
1: 26 000	1	2_1	333	5.1	3	3.6	0.43	39	2.9	1.8	21	19	38	
	2	2_2	315	4.8	2.8	3.5	0.44	39	2.8	1.8	18	16	32	
	3	2_a	775	5.4	3.3	3.8	0.44	37	2.9	1.9	17	15	35	
	4	2_b	1626	5.4	3.4	3.8	0.45	38	3.1	1.9	16	14	35	
	5	2_c	1482	5.2	3.2	3.8	0.44	39	3	2	17	16	37	
	6	3_3	3402	4.6	3.5	3.6	0.58	55	6.8	4.6	11	12	22	
	7	4_7	272	3.7	2.6	2.8	0.53	16	1.9	1.7	16	17	22	
	8	4_a	1286	5.5	3.5	3.8	0.44	37	2.9	2.7	17	15	36	
	9	4_b	2115	5.4	3.3	3.9	0.45	39	3	2	15	13	36	
	10	4_c	317	5.2	3.1	3.8	0.44	38	2.6	1.7	20	18	38	
	11	4_d	946	5.4	3.4	3.9	0.46	39	3.2	2	16	14	38	
Średnia arytmetyczna				5.1	3.2	3.6	0.46	38	3.2	2.2	16.7	15.4	33.5	

4.2. Globalna niezawodność współrzędnej tłowej punktu wiążącego

Globalna nadliczbowość grupy pomiarów, w tym przypadku współrzędnej tłowej, jest przeciętną – średnią arytmetyczną z ich wskaźników lokalnej nadliczbowości i jest miarą niezawodności tej grupy pomiarów (Foerstner, 1985), (Kruck, 2006).

Wartości globalnej niezawodności współrzędnej tłowej dla poszczególnych badanych bloków zostały zamieszczone w tabeli 1, w kolumnie 8. Globalna nadliczbowość współrzędnej tłowej w badanych aerotriangulacjach mieści się w przedziale $0.43 \div 0.60$. W tabeli 1 podano również wartości średnie dla bloków o tej samej skali zdjęć. Średnie te są bliskie wartości 0.5. Jednak w poszczególnych blokach dobrą niezawodność – nadliczbowość większą niż 0.50 uzyskano tylko dla 11 bloków na 25 wszystkich. Z analizy wiążącej w poszczególnych blokach wynika, że w części zbadanych bloków występuje wyraźna dysproporcja między dużą liczbą pomiarów na zdjęciach, a względnie małą liczbą punktów wiążących szeregi. Świadczy to o niedbałym posługiwaniu się automatycznym pomiarem, jak również o braku edycji tego pomiaru za pomocą narzędzi dla eliminowania nieefektywnych i zbędnych wiązań oraz narzędzi wykrywających miejsca w bloku wymagające dodatkowych pomiarów.

4.3. Niezawodność pojedynczej współrzędnej tłowej punktu wiążącego

Na globalną nadliczbowość grupy pomiarów składają się wskaźniki lokalnej nadliczbowości poszczególnych pomiarów, dlatego analizowano wskaźnik pojedynczej współrzędnej tłowej ze względu na liczbę zdjęć, na których pomierzono punkt wiążący. Poniżej zostały przedstawione wyniki tych analiz:

- punkty wiążące pomierzone tylko na dwóch zdjęciach szeregu mają zerową lokalną nadliczbowość dla obu współrzędnych x ,
- punkty wiążące pomierzone na dwóch zdjęciach w sąsiednich szeregach mają zerową lokalną nadliczbowość niektórych współrzędnych lub bardzo małą nadliczbowość wszystkich czterech współrzędnych,
- fotopunkty pomierzone tylko na dwóch zdjęciach, mają niezerową nadliczbowość wszystkich współrzędnych tłowych, a w badanych blokach jej wielkość była zależna od relacji między precyzją współrzędnych tłowych a precyzją współrzędnych fotopunktów, Dla skali zdjęć 1:13 000 nadliczbowość współrzędnej x wyniosła średnio ok. 0.17, dla skali 1: 26 000 ok. 0.22,
- punkty wiążące pomierzone na trzech zdjęciach mają:
 - w pasach potrójnego pokrycia w szeregu, mają małą lokalną nadliczbowość dla współrzędnej x na zdjęciach bocznych – około 0.15, a dla y bliską 0.50,
 - obserwowane na zdjęciach różnych szeregów, mogą mieć jedną współrzędną (x lub y), o zerowej nadliczbowości,
- fotopunkty pomierzone na trzech zdjęciach mają lokalną nadliczbowość dla współrzędnej x na zdjęciach bocznych: dla skali 1:13 000 – 0.18, a dla skali 1:26 000 – 0.22,
- punkty wiążące pomierzone na czterech zdjęciach mają lokalną nadliczbowość, wszystkich 8 współrzędnych, bliską 0.5,
- największy wkład w globalną nadliczbowość dają punkty wiążące pomierzone na sześciu zdjęciach. Lokalna nadliczbowość współrzędnej w takim wiązaniu sięga

wartości 0.6, dla każdej z 12 współrzędnych. W pozycjach Grubera gdzie pomierzono po kilka takich punktów, lokalna nadliczbowość niektórych współrzędnych sięga nawet 0.83,

- fotopunkty pomierzone na sześciu zdjęciach mają nieznacznie większą nadliczbowość współrzędnych tlowych w stosunku do zwykłych punktów wiążących.

5. WNIOSKI Z BADAŃ

5.1. Projektowanie pomiaru

Z prezentowanych w tym artykule badań i z badań przedstawionych w (Ziobro J., 2008b) wynika, że dla zapewnienia dobrej dokładności i niezawodności należy projektować w każdym rejonie Grubera minimum po dwa punkty wiążące. Istotnie lepszy wynik można uzyskać projektując 3÷5 punktów wiążących — przy 3 punktach wiążących uzyskuje się przeciętny wskaźnik lokalnej nadliczbowości tlowej ok. 0.55, a przy 5 wiążących ok. 0.60. Warto zauważyć, że zwiększanie dokładności i niezawodności wraz ze zwiększaniem liczby wiązań ma charakter asymptotyczny, to znaczy dla 6 i więcej wiązań w pozycji Grubera, wzrost ten jest bardzo niewielki, a nakład pracy związany z zapewnieniem homogeniczności dokładności wyniku może być duży.

5.2. Weryfikacja wiązań

Ważnym etapem realizacji projektu jest edycja automatycznego pomiaru. Wiązania niekompletne i nieefektywne obniżają przeciętną dokładność współrzędnych terenowych punktu wiążącego, a jest to podstawowa miara oceny jakości aerotriangulacji. Należy tu zwrócić uwagę na dwa zagadnienia. Pierwsze to fakt, że współrzędne tlowe o zerowej lokalnej nadliczbowości mogą być obciążone dowolnie dużym błędem grubym, który jest niewykrywalny podczas wyrównania. Drugie zagadnienie to zbyt duża liczba wiązań nie wnoszących do wzrostu dokładności i niezawodności, a których obecność w sieci jest konieczna z tytułu dodatkowych celów projektowania takich jak zapewnienie dla orientacji modeli stereoskopowych co najmniej 2 punktów wiążących w każdym rejonie Grubera, (Nowak J., 1999), czy też w celu wyznaczenia dodatkowych parametrów wyrównania. Rodzaje wiązań, które należy usunąć za pomocą narzędzi systemu pomiarowego, to:

- punkty wiążące tak blisko siebie położone na zdjęciach, że należy je uznać za identyczne,
- punkty pomierzone tylko na 2 zdjęciach – poza wymienionymi wyjątkami:
 - w narożnikach bloku,
 - w pokryciu poprzecznym między skrajnymi zdjęciami szeregów,
 - fotopunkty odfotografowane tylko na dwóch zdjęciach,
- punkty wiążące szeregi, ale pomierzone tylko na 3 zdjęciach – za wyjątkiem przypadku trudności w pomiarze spowodowanych pokryciem terenu,
- nadmierną liczbę punktów w podłużnym pokryciu.

5.3. Uwagi dodatkowe

Homogeniczność dokładności wyniku aerotriangulacji – możliwie jednolita dokładność niewiadomych w całym bloku – jest jednym z głównych celów projektowania i realizacji pomiaru, a który w krajowej praktyce jest zbyt często nie w pełni osiągnięty. Warto zaznaczyć, że obecnie systemy pomiarowe mają specjalne funkcje dla wykrywania w bloku miejsc o słabej konstrukcji, co znacznie usprawnia edycję pomiaru na zdjęciach.

Wnioski z badań zostały uwzględnione w nowym standardzie aerotriangulacji, który zostanie wprowadzony w życie jako rozporządzenie do ustawy „Prawo geodezyjne i kartograficzne”.

6. LITERATURA

- Ackerman F., 1981, Zuverlässigkeit photogrammetrischer Blöcke. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Heft 8, August 1981, s. 401–411.
- Barrot D., Colomina I., Termens A., 1994, Reliability of block triangulation with GPS aerial control. *ISPRS Commission III Symposium: Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision*, s. 35–42.
- Cooper M.A.R., Cross P.A., 1988, Statistical concepts and their applications in photogrammetry and surveying. *Photogrammetric Record*, April 1988, s. 637–663.
- Ebadi H., 2006, Advanced Analytical Aerial Triangulation. <http://sahand.kntu.ac.ir/~ebadi/AAT.pdf>.
- Foerstner W., 1985, The reliability of block triangulation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. LI, 8, August 1985, s. 1137–1149.
- Gruen A., 1980, Precision and reliability aspects in close-range photogrammetry. *Int. Arch. Photogrammetry*, 11 (23B), s. 378–391.
- Kruck E., 2006, *Bingo 5.3 User's Manual*. Geoinformatics & Photogrammetric Engineering.
- Li D., Shan J., 1989, Quality analysis of bundle block adjustment with navigation data. *Photogrammetric engineering and remote sensing, December 1989*, s. 1743–1746.
- Nowak E., 1986, *Teoretyczne i praktyczne aspekty geodezyjnego rachunku wyrównawczego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, *Prace Naukowe*, Geodezja, z. 27.
- Nowak, J., 1999, Własności niezawodnościowe podstawowych zadań fotogrametrycznych. *Przegląd Geodezyjny*, 11/1999, s. 13–16.
- Prószyński W., 1994, Criteria for internal reliability of linear least square models. *Bulletin Geodesique*, 1994, 68, s. 162–167.
- Prószyński W., Kwaśniak M., 2002, *Niezawodność sieci geodezyjnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Ziobro J., 2006, Przedwyrównawcze wykrywanie błędów grubych w pomiarze środków rzutów dla aerotriangulacji. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, s. 609–618.
- Ziobro J., 2008a, Precision and reliability of GPS-coordinates of projection centres in real aerial triangulations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B3b, Beijing 2008, s. 21–24.
- Ziobro J., 2008b, Przesłanki projektowania aerotriangulacji z fotopunktami niesygnalizowanymi. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, 2008, tom LIV, z. 112, s. 51–76.

THE RELIABILITY OF PHOTOCOORDINATES IN AERIAL TRIANGULATION

KEY WORDS: aerial triangulation, design, photocoordinates, precision, reliability

SUMMARY: Ensuring the reliability of measurements is one of the basic targets in designing geodetic networks. The reliability of a measurement is, after precision, the second component of its quality. A level too low of reliability causes a worse detection and location of gross errors, and an excessive influence of individual measurement error on the results. At too high reliability level may indicate a low economy of the design or too low precision in a group of measurements in relation to precision in other groups. The problem of reliability is tightly related not only to a detection of gross errors of measurements but also to other targets of design, such as accuracy of calculated unknowns and homogeneity of the accuracy. In aerial triangulation, photocoordinates are the most precise and most numerous group of measurements – up to 95% of all, so their precision and reliability have a fundamental influence on the accuracy of aerial triangulation results, the reliability of other groups of measurements being part of it.

The reliability measures and estimates applied to aerial triangulation are quoted in the paper. The results are presented of an extensive research on the photocoordinates reliability obtained from 25 aerial triangulations made in Poland in the years 2002 to 2007 for three scales of aerial photographs: 1: 13000, 1:19000, 1:26000 and for the number of photographs in a block ranging from 136 to 3402. Blocks had natural control points and the measured projection centers. With the BINGO software the measurements were calculated anew to check the correctness of adjustment and to standardize the statistic estimates, because the aerial triangulations were made with the use of different systems of measurement and adjustment.

The following results are given for each block: precision of the photocoordinates, average residual of a photocoordinate, average local redundancy numbers of a photocoordinate, average number of tie points falling into one photograph and average standard deviation of determining the ground coordinate of a tie point. In tables of the results there are given also mean values of the estimates for blocks of the same scale of photographs.

The reliability analysis results are given for a single tie point photocoordinates in relation to the number of photographs on which they were measured. The results are also given of an analysis of the average reliability of photocoordinates. From the analysis it appears that only in less than half of the blocks under study the reliability of the photocoordinates measurement gained a good level. In some blocks a significant disproportion exists between the big number of measurements on the photographs and the relatively small number of tie points between strips. This indicates negligence in the use of automatic measurement and besides the absence of edition of this measurement with the aid of tools for elimination of useless and ineffective tie points and tools detecting locations where additional measurements are required. The conclusions from the research concerning the measurement precision and reliability and the accuracy of the tie points calculation were taken into consideration in a project of the new aerial triangulation standard.

dr inż. Jan Ziobro
e-mail: ziobro@igik.edu.pl