

**PRZEDWYRÓWNAWCZE WYKRYWANIE BŁĘDÓW GRUBYCH
W POMIARZE KĄTÓW ORIENTACJI ZDJĘĆ DLA
AEROTRIANGULACJI**

**PRE-ADJUSTMENT DETECTION OF GROSS ERRORS IN IMU
MEASUREMENT FOR AEROTRIANGULATION**

Jan Ziobro

Zakład Fotogrametrii, Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria, aerotriangulacja, przedwyrównawcze wykrywanie błędów grubych, IMU

STRESZCZENIE: Opracowana metoda wykorzystuje dwa ogólne sposoby przedwyrównawczego wykrywania błędów grubych. Pierwszy z nich to kilkietapowe wykrywanie pozwalające separować od siebie wpływy błędów grubych i pomyłek w danych występujących w poszczególnych grupach pomiarów tak, że nie nakładają się one wzajemnie, a na etapie dotyczącym omawianej metody występują tylko obserwacje odstające w pomiarze kątów orientacji zdjęć. Drugi, to statystyczne testowanie różnic między kątami pomierzonymi i kątowymi elementami orientacji zdjęć uzyskanymi z wyrównania bez użycia pomiaru z IMU. Metoda pozwala również na oszacowanie błędu średniego pomiaru kątów. Testowanie skuteczności przeprowadzono na 11 aerotriangulacjach dużych bloków zdjęć wykonanych w kraju w latach 2008–2010. Skuteczność metody przedwyrównawczego wykrywania błędów grubych i pomyłek w pomiarze kątów jest zadowalająca, gdyż nie wykryte przez metodę błędy grube są nieliczne. Również oszacowanie błędu średniego pomiaru kątów daje zadowalające przybliżenie i może być szczególnie przydatne, gdy wykonawca pomiaru podaje za mało dokładne oszacowanie błędu pomiaru kąta.

1. WPROWADZENIE¹

Metoda najmniejszych kwadratów stosowana w opracowaniach pomiarów jest bardzo wrażliwa na występowanie błędów grubych i pomyłek w danych. Wystąpienie tych zaburzeń w pomiarach może powodować istotne trudności w opracowaniu, dlatego dąży się do ograniczenia liczby i wielkości zaburzeń poprzez stosowanie na etapie pomiaru procedur niezawodnościowych, jak i stosowanie wstępnej analizy pomiarów ogólnie nazywanej przedwyrównawczym wykrywaniem błędów grubych.

Najczęściej stosowaną metodą wykrywania błędów grubych na podstawie rezultatów wyrównania jest *data snooping*, która zakłada, że w sieci występuje tylko jeden błąd gruby

¹ Badania wykonano w ramach projektu nr 1960/B/T02/2010/38 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

(Prószyński, et al., 2002). W przypadku wystąpienia większej liczby błędów grubych, ich szkodliwy, nakładający się wpływ, może zarówno wzmacniać jak i znosić się, przez co ich wykrywanie i lokalizacja są trudne. W aerotriangulacji, gdzie występują cztery grupy pomiarów o bardzo różnym charakterze, przy czym trzy z nich mają duże błędy systematyczne, które są wyznaczane w wyrównaniu, wykrywanie to jest uciążliwe i długotrwałe, a jak pokazuje praktyka produkcyjna nie zawsze w pełni skuteczne. Można tu dodać, że problem komplikuje podawane, przez wykonawców poszczególnych grup pomiarów, oszacowanie błędu średniego pomiaru, które jest nierzadko bardzo odległe od faktycznego błędu.

W ograniczaniu przyczyn i skutków zaburzeń w pomiarach stosowanych jest kilka metod, z których jedną jest projektowanie sieci o wysokiej niezawodności obserwacji, ale w przypadku aerotriangulacji jest ono silnie ograniczane poprzez z góry narzucone wielkości precyzji, co wynika z możliwości stosowania takich a nie innych sensorów, oraz ograniczane poprzez nieekonomiczność zwiększania liczby obserwacji, czy też poprzez zwiększanie pokrycia poprzecznego zdjęć. Skutkiem wyżej podanych przyczyn ważne staje się stosowanie procedur niezawodnościowych w wykonywaniu pomiarów, które zmniejszają możliwość wystąpienia pomyłek i błędów grubych.

Kolejną metodą jest uniezależnienie, tam gdzie to możliwe, wykrywania błędów grubych w danej grupie pomiarów od wpływu tego rodzaju błędów znajdujących się w innych grupach. Można to wykonać poprzez podział układu obserwacyjnego na części wynikające z różnic technologicznych w pomiarze poszczególnych grup (Adamczewski, 2005), a następnie przeprowadzać wyrównanie dołączając kolejne grupy – etapowe wykrywanie błędów grubych. Etapowe wykrywanie jest możliwe w przypadku aerotriangulacji i pozwala ono na separację oddziaływania błędów grubych w poszczególnych grupach oraz daje możliwość weryfikowania błędu średniego danej grupy pomiarów, nie zniekształcanego błędami grubymi występującymi w innych grupach.

W aerotriangulacji od dawna jest stosowana separacja wpływów błędów grubych we współrzędnych tłowych od tych występujących w pozostałych pomiarach. Polega ona na wyrównaniu współrzędnych tłowych w lokalnym układzie współrzędnych, na ogół w przestrzennym układzie jednego ze zdjęć, to znaczy bez wprowadzania do wyrównania pozostałych grup pomiarów. Po usunięciu błędów grubych we współrzędnych tłowych i weryfikacji ich błędu średniego a priori, do wyrównania wprowadza się współrzędne fotopunktów, wykrywa się błędy grube i weryfikuje się ich błąd średni.

Użycie pomiaru środków rzutów należy poprzedzić przedwyrównawczym wykrywaniem pomyłek i błędów grubych w tej grupie. Metoda opracowana przez autora (Ziobro, 2006), opiera się na poczynionym spostrzeżeniu, że znane są współrzędne środków rzutów z dwóch niezależnych od siebie wyznaczeń: – pierwsze to wynik wyrównania obserwacji na zdjęciach wraz z pomiarem fotopunktów; – drugie wyznaczenie to pomiar wykonany w trakcie lotu fotogrametrycznego (GNSS). Drugim istotnym spostrzeżeniem w omawianej metodzie jest to, że przyrosty współrzędnych i odległość między sąsiednimi środkami rzutów (na ogół jest to baza fotografowania), mają cechy jak niżej:

- przyrosty współrzędnych i długość bazy obliczone z wyrównania, zostają dokładniej wyznaczone niż same współrzędne środków rzutów, gdyż można sądzić, że

w różnicy współrzędnych sąsiednich środków rzutów nastąpiła samoeliminacja systematycznego obciążenia;

- przyrosty współrzędnych i długość bazy obliczone z pomiaru uzyskanego w trakcie lotu fotogrametrycznego są wolne do błędów systematycznych - *shift* i *drift*.

Porównanie wyżej wymienionych wielkości, z tych dwóch niezależnych wyznaczeń, przy uwzględnieniu błędów, z którymi zostały określone, pozwala na jednoczesne wykrycie i lokalizację błędów grubych w pomiarze środków rzutów, jak i na wykrycie, często występującego w praktyce, złego podziału pomiaru środków rzutów na profile gps - podziału na ciągi środków rzutów o tym samym *shift* i *drift*. Poziom wykrywanie błędów grubych tą metodą jest stosunkowo wysoki - około 6 błędów średnich. Opracowany w tym celu program analizujący ciąg różnic wzdłuż profilu gps, pozwala w prosty i szybki sposób wykryć i zlokalizować zaburzenie, określić jego przyczynę i podjąć właściwą decyzję, albo o usunięciu obserwacji odstającej z obliczeń, albo o zmianie podziału pomiarów na profile gps. Analiza pozwala również na weryfikację błędu średniego pomiaru GNSS. Takich analiz nie daje się zrobić na podstawie standardowego, wspólnego wyrównania wszystkich grup pomiarów, ponieważ nie jest możliwe określenie przyczyny zaburzenia, jak i określenie jego lokalizacji, gdyż pojedynczy błąd gruby lub pomyłka silnie deformuje poprawki do wszystkich pomiarów na danym profilu gps.

W literaturze brakuje bezpośrednich odniesień do wykrywania pomyłek i błędów grubych w pomiarze kątów, a jest to skomplikowany proces ze względu na wymienione niżej warunki:

- złożony proces przeliczenia kątów z IMU na kąty orientacji zdjęć w krajowym lokalnym układzie współrzędnych, niekiedy źle wykonany;
- ścisłe warunki wyboru modelu matematycznego kalibracji IMU wykonywanej w trakcie wyrównania;
- trudności w prawidłowym oszacowaniu błędów średnich a priori kątów orientacji;
- zaburzenia wywołane nieprawidłowościami mogącymi wystąpić w wielu innych parametrach sieci.

Analiza krajowych aerotriangulacji wykazała, że w tym zakresie brak jest skutecznej metodyki postępowania.

2. PODSTAWY METODY

Opracowana metoda opiera się na następujących założeniach:

1. Zakłada się etapowe wykrywanie, pozwalające separować od siebie wpływy błędów grubych i pomyłek w danych występujących w poszczególnych grupach pomiarów tak, że nie nakładają się one wzajemnie, a na etapie dotyczącym omawianej metody występują już tylko obserwacje odstające w pomiarze kątów. Etapowe wykrywanie błędów grubych we współrzędnych tłowych, fotopunktów i środków rzutów, oraz weryfikacja błędów średnich tych trzech grup przebiega w następujących etapach:
 - a) Wyrównanie jedynie współrzędnych tłowych w lokalnym układzie w celu wykrywania błędów grubych w tej grupie oraz zweryfikowanie ich błędu średniego.

- b) Łączne wyrównanie współrzędnych tłowych i współrzędnych fotopunktów w celu wykrycia i lokalizacji błędów grubych we współrzędnych fotopunktów oraz w celu zweryfikowania błędu średniego współrzędnych fotopunktów.
 - c) Wykrywanie pomyłek i błędów grubych we współrzędnych środków rzutów za pomocą metody opracowanej we wcześniejszych badaniach autora, a omówionej we „Wprowadzeniu”. Po wykonaniu wymienionych etapów otrzymuje się dobre przybliżenie wyników aerotriangulacji, nieobciążonych nie wykrytymi błędami grubymi.
2. Następnym krokiem w metodzie jest wyrównanie łączne wszystkich czterech grup z tym, że pomiary kątów w tym wyrównaniu występują z bardzo niską wagą - przyjmuje się tu błąd średni kąta równy 10 gradom. Przyjęcie tak dużego błędu średniego kąta powoduje, że pomiar ten nie ma żadnego wpływu na wyniki wyrównania - wskaźnik lokalnej nadliczbowości wszystkich pomiarów kątów jest równy 1.0. Należy zwrócić uwagę, że w wyrównaniu tym zostają wyznaczone następujące wielkości:
 - błędy systematyczne pomiaru kątów - kąty kalibracyjne, o wartość których pomiar kątów zostaje skorygowany;
 - elementy katowe orientacji zdjęć i ich odchylenia standardowe.
 3. Wynik otrzymany z wyrównania z niską wagą kątów ma następującą interpretację:
 - a) Poprawki do pomiaru kątów można interpretować jako różnicę między wyznaczonymi (przybliżonymi) kątowymi elementami orientacji zdjęć, a samym pomiarem kątów.
 - b) Poprawki do pomiaru kątów są więc obciążone błędem wyznaczenia kątowych elementów orientacji i błędem wyznaczenia kątów kalibracyjnych.
 - c) Odchylenie standardowe liczone z poprawek do pomiaru kątów jest obciążone wymienionymi w punkcie b) błędami, a ponadto jest obciążone wpływem błędów grubych i pomyłek w poszczególnych pomiarach.
 - d) Natomiast poszczególne poprawki do pomiaru kątów nie są deformowane (lub w niewielkim stopniu tylko poprzez wpływ na kąty kalibracyjne) pomyłkami i błędami grubymi w pomiarach innych kątów, jak by to miało miejsce w standardowym wyrównaniu. Jest to ważną zaletą tej metody, gdyż w standardowym wyrównaniu nierzadko zdarzające się pomyłki w przygotowaniu danych lub liczne błędy grube tak silnie zniekształcają poprawki do obserwacji sąsiednich, że znacznie to utrudnia i wydłuża czas wykrywania i lokalizacji błędów grubych.
 4. Opracowana metoda jest odmianą znanej metody przedwyrównawczego wykrywania błędów grubych, w której wykrywanie przeprowadzane jest na podstawie testowania różnicy między wielkością uzyskaną z obliczenia przybliżonej wartości pomiaru, a samą wartością pomiaru. Została ona ogólnie przedstawiona w publikacjach (Adamczewski, 2005; Ghilani, 2010; Kavouras, 1982; Kruck, 2007; Nowak, 1986).
 5. Przyjmuje się również kolejne następujące założenia:
 - nie jest znany a priori błąd średni pomiaru kąta;
 - próba poprawek jest jednolita;
 - poprawki do pomiaru kątów mają rozkład normalny.
 6. Kolejnym etapem w metodzie jest statystyczne testowanie otrzymanych zbiorów poprawek do kątów ω , φ i κ , ze względu na występowanie w nich błędów grubych.

Obliczane jest odchylenie standardowe a posteriori (z próby) oraz poprawki są standaryzowane poprzez podzielenie przez to odchylenie. Przy takim zdefiniowaniu rozkładu, w celu wykrywania obserwacji odstających można stosować test Studenta (Łoś, 1980; Ney, 1976), a biorąc pod uwagę, że badane są duże bloki, liczebność próby wynosi od kilku set do kilku tysięcy, oraz ze względu na asymptotyczną zbieżność do rozkładu normalnego, można stosować test na odstawianie pochodzący z rozkładu normalnego.

7. Opracowana metoda jest tylko grubym przybliżeniem w odniesieniu do bardziej ścisłych metod. Również niektóre z założeń nie dają się w prosty sposób weryfikować, jak na przykład założenie o jednolitość błędu średniego pomiaru kąta w całej próbie, jak i jednolitości wyznaczonych w wyrównaniu standardowych odchyłeń kątowych elementów orientacji. Z powodu wymienionych przyczyn i z ostrożności, aby nie odrzucać obserwacji poprawnych, przyjęto skrajnie niski poziom istotności testu $\alpha/2=0.000025$, przy którym wartość krytyczna testu wynosi 4.0. Obserwacje pozostające w obliczeniach będą oczywiście ponownie testowane podczas standardowego końcowego wyrównania, a od omawianej metody oczekuje się jedynie wykrycia pomyłek i błędów grubych o dużych wartościach.

3. ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKRYWANIA BŁĘDÓW GRUBYCH

Relacje między wielkościami błędów, wymienionymi w założeniach, mają zasadnicze znaczenie dla skuteczności metody. Poniżej przedstawiono analizę możliwości wykrywania błędów grubych, przy parametrach występujących w krajowych aerotriangulacjach.

3.1. Analiza wpływu dokładności wyznaczenia kąta orientacji

Pierwszym problemem jest przeciętna wielkość odchylenia standardowego kąta orientacji zdjęcia wyznaczonego na podstawie wyrównania z bardzo niską wagą pomiaru kątów. W przypadku, gdyby odchylenie to było wielokrotnie większe od błędu średniego pomiaru kąta, to metoda byłaby nieskuteczna, gdyż poziom wykrywalności odstających obserwacji byłby zbyt niski – poprawki pokazywałyby jedynie błąd wyznaczenia kąta orientacji, nawet przy wystąpieniu błędu grubego w pomiarze.

Zagadnienie to zostało już częściowo przedstawione w publikacji (Ziobro, 2011a), dotyczącej analizy produkcyjnych bloków, gdzie wyznaczono przeciętne odchylenia standardowe kątów orientacji zdjęć w wyrównaniach bez użycia pomiaru kątów. Uzyskane z takich opracowań, przeciętne odchylenie standardowe kąta orientacji, dla zbadanej próby 19 produkcyjnych bloków, było równe: $M_{\omega}=M_{\varphi}=25^{\text{cc}}$ i $M_{\kappa}=8^{\text{cc}}$. Natomiast przeciętny błąd średni pomiaru kąta orientacji uzyskiwany w krajowej produkcji to: $m_{\omega}=m_{\varphi}=44^{\text{cc}}$, $m_{\kappa}=124^{\text{cc}}$. Porównanie tych wielkości pozwala twierdzić, że możliwe jest wykrywanie błędów grubych i pomyłek w pomiarze kątów, gdyż błędy pomiaru m_{ω} i m_{φ} mają około dwukrotnie większe wartości niż odchylenia standardowe M_{ω} i M_{φ} , a dla M_{κ} relacja ma jeszcze większą wartość.

Należy zauważyć, że bloki produkcyjne na ogół zostały opracowane ze zbyt dużą liczbą fotopunktów — przeciętnie 1 fotopunkt na 20.0 zdjęć, dlatego dla 10 dużych bloków

produkcyjnych określono przeciętne odchylenie standardowe kątów orientacji zdjęć, przy zmniejszonej liczbie wiązań (za pomocą funkcji *thinning* otrzymano po 2 punkty wiążące w rejonie Grubera) i przy małej, ale wystarczającej liczbie fotopunktów (Ziobro, 2011b) - przeciętnie 1 F-punkt na 75.0 zdjęć i bez wykorzystania pomiaru kątów. Uzyskane w takich opracowaniach przeciętne odchylenia standardowe to: $M_{\omega}=M_{\phi}=34^{\circ}$ i $M_{\kappa}=12^{\circ}$, co również potwierdza możliwość wykrywania błędów grubych w pomiarze kątów.

3.2. Iteracyjność procesu wykrywania błędów grubych

W metodzie zakłada się, że nie jest znany błąd średni pomiaru kątów, co wynika ze zbyt małego przybliżenia tego błędu podawanego przez wykonawców pomiaru. Powoduje to konieczność wyznaczenia odchylenia standardowego z próby, a ponieważ jest ono obciążone błędami grubymi i pomyłkami wymaga to korygowania go w sposób iteracyjny. To znaczy, po analizie wyników i po eliminacji obserwacji odstających należy powtórzyć obliczenia — zostanie obliczone nowe odchylenie standardowe, które będzie mniejsze niż w poprzedniej iteracji. Wykrywanie błędów grubych i ustalenie odchylenia standardowego zostaje zakończone, gdy po kolejnej iteracji wykrywania nie występują już poprawki o wielkości większej niż wartość krytyczna testu.

3.3. Analiza wpływu dokładności wyznaczenia kątów kalibracyjnych

Trzecim problemem jest określenie praktycznego wpływu na analizowane poprawki błędu przybliżenia kątów kalibracyjnych, o wartości których poprawiane są pomiary kątów. Wpływ ten określono poprzez porównanie wyników kalibracji uzyskanych ze standardowych wyrównań z wynikami uzyskanymi z wyrównań z niską wagą kątów. Przeciętna różnica między kątami kalibracyjnymi uzyskana w 10 blokach to 11° , a maksymalna 33° .

Również badano to zagadnienie w trakcie testowania metody w 11 realnych aerotriangulacjach. W trzech aerotriangulacjach o największej liczbie obserwacji odstających, gdzie ich procentowa liczba była równa: 11.3%, 5.5% i 4.0%, a liczba iteracji wykrywania to odpowiednio: 11, 7 i 7 iteracji, badano zmianę wartości kątów kalibracyjnych przed pierwszą iteracją wykrywania, a ich wartościami uzyskanymi w końcowym standardowym wyrównaniu. Największa różnica była równa 22° , czyli około połowę błędu średniego kątów m_{ω} i m_{ϕ} , przeciętnie uzyskiwanego w krajowej produkcji. Można powiedzieć, że przy takim procencie błędów grubych, dokładność otrzymanego przybliżenia kątów kalibracyjnych nie wpłynie znacząco na poprawność wykrywania obserwacji odstających.

3.4. Wnioski z analiz

Wyniki powyższej analizy upoważniają do następujących wniosków:

- kąty orientacji zdjęć wyznaczone w wyrównaniu z niską wagą kątów i pomiary kątów są wyznaczeniami praktycznie niezależnymi od siebie;
- testowane poprawki do kątów są różnicą tych dwóch wyznaczeń;

- możliwe jest wykrywanie błędów grubych i pomyłek w pomiarze kątów, gdyż błędy pomiaru mają istotnie większe wartości niż odchylenia standardowe kątów orientacji zdjęć wyznaczone w wyrównaniu z niską wagą kątów.

4. TESTOWANIE METODY

Opracowano program w celu analizy zbioru poprawek, który oblicza następujące wielkości: oblicza odchylenie standardowe a posteriori; wyraża poprawki do kątów w wielkości tego odchylenia; oraz oznacza te z nich, których znormalizowana, bezwzględna wartość jest większa niż wartość krytyczna testu.

Tabela 1. Wyniki testowania metody przedwyrównawczego wykrywania błędów grubych w pomiarze kątów

Nazwa bloku	Liczba zdjęć w bloku	Liczba iteracji wykrywania obserwacji odstających w pomiarze IMU	Ogólna liczba wykrytych obserwacji odstających w pomiarze IMU	Procent obserwacji odstających w pomiarze IMU [%]	Liczba obserwacji odstających w pomiarze IMU wykrytych w końcowym wyrównaniu
1	2	3	4	5	6
GL	1598	11	181	11.3	0
OB7_1	3175	7	127	4.0	0
OB4_1	1955	7	108	5.5	0
OB_9_3	3526	6	35	1.0	1
OB_9_2	1881	5	8	0.4	4
OB_9_1	1581	3	6	0.4	5
OB1_1	960	3	7	0.7	0
KO_2	975	3	11	1.1	0
OB3_2A	1760	2	6	0.3	1
OB4_2	2724	2	3	0.1	0
87_OB4_1	1659	1	0	0.0	0

Testowanie metody przedwyrównawczego wykrywania błędów grubych przeprowadzono w realnych aerotriangulacjach, w następujący sposób:

- Do testowania wybrano 11 produkcyjnie wykonywanych aerotriangulacji o dużej liczbie zdjęć, o liczebności od 960 do 3526.
- W opracowaniach wykorzystano dla celów testowych wszystkie obserwacje kątów orientacji, również te, co do których było wiadomo, że są obciążone błędami grubymi i pomyłkami.

- c) Bloki opracowano zgodnie z opisaną wcześniej metodą, to znaczy: zgodnie z etapowym wykrywaniem błędów grubych w poszczególnych grupach pomiarów oraz zgodnie z założeniami metody.
- d) Po eliminacji obserwacji odstających zrobiono standardowe wyrównanie, z wykrywaniem błędów grubych metodą *data snooping*, w celu określenia liczby obserwacji odstających, których nie wykryła testowana metoda.

W tabeli 1 podano liczbowe charakterystyki wykrywania błędów grubych w poszczególnych blokach. W tabeli 1, w kolumnie 3, podano liczbę iteracji wykrywania obserwacji odstających. W kolumnie 4 podano liczbę obserwacji odstających spowodowanych pomyłkami i błędami grubymi, które wykryto w ciągu wszystkich iteracji, w kolumnie 5 podano procent obserwacji odstających w odniesieniu do liczby zdjęć w bloku.

W czterech blokach (na 11 wszystkich bloków) podczas standardowego wyrównania wykryto jeszcze nieliczne obserwacje odstające (tabela 1, kolumna 6). Wielkości wykrytych błędów grubych nie przekraczały 8.5-krotnego błędu średniego.

5. METODA OSZACOWANIA BŁĘDU POMIARU KĄTA

Przedwyrównawcze szacowanie błędu średniego ma istotne znaczenie z dwóch powodów. Pierwszy powód, to zdarzające się zbyt grube przybliżenie błędu, podawanego przez wykonawców tego pomiaru, co stwierdzono w trakcie analizy krajowych aerotriangulacji. Drugi powód, to brak możliwości dobrej weryfikacji tego błędu w trakcie przebiegu opracowania obserwacji, gdyż mniej zaawansowane systemy wyrównania nie testują (test *aposteriori* / *a priori*) poprawności wprowadzonych do obliczeń błędów średnich poszczególnych grup pomiarów, a dobre wagowanie jest podstawowym postulatem prawidłowego wyrównania.

Na podstawie zależności podanych w poprzednich punktach, dotyczących interpretacji testowanego zbioru poprawek i z założenia o normalności rozkładów błędów tych (praktycznie) niezależnych wyznaczeń wynika, że wariancja testowanych poprawek jest sumą ich wariancji, a więc łatwo można na podstawie obliczonych wielkości oszacować błąd średni pomiaru kąta.

Oszacowano błędy średnie pomiaru kątów w poszczególnych blokach, jako pierwiastek kwadratowy z różnicy wariancji testowanych poprawek i wariancji wyznaczonych kątowych elementów orientacji z wyrównania z niską wagą kątów. Otrzymane oszacowania porównano ze zweryfikowanymi błędami średnimi *a priori* w standardowych końcowych wyrównaniach bloków. W 11 badanych blokach, przeciętna rozbieżność między tymi błędami, dla ω i ϕ była równa 10^{cc} , a maksymalna rozbieżność 23^{cc} . Dla błędu średniego kąta κ otrzymano przeciętną rozbieżność 4^{cc} , a maksymalną 20^{cc} . W porównaniu do przeciętnie uzyskiwanych w produkcji błędów średnich kątów, to jest $m\omega=m\phi=44^{\text{cc}}$ i $m\kappa=124^{\text{cc}}$, oszacowane błędy średnie mają wystarczające przybliżenie.

6. WNIOSKI

Skuteczność opracowanej metody przedwyrównawczego wykrywania błędów

grubych w pomiarze kątów jest zadowalająca, gdyż nie wykryte przez metodę błędy grube są nieliczne. Metodę warto stosować, gdyż pozwala ona zaoszczędzić sporo czasu w przypadku wystąpienia w pomiarach większej liczby pomyłek i błędów grubych.

Opracowana metoda przedwyrównawczego oszacowania błędów średnich pomiaru kątów daje zadowalające przybliżenie błędu. Stosowanie jej jest szczególnie przydatne, gdy wykonawcy podają za mało dokładne oszacowanie błędu, jak również, gdy systemy wyrównania nie mają funkcji weryfikującej wprowadzonych do wyrównania błędów średnich.

7. LITERATURA

- Adamczewski Z., 2005. *Teoria błędów dla geodetów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Ghilani C. D., 2010. *Adjustment computations: Spatial data analysis*. Wiley.
- Kavouras M., 1982. *On the Detection of Outliers and the Determination of Reliability in Geodetic Networks*. Technical Report No 87. Dept. of Surveying Engineering, Univ. of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada, <http://gge.unb.ca/Pubs/TR87.pdf>
- Kruck E., 2007. *Bingo 5.4, User's Manual*. Geoinformatics & Photogrammetric Engineering.
- Nowak E., 1986. *Teoretyczne i praktyczne aspekty geodezyjnego rachunku wyrównawczego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Prace naukowe, Geodezja, zeszyt 27.
- Ney B., 1976. *Metody statystyczne w geodezji*, Akademia Górniczo-Hutnicza, 1976.
- Łoś A., 1980. *Rachunek wyrównawczy*. tom II, PWN, 1980.
- 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, 2006, s. 609-618.
- Ziobro, J., 2011a. Wykorzystanie pomiaru GNSS/IMU w krajowych aerotriangulacjach, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 23, s. 531-539.
- Ziobro, J., 2011b. Integrated sensor orientation – ground control points for large-block aerotriangulation, *Geoinformation Issues*, 2011, vol.3, No 1 (3), s. 37-49.

PRE-ADJUSTMENT DETECTION OF GROSS ERRORS IN IMU MEASUREMENT FOR AEROTRIANGULATION

KEY WORDS: photogrammetry, aerotriangulation, pre-adjustment gross errors detection, IMU

Summary

Least squares method used in measurements adjustment is very sensitive to the occurrence of gross errors and mistakes in the data. In the event of greater number of gross errors, their harmful, imposing the effect, may be as both strengthen and eliminated by which the detection and location are difficult. In order to reduce the number and size of disturbances shall apply procedures of reliability

to the stage of measurement, and requires a preliminary analysis of the measurements, generally called pre-adjustment gross error detection. In aerotriangulation, where there are four groups of measurements with very different origin, the three of them have large systematic errors, which are determined in the adjustment, detection is cumbersome and lengthy, and as practice shows do not always fully effective.

Developed method uses two general ways of pre-adjustment gross errors detection. The first is the detection in several stages, which separates the influence of gross errors and mistakes in the data contained in each group of measurements so that they do not overlap each other. At the stage for this method are only outlier in the measurement of angles of orientation of images. The second is statistical testing of differences between the measured angles and angles of orientation of the images obtained from the adjustment without the use of measurement of the IMU. The method also allows estimation of the standard deviation of IMU measurement. The presented method is only a coarse approximation for more accurate methods. It is assumed that the method detects gross errors with large values. After the detection gross errors and mistakes, observations remaining in the calculations are of course re-tested during the final standard adjustment.

Effectiveness testing of method have been carried out on the 11 aerotriangulatinos large blocks images taken in the country in 2008-2010. The effectiveness of the method is satisfactory, because undetected outliers are rare. Also, the estimation of standard deviation of measurement of angles is satisfactory.

Dane autora:

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