

WYKORZYSTANIE POMIARU GNSS/IMU W KRAJOWYCH AEROTRIANGULACJACH

THE USE OF GNSS/IMU FOR NATIONAL AERIAL TRIANGULATION

Jan Ziobro

Instytut Geodezji i Kartografii

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria, aerotriangulacja, GNSS/IMU, precyzja, niezawodność

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wykorzystania w krajowych aerotriangulacjach nowych technologii, w szczególności technologii zintegrowanego orientowania sensorów. Celem badań było określenie stanu projektowania i realizacji aerotriangulacji w zakresie projektowania fotopunktów, uzyskiwanych precyzji i niezawodności pomiarów. Badania oparto o wyniki 19 produkcyjnych aerotriangulacji wykonanych w kraju w latach 2008–2010. Wybrane do badań bloki wykonano wielkoformatowymi kamerami cyfrowymi, przy czym więcej niż 90% zdjęć miało pomiary GNSS/IMU. Bloki opracowano ponownie za pomocą programu Bingo, w celu usunięcia zdarzających się oczywistych pomyłek oraz w celu ujednoczenia ocen statystycznych. Oceniono projektowanie fotopunktów – ich liczbę i rozmieszczenie w bloku. Dla badanej próby bloków określono zakres zmienności precyzji pomiarów, ich przeciętne wartości oraz porównano uzyskane wartości przeciętne z możliwościami obecnych technik pomiarowych. Określono również przeciętną niezawodność poszczególnych grup pomiarów w aerotriangulacji oraz przeciętne dokładności wyznaczenia współrzędnych terenowych punktów wiążących. Precyzje pomiarów w badanej próbie bloków nie odbiegają od tych uzyskiwanych w innych krajach. Wnioski z badań dotyczą zmiany wymagań odnośnie liczby fotopunktów w bloku, gdyż na ogół w ocenianych blokach jest ona o wiele za duża. Wnioski również dotyczą poprawy dwóch elementów technologii, a mianowicie: ściślejszego powiązania kalibracji sensorów pomiarowych z okresami stabilności ich błędów systematycznych oraz zwiększenia precyzji sygnalizacji fotopunktów i precyzji pomiaru sygnałów na zdjęciach. Wyniki i wnioski z badań będą mogły służyć formułowaniu warunków dla wykonywania aerotriangulacji oraz zostaną wykorzystane w badaniach symulacyjnych aerotriangulacji w celu określenia pożądanej liczby i gęstości fotopunktów, dla dużych bloków opracowywanych technologią zintegrowanego orientowania sensorów.¹

1. MOTYWACJE

Wykorzystanie w aerotriangulacji pomiaru środków rzutów i kątów orientacji zdjęć jest obecnie powszechne. Szersze użytkowanie zostało zapoczątkowane badaniami OEEPE „Integrated Sensor Orientation” przeprowadzonymi w latach 2000/2001, (Heipke, *et al.*, 2002a; Heipke, *et al.*, 2002b). Badania dotyczyły technologii *integrated sensor orientation*,

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

(ISO) – polski termin to – zintegrowana orientacja sensorów, (Jędrzycka, 2002). Główną cechą technologii jest wyznaczanie błędów systematycznych urządzeń (kalibracja) w trakcie produkcyjnych opracowań aerotriangulacji, co pozwala na pominięcie częstego kalibrowania urządzeń poprzez fotogrametryczny nalot pól testowych. Głównym celem i zaletą stosowania ISO jest dalsze ograniczenie wymaganej liczby fotopunktów w bloku, w odniesieniu do aerotriangulacji tylko z pomiarem współrzędnych środków rzutów (GNSS). Istotne ograniczenie wymaganej liczby fotopunktów stwarza nową jakość, gdyż nawet dla drobnych skal zdjęć staje się możliwe i opłacalne sygnalizowanie fotopunktów, które daje duży wzrost dokładności wyników. Również zaletą ISO jest możliwość ograniczenia liczby punktów wiążących, co przy dzisiejszym wysokim stopniu automatyzacji pomiaru na zdjęciach jest istotne przede wszystkim w trudnym terenie lub w przypadku niewystarczającego pokrycia zdjęciami. W okresie ostatnich dziesięciu lat przeprowadzono dużą liczbę badań dotyczącą bezpośrednio technologii ISO. Można tu wymienić badania dotyczące takich problemów jak:

- wydajność cyfrowych kamer
- stabilność błędów systematycznych IMU
- rola dodatkowych parametrów wyrównania w ISO
- wymagana liczba fotopunktów w ISO
- ograniczenie liczby punktów wiążących w ISO
- wzrost precyzji pomiaru elementów orientacji zdjęć
- metody i algorytmy.

W ostatnich paru latach przeprowadzono kompleksowe testy stanu technologii fotogrametrycznej z wykorzystaniem kamer cyfrowych, z udziałem wielu instytucji: w latach 2008/2010 test pod nazwą „The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation”, (Cramer, 2010), oraz w latach 2008/2010 test „Euro SDR project: Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images”, (Honkavaara, *et al.*, 2009). Wyniki badań z ostatnich kilku lat, jak i z ostatniego roku, (Jacobsen, 2011), pokazują ciągły rozwój technologii fotogrametrycznej, w tym wykorzystania kątów orientacji zdjęć.

Publikacje zagraniczne nie odnoszą się do ważnych problemów, z jakimi można się spotkać przy projektowaniu i realizacji aerotriangulacji. Do takich problemów istotnie wpływających na jakość, a które jak pokazała analiza krajowych aerotriangulacji przysparzają wykonawcom poważnych kłopotów, można zaliczyć takie zagadnienia jak: wymagana precyzja pomiaru kątów orientacji zdjęć; liczba i rozmieszczenie fotopunktów; wykrywanie błędów grubych w pomiarze kątów orientacji.

2. CELE BADAŃ

Projektowanie aerotriangulacji wymaga wiedzy o aktualnych możliwościach techniki i technologii. W kraju zdjęcia lotnicze i pomiar elementów orientacji wykonuje wiele firm za pomocą sprzętu o istotnie różniących się parametrach. Technologię ISO, na szerszą skalę produkcyjną, stosuje się u nas w kraju od 2008 roku. Warto tu również zaznaczyć, że w okresie ostatnich paru lat zaniechano użytkowania kamer analogowych, a standardem stały się wielkoformatowe fotogrametryczne kamery cyfrowe. Niepomyślną, a ważną okolicznością w krajowym wykonawstwie jest brak odpowiednich wymagań na jakość półproduktu, którym jest aerotriangulacja. Przegląd wymagań stawianych wykonawcom pokazuje, że nie oddają one celu aerotriangulacji, to znaczy nie odnoszą

się wprost do dokładności wyznaczanych niewiadomych, ani też nie odnoszą się do dokładności produktów jakim służą – do dokładności ortofotomapy czy numerycznego modelu terenu. Sprzeczne są również z korzyściami płynącymi ze stosowania technologii ISO – nie uwzględniają możliwości zmniejszenia wymaganej liczby fotopunktów i punktów kontrolnych.

W zagranicznych publikacjach nie przedstawiono badań, które wskazywałyby na minimalną wymaganą precyzję kątów w technologii ISO, w odniesieniu do obecnie uzyskiwanych precyzji innych grup pomiarów. Ocenę uzyskiwanych precyzji i dokładności można otrzymać poprzez opracowanie fotogrametrycznych pól testowych. Inną drogą do tego jest analiza produkcyjnych aerotriangulacji, która pozwala na określenie takich parametrów jak: precyzja poszczególnych grup pomiarów; rozkład zmienności tych precyzji na podstawie wielu bloków; dokładność niewiadomych; praktyczną efektywność stosowania ISO. Opisywane badania miały następujące cele:

- ocenę liczby i rozmieszczenia fotopunktów
- oszacowanie efektywności stosowania ISO
- sprawdzenie prawidłowości przeliczenia kątów orientacji do lokalnego układu współrzędnych
- określenie zakresu zmienności, w próbie badanych bloków, precyzji poszczególnych grup pomiarów oraz ich niezawodności w aerotriangulacji
- określenie zmienności, w próbie badanych bloków, dokładności współrzędnych terenowych punktów wiążących.

3. OPIS PRÓBY BLOKÓW WYBRANYCH DO BADAŃ

Operaty produkcyjnych aerotriangulacji pozyskano z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej oraz z samorządowych ośrodków dokumentacji. Pozyskano 23 operaty w formie elektronicznej. Aerotriangulacje te wykonano w latach 2008–2010, a można ocenić, że są to wszystkie aerotriangulacje z technologią ISO opracowane w kraju do końca pierwszego kwartału 2010 r. Do analizy zakwalifikowano 19 z nich, gdyż te spełniały przyjęte założenia badawcze, a mianowicie:

- zdjęcia wykonano wielkoformatowymi kamerami cyfrowymi – były to kamera DMC i trzy typy kamery UltraCam
- zdjęcia w 90% miały pomiary GNSS/IMU
- operaty zawierały kompletną informację pozwalającą na ponowne opracowanie aerotriangulacji.

Próba bloków wybrana do badań ma przytoczone niżej cechy:

- 5 bloków wstęgowych – trójszereg, o pokryciu poprzecznym 50%
- 14 bloków prostokątnych
- terenowy rozmiar piksela zdjęcia (GSD), zawiera się w przedziale 4÷34cm
- skala zdjęć waha się 1:6 600÷1:41 500
- liczba zdjęć w bloku wynosi 321÷4898
- większość bloków prostokątnych ma liczną osnowę fotopunktów.

4. METODYKA BADAŃ

Bloki produkcyjne zawierały szereg niedoskonałości, takich jak:

- brak kalibrowania sensora zdjęciowego
- brak weryfikacji błędów średnich a priori, szczególnie dotyczyło to pomiaru kątów
- zły podział pomiaru GNSS na profile gps
- nieusunięte błędy grube w pomiarach.

Dla poprawnego określenia precyzji pomiarów, ich niezawodności w sieci i wyznaczenia dokładności niewiadomych, bloki opracowano ponownie, w następujący sposób:

- do wyrównania bloków użyto programu Bingo
- użyto dodatkowych parametrów wyrównania – 24 wyrazowy model parametrów
- zastosowano blokowe kalibrowanie IMU
- wyznaczenie *shift i drift* w pomiarze GNSS przeprowadzono profilami gps
- eliminację obserwacji odstających wykonano metodą Baarda
- w trakcie kolejnych wyrównań weryfikowano błędy średnie a priori
- przeprowadzono przedwyrównawcze wykrywanie błędów grubych w GNSS oraz wykrywanie złego podziału na profile gps, metodą opisaną w (Ziobro, 2006).

Szczegółowe wyniki liczbowe przedstawiono w trzech tabelach na przeźroczech, podczas referowania tematu – są one zamieszczone w materiałach na internetowej stronie sympozjum.

5. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE

5.1. Ocena projektowania aerotriangulacji dotycząca liczby fotopunktów

Liczba fotopunktów w bloku na poważny wpływ na koszty wykonania aerotriangulacji, a technologia ISO daje możliwość dużego ograniczenia ich wymaganej liczby. Dla badanych bloków obliczono wskaźnik podający liczbę zdjęć przypadających na jeden fotopunkt. Pozwala to w sposób syntetyczny ocenić korzyść ekonomiczną wynikającą ze stosowania ISO. Z publikacji (Ziobro, 2008a), omawiającej stan krajowej aerotriangulacji dla zdjęć analogowych z technologią GNSS, oraz z publikacji dotyczącej projektowania fotopunktów dla takiej technologii stosowanej w kraju, (Ziobro, 2008b) wynika, że dla dużych prostokątnych bloków zadowalającą dokładność niewiadomych i homogeniczność tej dokładności można uzyskać dla wskaźnika $12 \div 20$ zdjęć przypadających na jeden fotopunkt, przy czym $1/3$ z nich to z-punkty. Z literatury dotyczącej ISO, (Jacobsen, 1999; Kremer, *et al.*, 2003; Reinartz, *et al.*, 2010) i z badań wykonanych przez autora, (jeszcze nie opublikowanych), wynika, że dla zdjęć cyfrowych i przy obecnie uzyskiwanych w kraju precyzjach pomiarów, wystarcza, aby wskaźnik ten dla technologii ISO i dla dużych bloków, zawierał się w granicach $50 \div 130$ zdjęć przypadających na jeden fotopunkt. Dla bloków wstęgowych wskaźnik powinien się zwierać w przedziale $30 \div 50$ zdjęć.

Wskaźnik pokazuje, że na 14 dużych prostokątnych bloków tylko w dwóch aerotriangulacjach wykorzystano możliwość ograniczenia liczby fotopunktów. Natomiast w 12 blokach liczba fotopunktów nawet wielokrotnie przekracza ich liczbę potrzebną do uzyskania zadowalającego wyniku – wskaźnik ma wartość $13 \div 29$ zdjęć. Dla bloków wstęgowych, wskaźnik pokazuje poprawne projektowanie osnowy.

5.2. Wzrost dokładności wyników z tytułu zastosowania ISO

Analizowano wyniki wyrównań aerotriangulacji z pomiarem GNSS/IMU oraz wyniki dodatkowych wyrównań bloków z użyciem pomiaru GNSS, (bez użycia pomiaru kątów IMU). Porównano przeciętne dla bloku odchylenie standardowe niewiadomej – kątów orientacji i współrzędnych terenowych punktów wiążących. Określono procentowy wzrost dokładności niewiadomych w wyrównaniu z GNSS/IMU, w odniesieniu do wyników z użyciem tylko GNSS.

Wzrost dokładności wyznaczenia kątów orientacji ω i φ waha się $8\pm 68\%$, a przeciętny wzrost wynosi 36%. Dla kąta κ zmienia się on w przedziale $0\pm 20\%$, a wartość przeciętna wzrostu wynosi 7%. Wzrost dokładności dla współrzędnych poziomych punktów wiążących przyjmuje wartości z przedziału $-34\pm 30\%$, a wartość przeciętna 6%. Warto zaznaczyć, że na 18 bloków, dla 13 z nich wzrost ten wynosi poniżej 10%. Dla rzędnej wzrost dokładności jest w przedziale $-9\pm 32\%$, a przeciętny wzrost 15%. Ogólnie mówiąc, uzyskane wzrosty dokładności są niewielkie.

5.3. Analiza występowania błędu zbieżności południków

Wartości pomiaru kątów i sama kalibracja mają wtedy znaczenie, jeżeli nie są obciążone błędem zbieżności południków (złym przeliczeniem kątów z układu w którym zostały pomierzone na układ współrzędnych lokalnych) – w przeciwnym razie precyzja pomiaru, przy blokowej kalibracji kątów, zostanie obciążona tym błędem. Z przeprowadzonej podczas badań analizy skutków takiego błędu wynika, że sąsiednie szeregi zdjęć nalatywane z przeciwnych kierunków, otrzymają w wyrównaniu poprawki do kątów κ o wartościach wielokrotnie przewyższających ich spodziewany błąd średni pomiaru, o znakach przeciwnych i wartościach bezwzględnych bliskich sobie. Taki przypadek wystąpił dla jednego z bloków, gdzie wartość błędu średniego a priori kąta κ , po weryfikacji, wyniosła 680^{cc} , wobec spodziewanej wartości około 100^{cc} . Analiza poprawek we fragmentach sąsiednich szeregów, wykazała systematyczne obciążenie $S_{\text{conv } \kappa} = 694^{\text{cc}}$ i przypadkowe $m_{\text{conv } \kappa} = 51^{\text{cc}}$. Z tego powodu wyniki tego bloku dotyczące oceny kątów nie zostały uwzględnione w obliczeniach wartości przeciętnych dla całej próby bloków.

5.4. Precyzja i niezawodność pomiaru kątów

Precyzja kątów ω i φ w badanej próbie bloków zmienia się od 13^{cc} do 160^{cc} , a wartość średnia wynosi 44^{cc} . Precyzja kąta κ zmienia się od 35^{cc} do 300^{cc} , a wartość średnia z próby wynosi 124^{cc} . Precyzja kątów ω i φ nie odbiega od tych podawanych w literaturze tematu, natomiast precyzja κ mogłaby być bliższa lepsza – bliższa 100^{cc} , (Blazquez, *et al.*, 2010; Applanix, 2009; IGI, 2009).

Przeciętne dla bloku wartości (globalne) wskaźnika lokalnej nadliczbowości pomiaru kąta wynoszą: dla ω i φ zmienia się on 0.30 ± 0.99 , a dla kąta κ 0.61 ± 1.00 . Dla wartości powyżej 0.90, pomiary praktycznie niewiele wnoszą ani do dokładności wyników, ani nie powodują wzrostu niezawodności sieci. Wartość wskaźnika powyżej 0.90 występuje w zdecydowanej większości bloków. Względnie wysoka precyzja pozostałych grup pomiarów w stosunku do precyzji pomiaru kątów, skutkuje niewielkim wpływem tego pomiaru na wyniki aerotriangulacji, a wyraża się to bardzo wysokim wskaźnikiem globalnej nadlicz-

bowości pomiaru kątów. Również nadmierna liczba fotopunktów w bloku skutkuje podobnie jak poprzednio podana przyczyna.

5.5. Precyzja i niezawodność współrzędnych środków rzutów

Błędy poziomych współrzędnych przyjmują wartości $0.7\div 14.0$ cm, wartość średnia dla próby bloków wynosi 5.8 cm. Błąd mZ_0 przyjmuje wartości $0.6\div 6.0$ cm, a wartość średnia 2.9 cm. Warto tu odnotować wysoki wzrost precyzji pomiaru w odniesieniu do wyników otrzymanych, w podobnym do obecnego badaniu, wykonanym w ubiegłych latach dla zdjęć analogowych, (Ziobro, 2008a), gdzie błąd średni dla wszystkich trzech współrzędnych wyniósł 11 cm.

Niezawodność pomiaru współrzędnych w całej próbie bloków jest dobra – przeciętna wartość wskaźnika wynosi: dla współrzędnych poziomych 0.46, a dla rzędnej 0.66.

5.6. Precyzja i niezawodność współrzędnych tłowych

Błąd średni tłowych dla badanych bloków zmienia się $0.8\div 2.4$ μm , a wartość przeciętna wynosi 1.4 μm . W porównaniu do przeciętnej precyzji uzyskiwanej dla zdjęć analogowych, określonej w badaniach przedstawionych w (Ziobro, 2010), wynoszącej 5.0 μm , precyzja pomiaru dla zdjęć cyfrowych jest ponad trzykrotnie większa. Uzyskana precyzja pomiaru tłowych nie odbiega istotnie od wyników otrzymywanych w innych krajach, (Jacobsen, *et al.*, 2010). Niezawodność pomiaru tłowych jest dobra we wszystkich badanych blokach – przeciętna wartość wskaźnika nadliczbowości wynosi $0.51\div 0.73$, przeciętnie 0.61.

5.7. Precyzja i niezawodność współrzędnych fotopunktów

W blokach o większej skali zdjęć, gdzie fotopunkty zostały zasygnalizowane, (8 bloków), błędy średnie mX i mY zmieniają się w przedziale $0.32\div 0.72$ GSD, a przeciętnie 0.58 GSD. Błąd średni mZ , dla tych bloków zmienia się w przedziale $0.50\div 1.70$ GSD, a średnio wynosi 0.98 GSD. Precyzja poziomej współrzędnej równa 0.58 GSD jest niższa niż należałoby się spodziewać dla fotopunktów sygnalizowanych. Dla bloków o mniejszych skalach zdjęć, (11 bloków), o fotopunktach naturalnych, błędy mX i mY zmieniają się w przedziale $0.43\div 1.25$ GSD, przeciętnie 0.69 GSD. Błąd mZ zmienia się w przedziale $0.46\div 1.82$ GSD, a średnio wynosi 1.03 GSD.

Wskaźnik przeciętnej nadliczbowości dla współrzędnych poziomych fotopunktów zmienia się w przedziale $0.63\div 0.95$, a jego średnia wartość wynosi 0.82. Warto podkreślić, że dla bloków w mniejszych skalach wskaźnik ten osiąga wartość 0.90 i większą. Jest to spowodowane przede wszystkim niepotrzebnie dużą liczbą fotopunktów w bloku, jak i względnie bardzo wysokimi precyzjami pomiaru środków rzutów i tłowych, w stosunku do precyzji współrzędnych poziomych niesygnalizowanych fotopunktów. Niezawodność rzędnej jest wysoka – przeciętny wskaźnik nadliczbowości przyjmuje wartości z przedziału $0.48\div 0.89$, a średnia dla próby bloków ma wartość 0.73.

5.8. Dokładność wyznaczenia współrzędnych terenowych punktów wiążących

W relacji do GSD przeciętne odchylenie standardowe współrzędnej poziomej wynosi: $MX/MY = 0.2$ GSD, $MZ = 0.7$ GSD. W porównaniu do wyników uzyskiwanych dla analogowych zdjęć skanowanych, jest to duży wzrost dokładności, szczególnie współrzędnych poziomych. Podane w wynikach badań 21 dużych bloków, (z pomiarem GNSS), o zdjęciach analogowych, (Ziobro, 2010), dokładności punktów wiążących, wyrażone w terenowej wielkości piksela skanowania zdjęcia, wyniosły odpowiednio: $MX/MY = 0.4$ pix, $MZ = 0.9$ pix.

W badanych blokach, pozostawiono w sieci zbyt dużą liczbę punktów wiążących obserwowanych jedynie na dwóch lub trzech zdjęciach, które nic nie wnoszą do konstrukcji sieci, natomiast obniżają przeciętną dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów wiążących, szczególnie obniżają dokładność wyznaczenia rzędnej punktu wiążącego, co znajduje wyraz w dużej różnicy między dokładnością MX/MY a dokładnością MZ .

6. WNIOSKI

Niewłaściwe projektowanie fotopunktów i nie wykorzystanie zalet technologii ISO, w większości badanych bloków, zostało spowodowane zbyt dużymi wymaganiami dotyczącymi liczby fotopunktów w bloku. Również wykonawcy nie zawsze nadążają za rozwojem techniki, co przede wszystkim skutkuje zbyt dużym kosztem wykonania aerotriangulacji.

Precyzje pomiaru kątów i pozostałych grup pomiarów nie odbiegają istotnie od tych podawanych w literaturze. Można jednak wymienić tu dwa ważne elementy technologii aerotriangulacji, które wpływają na precyzje pomiarów, a które wymagają istotnej poprawy. Pierwszy to konieczność wykonywania kalibrowania sensora zdjęciowego w każdej aerotriangulacji oraz ścisłe powiązanie kalibracji sensorów z okresem stabilności ich błędów systematycznych. Drugim elementem wymagającym poprawy są stosowane obecnie metody pomiaru sygnałów na zdjęciach i precyzja sygnalizacji, szczególnie dla dużych skal zdjęć – nie są już one odpowiednie dla ciągle rosnącej rozdzielczości zdjęć cyfrowych, co uwidacznia się we względnie niskiej precyzji współrzędnych fotopunktów sygnalizowanych.

7. LITERATURA

Applanix, 2009, POS AV specifications.

http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/POSAV_SPECS.pdf

Blázquez M., Colomina I., 2010, On the Role of Self-Calibration Functions in Integrated Sensor Orientation, International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2010. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/Eurocow2010/euroCOW2010_files/papers/05.pdf

Cramer M., 2010. The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Over-view and Test Design. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2010/01-PFG02-2010-Ueberblick-FinalVersion-20100112.pdf>

Haala N., Cramer M., Jacobsen K., 2010. The German camera evaluation project results from the geometry group.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part1/08/08_04_Paper_159.pdf

Heipke C., Jacobsen K., Wegmann H., Andersen Ø, Nilsen B., 2002a. Test goals and test set up for the OEEPE test “Integrated Sensor Orientation”, in: Heipke C., Jacobsen K.,

- Wegmann H.(Eds.).
http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/1_Heipke_et_al..pdf
- Heipke C., Jacobsen, K., Wegmann H., 2002b. Analysis of the results of the OEEPE test “Integrated sensor orientation”, Proceedings of OEEPE workshop “Integrated sensor Orientation”.
<http://www.gtbi.net/export/sites/default/GTBiWeb/soporte/descargas/AnalisisOeepeOrientacionIntegrada-en.pdf>
- IGI, 2009, AEROcontrol specifications. <http://www.igi.eu/aerocontrol.html>
- Jacobsen K., 1999, Combined Bundle Block Adjustment with Attitude Data, ASPRS Annual Convention Proceedings, Portland 1999
http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/jac_99_cbba_adata.pdf
- Jacobsen K., Cramer M., Ladstädter R., Ressel C., Spreckels V., 2010. DGPF-Project: Evaluation of Digital Photogrammetric Camera Systems – Geometric Performance. http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/PFG-Geometrie-08012010.pdf
- Jacobsen K., 2011. Recent Developments of Digital Cameras and Space Imagery, GIS Ostrava 2011. <http://gis.vsb.cz/gis2011/abstracts/jacobsen.pdf>
- Jędrzycka R., 2002. Pomiar GPS/IMU, a wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 12, Białobrzegi 2002.
- Kremer, J., Kruck, E., 2003, Integrated Sensor Orientation – Two Examples to show the Potential of simultaneous GPS/IMU and Image Data Processing, International Workshop Theory, Technology and Realities of Inertial / GPS Sensor Orientation, ISPRS WG I/5, Castelldefels, Spain, September 2003.
http://www.isprs.org/commission1/theory_tech_realities/pdf/p13_s4.pdf
- Prószyński W., Kwaśniak M., 2002. *Niezawodność sieci geodezyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Reinartz, P., Smith, M. J., Kokkas, N., Park, D. W. G., 2010, An Integrated Sensor Orientation System for Airborne Photogrammetric Applications.
http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/EuroCOW2010/euroCOW2010_files/papers/31.pdf
- 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., 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, pp. 21–24.
- Ziobro J., 2008b. Przesłanki projektowania aerotriangulacji z fotopunktami niesygnalizowanymi, *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, 2008, tom LIV, zeszyt 112, s. 51–74.
- Ziobro J., 2010. Niezawodność współrzędnych tłoowych w aerotriangulacji, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 21., Wrocław 2010, s. 513–521.

THE USE OF GNSS/IMU FOR NATIONAL AERIAL TRIANGULATION

KEY WORDS: photogrammetry, aerial triangulation, GNSS/IMU, precision, reliability

SUMMARY: The results of research on the use of new technologies in national aerotriangulations have been presented, in particular the technology of integrated sensor orientation. The aim of this study was to determine the state of design and implementation of aerotriangulations in respect to GCP

design and obtained precision and reliability of measurements. The study was based on the results of 19 actual aerotriangulations made in the country in the years 2008–2010. The blocks selected for study were made with a large-format digital camera and more than 90% of images had measurements of GNSS / IMU. They were calculated again with Bingo software to remove the occasional factual errors and to standardize the statistical evaluations. The designs of GCPs were rated by considering their number and distribution in the block. For the examined sample of blocks the range of variability of the precision of measurements was determined together with its mean values. The obtained mean values of the precision were compared with the capabilities of current measurement techniques. Also the average reliability of individual groups of measurements in aerotriangulation was determined and the average accuracy of determination of the ground coordinates of tie points. The precisions of measurement in the sample blocks do not differ from those obtained in other countries. The conclusions of studies concern changes in requirements for the number of ground control points in the block because in rated blocks, this number is usually far too high. The conclusions also postulate to improve two components of the technology, namely: one – a closer link between the calibration of measuring sensors with the periods of stability of their systematic errors and two – the increase of the precision of target of GPC and the precision of measurement of the targeted GCP in the images. The results and conclusions of the research will be able to serve in formulating conditions for performing aerial triangulation and will be used in simulation studies of aerial triangulation to determine the desired number and density of GCP for large blocks calculated with the use of the technology of integrated sensor orientation.

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