

JAN ZIOBRO

Instytut Geodezji i Kartografii

PRZESŁANKI PROJEKTOWANIA AEROTRIANGULACJI Z FOTOPUNKTAMI NIESYGNALIZOWANYMI*

ZARYS TREŚCI: Przedstawiono zasady projektowania aerotriangulacji bloków z fotopunktami niesygnalizowanymi oraz podano parametry projektowania dla dwóch skal zdjęć lotniczych często stosowanych w kraju. Proces projektowania opisano w aspekcie niezawodności całej sieci, niezawodności poszczególnych grup pomiarów oraz możliwej do uzyskania dokładności niewiadomych i homogeniczności dokładności. Podano sposób projektowania dodatkowej osnowy fotopunktów w przypadkach nierzadko zdarzającego się braku pomiaru środków rzutów dla niektórych szeregów bloku.

SŁOWA KLUCZOWE: aerotriangulacja, projektowanie, precyzja, niezawodność, fotopunkty niesygnalizowane, symulacja,

1. WSTĘP

Zachętą do badań były wyniki przeprowadzonej przez autora obszernej analizy produkcyjnych aerotriangulacji opracowanych w kraju w ciągu ostatnich kilku lat. Analiza obejmowała 38 bloków o skalach zdjęć 1:13 000, 1:19 000 i 1:26 000. Były to na ogół duże prostokątne bloki, z fotopunktami niesygnalizowanymi, przy czym 25 z tych bloków miało pomiar środków rzutów. Analizowano niezawodność trzech grup pomiarów występujących w sieci i ich precyzję, liczbę i jakość wiązań oraz liczbę i rozmieszczenie fotopunktów. Wyniki analizy wykazały, że w projektowaniu sieci stosowano dość różne kryteria, czasami niejasne, szczególnie dotyczyło to bloków z pomiarem środków rzutów.

Motywnem podjęcia badań były również wyniki analizy wymagań stawianych wykonawcom aerotriangulacji, które określone są w warunkach na wykonanie robót fotogrametrycznych. Wymagania te są bardzo ogólnikowe i nie zawierają podstawowych warunków takich jak: oczekiwana

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

dokładność wyników aerotriangulacji, wymagana niezawodność pomiarów czy też spełnienie podstawowych kryteriów wiarygodności otrzymanych wyników. Kryteriami liczbowymi, które można spotkać w tych wymaganiach, są: błąd średni typowego spostrzeżenia – na ogół wymagany jest błąd nie większy niż 8 μm — oraz wielkość średniej kwadratycznej poprawki do współrzędnej fotopunktu. Są to kryteria wysoce niewystarczające, niewiele mówiące o oczekiwanej jakości produktu.

Innym, dość często występującym wymaganiem jest konieczność projektowania punktów kontrolnych. W zbadanych blokach produkcyjnych fotopunkty i punkty kontrolne były identyfikowanymi szczegółami terenowymi, których dokładność współrzędnej była nawet trzykrotnie niższa od dokładności współrzędnej wyznaczonego punktu wiążącego. Niesygnalizowane punkty kontrolne chronią opracowanie przed omyłkami i błędami grubymi, ale uzyskane różnice współrzędnych na tych punktach nie mogą stanowić miary dla dokładności aerotriangulacji.

Kolejnym argumentem przemawiającym za badaniami niezawodności i dokładności bloków z niesygnalizowanymi fotopunktami jest to, że publikacje o tematyce projektowania aerotriangulacji odnoszą się do bloków z sygnalizowaną osnową (Ackerman et al., 1993; Barrot et al., 1994; Li et al., 1989; Ebadi, 2006; Passini et al., 2002). Wysoka dokładność współrzędnych, nawet o rząd większa od dokładności fotopunktów niesygnalizowanych, daje dużo większą dokładność wyników i istotnie zmienia globalną niezawodność grup pomiaru, szczególnie niezawodność współrzędnych fotopunktów i środków rzutów. Można więc spodziewać się, że nie wszystkie wnioski z tych publikacji mają charakter ogólny.

2. CEL BADAŃ

Celem ogólnym badań było określenie podstawowych wymagań projektowania aerotriangulacji bloków z fotopunktami niesygnalizowanymi i określenie możliwej do uzyskania jakości dla typowych bloków ostatnio opracowywanych w kraju. Wyniki tych badań będą mogły dać podstawę standardu jakościowego, którego brakuje zarówno w krajowych przepisach technicznych, jak i w praktyce produkcyjnej.

Za cel badań wybrano bloki o skali zdjęć 1:13 000 i 1:26 000, wykonane kamerą o odległości obrazu 150 mm, pokryciu 60/30 %, z pomiarem środków rzutów i z fotopunktami niesygnalizowanymi. Wielkość bloku przyjęto z praktyki produkcyjnej, gdzie przeciętna wielkość podbloku aerotriangulacji, który był podstawą dalszych opracowań fotogrametrycznych – służących wytworzeniu numerycznego modelu terenu i ortofotomapy, wynosiła około 400 zdjęć. W produkcji większe bloki są tworzone z połączenia podbloków tej wielkości, już po wykonaniu wymienionych opracowań fotogrametrycznych.

Pierwszym szczegółowym celem badań było określenie minimalnej liczby wiązań fotogrametrycznych zapewniających dobrą niezawodność całej

aerotriangulacji i akceptowalną niezawodność poszczególnych grup pomiarów występujących w sieci.

Drugim szczegółowym celem było określenie liczby i rozmieszczenia fotopunktów w bloku, które zapewniałyby możliwie dużą i jednolitą dokładność wyników. Pozwoli to na wyznaczenie możliwej do osiągnięcia dokładności wyników w takich blokach i tym samym na sformułowanie, lepszych niż dotąd stosowane, kryteriów oceny aerotriangulacji.

Trzecim celem było podanie sposobu uzupełnienia osnowy dodatkowymi fotopunktami w przypadku nierzadko zdarzającego się braku pomiaru środków rzutów dla niektórych szeregów bloku. Bez dodatkowej osnowy taki brak powodowałby znaczny, lokalny spadek dokładności, szczególnie dla rzędnej Z punktów wiążących. W praktyce produkcyjnej postępowano w różny sposób.

3. METODA BADAŃ

Badania przeprowadzono metodą prób i błędów, porównując wyniki szeregu wariantów aerotriangulacji. Warianty aerotriangulacji utworzono poprzez symulację pomiarów dla aerotriangulacji i symulację wyrównania bloku. Zastosowana w badaniach symulacja pozwalała na ocenę wariantu aerotriangulacji za pomocą następujących parametrów:

- globalnej nadliczbowości sieci;
- lokalnej nadliczbowości pomiarów;
- globalnej nadliczbowości grup pomiarów występujących w sieci;
- błędu średniego poszczególnych niewiadomych;
- przeciętnych błędów średnich grup niewiadomych.

3.1. Symulacja pomiaru

Symulację pomiaru punktów wiążących przeprowadzono obserwując, z niższą dokładnością, dodatkowy zbiór punktów w produkcyjnej, standardowej aerotriangulacji. Wyznaczenie współrzędnych terenowych dodatkowych punktów uzyskano wyrównując łącznie oba pomiary, przy czym dokładniejsze punkty wiążące występowały tu jako fotopunkty, których współrzędne wyznaczono wcześniej w standardowym wyrównaniu i przy błędzie pomiaru dodatkowych punktów wiążących pięciokrotnie większym niż standardowy pomiar, to jest około 20 μm . Tak więc pomiary dodatkowe nie wywarły wpływu na elementy orientacji zewnętrznej zdjęć, a współrzędne terenowe dodatkowych punktów wiążących faktycznie zostały wyznaczone fotogrametrycznym wielokrotnym wcięciem w przód. Dokładność wyznaczenia współrzędnych terenowych tych punktów odpowiadała wyżej podanej dokładności pomiaru współrzędnych tłowych tych dodatkowych punktów wiążących i zupełnie wystarczała do przybliżenia niewiadomych.

Wartości elementów orientacji zewnętrznej zdjęć i pomiar środków rzutów przyjęto ze standardowej aerotriangulacji. Współrzędne terenowe

fotopunktów, w symulacji poszczególnych wariantów aerotriangulacji, wzięto ze zbioru przybliżonych wartości współrzędnych terenowych wszystkich wiązań.

Symulowany blok był prostokątny, złożony z 12 szeregów po 32 zdjęcia. W pozycjach Grubera w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami zaobserwowano po 6 punktów wiążących. Nie symulowano punktów wiążących szeregi pomierzonych jedynie na 4 zdjęciach, gdyż zdecydowanie największy wpływ na nadliczbowość pomiarów w całej sieci mają punkty zaobserwowane na 5 lub 6 zdjęciach. W pozostałych pozycjach Grubera – środki zdjęć, końce szeregów i brzeg bloku wzdłuż szeregów - zaobserwowano po od 3 do 6 punktów wiążących, a liczba tych punktów była taka sama we wszystkich wariantach aerotriangulacji i wynosiła 1600. W pomiarze zastosowano system numeracji wiązań pozwalający na uzyskanie w prosty sposób wariantów aerotriangulacji z różną liczbą wiązań w poszczególnych pozycjach Grubera.

Utworzono sześć wariantów pomiaru wiązań między szeregami zdjęć z różną liczbą punktów wiążących w pozycji Grubera w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami. W tych wariantach liczba punktów wiążących szeregi zmieniała się od 347 do 2044, przy czym ponad 90% z nich to było punktami pomierzonymi na 5 i 6 zdjęciach. Dla poszczególnych celów badań utworzono warianty aerotriangulacji dla dwóch skal zdjęć lotniczych oraz warianty z różnym rozmieszczeniem fotopunktów.

Tak skonstruowana sieć miała drobne nieregularności wynikające z rzeczywistego nalotu fotogrametrycznego i z niewielkich odstępstw od schematu obserwacji fotogrametrycznych spowodowanych występowaniem kompleksów leśnych w obszarze bloku.

W badaniach symulacyjnych projektowania sieci istotnym czynnikiem wpływającym na wiarygodność wniosków są użyte błędy średnie poszczególnych grup pomiarów. Dotyczy to wniosków w zakresie konstrukcji sieci, dokładności wyników i niezawodności pomiarów. Stosowanie konkretnych wartości powinno być dobrze uzasadnione, zarówno w odniesieniu do aktualnie osiągniętych w produkcji precyzji pomiaru, jak i do precyzji, które będą uzyskiwane za pomocą nowych technologii pomiaru.

W omawianych symulacjach użyto precyzje pomiarów uzyskiwane w pracach produkcyjnych wykonanych w kraju w ciągu ostatnich kilku lat. Wartości precyzji pomiarów zastosowane w symulacjach były przeciętnymi wartościami, określonymi na podstawie obszernych badań 38 bloków (łącznie około 40 tys. zdjęć lotniczych), w tym bloków o skalach zdjęć lotniczych, które są przedmiotem tych badań. Sposób określenia przeciętnych precyzji został podany w (Ziobro, 2006, 2007, 2008). W tabeli 1 zostały podane przeciętne wartości precyzji wyznaczone w badaniach.

Tabela 1. Przeciętne wartości precyzji pomiarów osiągnięte w produkcji

Skala zdjęć lotniczych	Błąd średni pomiaru			
	współrzędne fotopunktów niesygnalizowanych [cm]		współrzędne tłowe [μm]	współrzędne środków rzutów [cm]
	MX / MY	MZ	x / y	MXo / MYo / MZo
1:13 000	17.8	30.5	5.0	10.7
1:26 000	46.2	35.0	5.0	10.7

3.2. Symulacja wyrównania

Do symulacji wyrównania aerotriangulacji został użyty program BINGO w wersji 5.3. Na podstawie przybliżonych wartości pomiarów i przybliżonych wartości niewiadomych oraz błędów średnich a priori grup pomiarów program oblicza: lokalną nadliczbowość pomiarów, która jest miarą niezawodności wewnętrznej, zgodnie z metodą prof. W. Baarda – data snooping; parametry elipsoidy błędu średniego niewiadomych; błędy średnie niewiadomych.

Program nie wyznacza niezawodności zewnętrznej pomiarów, gdyż jest to praktycznie niemożliwe ze względu na wymagany ogromny nakład obliczeniowy (Kruck, 2006). Znajomość zewnętrznej niezawodności, określającej stopień zniekształcenia niewiadomych przez niewykryte błędy grube, nie jest praktycznie przydatna w projektowaniu sieci, a powszechnie stosowana jest niezawodność wewnętrzna (Prószyński et al., 2002). Należy również zauważyć, że istnieje ścisły związek między niezawodnością wewnętrzną a niezawodnością zewnętrzną, gdzie wysoka niezawodność wewnętrzna prowadzi do wysokiej niezawodności zewnętrznej, (Cooper et al., 1988; Prószyński et al., 2002)

Program symulacji nie uwzględnia dodatkowych parametrów kompensujących błędy systematyczne zdjęć i różnice wynikające z różnych układów współrzędnych, gdyż nie są znane a priori ani postać, ani wartości współczynników przy wyrazach wielomianów dodatkowych parametrów.

3.3. Ocena niezawodności pomiarów

W literaturze dotyczącej projektowania aerotriangulacji najczęściej jest stosowana klasyfikacja poziomu niezawodności wewnętrznej (Barrot et al., 1994; Ebadi, 2006; Li et al., 1989) opracowana przez prof. W. Foerstnera (Foerstner, 1985). W tej klasyfikacji „dobremu” poziomowi niezawodności wewnętrznej odpowiada wartość 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). W instrukcjach na wykonanie aerotriangulacji można znaleźć wymaganie, aby ogólna nadliczbowość aerotriangulacji dla bloków prostokątnych była większa od 0.50 (Ministry of Agriculture and Lands, 2008).

W klasyfikacji podanej w (Foerstner, 1985) jako „akceptowalny” poziom niezawodności podany jest przedział wartości nadliczbowości od 0.10 do 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.

Na podstawie lokalnej nadliczbowości pomiarów wyznaczono globalną nadliczbowość poszczególnych trzech grup pomiarów (dla poszczególnych współrzędnych), liczoną jako średnia arytmetyczna z wartości lokalnych nadliczbowości.

3.4. Ocena dokładności wyników

Z dwóch podstawowych grup niewiadomych do badania dokładności wyników poszczególnych wariantów aerotriangulacji bardziej nadają się współrzędne punktów wiążących niż elementy orientacji zewnętrznej zdjęć, gdyż lepiej odwzorowują zmienność dokładności w obszarze bloku. W analizie ograniczono się do punktów wiążących szeregi, gdyż są one dokładniej wyznaczane niż punkty wiążące obserwowane tylko w jednym szeregu z powodu obserwacji na dwukrotnie większej liczbie zdjęć. W badanych blokach błędy średnie współrzędnych takich wiązań były mniejsze o kilkanaście procent.

W badaniach analizowano elipsoidy błędu średniego współrzędnych punktów wiążących i stwierdzono, że mają one osie równoległe do osi układu współrzędnych. Sprawdzono to poprzez analizę wielkości kowariancji współrzędnych punktu wiążącego (Prószyński, 1990). Wartości średnie odpowiednich trzech kowariancji z całego bloku (tylko dla punktów wiążących szeregi), obliczone dla jednego z badanych wariantów aerotriangulacji, wyniosły $Q_{xy} = 0.007$, $Q_{xz} = 0.033$, $Q_{yz} = 0.034$, oznacza to, że kąty między osiami elipsy a odpowiednimi osiami układu współrzędnych są małe. Można to również sprawdzić graficznie, gdyż program BINGO daje przestrzenną prezentację elipsoid błędów średniego punktów wiążących. Tak więc w analizie dokładności wyników można było ograniczyć się do analizy błędów średniego współrzędnej.

Przeprowadzono analizę różnic wielkości błędów średnich współrzędnych poziomych punktów wiążących szeregi MX i MY. Wynika z niej, że błędy te były praktycznie równe. Przeciętna (średnia kwadratyczna) względna różnica tych błędów była mniejsza niż 5%.

W projektowaniu sieci dąży się do zapewnienia izotropowości i homogeniczności dokładności wyników. Izotropowość – jednakowa dokładność wszystkich trzech współrzędnych wyznaczanego punktu – w badanych typach bloków nie jest możliwa do uzyskania, co jest uwarunkowane kształtem bloku zdjęciowego i osiąganymi w produkcji precyzjami poszczególnych grup pomiarów. W zbadanych blokach produkcyjnych dokładność wyznaczonej rzędnej Z była nawet dwuipółkrotnie mniejsza od dokładności współrzędnych poziomych.

W badanych blokach można dążyć do uzyskania homogeniczności – to jest do jednakowej dokładności poszczególnych współrzędnych w całym bloku – poprzez odpowiednią liczbę i rozmieszczenie fotopunktów. W badaniu dotyczącym dokładności wyników analizie poddano sześć wariantów rozmieszczenia fotopunktów w bloku dla wymienionych wcześniej dwóch skal zdjęć lotniczych.

3.5. Brak pomiaru środków rzutów dla niektórych szeregów zdjęć

W pierwszej części badania określono wpływ braku pomiaru środków rzutów dla kilku szeregów zdjęć na przeciętną dokładność wyników i homogeniczność dokładności. Symulację przeprowadzono dla braku pomiaru od jednego do czterech sąsiednich szeregów znajdujących się w środku bloku.

W drugiej części badania poszukiwano liczby i rozmieszczenia dodatkowych fotopunktów, które byłyby ekwiwalentem brakujących pomiarów. Określenie dodatkowej osnowy przeprowadzono drogą kolejnych przybliżeń – poprzez zwiększanie liczby fotopunktów aż do uzyskania dokładności i homogeniczności bliskiej tej, którą otrzymano przy kompletnym pomiarze środków rzutów. Kierowano się przy tym charakterem spadku dokładności, który został określony w pierwszej części badania.

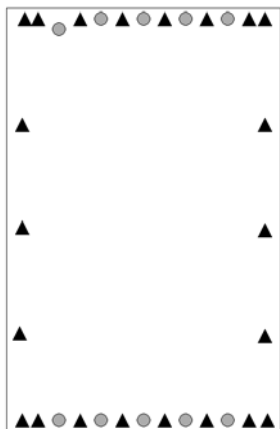
4. BADANIA ZALEŻNOŚCI MIĘDZY LICZBĄ WIĄZAŃ A NIEZAWODNOŚCIĄ POMIARÓW

4.1. Opis badań

Utworzono po sześć wariantów aerotriangulacji dla bloków w dwóch skalach zdjęć lotniczych, z liczbą punktów wiążących do 1 do 6 w pozycjach Grubera w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami. W pozostałych pozycjach Grubera liczba i rozmieszczenie punktów wiążących były jednakowe we wszystkich wariantach. Wszystkie zdjęcia miały pomiar współrzędnych środka rzutów.

W wariantach występowała jednakowa osnowa fotopunktów przedstawiona na rysunku 1. Osnowa ta została wybrana ze względu na dużą homogeniczność dokładności wyniku – dokładności współrzędnych – punktów wiążących szeregi. Podobne rodzaje osnowy występują w krajowej praktyce

produkcyjnej i w literaturze tematu. Na rysunku 1 trójkątem został oznaczony pełen fotopunkt XYZ, a kółkiem fotopunkt Z. Fotopunkty zostały pomierzone w pokryciu porzecznym na 4 zdjęciach, z wyjątkiem fotopunktów narożnych, które pomierzono na 2 zdjęciach oraz tych na bokach bloku, które pomierzono na 3 zdjęciach.



Rys. 1. Osnowa „22+10”

Dla zilustrowania homogeniczności na rysunkach 6 i 7 (w dalszej części tekstu) przedstawiono rozkład błędu średniego współrzędnej X i rzędnej Z punktu wiążącego szeregi w obszarze całego bloku, dla wyników dla skali zdjęć 1:26 000, z trzema punktami wiążącymi w sześciokrotnym pokryciu. Skala z lewej strony rysunku i legenda dla izolacji z prawej pokazują wielkość błędu w metrach. Powierzchnie i izolacje interpolowano na podstawie błędu 1038 punktów wiążących szeregi zdjęć. Należy stwierdzić, że rozkład błędu współrzędnych w poszczególnych wariantach, i dla obu skal zdjęć, miał podobny charakter. Na rysunkach 6 i 7 można dostrzec, że najniższą dokładność osiągnięto na brzegach bloku, mimo że tu właśnie znajdują się fotopunkty. Zmniejszenie wpływu tego znanego zjawiska na jakość produktów fotogrametrycznych, uzyskuje się przez projektowanie (między innymi z tego powodu) w nalocie fotogrametrycznym dodatkowych zdjęć w szeregu i dodatkowych szeregów wychodzących poza granice fotografowanego obiektu.

Obliczono średnie odchylenia od przeciętnej wartości błędu w całym bloku (średnia kwadratyczna), dla współrzędnych X i Z, dla występujących w tym badaniu 12 wariantów aerotriangulacji. Obliczono również wskaźnik zmienności V – iloraz odchylenia do wartości przeciętnej, który jest miarą pozwalającą porównać rozproszenie dla zbiorów o różnej wartości przeciętnej, a tym samym porównać poziomy homogeniczności wyników.

Wskaźniki zmienności mieściły się w przedziale od 8% do 13%. Można, więc powiedzieć, że dokładność w tych wariantach była homogeniczna, a wzrost dokładności związany ze zwiększeniem liczby wiązań był równomierny w całym obszarze bloku.

4.2. Wyniki badań

W tabelach 2 i 3 zamieszczono wyniki symulacji aerotriangulacji ze zmienną liczbą punktów wiążących w pozycjach Grubera w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami. Ponad 90% tych punktów było pomierzonych na 5 lub 6 zdjęciach. Lokalna nadliczbowość pomiaru współrzędnych tłowych tych punktów znajdowała się w przedziale od 0.50 dla punktów obserwowanych na

4 zdjęciach, do 0.80 dla punktów obserwowanych na 6 zdjęciach. W tabelach podano globalną nadliczbowość dla każdego z sześciu wariantów:

- wszystkich pomiarów w aerotriangulacji;
- współrzędnych tłowych wszystkich punktów w bloku;
- współrzędnych fotopunktów;
- współrzędnych środków rzutów.

Lokalne nadliczbowości współrzędnych tłowych x i y danego punktu wiążącego były praktycznie równe sobie, dlatego w tabelach podano jedną wartość globalnej nadliczbowości. Ta równość występowała także dla nadliczbowości współrzędnych poziomych X i Y fotopunktów i dla nadliczbowości współrzędnych X i Y środków rzutów. W tabelach zamieszczono przeciętną dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów wiążących szeregi (średnia arytmetyczna). Ponieważ, jak już wcześniej podano w punkcie 3.3, błędy średnie MX i MY nie różniły się więcej niż o 5%, podano jedną wartość.

Wyniki pozwalają zauważyć, że „dobrą” niezawodność wewnętrzną aerotriangulacji, to jest nadliczbowość $r > 0.50$, otrzymano w wariantach z 3 lub więcej punktami wiążącymi w pozycji Grubera w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami (tabele 2 i 3, kolumna 2). Liczba wiązań między szeregami najbardziej wpływała na globalną nadliczbowość poziomych współrzędnych środków rzutów dla skali zdjęć 1:26 000 (tabela 3, kolumna 6), która osiągnęła „akceptowalną” niezawodność, $r > 0.25$, również przy 3 punktach wiążących.

Tabela 2. Niezawodność pomiarów przy zmiennej liczbie wiązań między szeregami, skala zdjęć 1:13 000

Liczba punktów wiążących w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami	Globalna nadliczbowość pomiarów						Przeciętna dokładność punktów wiążących szeregi [cm]	
	całej aerotriangulacji	współrzędnych tłowych	współrzędnych fotopunktów		współrzędnych środków rzutów			
	r	r_x/r_y	r_X/r_Y	r_Z	r_{Xo}/r_{Yo}	r_{Zo}	MX/MY	MZ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.43	0.43	0.66	0.43	0.37	0.73	7.4	21.5
2	0.50	0.50	0.69	0.51	0.48	0.78	6.9	19.2
3	0.54	0.54	0.71	0.55	0.54	0.82	6.7	17.9
4	0.57	0.57	0.72	0.62	0.58	0.83	6.5	15.8
5	0.59	0.59	0.72	0.64	0.61	0.84	6.4	15.1
6	0.61	0.61	0.73	0.66	0.64	0.84	6.4	14.7

Tabela 3. Niezawodność pomiarów przy zmiennej liczbie wiązań między szeregami, skala zdjęć 1:26 000

Liczba punktów wiążących w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami	Globalna nadliczbowość pomiarów						Przeciętna dokładność punktów wiążących szeregi [cm]	
	całej aerotriangulacji	współrzędnych tłowych	współrzędnych fotopunktów		współrzędnych środków rzutów			
	r	rx/ry	rX/rY	rZ	rXo/rYo	rZo	MX/MY	MZ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.43	0.45	0.77	0.27	0.15	0.52	16.4	30.2
2	0.50	0.51	0.79	0.34	0.22	0.63	15.4	27.2
3	0.54	0.55	0.80	0.39	0.27	0.68	14.9	25.3
4	0.57	0.57	0.81	0.45	0.31	0.72	14.7	22.9
5	0.59	0.60	0.82	0.48	0.34	0.74	14.6	21.9
6	0.61	0.61	0.82	0.50	0.37	0.75	14.5	21.3

Dla wszystkich badanych globalnych nadliczbowości pomiarów jej wartość rosła wraz ze wzrostem liczby wiązań i wzrost ten miał charakter asymptotyczny, to znaczy, wzrost wartości miał granicę. Teoretyczną granicą do której dążą wartości lokalnych nadliczbowości i tym samym globalne nadliczbowości, jest 1.0 (Prószyński et al. 2002), przy nieograniczonym wzroście liczby pomiarów. Dane podane w tabelach pokazują, że już przy kilku punktach wiążących wzrost był bardzo mały. Pomiedzy wariantami aerotriangulacji z 5 a 6 punktami wiążącymi wynosił on przeciętnie tylko 0.02.

Zmniejszenie wielkości błędu średniego współrzędnej punktu miało również charakter asymptotyczny. Dla współrzędnych poziomych X i Y zmniejszenie błędu między wariantami z 5 a 6 punktami wyniosło, dla bloków w obu skalach zdjęć, mniej niż 1%, a dla rzędnej Z mniej niż 3%.

Dla rzędnej Z można również zauważyć, że zwiększenie liczby wiązań z 3 do 4 punktów dało zmniejszenie błędu średniego około 10 %, w blokach dla obu skal zdjęć, natomiast zwiększenie liczby wiązań z 4 do 5 punktów dało zmniejszenie błędu poniżej 5%.

4.3. Wnioski z badań

Wyniki pozwalają na wyciągnięcie wniosków dotyczących projektowania liczby punktów wiążących:

- 1) „Dobrą” niezawodność całej aerotriangulacji i co najmniej „akceptowalną” niezawodność wszystkich grup pomiarów osiągnięto dla 3 lub więcej punktów wiążących pomierzonych w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami. Dla bloków o skali zdjęć 1:13 000 również dla 2 punktów wiążących uzyskano niezawodność aerotriangulacji bliską „dobrej” niezawodności.

Należy zauważyć, że występuje tu różnica w porównaniu z orientacją wzajemną zdjęć w celu zbudowania modelu stereoskopowego, gdzie „dobrą” niezawodność pomiarów uzyskuje się już przy 2 punktach pomierzonych w pozycji Grubera (Nowak, 1999).

W zbadanych wcześniej blokach produkcyjnych z pomiarem środków rzutów, o skali zdjęć 1: 26 000, występował niski poziom niezawodności wewnętrznej współrzędnych X i Y środków rzutów. Dla 8 na 11 zbadanych bloków globalna nadliczbowość tych współrzędnych wynosiła od 0.15 do 0.22 (Ziobro, 2007). Spowodowane to zostało między innymi, za małą liczbą punktów wiążących w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami.

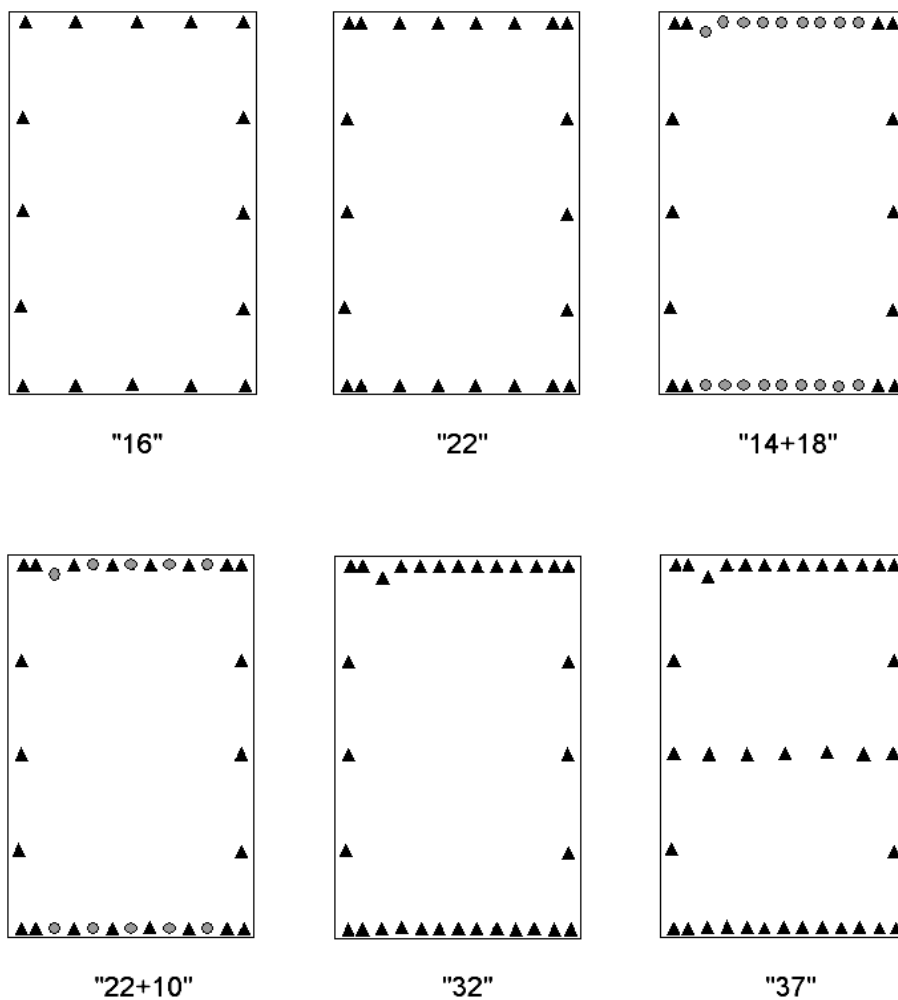
- 2) Wzrost niezawodności pomiarów i dokładności wyników wraz ze wzrostem liczby wiązań miał w badanym zakresie zmienności charakter asymptotyczny. Pozwoliło to na podanie liczby wiązań, która jest optymalna ze względu na nakład pracy:
 - (a) projektowanie większej niż 3 liczby wiązań może być w przypadku pomiaru półautomatycznego nieekonomiczne ze względu na niewielki wzrost niezawodności pomiarów.
 - (b) zwiększenie liczby wiązań z 3 do 4 daje 10% zmniejszenie błędu rzędnej Z; dalsze zwiększanie liczby wiązań jest nieuzasadnione. Przy wykorzystaniu automatycznego pomiaru, nadmierna liczba wiązań, nawet o dużej lokalnej nadliczbowości, powoduje wzrost nakładu pracy dla wykrywania błędów grubych w pomiarze.

5. BADANIE DOKŁADNOŚCI I HOMOGENICZNOŚCI W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU OSNOWY FOTOPUNKTÓW

5.1. Opis badań

Do badań wybrano sześć wariantów osnowy fotopunktów podobnych do stosowanych w krajowej praktyce. W wariacie „16” 1 fotopunkt przypada na 24 zdjęcia bloku, a w wariacie „37” 1 fotopunkt przypada na 10 zdjęć. Innych wariantów nie rozpatrywano, gdyż mniejsza liczba fotopunktów niż w wariacie „16” dałaby globalną nadliczbowość rzędnej Z fotopunktów, dla bloków o skali zdjęć 1:26 000, mniejszą od 0.25. Natomiast większa liczba fotopunktów niż w „37” byłaby zupełnie nieuzasadniona ze względu na nieistotny wzrost dokładności punktów wiążących oraz nieistotny i niepotrzebny wzrost niezawodności współrzędnych fotopunktów.

We wszystkich 12 symulacjach aerotriangulacji pomiar punktów wiążących był taki sam, z 3 punktami w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami. Wszystkie zdjęcia posiadały pomiar środków rzutów. Należy zauważyć, że w wariantach „14+18”, „22+10”, „32” i „37” w pokryciu poprzecznym na początku i końcu każdego szeregu znajduje się fotopunkt wysokościowy Z lub pełny XYZ. Natomiast w wariantach „16” i „22” takie fotopunkty znajdują się w co trzecim lub co drugim wiązaniu między szeregami.



Rys. 2. Warianty osnowy fotopunktów

5.2. Wyniki badań

Tabela 4. Przeciętne błędy współrzędnych punktów wiążących w zależności od wariantu osnowy, skala zdjęć 1:13 000

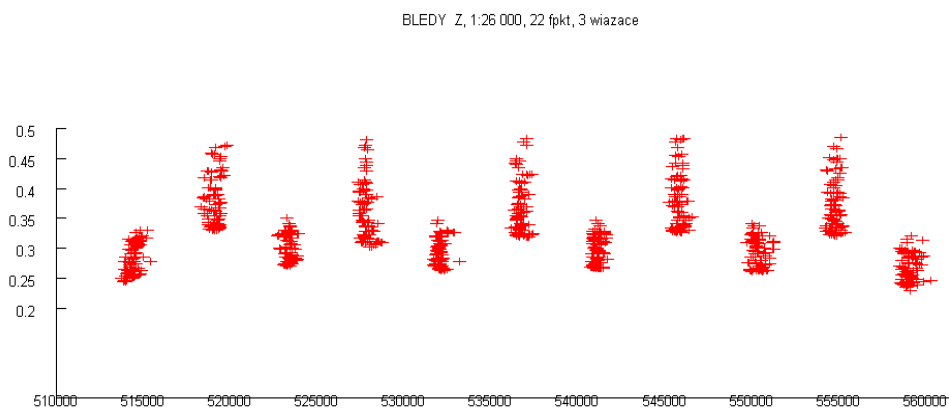
Wariant osnowy	PRZECIĘTNY BŁĄD ŚREDNI WSPÓLRZĘDNEJ PUNKTU WIĄŻĄCEGO										Globalna nadliczbowość współrzędnych fotopunktów	
	MX / MY [cm]					MZ [cm]					rX/rY	rZ
	prze- ciętny	odchy- lenie	V [%]	max	min	prze- ciętny	odchy- lenie	V [%]	max	min		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
„16”	7.4	1.0	13	12.2	6.1	26.9	3.4	13	36.1	20.6	0.66	0.43
„22”	6.7	0.9	13	10.5	5.5	22.3	2.8	13	30.0	15.9	0.71	0.48
„14+18”	8.2	0.8	10	13.3	6.8	18.0	1.7	9	22.8	14.2	0.64	0.55
„22+10”	6.7	0.8	12	10.4	5.5	17.9	1.7	9	22.7	14.2	0.71	0.55
„32”	5.9	0.8	13	9.4	5.0	18.0	1.7	9	22.7	14.1	0.76	0.55
„37”	5.7	0.8	14	9.3	4.6	17.0	1.8	11	22.3	13.7	0.79	0.60

Tabela 5. Przeciętne błędy współrzędnych punktów wiążących w zależności od wariantu osnowy, skala zdjęć 1:26 000

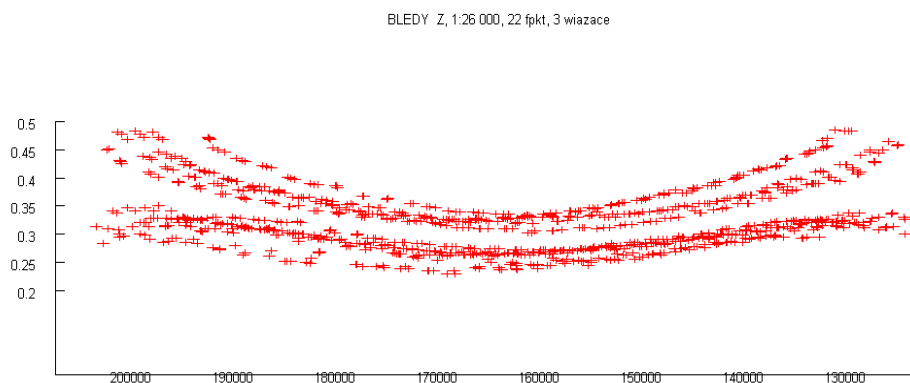
Wariant osnowy	PRZECIĘTNY BŁĄD ŚREDNI WSPÓLRZĘDNEJ PUNKTU WIĄŻĄCEGO										Globalna nadliczbowość współrzędnych fotopunktów	
	MX / MY [cm]					MZ [cm]					rX/rY	rZ
	prze- ciętny	odchy- lenie	V [%]	max	min	prze- ciętny	odchy- lenie	V [%]	max	min		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
„16”	17.0	2.0	12	25.0	14.2	41.3	7.5	18	60.5	28.1	0.76	0.27
„22”	15.0	1.8	12	21.7	12.6	32.6	5.3	16	48.5	22.9	0.80	0.32
„14+18”	18.3	1.7	9	26.2	15.5	25.3	2.3	9	32.0	20.6	0.74	0.39
„22+10”	14.9	1.8	12	22.9	12.4	25.3	2.3	9	32.0	20.5	0.80	0.39
„32”	13.1	1.6	12	19.5	11.0	25.2	2.3	9	31.9	20.5	0.84	0.39
„37”	12.6	1.6	13	19.3	10.4	24.1	2.6	11	31.7	18.7	0.86	0.45

W tabelach 4 i 5 zamieszczono dokładności punktów wiążących szeregi oraz wyniki dotyczące niezawodności współrzędnych fotopunktów. Natomiast nie zamieszczono tu wyników dotyczących niezawodności współrzędnych łowych i współrzędnych środków rzutów, gdyż liczba i rozmieszczenie fotopunktów w badanych wariantach (i przy stosowanych precyzjach pomiarów) zupełnie nie zmieniały globalnych nadliczbowości tych grup pomiarów. Globalne nadliczbowości tych grup były takie same jak dla wariantu osnowy „22+10” i zostały podane w tabelach 2 i 3, dla wariantu symulacji z 3 punktami wiążącymi.

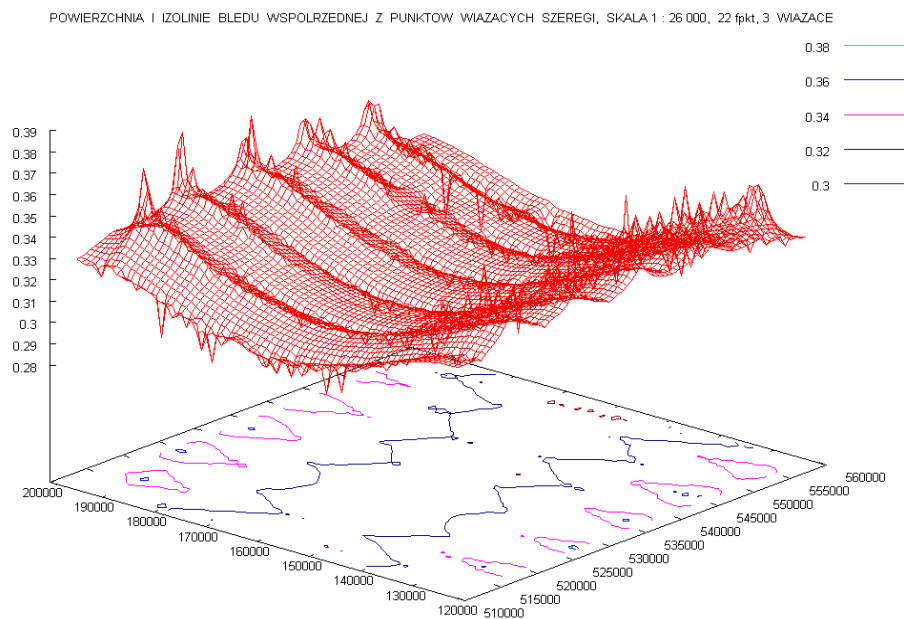
W tabelach 4 i 5 dla poszczególnych wariantów osnowy podano: przeciętny błąd średni współrzędnej punktu wiążącego szeregi (średnia arytmetyczna z 1038 wartości); średniokwadratyczne odchylenie od tej przeciętnej; wartości skrajne błędu oraz w kolumnach 4 i 9 wskaźnik zmienności V. W celu analizy przestrzennego rozkładu błędu współrzędnej w całym bloku wartości błędu przedstawiono graficznie jako rzędną przestrzennego wykresu oraz jako interpolowaną powierzchnię i izolinie błędu. Przykłady podane na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiają ten sam zbiór – błąd średni rzędnej Z punktu wiążącego szeregi, w wariantcie osnowy „22” dla skali zdjęć 1:26 000.



Rys. 3. Błąd średni rzędnej Z, widok wzdłuż osi szeregów, wariant osnowy „22”, skala zdjęć 1:26 000



Rys. 4. Błąd średni rzędnej Z, widok poprzecznie do osi szeregów, wariant osnowy „22”, skala zdjęć 1:26 000



Rys. 5. Błąd średni rzędnej Z, powierzchnia interpolowana i izoliny błędów, wariant osnowy „22”, skala zdjęć 1:26 000

5.3. Analiza wyników

5.3.1. Wzrost dokładności związany ze wzrostem liczby fotopunktów

Porównanie przeciętnych błędów między wariantami „32” i „37” pokazało, że dla wszystkich trzech współrzędnych, dla obydwu skal zdjęć, zmniejszenie błędu wyniosło mniej niż 5%. Można więc powiedzieć, że dodatkowe fotopunkty wewnątrz bloku w wariacie „37” nie spowodowały istotnego zmniejszenia błędów.

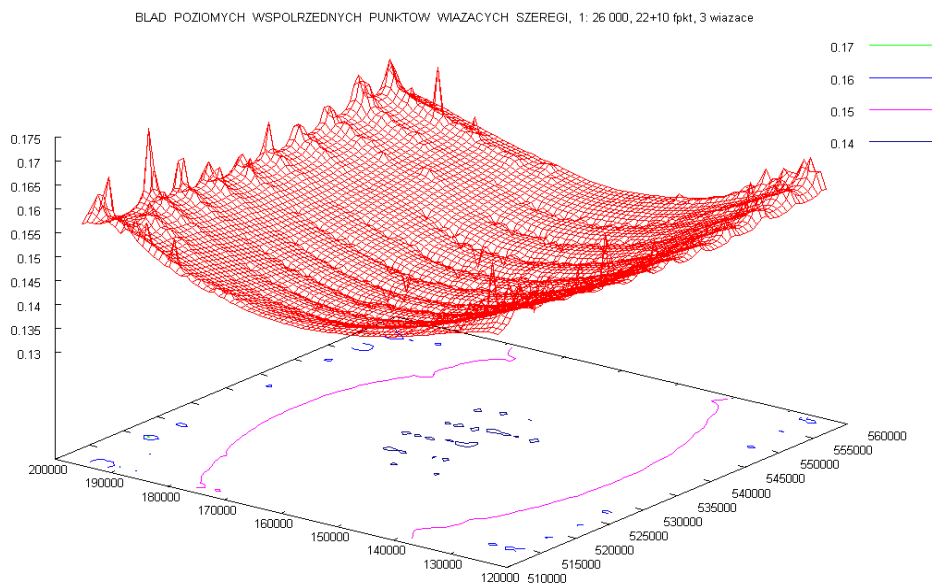
Zmniejszenie błędu współrzędnych poziomych X i Y wystąpiło między wariantami „22+10” oraz „32”, i wyniosło po 11% dla bloków w obydwóch skalach zdjęć. Również to zmniejszenie wystąpiło pomiędzy wariantami „14+18” a „22+10”, i wyniosło po 18% dla bloków w obydwu skalach zdjęć.

Zmniejszenie błędu rzędnej Z pomiędzy wariantami „22” oraz „14+18”, z tytułu większej liczby fotopunktów wysokościowych Z, wyniosło 19% i 22%, odpowiednio dla skal zdjęć 1:13 000 i 1:26 000 oraz dało mniejszy błąd maksymalny, odpowiednio o 24% i 34%. Zmniejszenie błędu Z między „16” a „14+18” wyniosło 33% i 38%, odpowiednio dla skal zdjęć, a zmniejszenie błędu maksymalnego wyniosło 36% i 47%. Warianty „14+18”, „22+10” i „32” mają tę samą liczbę i rozmieszczenie fotopunktów Z (32 fotopunkty Z), tak że błędy wysokości wyznaczonych wiązań były jednakowe.

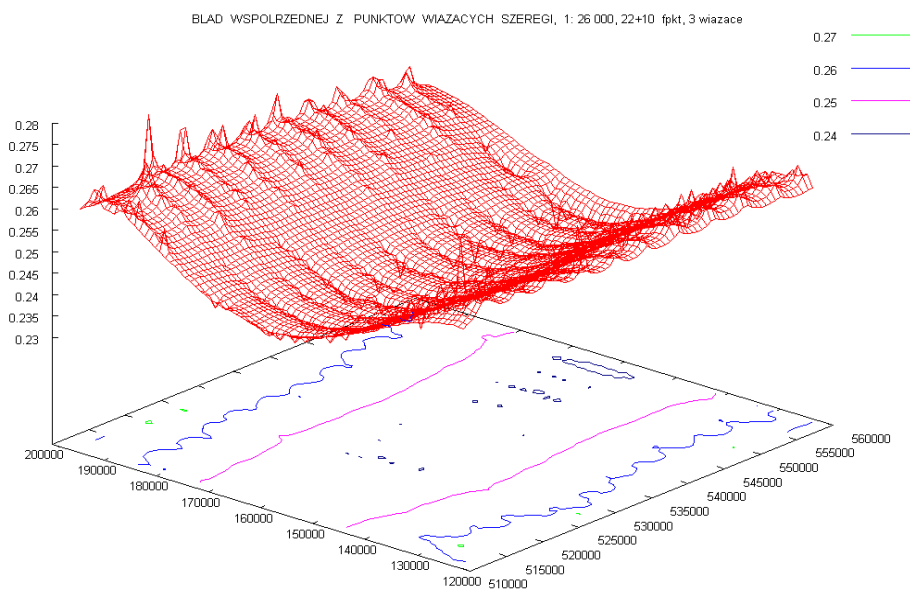
Z analizy można wyciągnąć wniosek, że z tytułu dokładności współrzędnych poziomych i dokładności rzędnej przy projektowaniu należy brać pod uwagę warianty „22+10” i „32”, lub wariant mieszany z tych dwóch osnów. Należy tu zauważyć, że wariant „22+10” jest nie tyle ekonomiczniejszy, co łatwiejszy w realizacji niż wariant „32” ze względu na zwykle trudny wybór dobrze zdefiniowanych (na zdjęciach i terenie) szczegółów sytuacyjnych jako fotopunktów XYZ.

5.3.2. Homogeniczność dokładności wyników

Wskaźnik zmienności V dokładności współrzędnych poziomych X i Y punktów wiążących szeregi we wszystkich wariantach osnowy i dla obydwóch skal zdjęć (tabele 4 i 5, kolumna 4) był podobnej wielkości i mieścił się w przedziale od 9% do 14%. Można powiedzieć, że w badanym zakresie liczba fotopunktów nie wpływała istotnie na homogeniczność dokładności X i Y. Kształt powierzchni utworzonej przez błędy X (lub Y) we wszystkich wariantach był taki sam i bez lokalnych zaburzeń, z wyjątkiem zaburzeń na brzegu bloku — na początku i końcu szeregów, spowodowanych mniejszą dokładnością punktów wiążących pomierzonych tylko na 4 zdjęciach. Przykład rozkładu błędu w obszarze bloku dla współrzędnych poziomych jest podany na rysunku 6 i przedstawia wyniki dla wariantu „22+10”, dla skali zdjęć 1:26 000.



Rys. 6. Błąd średni współrzędnej X/Y, powierzchnia interpolowana i izolinie błędów, wariant osnowy „22+10”, skala zdjęć 1:26 000



Rys. 7. Błąd średni rzędnej Z, powierzchnia interpolowana i izolinie błędów, wariant osnowy „22+10”, skala zdjęć 1:26 000

Zagadnienie to inaczej prezentowało się dla rzędnej Z, gdyż w wariantach z mniejszą liczbą fotopunktów Z, to jest w wariantach „16” i „22”, wskaźnik zmienności V był większy niż w pozostałych (tabele 4 i 5, kolumna 9), a rozkład błęd Z w obszarze bloku pokazał, że wiązania między szeregami, gdzie nie było fotopunktów na początku i końcu szeregu, miały niższe dokładności. Dla wariantu „22”, dla skali zdjęć 1:26 000, obliczono przeciętny błąd Z punktu znajdującego się w wiązaniu między szeregami – raz z fotopunktami na końcach pokrycia poprzecznego, drugi raz bez nich. Przeciętne błędy wysokości (dla 96 punktów w jednym wiązaniu między szeregami) wyniosły odpowiednio 29.4 cm i 36.8 cm, a odchylenia od średniej odpowiednio 2.2 cm i 4.2 cm. Oznacza to, że w takiej aerotriangulacji wiązania leżące po przeciwnych stronach tego samego zdjęcia miały błędy wysokości różniące się o 25%. Rozkład błęd wysokości dla tego przypadku jest przedstawiony na rysunkach 3, 4 i 5. Efekt ten występował również dla skali zdjęć 1:13 000, ale był mniejszy i wyniósł 11%.

Warianty „14+18”, „22+10” i „32” miały taką samą osnowę wysokościową, takie same błędy wyznaczenia wysokości i taki sam wskaźnik zmienności V równy 9%. Wartość 9% oznacza, że zmienność była niewielka, a tym samym poziom homogeniczności był wysoki. Rozkład błęd Z w wariancie „22+10”, dla skali zdjęć 1:26 000 jest przedstawiony na rysunku 7. Zaburzenia powierzchni błęd na końcach szeregów, tak samo jak dla współrzędnej poziomej, były spowodowane niższą dokładnością punktów wiążących pomierzonych na 4 zdjęciach.

5.3.3. Niezawodność pomiarów

W punkcie 5.2 stwierdzono już, że różnice w osnowie fotopunktów (w badanym zakresie) zupełnie nie wpływają na globalną niezawodność wewnętrzną współrzędnych tłowych i współrzędnych środków rzutów. Było to spowodowane znacznie mniejszą precyzją fotopunktów niesygnalizowanych w stosunku do precyzji tych grup pomiarów, nawet czterokrotnie mniejszą dla skali zdjęć 1:26 000 (tabela 1), oraz znacznie mniejszą ich liczebnością.

Natomiast wraz ze wzrostem liczby fotopunktów rosła niezawodność ich współrzędnych. Wzrost ten był korzystny dla współrzędnej Z dla skali zdjęć 1:26 000, gdzie między wariantem „16” a „14+18” globalna nadliczbowość Z wzrastała od 0.27 do 0.39, (tabela 5, kolumna 13).

Dla współrzędnych poziomych X i Y, dla obydwu skal zdjęć, występował wzrost globalnej nadliczbowości wraz ze wzrostem liczby fotopunktów X Y, ale nie miał on większego znaczenia, gdyż wystąpił w przedziale od 0.64 do 0.86 to znaczy, na poziomie i tak już bardzo wysokiej nadliczbowości.

5.4. Wnioski z badań

Projekt aerotriangulacji z osnową „22+10” i 3 punktami wiążącymi w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami można uznać za optymalny dla bloków

w skalach 1:13 000 i 1:26 000, z fotopunktami niesygnalizowanymi i precyzjami stosowanymi w produkcji, gdyż:

- zapewnia możliwie dużą dokładność wyników,
- daje homogeniczną dokładność,
- ma „dobrą” globalną niezawodność wewnętrzną całej sieci, a wszystkie trzy grupy pomiarów mają co najmniej „akceptowalny” poziom niezawodności.

Określone tu warunki dla wykonania aerotriangulacji i osiągnięta dokładność mogą stanowić podstawę opracowania standardu jakościowego dla tego typu bloków.

6. OKREŚLENIE ZASTĘPCZEJ OSNOWY PRZY CZĘŚCIOWYM BRAKU POMIARU ŚRODKÓW RZUTÓW

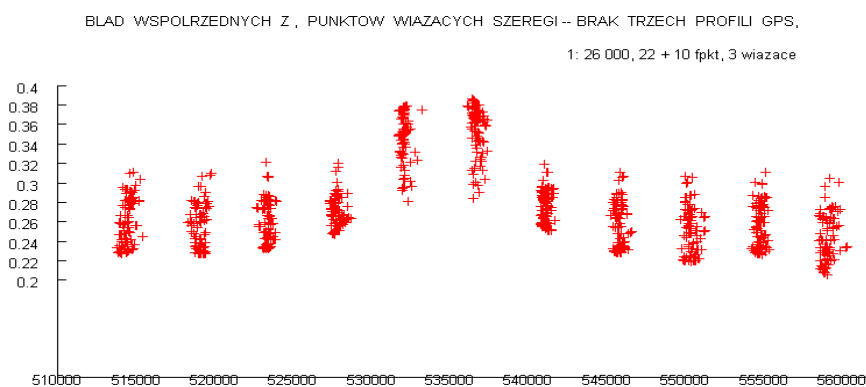
6.1. Opis badań

Symulację wykonano dla optymalnego wariantu aerotriangulacji, to jest przy osnowie fotopunktów „22+10” i 3 punktach wiążących w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami, dla obydwu badanych skal zdjęć lotniczych. Symulowano brak pomiaru środków rzutów dla od 1 do 4, sąsiadujących z sobą szeregów zdjęć, w środku bloku. Szkice bloków z zaznaczonymi linią przerywaną brakującymi pomiarami środków rzutów przedstawione są na rysunku 11. Obliczono przeciętny błąd współrzędnej punktu wiążącego szeregi (średnia arytmetyczna z 1038 wartości). Przeciętne błędy podano w tabeli 6.

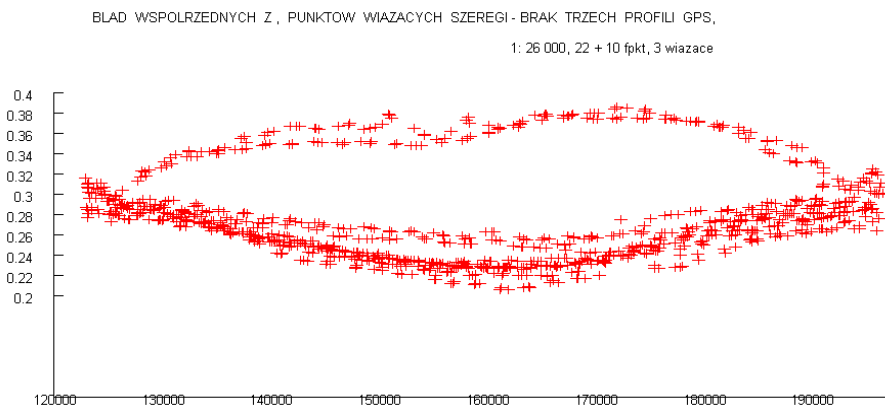
Tabela 6. Przeciętne błędy współrzędnych punktów wiążących przy częściowym braku pomiaru środków rzutów

Liczba szeregów bez pomiaru środków rzutów	Przeciętny błąd średni współrzędnej punktu wiążącego [cm]			
	skala zdjęć 1:13 000		skala zdjęć 1:26 000	
	MX / MY	MZ	MX / MY	MZ
<i>l</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
0	6.7	17.9	14.9	25.3
1	6.7	18.0	15.0	25.6
2	6.7	18.4	15.1	26.4
3	6.8	18.8	15.3	27.6
4	6.8	19.5	15.4	29.2

Należy zauważyć, że przeciętny błąd nie odzwierciedla lokalnych spadków dokładności, dlatego analizowano również rozkład błędów średnich w obszarze bloku w postaci graficznej, jako rzędną przestrzennego wykresu oraz jako interpolowaną powierzchnię i izolinie błędów. Odpowiedniejsze dla analizy są nieinterpolowane wyniki, na rysunkach 8, 9, 10 i 11 są one prezentowane w rzucie na płaszczyzny pionowe – równoległe i prostopadłe do kierunku szeregów zdjęć. Interpolowane powierzchnie i izolinie nadmiernie spłaszczają lokalne różnice.



Rys. 8. Wpływ braku pomiaru środków rzutów dla trzech szeregów. Błąd średni rzędnej Z, widok wzdłuż osi szeregów, skala zdjęć 1:26 000



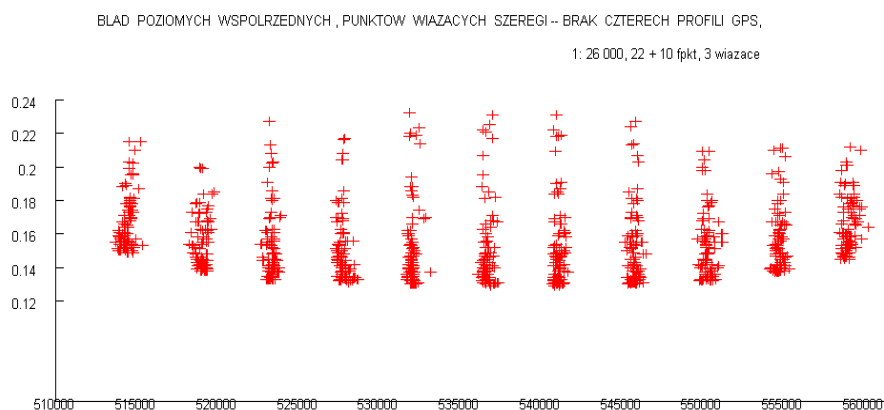
Rys. 9. Wpływ braku pomiaru środków rzutów dla trzech szeregów. Błąd średni rzędnej Z, widok poprzecznie do osi szeregów, skala zdjęć 1:26 000

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wpływ brakujących pomiarów na dokładność wyznaczenia rzędnej Z. Na rysunku 8 widać, że cztery wiązania między szeregami mają niższą dokładność Z, w odniesieniu do tych z pomiarem środków rzutów, a rysunek 9 pokazuje, że dwa z nich, w swojej środkowej części, miały dokładność o blisko 50% niższą. Takie analizy wykonano dla

ośmiu symulacji określających wpływ braku pomiaru oraz dla kilkunastu następnym zrobionych dla określenia zastępczej osnowy fotopunktów.

6.2. Analiza wyników

Wyniki przeciętnego spadku dokładności współrzędnych poziomych X i Y podane w tabeli 6 (kolumny 2 i 4) oraz analiza przestrzennego rozkładu błędów pozwalają stwierdzić, że brak pomiaru współrzędnych środków rzutów nie spowodował spadku dokładności i zmniejszenia homogeniczności dokładności tych współrzędnych, nawet przy braku pomiaru dla czterech kolejnych szeregów zdjęć (rys. 10). Niewielki spadek dokładności wystąpił jedynie dla współrzędnych punktów na końcach szeregów, które nie miały pomiaru środków rzutów i wyniósł dla tych punktów mniej niż 10% w stosunku do wyników z kompletnym pomiarem środków rzutów.



Rys. 10. Wpływ braku pomiaru środków rzutów dla czterech szeregów. Błąd średni współrzędnej X/Y, widok wzdłuż osi szeregów, skala zdjęć 1:26 000

Natomiast dla rzędnej Z spadek przeciętnej dokładności oraz lokalne spadki rosły wraz z liczbą brakujących pomiarów środków rzutów. Wnioski z analiz dla rzędnej Z są następujące:

- 1) Brak pomiaru dla jednego szeregu nie spowodował istotnego spadku dokładności Z, dla obydwu skal zdjęć lotniczych — nie jest potrzebna dodatkowa osnowa.
- 2) Brak pomiaru dla dwu szeregów wywołał spadek dokładności różny dla obydwu skal. Dla skali zdjęć 1:26 000, w środkowej części wiązania znajdującego się między szeregami bez pomiaru, spadek ten sięgał około 30%, w stosunku do wiązań między szeregami, które miały pomiar, a dla skali 1:13 000 spadek ten wyniósł około 20%.
- 3) Brak pomiaru dla trzech i czterech szeregów obniżył dokładność, odpowiednio, 4 i 5 sąsiednich wiązań między szeregami. Dla skali zdjęć

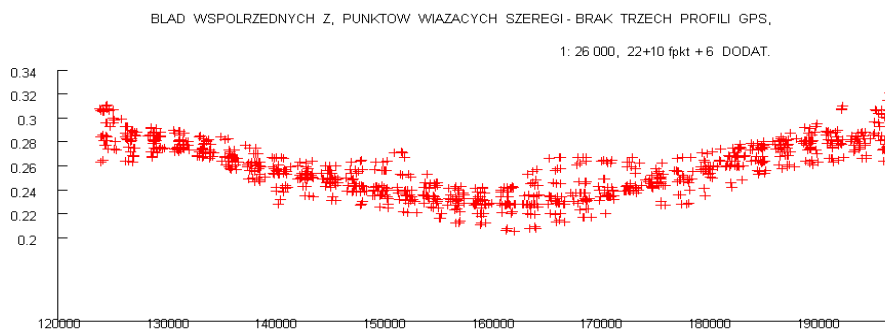
1:13 000 spadek dokładności sięgał około 50%, a dla 1:26 000 około 100%. Przykład wpływu braku pomiaru przedstawiony jest na rysunkach 8 i 9.

- 4) Największy spadek dokładności występował w środkowej części wiązania między szeregami.

6.3. Zastępcza osnowa i jej skuteczność

Z badań opisanych w punkcie 6.2. wynika, że dodatkowa osnowa może być utworzona z fotopunktów Z, co daje możliwość lokalizowania ich w najkorzystniejszym obszarze, to jest w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami. Gdyby trzeba było projektować pełne fotopunkty XYZ, prawdopodobieństwo znalezienia dobrze identyfikowanego szczegółu w sześciokrotnym pokryciu zdjęciami byłoby mniejsze i w symulacjach należałoby użyć fotopunktów obserwowanych na czterech zdjęciach.

Stosownie do wniosków z poprzedniej części badań, w symulacjach dodatkowe fotopunkty wybrano w środkowej części wiązań między szeregami, a użyte fotopunkty Z były obserwowane na 6 zdjęciach. Określenie dodatkowej osnowy przeprowadzono drogą kolejnych przybliżeń poprzez zwiększanie liczby fotopunktów aż do uzyskania homogeniczności bliskiej tej, którą otrzymano przy kompletnym pomiarze środków rzutów, to znaczy, tak aby pozostające lokalne spadki dokładności nie były większe niż o około 10%. Rysunek 11 ilustruje uzyskaną poprawę homogeniczności wyników poprzez dodatkową osnowę 6 fotopunktów Z, w odniesieniu do wyników otrzymanych bez tej osnowy, a pokazanych na rysunku 9.

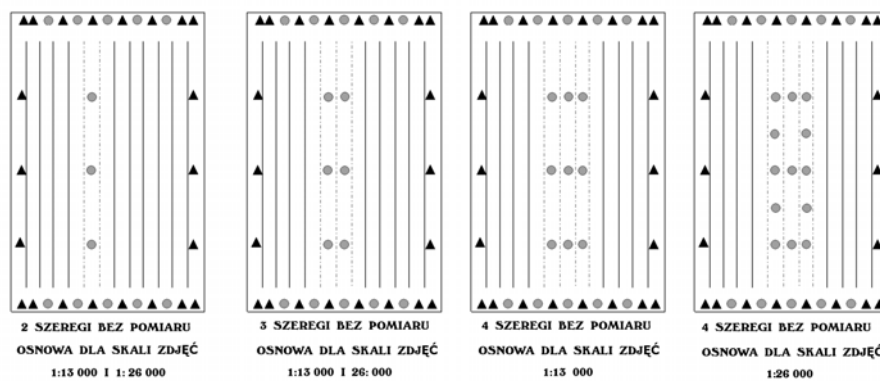


Rys. 11. Wpływ dodatkowych 6 fotopunktów przy braku pomiaru środków rzutów dla trzech szeregów zdjęć. Błąd średni rzędnej Z, widok poprzecznie do osi szeregów, skala zdjęć 1:26 000

Skompensowanie braku pomiaru środków rzutów za pomocą dodatkowych fotopunktów nie było pełne, co można dostrzec na rysunku 11. Natomiast obliczony przeciętny błąd średni Z (przeciętna ze 184 wartości) dla dwu najbardziej obciążonych brakiem pomiaru środków rzutów wiązań między

szeregami (rys. 8) był tylko o 3% większy od przeciętnego błędu uzyskanego dla całego bloku, przy obecności wszystkich pomiarów środków rzutów.

Rysunek 12 przedstawia wyznaczone w badaniach ekwiwalentne osnowy. Dodatkowe fotopunkty Z zostały umieszczone wzdłuż szeregu co 8 zdjęć, z wyjątkiem osnowy dla braku pomiaru dla 4 szeregów, dla skali zdjęć 1:26 000, gdzie wymagane było gęstsze rozmieszczenie fotopunktów – co 4 zdjęcia.



Rys. 12. Ekwiwalentne osnowy dla brakujących pomiarów środków rzutów

Rozpatrzone przypadki braku pomiaru oczywiście nie wyczerpują wszystkich mogących się zdarzyć, ale z doświadczenia wynika, że odpowiadają one znacznej części z nich.

7. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono założenia, jakimi powinni kierować się projektanci aerotriangulacji bloków z fotopunktami niesygnalizowanymi oraz metodykę oceny projektu. Podano główne cele projektowania, jakimi są liczba pomiarów fotogrametrycznych oraz osnowa, w aspekcie dokładności wyników i niezawodności pomiarów. Opisane rezultaty projektowania dla bloków w skalach zdjęć 1:13 000 i 1:26 000, najczęściej opracowywanych w Polsce w ostatnich latach, mogą stanowić podstawę standardu jakości, którego brak jest w krajowych przepisach technicznych i praktyce produkcyjnej.

8. LITERATURA

- Ackerman, F.; Schade, H., 1993, *Application of GPS for Aerial Triangulation*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, No 11, November 1993.
- 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. p. 35–42.

- Cooper, M.A.R.; Cross, P.A., 1988, *Statistical Concepts and their Applications in Photogrammetry and surveying*, Photogrammetric Record, April 1988.
- 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.
- 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.
- Ministry of Agriculture and Lands Integrated Land Management Bureau (ILMB) Base Mapping and Geomatic Services Branch, 2008, *Specifications for Aerial Triangulation*, April 2008, <http://ilmbwww.gov.bc.ca/bmgs/pba/trim/specs/Aerial%20Triangulation%20Specifications.pdf>
- Nowak, J., 1999, *Własności niezawodnościowe podstawowych zadań fotogrametrycznych*, Przegląd Geodezyjny, 11/1999.
- Passini, R.; Jewell, D.; Jacobsen, K., 2002, *An Accuracy Study on Large Airborne GPS Aero Triangulation Block*, ASPRS Annual Convention, Washington 2002.
- Prószyński, W., 1990, *Geodezja inżynierska*, Tom 1, Praca zbiorowa, Rozdział 7, Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, 1990.
- Prószyński, W., 1994, *Criteria for Internal Reliability of Linear Least Square Models*, Bulletin Geodesique, 1994, 68, 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., str. 609–618.
- Ziobro J., 2007, *Precyzja i niezawodność pomiaru środków rzutów w rzeczywistych aerotriangulacjach*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17b, str. 841–847.
- Ziobro J., 2008, *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, p. 21–24.

Recenzowała: Prof. dr hab. inż. Aleksandra Bujakiewicz

JAN ZIOBRO

Instytut Geodezji i Kartografii

CONDITIONS OF DESIGNING AEROTRIANGULATION WITH NON-SIGNALIZED CONTROL POINTS

Summary

Author presented in the article conditions of designing block aerotriangulation with measurement of projection centres and non-signalized control points. The impulse to these studies was given by the results of analysis of 38 blocks elaborated in Poland, which revealed, that contractors applied in designing not entirely precise assumptions. Also domestic technical instructions in this field do not determine goals of designing precisely and comprehensively. Publications related to designing of aerotriangulation concern blocks of non-signalized control points; hence conclusions on accuracy of results and reliability of measurements in network cannot be fully applied to blocks with non-signalized control points.

The aim of study was to determine assumptions for designing aerotriangulation of rectangle blocks at scales of 1:13 000 and 1:26 000, which have been applied in the last period most frequently in our country. In these study the required reliability of measurements was determined, as well as possible accuracy of the results, taking into account precisions of particular groups of measurements achieved in production.

Investigations were carried out comparing results of different variants of aerotriangulation. These variants were created through simulation of measurements and simulation of block adjustment. The applied simulation enabled to evaluate variant of aerotriangulation using the following parameters: global redundancy of network, local redundancy of particular measurements, global redundancy of groups of measurements, mean errors of unknowns, average errors of groups of unknowns.

The detailed goals and scope of the studies were as follows:

- Determination of impact of number of tie points between strips on reliability of particular groups of measurements and accuracy of unknowns and selection of the best number of ties. Variants of aerotriangulation with number of six-fold tie points from 1 to 6 points were analysed.

- Determination of relation between accuracy of the results, reliability of groups of measurements versus distribution and number of ground control points, including selection of the best control network. Six variants of control network were analysed, taking into account accuracy of the results and its homogeneity, as well as reliability of measurements.
- Preparation of additional control points for compensating partial lack of measurement of projection centres (which happens quite frequently). Impact of lack of measurements was studied for 1 to 4 strips.

Author presented in the article conditions for determining the best variant of aerotriangulation, considering reliability of measurements, as well as accuracy and homogeneity of the results. The determined parameters of designing can be a basis for high-quality standard aerotriangulation for these types of blocks.

Key words: aerotriangulation, designing, precision, reliability, non-signalized control points, simulation