

Ryszard Preuss

AEROTRIANGULACJA WIELOCZASOWA

Streszczenie. *W ostatnich latach obserwujemy rozwój techniki „geokodowania wprost”. Dzięki rozwiązaniom sprzętowym rejestrowane są w czasie lotu fotogrametrycznego wszystkie parametry orientacji zewnętrznej wykonywanych zdjęć. Jednak badania eksperymentalne z zakresu precyzji tak wyznaczonych parametrów wskazują, że ich przydatność do pomiarów wielkoskalowych jest niewystarczająca. W praktyce produkcyjnej naszego kraju prawdopodobnie ta nowa technika pojawi się dopiero za kilka lat. W niniejszym referacie autor przedstawia koncepcję odtwarzania orientacji zewnętrznej dla bloku nowych zdjęć z wykorzystaniem parametrów orientacji zdjęć archiwalnych bez jakichkolwiek punktów naziemnej osnowy terenowej. Przeprowadzone prace eksperymentalne wskazują, że rozwiązanie to można stosować dla zdjęć wykonywanych według powtarzalnego nalotu w odstępach kilkuletnich. Zastosowanie modułów programowych ISAT stacji cyfrowej Image Station całkowicie automatyzuje proces pomiarowy i obliczeniowy. W referacie są zaprezentowane wyniki opracowania zdjęć wykonanych dla obszar miasta Poznania w odstępie czasowym dwóch lat.*

1. Wprowadzenie

Obecnie najczęściej dla ograniczenia liczby potrzebnych punktów osnowy polowej w procesie aerotriangulacji wyznacza się w czasie lotu fotogrametrycznego środki rzutów techniką GPS. Uwzględnienie wyników pomiarów GPS można zrealizować stosując metody łącznego wyrównania bloku. Odbywa się ono najczęściej z wykorzystaniem metody niezależnych wiązek. System GPS dostarcza nam współrzędnych punktów mierzonych w układzie globalnym WGS-84. W systemie tym są określane pozycje anteny odbiornika GPS w określonym interwale czasowym, a na ich podstawie metodą interpolacji wyznacza się interesujące nas środki rzutów. Pomiary naziemne punktów osnowy polowej są również coraz częściej wykonywane techniką GPS, nie są one jednak na ogół synchronizowane z momentem wykonywania zdjęć. Dlatego też istnieje problem integracji pomiarów fotogrametrycznych i GPS. Odbywa to się poprzez modyfikację modelu funkcjonalnego do łącznego wyrównania obserwacji fotogrametrycznych i obserwacji wykonywanych techniką GPS. Do tradycyjnego równania kolinearności wprowadzono parametry dodatkowe integrujące obserwacje określone w różnych układach odniesień. Praktycznie każdy szereg jest dodatkowo modelowany przy pomocy 6 parametrów. Trzy parametry opisują translację pomiędzy układami, a pozostałe są funkcjami liniowymi względem czasu wykonywania zdjęć.

Ten nowy model wyrównawczy praktycznie nie zmienia konwencjonalnego podejścia stosowanego w metodzie niezależnych wiązek, jest on jedynie rozszerzony o dodatkowe równania obserwacyjne układane bezpośrednio do pozycji anteny

satelitarnej w układzie odniesienia. Same parametry korekcyjne mogą być wyznaczone jako stałe dla pojedynczego szeregu, grupy szeregów lub całego bloku.

Na prawidłowość wyznaczenia tych parametrów wpływa liczba wykorzystywanych punktów osnowy terenowej jak również konfiguracja geometryczna zdjęć w bloku i sposób ich wykonywania. Przy minimalnej liczbie punktów osnowy polowej (np.: 4 punkty w narożnikach bloku) dla prawidłowego obliczenia parametrów korekcyjnych konieczne jest wykonywanie dodatkowych zdjęć w poprzecznych szeregach na początku i końcu bloku (Ackermann,1991) . Te dodatkowe poprzeczne szeregi zastępują wymagany na końcu i początku szeregu łańcuch punktów wysokościowych.

Wyznaczanie parametrów korekcyjnych dla pojedynczych szeregów jest korzystne, gdyż w praktyce ogranicza to wpływ możliwych do wystąpienia błędów systematycznych określenia pozycji techniką GPS jednak wymaga wyznaczenia dodatkowo polowych punktów wysokościowych lub wykonania wcześniej wspomnianych szeregów poprzecznych. Dalsze ograniczenie punktów osnowy polowej jest możliwe przy wyznaczeniu parametrów korekcyjnych dla całego bloku. W wersji programu Bingo-F (Kruck,1996) zastosowano rozwiązanie pozwalające na uwzględnienie wyników obliczeń programem Geonap, który wyznacza najprawdopodobniejszą konstrukcją geometryczną obserwacji GPS wraz z eliminacją tzw. „utraconych cykli” oraz tworzy charakterystykę dokładnościową w postaci pełnej macierzy wariancyjno-kowariancyjnej. W procesie wyrównania łącznego obserwacji fotogrametrycznych i środków rzutów techniką GPS ta macierz wariancyjna jest uwzględniana. Dzięki temu obserwacje GPS (wyznaczone pozycje środków rzutów) w procesie wyrównania są modelowane jednym wspólnym modelem. Ogranicza to znacznie liczbę wyznaczanych parametrów dodatkowych oraz wymaganych punktów osnowy polowej.

Równoległe z pracami nad doskonaleniem technologii aerotriangulacji prowadzone są badania nad całkowitym wyeliminowaniem procesu aerotriangulacji (Jeyapalan,1996). Pierwotnym rozwiązaniem było zamontowanie na samolocie 4 anten GPS. Obecnie rejestracja wszystkich parametrów orientacji zewnętrznej w czasie wykonywania zdjęć realizowana jest poprzez łączne rejestracje GPS i INS (Skaloud,1996). Problemem takiego rozwiązania jest, że wyznaczone w ten sposób parametry orientacji zewnętrznej są obarczone czynnikami systematycznymi. Istniejące stałe rozbieżności wyznacza się metodą samokalibracji (Jeyapalan,1996). Obserwujemy więc tendencję do wdrażania do fotogrametrii lotniczej metod przestrzennego wcięcia wprzód ze znanych stanowisk, będącym pierwotnym rozwiązaniem dla fotogrametrii naziemnej. To rozwiązanie nazywane geokodowaniem wprost jest już z powodzeniem stosowane w praktyce produkcyjnej dla zdjęć w skalach średnich. Uzyskiwane w takim podejściu dokładności nie są jednak zadawalające dla opracowań wielkoskalowych (Heipke,2001). W niniejszym artykule prezentowane jest całkowicie odmienne rozwiązanie w celu do minimum ograniczenia potrzeby wyznaczania punktów osnowy polowej w procesie aerotriangulacji. Osnowę z powodzeniem mogą zastąpić zdjęcia archiwalne (dla których znana jest georeferencja) pod warunkiem, że na czasowych zdjęciach są jednakowe elementy obrazowe.

2. Sposób rozwiązania zadania z wykorzystaniem programu ISAT

Proponowane podejście do wyznaczania orientacji zdjęć w bloku opiera się na założeniu, że będzie możliwa automatyczna korelacja obrazów czasowych. W praktyce więc możemy takie rozwiązanie stosować dla bloków zdjęć spełniających następujące warunki:

- zdjęcia są wykonywane okresowo według tego samego projektu nalotu,
- skala zdjęć jest jednakowa z tolerancją 10%,
- zmiany w treści zdjęć są lokalne.

Dzięki stosowaniu do prowadzenia pomiarów na zeskanowanych zdjęciach cyfrowych stacji fotogrametrycznych posiadamy obecnie programową możliwość wyznaczania punktów wiążących dla dowolnej liczby zdjęć. Taką funkcjonalność prezentuje moduł programowy Image Station Automatic Triangulation (ISAT 2001) na stacji Image Station firmy Z/I Imaging Program ISAT jest to kompleksowy pakiet do w pełni automatycznej aerotriangulacji. Pakiet ten posiada wszystkie cechy Image Station Digital Mensuration oraz dodatkowy moduł do automatycznego pomiaru punktów wiążących. Duża niezawodność pomiaru ma swoje źródła w wieloletnich badaniach firmy Zeiss nad algorytmami programu Phodis-AT, które zostały przeniesione na uniwersalną i intuicyjną w użytkowaniu platformę ISDM. Algorytmy te wykorzystują techniki FBM (Feature Based Matching - dopasowanie obiektów) i LSM (Least Squer Matching - metodę najmniejszych kwadratów). Dzięki metodzie FBM wybierane są „pewnie” usytuowane punkty, natomiast LSM pozwala na pomiar ostateczny z podpikselową precyzją. Program ISAT dokonuje wyboru lokalizacji kilkuset punktów wiążących na zdegradowanym obrazie metodą FBM (~600 μ m). Następnie dokonuje wstępnego pomiaru na poziomie (~300 μ m) i ostatecznego na poziomie odpowiadającym aperturze skanowania. Po etapie pomiarów automatycznie uruchamiany jest moduł obliczeniowy i eliminowane są punkty o błędach odstających (Blunder Detection). Proces Automatic Thining pozwala na wyeliminowanie z rezultatów punktów o dużej redundancji. Program analizuje wyniki pod względem prawidłowości dystrybucji wiązań i jeśli odnajdzie obszary które „podejrzuwa” o nieprawidłowość wiązań (np. wody), oznacza je. Następnie wszystkie niezbędne zdjęcia wyświetlane są i obserwator może sam zmierzyć punkt. Szybkość pomiarów sięga kilkudziesięciu sekund do około dwóch minut na zdjęcie. Dzięki możliwości podziału bloku na podbloki, można mierzyć dowolnej wielkości grupy zdjęć, bez ograniczenia wynikającej z wolnej przestrzeni na dyskach. Ostatecznie łączy się wyniki pomiarów podbloków i dokonuje wspólnego wyrównania. Program posiada funkcję przetwarzania wsadowego (Job Service), dzięki temu zadania można ustawić w „kolejkę”, która zacznie się wykonywać na przykład po zakończeniu pracy przez operatora.

Przedstawiona wcześniej charakterystyka programu ISAT wskazuje, że spełnia on założenia proponowanego przez autora rozwiązania. Dzięki znajomości parametrów orientacji zewnętrznej dla zdjęć archiwalnych proces jednoczesnego wyrównania bloku wieloczasowego określi finalnie parametry orientacji zewnętrznej dla zdjęć nowych. W konsekwencji możemy dalej na tych zdjęciach pracować w identycznym układzie odniesienia jaki był przyjęty dla zdjęć archiwalnych. Duża gęstość punktów

wiązających realizowana w procesach automatycznej aerotriangulacji oraz stosowanie modułów do eliminacji błędów odstających gwarantuje poprawne określenie interesujących nas parametrów orientacji zdjęć w bloku.

3. Charakterystyka bloku testowego

Do przeprowadzenia praktycznych testów zaproponowanego rozwiązania wykorzystano produkcyjne zdjęcia lotnicze wykonane dla miasta Poznania. Zdjęcia te sporządzono w maju 1995 roku po raz pierwszy, a następnie powtórzono nalot według tego samego projektu nalotu w 1997 roku. Naloty fotogrametryczne wykonywano z jednoczesną precyzyjną rejestracją środków rzutów dla celów aerotriangulacji. Prace te wykonało Państwowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne przy współpracy z niemiecką firmą **S.I.G. AERIAL SURVEY**. Zdjęcia panchromatyczne w skali 1:6250 były sporządzone dla potrzeb tworzenia numerycznej mapy miasta Poznania, przy standardowych pokryciach ($p=60\%$ i $q=20\%$). Zdjęcia te zostały wykonane kamerą LMK 3000 zainstalowaną na samolocie Cessna TU 206G. Proces nalotu jak i momenty rejestracji były sterowane przy pomocy systemu nawigacyjnego **CCNS 4** zgodnie z wcześniej zaprogramowanymi parametrami. Do rejestracji środków rzutów użyto systemu **CCNS AEROcontrol** pozwalającego na różnicowe wyznaczanie pozycji techniką GPS względem stacji naziemnej zlokalizowanej na punkcie osnowy geodezyjnej. Z całego zasobu zdjęciowego dla potrzeb testowania proponowanego rozwiązania wykorzystano bloki utworzone z 20 zdjęć na każdy termin nalotu. Wyselekcjonowane zdjęcia zeskanowano z rozdzielczością 1200 dpi i poddano 4-ero krotnej kompresji objętościowej. Dla takich zdjęć cyfrowych na stacji IS 2000 założono w programie ISAT wspólny projekt pozwalający na wykonanie aerotriangulacji wieloczesowej, jak również standardowych aerotriangulacji dla bloku zdjęć na wybrany termin rejestracji.

4. Prezentacja wyników

Aby poprawnie ocenić wyniki aerotriangulacji wieloczesowej na materiałach testowych została wykonana w pierwszym etapie aerotriangulacja tradycyjna na zdjęciach cyfrowych z 1995 roku. Na etapie definiowania projektu wprowadzono lokalizację środków rzutów z dokładnością $\pm 50\text{m}$. Proces pomiaru przebiegał automatycznie w module ISAT. W tym module przeprowadzono również wyrównanie bloku. Cały przeprowadzony proces obserwacji i wyrównania charakteryzują następujące wielkości:

- Średni błąd typowego spostrzeżenia $\sigma = 4.4\mu\text{m}$,
- Średni błąd wpasowania na fotopunktach:

MX [m]	MY [m]	MX Y [m]	MZ [m]
0.148	0.202	0.177	0.117

- maksymalne odchyłki na fotopunkcie:

dX [m]	dY [m]	dZ [m]
0.329	0.332	0.218

Najważniejsze charakterystyki dotyczące wykonania obserwacji metodą automatycznej korelacji w tym wariancie aerotriangulacji to:

- wyznaczenie 468 punktów wiążących, co odpowiada ok. 1470 punktom na poszczególnych zdjęciach..
- średnia liczba punktów wiążących na zdjęcie – ok. 60
- minimalna liczba punktów wiążących na zdjęciu – 27
- maksymalna liczba punktów wiążących – 81
- liczba punktów wiążących szeregi – 40

Rozkład punktów wiążących oraz osnowy jest ilustrowany na rysunku nr 1.

Z analizy tego rysunku wynika że, rozkład punktów wiążących na zdjęciach w tym wariancie jest prawidłowy w przypadku łączenia zdjęć w szeregu. Punkty są rozłożone równomiernie, a na zdjęciu występuje średnio ok. 60 punktów, co zapewnia prawidłowe powiązanie zdjęć. W przypadku łączenia szeregów można zaobserwować dwa obszary gdzie brakuje punktów wiążących (pomiędzy zdjęciami 392, 391 i 95, 96 oraz pomiędzy 48, 47 i 302, 301) w tych miejscach wymagane by były dodatkowe pomiary przeprowadzone przez obserwatora. Dodatkowo ten sam blok został opracowany z uwzględnieniem środków rzutów. Tak wykonany wariant aerotriangulacji miał głównie odpowiedzieć na pytanie: „czy znajomość dokładniejszej lokalizacji środków rzutów wpłynie na proces korelacji i w efekcie na liczbę punktów wiążących w opracowywanym bloku”. Współrzędne środków rzutów zostały wykorzystane na etapie definiowania projektu oraz w procesie wyrównania. Ten wariant aerotriangulacji charakteryzują następujące wielkości:

- średni błąd typowego spostrzeżenia $\sigma = 4.7\mu\text{m}$
- średni błąd wpasowania na fotopunktach:

MX [m]	MY [m]	MXY [m]	MZ [m]
0.148	0.177	0.163	0.122

- maksymalne różnice między współrzędnymi na fotopunkcie:

dX [m]	dY [m]	dZ [m]
0.250	0.269	0.250

W procesie automatycznej korelacji program ISAT wyznaczył:

- 267 punktów wiążących, co odpowiada ok. 950 punktom na poszczególnych zdjęciach..
- średnia liczba punktów wiążących na zdjęcie – ok. 40

- minimalna liczba punktów wiążących na zdjęciu – 20
- maksymalna liczba punktów wiążących – 50
- liczba punktów wiążących szeregi – 36

Rozkład punktów wiążących oraz osnowy dla tego wariantu jest ilustrowany na rysunku nr 2.

Zaskakującym jest to, że w wyniku automatycznej korelacji w wariancie z wykorzystaniem współrzędnych środków rzutów program ISAT wyznaczył mniej punktów wiążących. Przyczyną takiego wyniku może być sposób działania algorytmu programu, który podczas procesu korelacji automatycznie usuwa punkty mniej pewne (o niższym współczynniku korelacji). Punkty wiążące szeregi w tym wariancie są rozłożone korzystniej. Obszary na łączeniu szeregów są równomiernie pokryte punktami wiążącymi. Mała liczba punktów wiążących szczególnie na zdjęciach: 147 i 97 może spowodować konieczność wykonania dodatkowych pomiarów przez obserwatora. Wyniki wyrównania wskazują na wyższą dokładność wyrównania w przypadku tego wariantu, gdyż uzyskane odchyłki na punktach osnowy są niższe. Nieznacznie większa wartość błędu średniego typowego spostrzeżenia (σ) wynika z faktu wykonania wyrównania bloku z dodatkowymi obserwacjami środków rzutów.

Po empirycznym stwierdzeniu, że na proces korelacji w wykorzystywanym module ISAT nie wpływa znajomość środków rzutów eksperyment z aerotriangulacją wieloczasową wykonano bez wykorzystywania środków rzutów jako dodatkowych obserwacji. W nowo zdefiniowanym projekcie przewidziano wykorzystanie łącznie 40 zdjęć tego samego obszaru wykonanych w 1995 i 1997 roku.

Wyrównanie tak zdefiniowanego bloku wieloczasowego charakteryzują następujące parametry:

- średni błąd typowego spostrzeżenia $\sigma = \pm 6.9 \mu\text{m}$,
- średni błąd wpasowania fotopunktów:

MX [m]	MY [m]	MX Y [m]	MZ [m]
0.172	0.232	0.204	0.130

- maksymalne odchyłki na fotopunkcie:

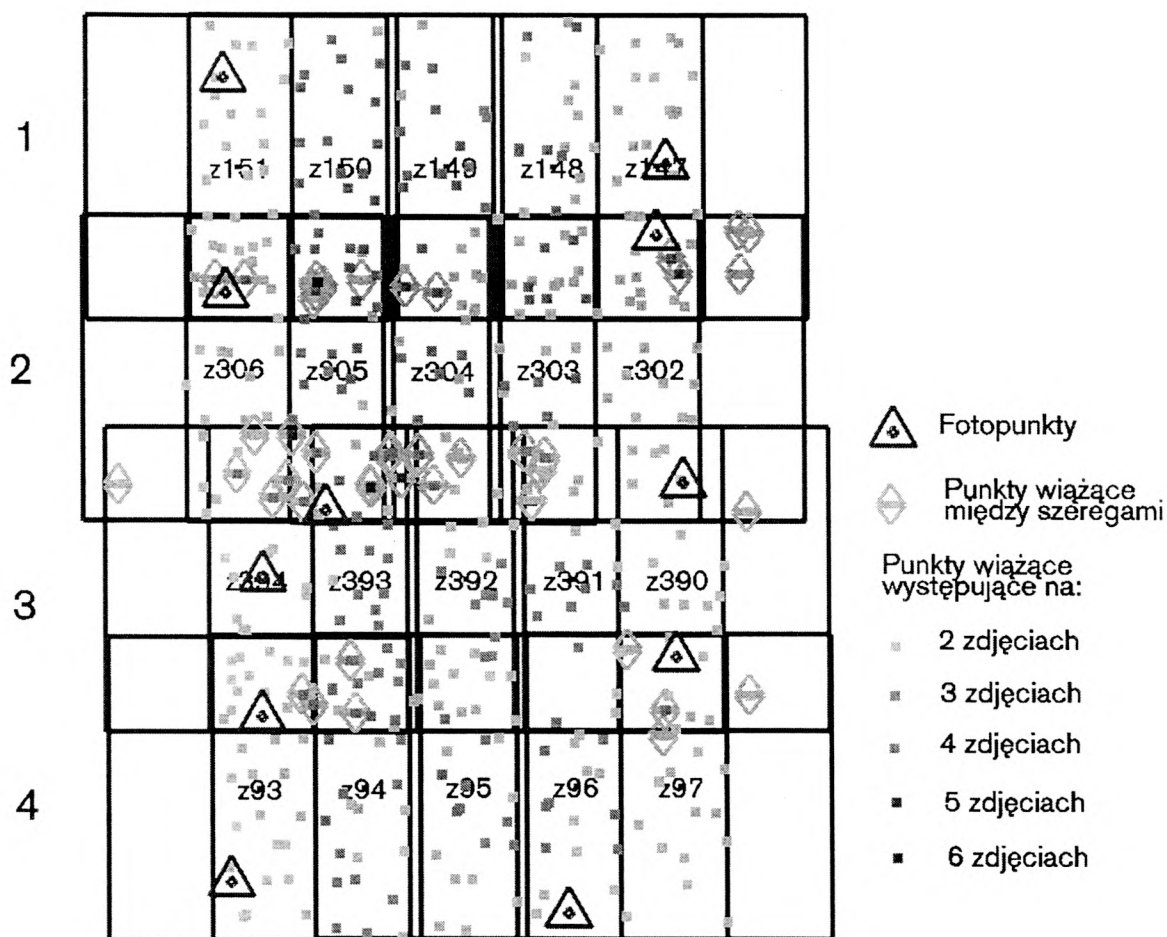
dX [m]	dY [m]	dZ [m]
0.236	0.361	0.223

Proces automatycznej korelacji dla przeprowadzonej aerotriangulacji wieloczasowej charakteryzują następujące wielkości:

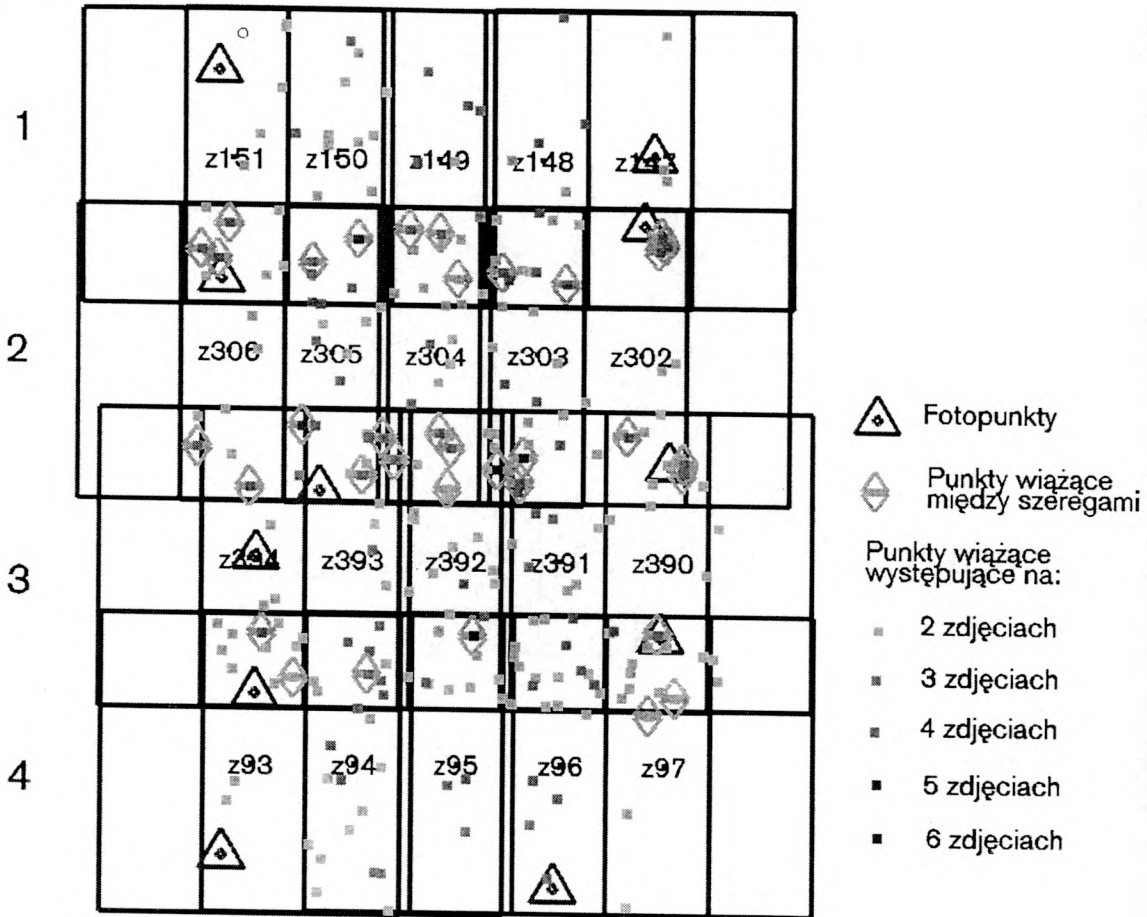
- program wyznaczył 962 punkty wiążące, co odpowiada ok. 2300 punktom na poszczególnych zdjęciach..
- średnia liczba punktów wiążących na zdjęcie – ok. 60

- minimalna liczba punktów wiążących na zdjęciu – 35
- maksymalna liczba punktów wiążących – 84
- liczba punktów wiążących szeregi złożone ze zdjęć z jednego okresu – 44.
- liczba punktów wiążących zdjęcia z dwóch okresów – 87.

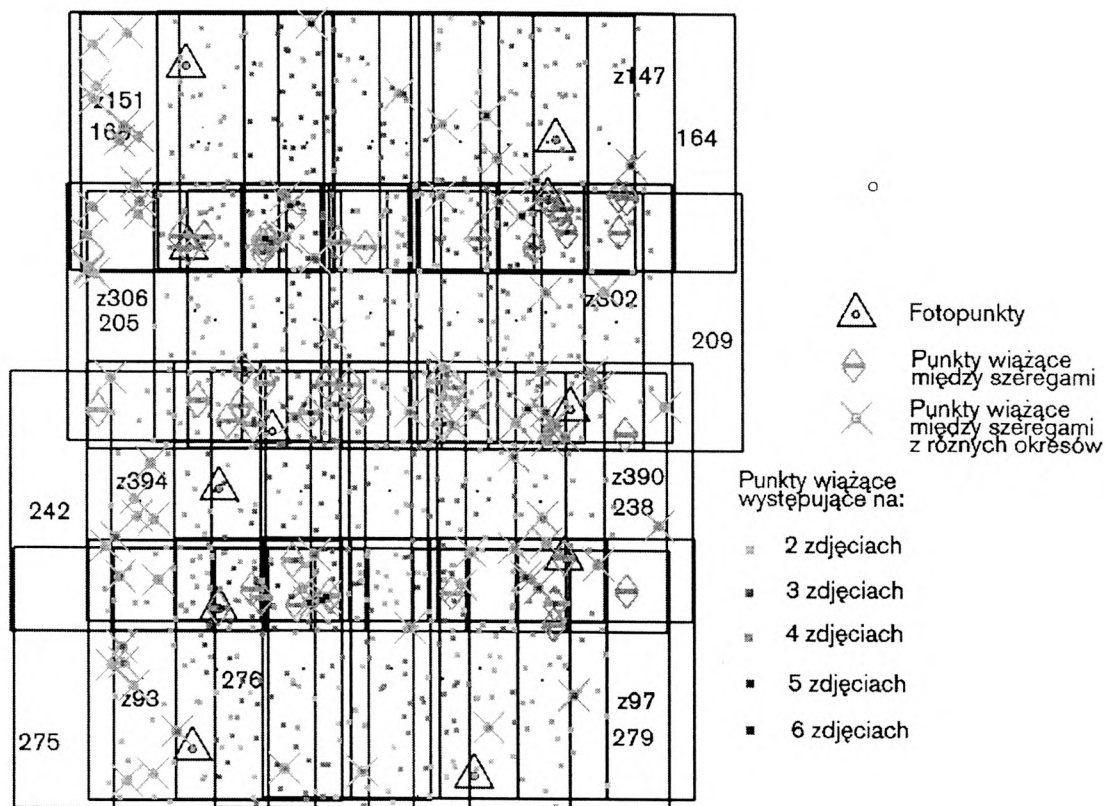
Na podstawie prezentowanej statystyki można stwierdzić, że jednocześnie obserwowane i wyrównane dwa zespoły zdjęć tego samego terenu wykonane w odstępie dwu letnim pozwoliły na prawidłowe odtworzenie parametrów orientacji zewnętrznej zdjęć nie uzbrojonych w osnowę terenową.



Rys. 1 Szkic bloku zdjęć z 1995 roku z rozkładem punktów wiążących i punktów osnowy fotogrametrycznej. Zastosowane oznaczenia na rysunku są zgodnie z legendą



Rys. 2 Szkic bloku zdjęć z 1995 r. wraz z lokalizacją punktów wiążących wyznaczonych modułem ISAT z uwzględnieniem środków rzutów. Na rysunku zastosowano oznaczenia jak w legendzie



Rys. 3. Szkic bloku aerotriangulacji wieloczasowej.

Kolorem niebieskim oznaczone zdjęcia w kolorze niebieskim, a kolorem fioletowym oznaczono zdjęcia z 1997 roku.

5. Podsumowanie

Przedstawiona w niniejszym artykule metodyka wykonywania aerotriangulacji wieloczasowej jest dedykowana dla terenów zurbanizowanych systematycznie pokrywanych zdjęciami lotniczymi. Wykonywanie tych zdjęć według stałego nalotu pozwala na wykorzystanie do pomiaru programów automatycznej aerotriangulacji. Dzięki stosowanej w tych programach opcji multi-photo możliwe jest programowe przyporządkowanie homologicznych obrazów na wielu zdjęciach jednocześnie. Prace eksperymentalne wykazały, że moduł ISAT daje prawidłowy rozkład punktów wiążących dla typowych bloków zdjęć. W przypadkach wykorzystania środków rzutów lub realizacji nietypowych bloków (np. aerotriangulacja wieloczasowa) mechanizmy automatyczne zawarte w tym module powodują zmniejszenie liczby wyznaczanych punktów wiążących i konieczność ich manualnego uzupełnienia.

Pomimo tego mankamentu (wykorzystywanego modułu programowego ISAT stacji IS 2000 Z/I imaging) przeprowadzona weryfikacja zaproponowanej metodyki aerotriangulacji wieloczasowej na bloku zdjęć testowych w skali 1: 6250 miasta Poznania dała pozytywne rezultaty. Uzyskane wyniki w pełni potwierdziły założenia koncepcyjne. Praktycznie nowe zdjęcia w takim procesie mają wyznaczone parametry orientacji zewnętrznej bez punktów osnowy polowej. Chcąc wykorzystywać produkcyjnie zaproponowane rozwiązanie należy archiwizować cyfrowe projekty aerotriangulacji.

6. Literatura:

- [1] Ackermann, F., 1991, GPS for Photogrammetry. Proceedings of ISPRS, pp 17-69.
- [2] Ackermann, F., Schade, H., 1993. „Application of GPS for Aerial Triangulation” Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 59 No 11, pp 1625-1632.
- [3] Fritsch, D., 1995, „Introduction into Digital Aerotriangulation” , Proceed. 45. Photogrammetric Week, pp. 165- 171.
- [4] Heipke, Ch., 1996, „Automation of Interior, Relative and Absolute Orientation”, Comm.III ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 297 -309.
- [5] Heipke, Ch, Jacobsen. K, Wegmann, H, 2001, The OEEPE Test on Integrated Sensor Orientation – Results of Phase I, Photogrammetric Week, pp. 195- 205.
- [6] Jeyapalan, K., 1996, „Airborne GPS”, Comm.III ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 377 -382.
- [7] Kruck, E., 1996, „Advanced Combined Bundle Block Adjustment with Kinematic GPS Data”, Comm.III ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 394 –398
- [8] Preuss,R.,1997, „Sposoby odtwarzania orientacji zdjęć we współczesnych technologiach fotogrametrycznych.”, materiały seminarium PTFiT.
- [9] Skaloud, J., Cramer, M., Schwarz, K., 1996, „Exterior Orientation by Direct Measurement of Camera Position and Attitude”, Comm.III ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 125 -129.

Recenzował: dr inż. Zdzisław Kurczyński