

Ryszard Preuss

SPOSOBY ODTWARZANIA ORIENTACJI ZDJEĆ WE WSPÓLCZESNYCH TECHNOLOGIACH FOTOGRAMERYCZNYCH*

1. Wprowadzenie

Właściwe pozyskiwanie danych przestrzennych ze zdjęć lotniczych jest zawsze poprzedzane czynnością rekonstrukcji modelu przestrzennego. W metodach analitycznych lub cyfrowych jest ona zawsze wykonywana matematycznie z wykorzystaniem warunku kolinearności lub komplanarności. Ten etap pracy nie dostarcza jeszcze konkretnego produktu, ale decyduje w sposób istotny o precyzji właściwych wyników pomiaru fotogrametrycznego. Dlatego też śledząc rozwój technologii fotogrametrycznych widzimy tendencję do ciągłego zwiększenia stopnia automatyzacji tego etapu technologicznego oraz ograniczenia do minimum potrzebnych na tym etapie prac terenowych. W tradycyjnej technologii analogowej czynność odtwarzania orientacji była procesem pracochłonnym. Realizowana ona była metodą dwuetapową i składała się z tworzenia modelu poprzez wzajemną orientację wiązek oraz lokalizacji zrekonstruowanego modelu fotogrametrycznego w układzie odniesienia, w którym następnie były prezentowane wyniki opracowania. Proces tworzenia modelu nie wymaga dodatkowych informacji natomiast odtworzenie jego lokalizacji bazuje na punktach osnowy fotogrametrycznej. Niejednokrotnie położenie tych punktów jest wyznaczane techniką pomiarów bezpośrednich, co w sposób istotny zwiększa koszty samego produktu fotogrametrycznego. Istotnym postępem ograniczającym zakres prac terenowych było zastosowanie technologii aerotriangulacji do kameralnego wyznaczania położenia punktów osnowy fotogrametrycznej.

Rozwinięta w latach 60-tych naszego stulecia technologia aerotriangulacji analitycznej należy do najprecyzyjniejszych sposobów określania współrzędnych metodami fotogrametrycznymi. Uzyskiwana tą drogą dokładność lokalizacji punktu zaspokaja zarówno wymogi tworzenia opracowań kartograficznych jak również pomiarów dla celów katastralnych, zagęszczenia osnów terenowych, a także precyzyjnych wyznaczeń deformacji obiektów inżynierskich.

Opracowane dwa rozwiązania zasadniczego (jednoczesnego) wyrównania bloku zdjęć lotniczych bazujące na fotogrametrycznych danych wyjściowych w postaci niezależnych modeli lub niezależnych wiązek są stosowane praktycznie w nie zmienionej formie w najnowszych rozwiązaniach technologicznych stosowanych w fotogrametrycznych stacjach cyfrowych. Proces zasadniczego wyrównania jest obecnie traktowany jako proces wsadowy po uzyskaniu niezbędnych danych inicjalnych. Właśnie w metodach pozyskiwania danych

* Publikację opracowano na podstawie referatów prezentowanych na XVIII Kongresie ISPRS w ramach Komisji Nr III „Teoria i algorytmy”

inicjalnych widzimy ciągły postęp i one właśnie są głównymi problemami, którym wiele uwagi poświęcają grupy robocze III komisji technicznej ISPRS.

Ciągłe dążenie do zwiększenia efektywności metod aerotriangulacji wyraża się dążeniem do ograniczenia do minimum liczby terenowych punktów osnowy polowej. Osiągnięcie tego zamierzenia, przy zachowaniu jednocześnie wysokiej precyzji współrzędnych punktów wyznaczanych, wiąże się z uwzględnianiem w procesie zasadniczego wyrównania dodatkowych obserwacji wykonanych innymi technikami pomiarowymi. Od kilku lat z powodzeniem ten cel jest osiągany poprzez wykorzystanie pomiarów satelitarnych GPS (np. metoda kinematyczna), pozwalających na rejestrację trajektorii ruchu samolotu, co wtórnie pozwala na określenie pozycji środków rzutów w momencie fotografowania. Wykorzystanie środków rzutów jako dodatkowych obserwacji w procesie zasadniczego wyrównania ogranicza w sposób istotny liczbę wymaganych punktów osnowy terenowej.

Metody analityczne aerotriangulacji wymagają wyznaczenia lokalizacji punktów nowo wyznaczanych w postaci ich współrzędnych tłowych wszystkich ich odwzorowań na zdjęciach w bloku.

Aktualne rozwiązania technologiczne w wykorzystywaniu obserwacji środków rzutów techniką GPS oraz automatyzacja procesu określania współrzędnych tłowych punktów nowo wyznaczanych w fotogrametrycznych systemach cyfrowych są głównymi problemami omawianymi w niniejszym artykule. Dołączona do niego bibliografia zawiera najważniejsze pozycje literatury, jakie poruszają omawianą problematykę. Jednakże, przy opracowaniu tego referatu publikacje były wykorzystane jedynie do udokumentowania głównych tendencji, jakie mają miejsce zdaniem autora we współczesnych technologiach fotogrametrycznych.

2. Wspomaganie wykonania zdjęć fotogrametrycznych techniką GPS

Od momentu stworzenia nawigacyjnego systemu satelitarnego NAVSTAR/GPS (Global Positioning System) zaczęto podejmować próby jego zastosowania w geodezji. W fotogrametrii w fazie początkowej był on stosowany dla celów nawigacyjnych. Metody różnicowe realizowane w trybie on-line zostały wykorzystane do naprowadzania samolotu na kolejne szeregi wykonywanego bloku, utrzymywanie prostoliniowego lotu w danym szeregu oraz również do sterowania momentem otwarcia migawki. Stało to się możliwe po wprowadzeniu do eksploatacji kamer najnowszej generacji. W efekcie ten zakres wykorzystania techniki GPS spowodował, że charakterystyka geometryczna wykonywanych bloków stała się bliska ideału. Powstała możliwość wykonywania zdjęć celowanych z dokładnością do 30 m (większa precyzja jest ograniczona właściwościami nawigowania samolotem). Jednakże nawet w największych skalach fotografowania cytowana precyzja gwarantuje stałość pokrycia podłużnego i poprzecznego z wystarczającą dokładnością. Ta charakterystyka zdjęć w bloku upraszcza problem odtwarzania orientacji zdjęć. Wspólne obszary pokrycia są wykonane w sposób regularny co ogranicza liczbę potrzebnych punktów wiążących pomiędzy szeregami. Natomiast w technikach cyfrowych możemy dzięki stosowaniu systemu GPS dostarczyć danych inicjalnych z dużo wyższą precyzją niezbędną do wykonywania procesu korelacji na homologicznych fragmentach obrazów. Wraz z rozwojem technologii GPS i opracowania (pomiar kinematyczno-różnicowy) powstała możliwość wyznaczania pozycji środków rzutów zdjęć wykonywanych w czasie lotu fotogrametrycznego. Pomiar taki sprowadza się do dyskretnego wyznaczenia trajektorii poruszania się anteny odbiornika GPS umieszczonej w samolocie fotogrametrycznym. Gęstość takiego pomiaru jest funkcją prędkości samolotu oraz częstotliwości rejestracji.

Obecnie stosowana jest rejestracja co 0,5 i 1,0 s. Taki quasi ciągły pomiar jest wykonywany względem odbiornika stacjonarnego umieszczonego na znanym punkcie osnowy geodezyjnej pozwalając w ten sposób wyeliminować błędy systematyczne systemu GPS. Właściwe określenie współrzędnych środków rzutów jest wyznaczane w procesie obliczeniowym po zakończeniu lotu (a posteriori). Precyzyjne wyznaczenia wymagają uwzględnienia mimośrodków anteny względem środka obiektywu kamery jak również wykonania transformacji wraz z korekcjami wysokości w celu przejścia do wymaganego układu odniesienia. Uwzględnianie środków rzutów określonych tą drogą przyczynia się do istotnego (ok. 10 razy) zmniejszenia potrzebnych punktów osnowy polowej. Jak więc widzimy technika GPS w sposób znaczący wpłynęła na rozwój i modyfikację obecnie stosowanych technologii fotogrametrycznych.

3. Wyznaczanie orientacji zewnętrznej zdjęć w bloku

Proces aerotriangulacji w najnowszych rozwiązaniach technologicznych w dalszym ciągu odgrywa bardzo istotną rolę. Prowadzi on do wzajemnego uzgodnienia orientacji zdjęć oraz odtworzenia lokalizacji bloku względem układu odniesienia, w którym będzie prowadzone właściwe opracowanie numeryczne lub cyfrowe mapy. We wcześniejszych technologiach analogowo-analitycznych i analitycznych wymagał on zaangażowania wyspecjalizowanych obserwatorów, którzy gwarantowali wymaganą precyzję przenoszenia punktów wiążących w pasach wielokrotnego nakładania się zdjęć lotniczych w bloku i ich pomiaru. Jednocześnie ostateczny rezultat (dokładność wyznaczenia położenia punktów nowo wyznaczanych w układzie terenowym) zależał od precyzji i ilości stosowanych punktów osnowy polowej.

Wprowadzane aktualnie modyfikacje do procesu aerotriangulacji dążą do:

- zautomatyzowania procesu przyporządkowania wspólnych odwzorowań i pomiaru punktów łącznych;
- ograniczenia do minimum liczby potrzebnych punktów osnowy polowej.

Przejęcie z aerotriangulacji analitycznej do cyfrowej jest podobną rewolucją jak przejście z metod analogowych do analitycznych. Jednakże w tym przypadku nie następuje poprawa dokładności opracowania, a zmienia się głównie zakres stosowania procedur automatycznych eliminujących w praktyce potrzebę zatrudniania wysoko kwalifikowanych obserwatorów posiadających predyspozycje do obserwacji stereoskopowych. W najnowszym oprogramowaniu fotogrametrycznych stacji cyfrowych jedynie proces identyfikacji i pomiaru punktów sygnalizowanych osnowy polowej przebiega interaktywnie z udziałem operatora, pozostałe etapy rekonstrukcji modeli przestrzennej mają charakter autonomiczny.

Typowy przebieg cyfrowej aerotriangulacji jest następujący:

- 1) przygotowanie procesu (inicjalizacja), obejmuje skanowanie zdjęć, wprowadzenie do oprogramowania danych geometrycznych o kamerze lub kamerach oraz sposobie wykonywania zdjęć. Na tym etapie bardzo pomocne są dane dodatkowe z procesu nalotu fotogrametrycznego. Wykorzystanie do sterowania nalem systemu GPS, które omówiono wcześniej przyczynia się do uproszczenia tego etapu pracy. W praktyce wykorzystywane są bezpośrednio raporty z takich programów jak T-Flight, CCNS GPS-Control itp.;

2) przyporządkowanie punktów homologicznych na wielu obrazach, jest to proces zastępujący w tradycyjnym rozwiązaniu etap nakłuwania punktów wiążących w pasach pokrycia podłużnego i poprzecznego zdjęć w bloku. Najczęściej proces był dotychczas realizowany interaktywnie z udziałem operatora. Jednak od kilku lat są z powodzeniem stosowane procedury całkowicie automatyczne. W tych procedurach zadanie to jest wykonywane w sposób sekwencyjny według określonej strategii prowadzącej do zdefiniowania wzajemnego usytuowania homologicznych części zdjęć z precyzją umożliwiającą przeprowadzenie korelacji obrazów według metody Cross Correlation Matching (CCM) lub Feature Based Matching (FBM) prowadzących do uzgodnienia obrazów z dokładnością pikselową.

Metoda CCM bazuje na określeniu stopnia podobieństwa dwóch porównywanych lub dopasowywanych fragmentów obrazów poprzez wyznaczenie współczynnika korelacji będącego stosunkiem kowariancji do średniej geometrycznej wariancji obu porównywanych obrazów. Jeżeli kowariancja jest unormowana to współczynnik korelacji może się zawierać w przedziale ± 1 . Wartość współczynnika korelacji -1 otrzymamy, gdy jeden z porównywanych obrazów będzie diapozytywem a drugi negatywem.

Metoda FBM bazuje na wydzieleniu z fragmentów porównywanych wyróżniających się szczegółów i następnie ich przyporządkowaniu. Dla wyodrębnienia takich elementów (punktów, linii lub powierzchni) stosuje się filtrację obrazów. Dzięki zastosowaniu specjalnych operatorów (Moraveca Dreschlera, Förstnera) dla analizowanych obrazów układane są listy wydzielonych obiektów. Odpowiednie algorytmy dokonują ich wzajemnego przyporządkowania i w efekcie wyznaczenia wzajemnej pozycji analizowanych obrazów. Dokładność tego sposobu korelacji jest uwarunkowana głównie od zastosowanego wymiaru okna w operatorach analizujących.

Cytowane metody korelacji pozwalają na osiągnięcie zadawalających rezultatów w rozsądnym wymiarze czasowym pod warunkiem, że odpowiadające sobie obszary są względem siebie przemieszczone o wartość rzędu 10 pikseli. Znajomość danych inicjalnych z taką precyzją jest głównym czynnikiem powodzenia procesu automatycznej aerotriangulacji. W praktyce są możliwe do osiągnięcia następujące przybliżenia przy wykorzystaniu najnowszych technologii wykonywania zdjęć (co zostało pod tym kątem scharakteryzowane w rozdz. 2.).

Precyzyjne określenie środków rzutów w trybie on-line oraz zastosowanie platformy stabilizującej pozwala na wstępne oszacowanie homologicznych podobszarów z dokładnością wyższą niż 10 mm w skali zdjęcia, nawet dla zdjęć przeznaczonych do pomiarów katastralnych. Chcąc spełnić omówione wcześniej kryterium należy zastosować metodę „piramidy”. Metoda ta bazuje na wytworzeniu ciągu obrazów o sekwencyjnie pomniejszonej rozdzielczości. Przykładowo mając zdjęcie oryginalne zeskanowane z rozdzielczością 30 μm generujemy szereg obrazów o rozdzielczości odpowiednio 60, 120, 240, 480 i 960 μm . W efekcie dla najniższej rozdzielczości mamy spełniony warunek wstępnego przyporządkowania odpowiadających sobie podobszarów i można przeprowadzić transfer punktów. Potrzeba wygenerowania i przechowywania obrazów w „piramidzie” powoduje dodatkowe powiększenie zbiorów rastrowych rzędu 40%. Dlatego przy stosowaniu takich rozwiązań ważnego znaczenia nabiera sprawa kompresji plików rastrowych. Jak wynika z wielu publikacji stosowanie rozwiązania JPEG ze współczynnikiem Q rzędu 100 w praktyce nie pogarsza wyników przeprowadzanych operacji geometrycznych jednocześnie przyczyniając się do 10-krotnego zmniejszenia wielkości zbiorów obrazowych.

Przedstawiona i stosowana w praktyce strategia nie uwzględnia faktu występowania deniwelacji w terenie. Przy stosunku deniwelacji do wysokości fotografowania powyżej 10% ten czynnik nabiera najistotniejszego znaczenia i może przekreślić możliwość automatycznego uzgodnienia wzajemnie nakładających się podobszarów zdjęć w bloku. Dla uwzględnienia deniwelacji w najnowszych wersjach oprogramowania [Krzystek, Heuchel, Hirt, Petran, 1995] zaczęto stosować strategię odtwarzania DTM równoległe z procesem aerotriangulacji. Wzajemne sprzężenie zwrotne tych dwóch procesów odtwarza DTM w otoczeniach punktów Grubera i w konsekwencji prowadzi do przyporządkowania podobszarów pokrywających się zdjęć w docelowej rozdzielczości oryginalnego zdjęcia poprzez przechodzenie przez kolejne poziomy piramidy w odwrotnej kolejności;

- 3) pomiar ostateczny punktów wiążących odbywa się w obszarach, w których z poprzedniego etapu osiągnięto wymagany stopień korelacji. W efekcie mierzone nie są pojedyncze punkty lecz całe grupy punktów. W praktyce na pojedynczym zdjęciu w wyniku automatycznie wykonywanej aerotriangulacji współrzędne uzyskuje kilkaset punktów. Punkty te są zlokalizowane w grupach po kilkadziesiąt w otoczeniach idealnego wzorca punktów Grubera. Samo wyznaczenie współrzędnych tłowych odbywa się najczęściej z wykorzystaniem metody korelacji bazującej na metodzie najmniejszych kwadratów (Least Squares Matching = LSM). Metoda ta zakłada, że analizowane obrazy są w tym samym układzie współrzędnych i są już przyporządkowane z dokładnością pikselową. Gwarantuje ona uwzględnienie różnych wartości radiometrycznych odwzorowań punktu i zmienną skalę odwzorowania uzyskując wynikową precyzję podpikselową przyporządkowania. W praktyce uzyskuje się dokładności rzędu 0,1 wymiaru piksela.

Pomiar punktów osnowy, jeżeli są one sygnalizowane, ma dotychczas najczęściej charakter interaktywny i odbywa się według następującego schematu:

- przygotowanie biblioteki cyfrowej rodzajów punktów sygnalizowanych;
- określenie przez operatora przybliżonej pozycji punktu sygnalizowanego na jednym zdjęciu;
- zastosowanie metody korelacji dla przybliżonej lokalizacji obrazów sygnału na obszarach wspólnego pokrycia zdjęć w bloku;
- precyzyjny pomiar metodą korelacji LSM w porównaniu z wzorcem w bibliotece.

Skuteczność takiego postępowania jak wynika z badań [Hahn, Kleifner, III] jest bardzo wysoka (rzędu 98,5% liczby punktów sygnalizowanych udało się pomierzyć według zaproponowanego schematu). Takie postępowanie jednocześnie gwarantuje precyzję pomiaru rzędu 0,2 wymiaru piksela przy wymiarze sygnału rzędu 5×5 pikseli. Określenie współrzędnych tłowych ze współrzędnych pikselowych odbywa się drogą transformacji afinicznej na nominalne współrzędne znaczków tłowych znane z metryki kalibracji kamery. Sam proces pomiaru znaczków tłowych jest omówiony w następnym rozdziale.

Łączne wyrównanie bloku zdjęć cyfrowych jest realizowane znanymi z rozwiązań analitycznych metodami niezależnych modeli lub niezależnych wiązek wyposażonymi w moduły do automatycznego wykrywania błędów grubych. Dzięki dużej nadwymiarowości liczby punktów podlegających wyrównaniu proces wykrywania błędów grubych jest wysoce efektywny i ich eliminacja w praktyce nie prowadzi do zaburzeń w rozwiązywanej konstrukcji bloku. Dzięki temu przebieg automatycznej aerotriangulacji jest w praktyce niezawodny.

Proces interaktywnej aerotriangulacji cyfrowej stosowany jest przykładowo w systemie Helava. Publikacja [Kersten, O'Sullivan, III] przedstawia wyniki praktyczne oraz analizę czasową aerotriangulacji półautomatycznej z wykorzystaniem takiego systemu. Jak wynika z przedstawionych zestawień łączny proces obejmujący skanowanie zdjęć, pomiar w trybie manualnym oraz ostateczne wyrównanie obejmuje ok. 20 minut na jedno zdjęcie. Jest to w porównaniu z aerotriangulacją wykonywaną na autografach analitycznych ok. 2 razy szybciej, przy zachowaniu jednocześnie porównywalnych dokładności wyników.

Przykładem systemu, w którym proces przyporządkowania punktów i ich pomiar przebiega w sposób autonomiczny jest system Phodis-AT. Wykorzystuje on do tego celu program Match-AT pozwalający na automatyczną rekonstrukcję DTM i dzięki temu automatyczny transfer punktów. W związku z takim podejściem etap pomiaru punktów osnowy polowej (wykonywany jest półautomatycznie) jest realizowany na początku procesu aerotriangulacji. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania czas wykonania aerotriangulacji w przeliczeniu na pojedyncze zdjęcie zmniejsza się do kilku minut (zależy to głównie od możliwości stosowanego komputera). W eksperymentach praktycznych z zastosowaniem stacji SGI z procesorem R-4000 MIPS czas ten wyniósł 5 minut [Krzystek, Heuchel, Hirt, Petran, 1995].

Dla ograniczenia liczby potrzebnych punktów osnowy polowej od kilku lat z powodzeniem wykorzystuje się technikę GPS do wyznaczania środków rzutów. Uwzględnienie wyników pomiarów GPS można zrealizować w obydwu najczęściej stosowanych metodach łącznego wyrównania bloku. Jednak w metodzie niezależnych wiązek jest to bardziej efektywne i to rozwiązanie jest głównie obecnie modyfikowane. W praktyce techniką GPS określamy pozycję anteny odbiornika w określonym interwale czasowym. Istnieje więc problem uwzględnienia mimośrodów pomiędzy pozycją anteny a interesującym nas położeniem środka rzutów. W procesie wyrównania metodą niezależnych wiązek rozszerza się więc równanie kolinearności o wartości mimośrodków, które mogą być niewiadomymi wyrównania lub wartościami wyznaczonymi w oddzielnym procesie kalibracji systemu. System GPS dostarcza nam współrzędnych punktów mierzonych w układzie globalnym WGS-84.

Biorąc pod uwagę, że w praktyce punkty osnowy są zdefiniowane najczęściej w krajowych lub lokalnych systemach geodezyjnych wynik aerotriangulacji winien być ostatecznie przedstawiony w stosowanych układach odniesienia. Pomiary naziemne punktów osnowy polowej, nawet jeżeli też są wykonywane techniką GPS, nie są na ogół synchronizowane z momentem wykonywania zdjęć. Dlatego też w modelu funkcjonalnym stosowanym do wyrównania łącznego obserwacji fotogrametrycznych i wykonywanych techniką GPS wprowadzono parametry dodatkowe integrujące różne stosowane systemy odniesień. Praktycznie dotychczas w stosowanym oprogramowaniu 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 wyznaczane jako stałe dla pojedynczego szeregu, grupy szeregów lub całego bloku.

Na prawidłowe 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

dotychczasowych zdjęć w poprzecznych szeregach na początku i końcu bloku. 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.

Ostatnio zaproponowano nowe rozwiązanie wykorzystania modelu obserwacji środków rzutów techniką GPS [Kruck, III]. Nowa wersja programu Bingo-F pozwala 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, które w dotychczasowych rozwiązaniach były określane praktycznie dla każdego szeregu oddzielnie. W efekcie w takim podejściu ograniczona jest do minimum liczba dodatkowych niewiadomych, które opisują poprawnie model fizyczny wykonanych obserwacji GPS oraz parametry transformacji tego zbioru do układu terenowego, w którym jest rozwiązywany blok aerotriangulacji. Dzięki temu w praktyce nie trzeba już (dla poprawnego obliczenia shiftu i driftu) wykonywać dodatkowych poprzecznych szeregów oraz stosować zwiększonej liczby punktów osnowy polowej.

Oryginalne rozwiązanie wykorzystywane dla określenia kątów orientacji pojedynczego szeregu zostało przedstawione w publikacji [Ebadi, Chapman, III]. Autorzy tego artykułu proponują wykorzystać dodatkowe pomiary na wysokich obiektach inżynierskich odfotografowanych na dowolnych stereogramach w szeregu. Wprowadzając dodatkowe warunki, że punkty obserwowane na różnych poziomach takich obiektów powinny posiadać jednakowe współrzędne sytuacyjne możemy ograniczyć do minimum liczbę potrzebnych punktów osnowy polowej. Jest to szczególnie cenna propozycja w przypadku opracowywania wydłużonych obiektów odwzorowywanych na pojedynczych szeregach (np.: przy inwentaryzacji lub tworzeniu podkładów dla autostrad), dla których liczba koniecznych punktów jest relatywnie duża. Przy średnich skalach fotografowania zdjęć lotniczych $mZ < 15\ 000$ należałoby skorzystać z tzw. obiektów topograficznych, które mają swoją lokalizację w bazie geometrycznej mapy numerycznej.

Równoległe z pracami nad doskonaleniem technologii aerotriangulacji prowadzone są eksperymenty w celu jej całkowitego wyeliminowania [Jeyapalan, III]. Zamontowanie na samolocie czterech anten GPS daje potencjalną możliwość zrezygnowania z punktów osnowy polowej oraz samego procesu aerotriangulacji. Problemem jest, że wyznaczone w takim sposobie kąty orientacyjne nie są zgodne z kątami orientacji zewnętrznej zdjęcia. Praktycznie istnieje stała rozbieżność dla kąta W. Tą wartość proponuje autor cytowanej publikacji określić metodą samokalibracji. Jeżeli pole testowe znajduje się blisko opracowywanego obiektu (rzędu 10 km) tym sposobem możemy wyznaczać położenie punktów w terenie (poprzez realizację jedynie przestrzennego wcięcia wprzód) z dokładnością rzędu 10 cm. Warunek bliskości pola testowego do kalibracji systemu jest konieczny ze względu na problem „undulacji” geoidy.

Inne podejście tej samej koncepcji jest prezentowane w [Skaloud, Cramer, Schwarz, III]. W tym przypadku wykorzystano integrację różnych systemów poprzez łączne wykorzystanie systemu GPS i INS pozwalającego na wyznaczenie łączne elementów orientacji zewnętrznej

liniowych i kątowych. Przeprowadzono badania nad możliwością całkowitego wyeliminowania aerotriangulacji. Zastosowano metodę geokodowania do lokalizacji położenia punktów w przestrzeni. W pracach eksperymentalnych dla zdjęć lotniczych w skali 1:6 000 ze stożkiem szerokokątnym i pokryciem podłużnym 80% i 60% poprzecznym uzyskano na punktach kontrolnych dokładność sytuacyjną ± 35 cm i wysokościową ± 50 cm. Można to uznać za zadawalającą dla wielu opracowań mapowych.

4. Rekonstrukcja modeli przestrzennych w fotogrametrycznych stacjach cyfrowych

Praca na fotogrametrycznych stacjach cyfrowych wymaga obrazu źródłowego w postaci cyfrowej. W przypadku opracowania zdjęć lotniczych musi więc nastąpić ich skanowanie. Ten proces obecnie nabiera kapitalnego znaczenia. Z jednej strony należy skanować z odpowiednią rozdzielczością (dla uzyskania założonych finalnych dokładności opracowania fotogrametrycznego), a z drugiej należy zadbać o odpowiednią charakterystykę radiometryczną zapisu cyfrowego. Ten aspekt staje się szczególnie ważny ze względu na stosowane metody automatycznej korelacji. Programowo przyporządkowywane obrazy powinny być radiometrycznie podobne i wiele algorytmów wręcz nie uwzględnia rozbieżności radiometrycznych, które mogą powstać w wyniku wstępnej obróbki obrazu nie mówiąc już o różnicach powstałych w momencie rejestracji (różne oświetlenie tego samego fragmentu terenu wynikające z pozycji kamery lotniczej i wpływu deniwelacji terenu). Tak więc proces skanowania i wstępnej obróbki musi dostarczać obrazów cyfrowych o podobnym zakresie radiometrycznym i minimalnych kontrastach. Istotnym udogodnieniem jest orientacja zdjęć na nośniku skanera w ten sposób aby układ współrzędnych obrazu cyfrowego był równoległy do układu tłowego. W ten sposób uzyskuje się lepsze przybliżenia lokalizacji znaczków tłowych i możliwość odtworzenia orientacji wewnętrznej zdjęć na drodze automatycznej.

Odtworzenie orientacji wewnętrznej jest zawsze pierwszym etapem procesu rekonstrukcji przestrzennej modelu ze zdjęć lotniczych lub obrazów satelitarnych. Czynność ta w cyfrowych stacjach fotogrametrycznych jest wykonywana jednokrotnie. Przy ponownej pracy na zdjęciach, dla których orientacja wewnętrzna była już wcześniej wykonywana, jest ona jedynie odczytywana z pliku gdyż relacja pomiędzy układem „pikselowym”, a układem tłowym jest stała. Sam „odczyt” położenia znaczków tłowych na obrazie cyfrowym może się odbyć półautomatycznie lub automatycznie. W obydwu przypadkach rzeczywisty obraz znaczka jest porównywany z obrazem wzorcowym posiadanym w bibliotece oprogramowania. Najczęściej do pomiaru wykorzystuje się metodę LSM. Metoda ta pozwala na pomiar tego typu punktów na drodze korelacji z dokładnością pod pikselową rzędu 0,01 wymiaru piksela. Oczywiście w praktyce jest ona często niższa ze względu na sposób odwzorowania się znaczków na obrazie oraz wpływ otoczenia na proces korelacji.

Dalszy proces rekonstrukcji modelu przestrzennego może przebiegać na dwa sposoby:

- przejściu orientacji zdjęć z procesu aerotriangulacji;
- wykonaniu orientacji wzajemnej (budowa modelu) i określeniu jego lokalizacji w układzie odniesienia drogą transformacji.

Większość stacji cyfrowych dla wykorzystania parametrów orientacji zdjęć, niezależnie jaka metoda ścisłego wyrównania do procesu aerotriangulacji została wykorzystana, ma specjalne drivery do ich konwersji na właściwą postać danych używanych w systemie. Taki sposób rozwiązania należy uznać za najbardziej poprawny, gdyż tylko w ten sposób

opracowywany model ma orientację taką jaka mu została nadana na etapie wykonania aerotriangulacji.

Jednak bardzo często stosowane jest drugie rozwiązanie i po określeniu elementów orientacji wzajemnej zdjęcia oryginalne przekształca się na normalne (o zerowych kątach orientacji) co w wielu przypadkach upraszcza dalsze etapy opracowania oraz stwarza możliwość stereoskopowej obserwacji w obrębie całego stereogramu.

Pomiar paralaks dla wyznaczenia elementów orientacji wzajemnej przeprowadzany jest automatycznie w punktach znajdujących się w otoczeniach punktów Grubera. Najczęściej wykorzystuje się większą liczbę lokalizacji niż 6, najczęściej 15. Przy czym w takim otoczeniu korelacji podlega do kilkunastu punktów wstępnie przyporządkowanych według strategii opisanej wcześniej przy omawianiu procesu automatycznej aerotriangulacji. W efekcie 5 niewiadomych (elementy orientacji wzajemnej) jest określanych z dużą precyzją dzięki dużej redundancji obserwacji. Pozwala to również efektywnie eliminować odstające obserwacje paralaksy poprzecznej, dla punktów gdzie korelacja obrazów została wykonana z obniżoną dokładnością.

Generalnie w tym procesie wykorzystywany jest warunek komplanarności zakładający, że promienie homologiczne do punktu wyznaczanego i baza powinny się znajdować w jednej płaszczyźnie. Jednocześnie ostatnio pojawiły się tendencje do określenia tych parametrów na podstawie innych warunków geometrycznych. W publikacji [Forket, III] zostało zaproponowane rozwiązanie bazujące na rekonstrukcji krzywych przestrzennych na podstawie ich odwzorowań na wielu zdjęciach. Wraz z rekonstrukcją tych krzywych określana jest również orientacja zdjęć, na których te krzywe były odwzorowane.

Po rekonstrukcji modelu na podstawie wykorzystania jedynie wewnętrznych związków jakie zachodzą pomiędzy zdjęciami tworzącymi stereogram, zachodzi potrzeba określenia skali i lokalizacji modelu w zewnętrznym układzie odniesienia. Typowe rozwiązanie tego zagadnienia polega na określeniu 7-mio parametrowej transformacji poprzez pomiar punktów na modelu punktów o znanej lokalizacji w układzie terenowym (punktów osnowy połowej lub wyznaczonych w procesie aerotriangulacji). Dokładność tego etapu prac zależy głównie od dokładności identyfikacji tych punktów w czasie ich pomiaru na zdjęciach. Najdokładniejsza identyfikacja jest osiągana dla punktów sygnalizowanych i dlatego, szczególnie dla zdjęć w skalach dużych i średnich punkty te sygnalizuje się przed wykonaniem nalotu. Dla potrzeb opracowań na stacjach cyfrowych wymiar sygnału należy tak dobrać aby punkt osnowy powierzchniowo odwzorował się przynajmniej na matrycy pikseli 5 x 5. Tak więc już na etapie projektowania zdjęć powinniśmy wiedzieć z jaką rozdzielczością będą zdjęcia skanowane.

Pomiar sygnalizowanych punktów osnowy jest możliwy dotychczas na drodze półautomatycznej. Może ona przebiegać według schematu prezentowanego w publikacji [Hahn, Kleifner, III]:

- przygotowanie biblioteki cyfrowej rodzajów punktów sygnalizowanych;
- określenie przez operatora przybliżonej pozycji punktu sygnalizowanego na jednym zdjęciu;
- zastosowanie metody korelacji dla przybliżonej lokalizacji obrazów sygnału na obszarach wspólnego pokrycia zdjęć w bloku;
- precyzyjny pomiar metodą korelacji metodą najmniejszych kwadratów w porównaniu z wzorcem w bibliotece.

W cytowanej publikacji wykazano, że takie podejście technologiczne jest skuteczne w 98,5% i daje precyzję pomiaru rzędu 0,2 wymiaru piksela przy wymiarze sygnałów rzędu 5 x 5 pikseli.

Wykonanie wszystkich orientacji (IO - Internal Orientation, RO - Relative Orientation, AO - Absolute Orientation) w stacjach cyfrowych jest wykonywane jednokrotnie, a ich wyniki są zapisywane w plikach orientacyjnych. Pozwala to na ich natychmiastowe przyporządkowanie przy ponownym wykorzystywaniu zdjęć, co pozwala na natychmiastowe przejście do właściwego opracowania fotogrametrycznego jakim może być: stereodigitalizacja, pomiar NMT lub generowanie cyfrowej ortofotomapy.

5. Podsumowanie

Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że we współczesnych technologiach fotogrametrycznych w zakresie odtwarzania orientacji zdjęć stosowane są modyfikacje metod mające na celu:

- ograniczenie do minimum prac terenowych związanych z pomiarami punktów osnowy polowej;
- przechodzenie na programowe przyporządkowywanie homologicznych punktów obrazów metodą korelacji.

Te czynniki głównie decydują o obserwowanym szerokim rozpowszechnianiu się cyfrowych metod fotogrametrycznych. Metody te dzięki temu stają się bardziej „przyjazne” dla użytkownika. W efekcie operatorem fotogrametrycznej stacji cyfrowej nie musi być już osoba z doświadczeniem fotogrametrycznym i o dobrych predyspozycjach do obserwacji stereoskopowej. W wielu przypadkach przy tworzeniu opracowań tematycznych byłoby wskazane, aby je wykonywali bezpośrednio zainteresowani użytkownicy.

Osiągnięcie jednak takiej popularyzacji i szerszego wykorzystania metod cyfrowych zależy od powszechnego stosowania w programach użytkowych programowej kompresji obrazu i ich instalacja na platformy PC.

Biorąc pod uwagę, że wynik korelacji zależy od jakości obrazu cyfrowego, głównym problemem w stosowaniu metod cyfrowych jest problem danych źródłowych w postaci cyfrowej. Obecnie dla zdjęć lotniczych przejście na formę cyfrową wymaga skanowania. Jest to proces, który decyduje o dokładności przyszłych opracowań. W przyszłości ośrodki dystrybuujące obrazy cyfrowe powinny gwarantować ich właściwą jakość do dalszego cyfrowego przetwarzania.

Literatura

- Arnold H. D., Herms P., Schroth R., 1993, *New Results from Photoflights with GPS*, Proceed 44. Photogrammetric Week, Stuttgart
- Fritsch D., 1995, *Introduction into Digital Aerotriangulation*, Proceed. 45. Photogrammetric Week, Stuttgart
- Gülch E., 1995, *Automatic Control Point Measurement*, Proceed. 45. Photogrammetric Week, Stuttgart

Hahn M., 1993. *Measurement by Image Matching - State-of-the-art in Digital Photogrammetry*, Proceed. 44. Photogrammetric Week, Stuttgart

Heipke Ch., 1993, *Performance and State-of-the-art of Digital Stereo Processing*, Proceed 44. Photogrammetric Week, Stuttgart

Krzystek P., Heuchel T., Hirt U., Petran F., 1995, *A New Concept for Automatic Aerial Triangulation*, Proceed. 45. Photogrammetric Week, Stuttgart

Schenk T., 1993. *Image Understanding and Digital Photogrammetry*, Proceed. 44. Photogrammetric Week, Stuttgart

Uwaga

Odsyłacze bibliograficzne z liczbą rzymską odnoszą się do spisu opracowań prezentowanych w czasie Kongresu, który zamieszczony jest na końcu niniejszego zeszytu. Rzymska liczba podana po nazwisku autora określa numer komisji do której należy cytowany tytuł.

Recenzował: dr inż. Władysław Mierzwa