

Pomiar położenia kamery fotolotniczej podczas lotu

GEOREFEREN

Bezpośredni pomiar elementów orientacji kamery w locie – dzięki integracji GPS i INS – otworzył drogę do redukcji, a nawet wyeliminowania osnowy polowej. Rozwiązania te przenikają do krajowego wykonawstwa. Jakże są tego skutki techniczne i ekonomiczne?

PAWEŁ FECZAN,
ZDZISŁAW KURCZYŃSKI

Pomiar fotogrametryczny odfotografowanych punktów terenowych sprowadza się do przestrzennego wcięcia w przód z pary zdjęć o znanych elementach orientacji zewnętrznej (tj. znanych stanowiskach fotografowania X, Y, Z i kątach obrotu zdjęć ω , ϕ , κ). Elementy te tradycyjnie wyznaczane są w procesie aerotriangulacji. Wykorzystując wzajemne pokrycia zdjęć, „spina” się je w przestrzenny blok i transformuje na układ terenowy poprzez grupę tzw. fotopunk-

tów. Prawie od początku historii zdjęć lotniczych podejmowano, czasem bardzo wyrafinowane, próby pomiaru tych elementów już podczas lotu. Pozwoliłoby to zmniejszyć lub wyeliminować punkty terenowe konieczne do opracowania. Wśród takich prób można wskazać:

- Fotografowanie linii horyzontu kamerami horyzontalnymi (sprzężonymi z kamerą fotogrametryczną), co pozwalało mierzyć kąty nachylenia kamery.
- Fotografowanie linii pionu materializowanej przez oś żyroskopu do wyznaczenia kątów nachylenia kamery.
- Fotografowanie położenia Słońca przez tzw. peryskop słoneczny, sprzężo-

ny z kamerą, do wyznaczenia kątów nachylenia kamery.

● Pomiar różnicy wysokości stanowisk kamery w momentach fotografowania poprzez pomiar różnicy ciśnienia atmosferycznego (za pomocą statoskopu).

● Poziomowanie kamer za pomocą ciężkich platform żyroskopowych, co pozwalało wykonywać zdjęcia o „zerowych” kątach nachylenia.

● Określenie położenia kamery za pomocą radiogeodezyjnych systemów nawigacyjnych, dopplerowskich czy inercyjnych.

Te liczne rozwiązania miały jedną wspólną cechę: pozwalały określić niektóre z elementów orientacji zdjęć. Jednak z powodu niezadowalającej dokładności (z punktu widzenia potrzeb pomiarowego ich wykorzystania) nie znalazły one szerokiego zastosowania w fotogrametrii. Sytuacja zmieniła się dopiero wraz z uruchomieniem systemu GPS, który umożliwił precyzyjny pomiar położenia kamery w locie (współrzędne X, Y, Z środka rzutów). Ta technika została opanowana w pierwszej połowie lat 90., w Polsce weszła do produkcji kilka lat później i stała się obowiązującą normą z początkiem obecnego dziesięciolecia.

Kolejnym krokiem jest integracja dwóch systemów: GPS i INS, która umożliwia pomiar wszystkich elementów orientacji każdego zdjęcia (3 współrzędne i 3 kąty obrotu). Technika ta od drugiej połowy lat 90. wchodzi do praktyki fotolotniczej i obecnie staje się standardem. W artykule prezentowane są pierwsze w kraju produkcyjne doświadczenia



Szlak kolejowy Kraków – Tarnów. Stacja kolejowa Bochnia.
Kamera cyfrowa UltraCam-X, piksel terenowy 0,05 m

CJA WPROST



zastosowania integracji GPS i INS oraz tzw. georeferencji wprost zdjęć lotniczych.

● SYSTEM GPS

Pomiar trajektorii samolotu opiera się na pomiarach fazowych GPS. W tej metodzie należy wyznaczyć w procesie inicjalizacji tzw. nieoznaczoność cykli fazowych, tj. liczbę cykli fazowych pomiędzy satelitą a odbiornikiem. Wartość nieoznaczoności pozostaje stała dla danego satelity, pod warunkiem że nie ma przerw w odbiorze sygnałów. Podczas misji fotolotniczej, trwającej kilka godzin, w wyniku krótkich przerw w odbiorze sygnałów satelity następuje jednak utrata cykli fazowych (*cycle slips*). Najczęściej dzieje się tak podczas manewru nawracania między sąsiednimi szeregami zdjęć, kiedy samolot przechyla się „na skrzydło”, na chwilę przesłaniając sygnał. Powoduje to błąd w wyznaczeniu odległości, a w konsekwencji – błąd we współrzędnych kamery (ściślej: centrum fazowego anteny). Błąd ten dla danej współrzędnej ma składową stałą (*shift*) i składową zależną od czasu (*drift*). Może osiągać wartości kilku, a nawet kilkunastu metrów. Dla krótkich odcinków czasowych, rzędu kilku-kilkunastu minut, co odpowiada czasowi „spokojnego” przelotu nad szeregiem zdjęć, dryft można uznać za liniowo zależny od czasu. W konsekwencji całą misję, złożoną z wielu szeregów zdjęć, dzieli się na tzw. profile GPS, tj. okresy niezakłóconego lotu, podczas których nie występuje utrata cykli.

Błędy wyznaczenia współrzędnych położenia kamery w szeregach modeluje się dla każdej współrzędnej zwykle prostą funkcją liniową. Parametry tej funkcji są włączane do procesu wyrównania aerotriangulacji jako niewiadome. Powoduje to jednak osłabienie „sztywności” bloku zdjęć ujawniające się w pierwszej kolejności deformacjami wysokościowymi w obszarze bloku. Zapobiec temu może specjalnie zaprojektowana połowa osnowa fotogrametryczna, złożona z fotopunktów położonych na początku i na końcu bloku w pasach pokrycia poprzecznego między szeregami zdjęć, wzmacniająca wysokościowo „słabe” miejsca w bloku.

Inne problemy wyznaczenia położenia kamery w locie to:

- określenie mimośrodów kamery (a ściślej przedmiotowego środka rzutów obiektywu) względem anteny montowanej zwykle na kadłubie samolotu nad kamerą,

- interpolacja położenia kamery w momencie otwarcia migawki między węzłami trajektorii samolotu wyznaczanej zwykle w cyklu 1-sekundowym.

Wykorzystanie GPS do określenia położenia kamery w locie od kilkunastu lat jest w pełni operacyjne, umożliwia wyznaczenie go z błędem 0,1-0,2 m, co zaspokaja potrzeby fotogrametryczne, nawet dla dużych skal zdjęć. Zwiększa to niezawodność technologiczną procesu aerotriangulacji i ułatwia jego automatyzację oraz pozwala znacząco zmniejszyć liczbę punktów „klasycznej” połowej osnowy fotogrametrycznej.

Szlak kolejowy Kraków – Tarnów. Most na rzece Dunajec. Kamera cyfrowa UltraCam-X, piksel terenowy 0,05 m



● SYSTEM INS

Inercyjny system nawigacyjny – INS (*Inertial Navigation System*) – wyznacza pozycję i orientację poprzez ciągły pomiar wzdłuż trzech ortogonalnych osi wartości przyspieszenia liniowego i składowych kątowych kursu. Te pomiary są integrowane po czasie, dając wartości prędkości, a w kolejnej pętli integracyjnej – wartości przebytej drogi (przyrosty współrzędnych wzdłuż każdej osi).

Systemy INS są znane od dość dawna, początkowo znalazły zastosowanie głównie wojskowe, obecnie także cywilne, głównie nawigacyjne. Bardzo różnią się klasą dokładności i ceną. W fotogrametrii wykorzystuje się systemy średniej klasy. Sercem systemu INS jest inercyjna jednostka pomiarowa – IMU (*Inertial Measurement Unit*), „na glucho” zintegrowana z obudową kamery (system typu *strap-down*). W jednostce znajdują się trzy akcelerometry mierzące przyspieszenia wzdłuż trzech ortogonalnych osi i triada żyroskopów sztywno związanych z osiami poruszającej się kamery. Warto dodać, że obecnie nie są to tradycyjne żyroskopy z wirującymi masami, lecz żyroskopy laserowe, oparte na technologii światłowodowej, niezawierające ruchomych elementów.

Pozycja oraz orientacja w systemach INS są wyliczane na podstawie zmierzonych przyspieszeń i kursu. W wyni-

ku dość złożonej obróbki pomiarów można wyznaczyć wartości katowe orientacji kamery oraz przyrosty współrzędnych przebyte przez samolot. Konieczna przy tym jest kalibracja systemu polegająca na wyznaczeniu mimośrodów i kątów orientacji jednostki IMU względem układu współrzędnych kamery. System INS daje bardzo dokładne wyniki względne. Niestety, wartości bezwzględne pogarszają się istotnie wraz z upływem czasu pracy systemu.



Rys. 1. Montaż jednostki IMU: z lewej – wewnątrz kamery cyfrowej UltraCam-D, z prawej – na korpusie kamery analogowej RMK Top

● INTEGRACJA GPS I INS

Powyżej omówione zostały systemy działające samodzielnie. Integracja obserwacji uzyskanych z GPS i INS w znaczący sposób poprawia osiągane dokładności i eliminuje ich wady. Wykorzystuje się tu fakt, że oba systemy mają różną propagację błędów, co czyni je wzajemnie komplementarnymi. Z jednej strony, wykorzystanie wysokiej dokładności, jaką w krótkim okresie osiągają systemy INS, pozwala na wygładzenie obserwacji GPS. Położenie i prędkość pomierzone przez INS pomagają odbiornikowi GPS wyznaczyć nieoznaczoność fazy, zniwelować wpływ utraty cykli oraz zakłóceń odbioru sygnału z satelitów. Z drugiej strony, wysoka stabilność GPS umożliwia wykorzystanie jego obserwacji do kompensacji błędów systematycznych INS związanych z pogarszaniem wyników wraz z upływem czasu. Integracja odbywa się na poziomie programowym poprzez odpowiednie filtrowanie pomiarów GPS i INS. Proces filtrowania może być centralny lub zdecentralizowany.

Przy podejściu centralnym komponenty GPS i INS są łączone ze sobą przy użyciu wspólnego filtra. Integracja odbywa się na poziomie surowych obserwacji pochodzących z obu podsystemów. Podejście z centralnym filtrem z punktu widzenia przetwarzania jest korzystne, natomiast może być kłopotliwe w przypadku dołączenia dodatkowych sensorów. Wówczas konieczne jest przekonstruowanie filtra jako całości. Alternatywą dla takiego rozwiązania jest decentralizacja filtrów. W pierwszym etapie obserwacje z pojedynczych urządzeń są filtrowane przez własne dedykowane filtry i dopiero po tym następuje integracja w filtrze wspólnym. Praktycznie realizowane jest to w ten sposób, że filtry przez większość czasu pracują oddzielnie i co jakiś określony interwał wyniki z jednego systemu są używane ja-

ko pseudoobserwacje do korekcji pomiarów drugiego. W tym procesie powszechnie stosuje się filtr Kalmana.

Integracja GPS i INS pozwala wyznaczyć nieoznaczoność fazy sygnału GPS i zniwelować wpływ utraty cykli GPS, znacząco redukując błędy systematyczne wyznaczenia trajektorii samolotu. Szczątkowa pozostałość tych błędów nadal jednak może być obecna w obserwacjach, toteż przy precyzyjnych opracowaniach fotogrametrycznych w procesie aerotriangulacji uzasadnione jest modelowanie tych błędów i ich wyznaczenie na etapie wyrównania. Stosuje się różne modele błędów:

- Model liniowy – uwzględniający przesunięcie i dryft. Modeluje się tak błędy całego bloku lub indywidualnie każdego szeregu zdjęć.
- Model dryftu Gaussa-Markowa – sprawdzający się w orientacji wprost kamer cyfrowych typu skaner elektrooptyczny.
- Model dryftu Wienera – zakładający wyłącznie przypadkowy charakter dryftu (co ma uzasadnienie dla danych po integracji GPS i INS). Model ten jest określany jako „dynamiczna kolokacja dryftu”.

● SYSTEMY GPS/INS NA RYNKU

Rozwiązania zapewniające integrację GPS i INS są obecnie w pełni operacyjne, dostępny jest na rynku sprzęt i oprogramowanie. Również współczesne technologie aerotriangulacji dają możliwość włączenia pomierzonych elementów orientacji zdjęć do wyrównania. Można tu wymienić systemy:

- AEROcontrol firmy IGI (do kamer lotniczych i lotniczych skanerów laserowych),
- POS/AV firmy Applanix,
- IPAS 20 firmy Leica.

Systemy te składają się z jednostki IMU, komputera pokładowego zintegrowanego z odbiornikiem GPS oraz anteny

montowanej na kadłubie samolotu, najlepiej nad kamerą. Jednostkę IMU montuje się jak najbliżej środka rzutów kamery. Współczesne kamery cyfrowe mają specjalną kieszeń wewnątrz korpusu umożliwiającą montaż IMU (rys. 1). Integracja GPS i INS pozwala na wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej kamery z dokładnością:

- pozycja: $m_p \approx 0,05-0,30$ m,
- kąty: $m_{\omega, \phi} \approx 0,005^\circ$, $m_\kappa \approx 0,01^\circ$.

Dokładność zależy od klasy zastosowanej jednostki IMU i odległości od stacji referencyjnej GPS. Elementy orientacji odczytywane są 200 razy na sekundę (lub częściej).

● KALIBRACJA GPS/INS

W trakcie rejestrowania obserwacji antena GPS znajduje się w pewnym oddaleniu od środka rzutów kamery. Ponadto osie pomiaru kątów INS są skrócone względem układu współrzędnych kamery. W celu wyznaczenia prawidłowych wartości orientacji zewnętrznej zdjęć konieczne jest uwzględnienie tych wartości (rys. 2). Mimośród anteny GPS może być mierzony wprost po zamontowaniu kamery oraz anteny w danym samolocie. Wielkość ta wyrażona jest w wartościach przesunięcia w przestrzennym układzie o początku w przedmiotowym środku rzutów kamery i może być wykorzystana bezpośrednio na etapie integracji GPS i INS lub – w wypadku braku integracji – na etapie aerotriangulacji.

Bardziej skomplikowane jest wyznaczenie nierównoległości INS. Określa się ją zwykle poprzez nalot fotogrametryczny nad polem kalibracyjnym z fopunktami o współrzędnych wyznaczonych z dużą dokładnością. Po nalocie wykonuje się wyrównanie bloku aerotriangulacji i wyznaczone wartości parametrów orientacji zewnętrznej porównuje się z wartościami uzyskanymi z pomiarów GPS/INS. Blok kalibracyjny powinien

składać się z minimum dwóch szeregów nalecanych w przeciwnych kierunkach. Pozwala to na wyodrębnienie przesunięcia od przesunięcia związanego z kierunkiem lotu. Ponadto wymagana jest duża gęstość fotopunktów.

Wyliczone na podstawie wyrównań wielkości wartości nierównoległości nie pozostają stałe w czasie, nawet gdy nie zmienia się mocowania jednostki IMU do korpusu kamery. Spowodowane jest to głównie silnymi przeciążeniami, jakim poddany jest system w czasie lotu. Implikuje to konieczność wykonywania ponownej kalibracji co pewien interwał czasu, odpowiednio dobrany do oczekiwanej dokładności. W przypadku projektów o wysokiej dokładności kalibrację należałoby wykonywać w zasadzie każdego dnia fotolotniczego, szczególnie gdy nie dysponujemy osnową fotogrametryczną. Częsta kalibracja systemu GPS/INS wykazuje możliwość pojawiania się skokowych zmian kątów orientacji IMU względem kamery na poziomie 0,02°.

• GEOREFERENCJA WPROST POPRZECZ INTEGRACJĄ GPS I INS

Georeferencja w fotogrametrii określa relację między układem współrzędnych zdjęcia a układem terenowym opisywaną przez elementy orientacji zewnętrznej kamery w momencie fotografowania (tj. 3 współrzędne środka rzutów i 3 kąty obrotu). Tradycyjnie georeferencję wyznacza się pośrednio – poprzez odfotografowane na zdjęciu punkty o znanych współrzędnych – tzw. fotopunkty.

Georeferencja wprost polega na bezpośrednim pomiarze elementów orientacji zewnętrznej kamery, tj. bez udziału fotopunktów. Konieczne jest w tym celu uwzględnienie przestrzennych i czasowych relacji między trzema systemami: GPS, INS i kamery. Sprowadza się to do przestrzennej (3D) transformacji wektora obrazowego r^c (wektora obrazu punktu w przestrzennym układzie współrzędnych kamery) do wektora r_i^m punktu terenowego w terenowym (geodezyjnym) układzie współrzędnych.

Posiłkując się oznaczeniami jak na rys. 2, proces georeferencji można ująć w następującą zależność:

$$r_i^m = r_{GPS/INS}^m(t) + R_b^m(t) [\lambda^i \cdot R_c^b \cdot r^c + a^b]$$

gdzie:

r_i^m – wektor punktu terenowego (i) w terenowym układzie współrzędnych,

$r_{GPS/INS}^m(t)$ – interpolowany wektor położenia centrum systemu INS w terenowym układzie współrzędnych,

λ^i – współczynnik skalowy obrazu punktu na zdjęciu,

$R_b^m(t)$ – macierz obrotu układu INS w terenowym układzie współrzędnych,

(t) – moment wykonania zdjęcia,

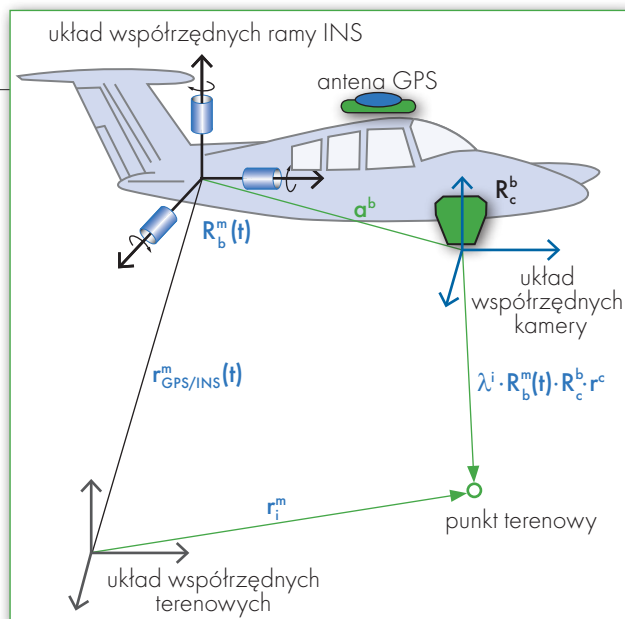
R_c^b – macierz obrotu między układem kamery a układem INS,

r^c – wektor punktu obrazowego w przestrzennym układzie kamery z pomiaru fotogrametrycznego (współrzędne tło punktu i odległość obrazowa kamery),

a^b – wektor ekscentru centrum systemu INS względem środka rzutów kamery.

Powyższe równanie georeferencji wprost wskazuje na konieczność kalibracji całego systemu, w tym geometrii kamery i wzajemnej orientacji między kamerą a INS.

Równanie ma 4 niewiadome: 3 współrzędne terenowe (wektor r_i^m) oraz współczynnik skalowy λ^i . Zobrazowanie punktu na jednym zdjęciu pozwala zapisać 3 równania z 4 niewiadomymi. Podstawą przestrzennych opracowań fotogrametrycznych jest stereoskopia. Mając drugie zdjęcie tego samego obszaru, dodajemy 3 kolejne równania i jedną niewiadomą (nowy współczynnik skalowy). Można więc wyznaczyć poszukiwane położenie terenowe punktu w procesie wyrównawczym.



Rys. 2. Elementy georeferencji wprost kamery kadrowej

• PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE INTEGRACJI GPS I INS W AEROTRIANGULACJI

Zalety integracji GPS i INS przebadano na trzech produkcyjnych blokach zdjęć zrealizowanych w firmie Tukaj Mapping Central Europe (osnowa, aerotriangulacja i opracowanie) we współpracy z BSF Swissphoto (wykonawstwo zdjęć i integracja GPS i INS). Charakterystykę bloków przedstawia tabela 1.

Wszystkie zdjęcia wykonano kamerami cyfrowymi. Są to zdjęcia o dużej (0,15 m) i bardzo dużej rozdzielczości (0,05 m) tworzące albo zwarty blok (Okęcie, Oleśnica), albo tzw. obiekt korytarzowy (linia kolejowa), niekorzystny z punktu widzenia rozkładu błędów. Bloki testowe stanowią więc różnorodny i dobry materiał eksperymentalny dla oceny integracji

REKLAMA



Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej zaprasza na Studium Podyplomowe „Systemy Informacji Przestrzennej”

Koszt studium: 5 000zł
Rozpoczęcie: w marcu każdego roku.
Zgłoszenia: od września do lutego

<http://telesip.gik.pw.edu.pl>

Tel. (0 22) 234 73 58
Fax : (0 22) 234 53 89

S.Bialousz@gik.pw.edu.pl
A.Fijalkowska@gik.pw.edu.pl



Ogłoszenie współfinansowane ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

TAB. 1. CHARAKTERYSTYKA BLOKÓW ZDJĘĆ

Obiekt	Port lotniczy Okęcie	Powiat oleśnicki	Linia kolejowa Kraków – Tarnów
kamera	UltraCam-D	UltraCam-D	UltraCam-X
GSD (piksel terenowy)	5 cm	15 cm	5 cm
liczba zdjęć	504	2495	1241
liczba szeregów	12	38	24 (po 3 wzdłuż linii)
pokrycie podłużne	60%	60%	70%
pokrycie poprzeczne	30%	30%	40%
kierunek lotu	północ-południe	wschód-zachód	łamany, wzdłuż linii
częstotliwość rejestracji referencyjnej stacji GPS	co 5 s	co 1 s	co 1 s
system GPS/INS	IGI Aerocontrol II	IGI Aerocontrol II	IGI Aerocontrol II
liczba fotopunktów sygnalizowanych	26	84	45

GPS i INS oraz – szerzej – dający pogląd o możliwościach współczesnej fotogrametrii cyfrowej opartej na zdjęciach wykonanych kamerami cyfrowymi.

Bloki zdjęć poddano pomiarowi i wyrównaniu metodą niezależnych zdjęć w pakiecie ISAT (*Image Station Automatic Triangulation*), wersja 5.0, na stacji cyfrowej ImageStation (Intergraph). Pomiar prowadzono w trybie automatycznego dopasowania obrazów, co dawało średnio 40-60 obserwowanych punktów na zdjęciu. Dla każdego obiektu przeprowadzono wyrównanie w kilku wariantach, które różniły się:

- Sposobem modelowania błędów systematycznych obserwacji GPS/INS. Wykorzystano: przesunięcie dla całego bloku (*shift per block*), liniowe przesunięcie i dryft dla każdego szeregu zdjęć (*linear shift/drift per strip*) oraz dynamiczny dryft dla szeregu (*dynamic drift per strip*).

- Sposobem modelowania błędów systematycznych zdjęć (aerotriangulacja z parametrami dodatkowymi). Wykorzystano tzw. model Ebnera błędów systematycznych (12 parametrów).

- Liczbą i rozkładem punktów polowej osnowy fotogrametrycznej (fotopunktów). Zmniejszano liczbę fotopunktów aż do przypadku wyrównania bez fotopunktów. Pozostałe punkty traktowano jako punkty kontrolne, na których prowadzono ocenę wyników.

Wybrane wyniki aerotriangulacji dla poszczególnych obiektów pokazuje tabela 2. Dla danego obiektu górny wiersz zawiera wyniki z osnową polową, a dolny – bez osnowy. Pokazane błędy to średnie błędy na fotopunktach kontrolnych (tj. tych, które nie weszły do wyrównania i stanowią niezależną ocenę dokładności aerotriangulacji). Sigma to średni błąd (w skali zdjęć) na punktach wiążących zdjęcia, jest

wskaźnikiem „wewnętrznej sztywności” geometrycznej bloku.

Uzyskane wyniki pozwalają wyciągnąć liczne wnioski ważne dla praktyki:

1. Błąd sigma we wszystkich obiektach jest na poziomie 2 μm , tj. poniżej 1/3 wielkości piksela. To dobrze ilustruje obecny poziom automatycznej aerotriangulacji ze zdjęć wykonanych kamerami cyfrowymi. Dla aerotriangulacji zdjęć analogowych wskaźnik ten plasuje się na poziomie około 5 μm .

2. W procesie aerotriangulacji, przy optymalnej osnowie polowej i poprawnym modelowaniu błędów systematycznych GPS/INS, można wyznaczyć przestrzenne położenie dobrze widocznych punktów (np. punktów sygnalizowanych) z dokładnością w przedziale 0,5-1,0 piksela zdjęcia. Dokładność wysokościowa też osiąga ten poziom, co stanowi 0,05-0,10% wysokości lotu. Należy mieć na uwadze, że powyższa ocena prowadzona jest na punktach wyznaczonych techniką GPS, też obarczonych błędami. Są to bardzo wysokie dokładności, porównywalne z uzyskiwanymi do wyznaczenia współrzędnych punktów bezpośrednimi metodami geodezyjnymi. Warto przy tym zauważyć, że współczesna aerotriangulacja opiera się na bardzo rzadkiej osnowie polowej. Jeden fotopunkt przypada na 20-30 zdjęć. Tak korzystne relacje można osiągnąć przy dużych blokach zdjęć. Aerotriangulacja bloków złożonych z kilku tysięcy zdjęć nie stanowi obecnie problemu.

3. Integrację GPS i INS cechuje wysoka skuteczność. Po wyrównaniu pozostają w danych wartości przesunięcia (*shift*) rzadko przekraczające 0,20 m dla poszczególnych szeregów.

4. Należy mieć świadomość, że uzmiennienie przesunięcia i dryftu dla poszczególnych szeregów osłabia blok i wymaga stosowania odpowiedniej polowej osnowy fotogrametrycznej (fotopunkty na początku i na końcu bloku w każdym pasie pokrycia poprzecznego między szeregami). Brak takiej osnowy prowadzi do niekontrolowanych deformacji wysokościowych w obszarze bloku. Ten wymóg jest szczególnie ważny w przypadku zdjęć tylko ze środkami rzutów (tj. bez integracji GPS i INS), co jest obecnie typowe dla praktyki krajowej. W takim przypadku występują znaczne błędy systematyczne we współrzędnych środków rzutów, zachodzi konieczność ich modelowania, a to bezwzględnie wymaga odpowiedniej osnowy polowej. W kraju nadal występują przypadki braku świadomości tego związku.

5. Integracja GPS i INS radykalnie zmniejsza błędy systematyczne. Przy braku dostatecznej osnowy polowej nie należy uzmienniać przesunięcia i dryftu dla każdego szeregu, a ograniczyć się do zamodelowania przesunięcia dla całego bloku. Z tych samych powodów nie należy włączać do wyrównania parametrów dodatkowych, opisujących błędy systematyczne zdjęć (np. parametry Ebnera).

6. Przy integracji GPS i INS możliwa jest aerotriangulacja bez fotopunktów. Dokładność opracowania w takim przypadku jest kilkakrotnie mniejsza od wariantu z optymalną osnową (wyniki – patrz tabela 2).

7. W aerotriangulacji z integracją GPS i INS występują różne grupy obserwacji: fotogrametryczne (współrzędne tło zdjęć), GPS, INS, współrzędne punktów osnowy. Należy bardzo uważnie podejść do właściwego wagowania tych obserwacji. Zdarzają się przypadki manipulowania wagami dla uzyskania w wyrównaniu minimalnych rozbieżności na punktach osnowy, co jest naganną praktyką.

8. Eksperyment potwierdził słabość obiektów bardzo wydłużonych („koryta-

TAB. 2. WSKAŹNIKI JAKOŚCI AEROTRIANGULACJI

Obiekt	Sigma [μm]	Błędy na pkt kontrolnych			Uwagi
		m_x [cm]	m_y [cm]	m_z [cm]	
Port lotniczy Okęcie (piksel 0,05 m)	1,8	0,9	1,4	2,6	osnowa, shift/drift per strip
	2,4	3,4	13,6	8,4	bez polowej osnowy
Powiat oleśnicki (piksel 0,15 m)	2,1	13,8	12,8	10,8	osnowa, dynamic drift per strip
	2,3	16,2	14,3	30,3	bez polowej osnowy
Linia kolejowa Kraków – Tarnów (piksel 0,05 m)	2,3	1,3	2,5	3,2	osnowa, shift/drift per strip
	2,3	10,1	19,4	11,7	bez polowej osnowy

rzowych”) składających się z pojedynczego szeregu zdjęć lub – jak w przypadku linii kolejowej – wąskiego, długiego bloku, złożonego z trzech szeregów. Słabość w takim przypadku wynika z mniejszej liczby wiązań wewnętrznych. Nie wystarczą w takiej konstrukcji fotopunkty tylko na początku i końcu, konieczne jest wsparcie fotopunktami wewnątrz bloku oraz punkty kontrolne dla rzetelnej oceny dokładności.

● GEOREFERENCJA WPROST ALTERNATYWA DLA AEROTRIANGULACJI

Georeferencja wprost wykorzystuje pomierzone bezpośrednio pozycję i orientację sensora w przestrzeni. Pomiar taki odbywa się obecnie przy użyciu systemów GPS/INS. Główną cechą georeferencji wprost jest brak konieczności używania jakichkolwiek fotopunktów i wykonywania aerotriangulacji. Jako orientacja zewnętrzna zdjęć przyjmowane są wyniki pomiarów po procesie integracji. Georeferencja wprost pozwala na obliczenie współrzędnych i opracowanie zdjęć w układzie terenowym.

W końcowym etapie eksperymentu zdecydowano się na przetestowanie potencjału nowatorskiej metody georeferencji wprost. Test polegał na zbudowaniu modeli stereoskopowych na podstawie elementów orientacji zewnętrznej pomierzonych w locie i pomierzeniu na nich szczegółów terenowych lub punktów osnowy o znanych współrzędnych, wyznaczonych technikami geodezyjnymi. Odchyłki uzyskane na podstawie tak zaplanowanych pomiarów dają podstawę do wniosków co do rzeczywistego potencjału zastosowanej metody. Dodatkowym wskaźnikiem jakości pomierzonych w locie elementów orientacji jest brak szczytkowych paralaks poprzecznych w zrekonstruowanych modelach. W teście tym wykorzystane zostały dwa projekty: „Port lotniczy” (GSD 5 cm) oraz „Powiat oleśnicki” (GSD 15 cm). Zasadniczą różnicą pomiędzy tymi projektami były dane referencyjne ze stacji naziemnych GPS użyte do wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej kamery. W przypadku „Portu lotniczego” użyto obserwacji rejestrowanych w interwale pięciosekundowym, natomiast dla powiatu oleśnickiego dostępne były obserwacje jednosekundowe.

W projekcie „Port lotniczy” zbudowano 4 modele stereoskopowe znajdujące się w różnych, odległych od siebie lokalizacjach. Na modelach tych znajdowało się kilkanaście punktów terenowych, do-

brze widocznych i identyfikowalnych na zdjęciach (studzienki kanalizacyjne, załamania krawężników), których współrzędne zostały wyznaczone metodą GPS z dokładnością pojedynczych centymetrów. Na trzech modelach nie zaobserwowano paralaksy poprzecznej, na jednym występowała zauważalna paralaksa, utrudniająca prawidłowe pomiary stereoskopowe. Dla każdego z czterech badanych modeli na podstawie odchyłek na punktach terenowych określono wartości błędów średnich, które wyniosły:

$$m_x = 0,31 \text{ m}, m_y = 0,13 \text{ m}, m_z = 0,15 \text{ m}.$$

Dla projektu „Oleśnica” dokonano pomiaru na 10 modelach rozłożonych równomiernie na obszarze opracowania. Na modelach nie zaobserwowano paralaksy poprzecznej. Jako punkty kontrolne wykorzystano fotopunkty sygnalizowane przed nalotem. Na tej podstawie określono błędy średnie współrzędnych reprezentatywne dla projektu „Powiat oleśnicki”. Otrzymano następujące wartości:

$$m_x = 0,23 \text{ m}, m_y = 0,46 \text{ m}, m_z = 0,44 \text{ m}.$$

Analizując te wyniki, można zauważyć, że:

1. Dla obiektu „Port lotniczy” (z pikselem 0,05 m) błędy wynoszą średnio:

● 6 pikseli w kierunku lotu (maks. 8 pikseli),

● 3 piksele w kierunku poprzecznym,

● 3 piksele w kierunku wysokości (maks. 9 pikseli).

2. Dla obiektu „Oleśnica” (z pikselem 0,15 m) odpowiednio:

● 3 piksele w kierunku lotu,

● 1,5 piksela w kierunku poprzecznym,

● 3 piksele w kierunku wysokości.

W obu przypadkach składowa błędów w kierunku lotu jest około 2 razy większa od składowej w kierunku poprzecznym, a błąd wysokości stanowi około 0,10% wysokości lotu.

Wyniki powyższe pokazują faktyczny potencjał georeferencji wprost i spodziewane rezultaty opracowania zdjęć bez aerotriangulacji i punktów osnowy. Uzyskana dokładność może być wystarczająca np. do produkcji cyfrowej ortofotomapy ze zdjęć o dużej rozdzielczości (piksel 0,15 m i większy). Przy ekstremalnie dużej rozdzielczości zdjęć (piksel 0,05 m) należy się spodziewać nieco większych błędów wyrażonych w wielokrotności piksela terenowego zdjęć.

PAWEŁ FECZAN

Tukaj Mapping Central Europe

PROF. NZW. DR HAB. ZDZISŁAW KURCZYŃSKI

WiGiK Politechniki Warszawskiej

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Prezentowane wyniki ukazują możliwość współczesnej aerotriangulacji opartej na zdjęciach wykonanych kamerami cyfrowymi. Przy dużej skali zdjęć (mały piksel zdjęć cyfrowych) uzyskiwana dokładność wyznaczenia położenia terenowego dobrze widocznych punktów jest porównywalna z bezpośrednim pomiarem geodezyjnym.

2. Aerotriangulacja jest obecnie całkowicie zautomatyzowana i może łączyć w jednym procesie nawet kilka tysięcy zdjęć. Gwarantuje to wysoką i jednorodną dokładność opracowań fotogrametrycznych na bardzo dużym obszarze, co stanowi ich unikalną zaletę.

3. Pomiar położenia kamery w locie poprzez integrację GPS/INS pozwala radykalnie zmniejszyć zapotrzebowanie na punkty polowej osnowy fotogrametrycznej, a dla mniej wymagających opracowań – całkowicie je wyeliminować.

4. Prezentowane wyniki pokazują zalety integracji GPS i INS dla opracowania zdjęć fotogrametrycznych (analogowych i cyfrowych). Integracja w takim zastosowaniu ułatwia opracowanie, chociaż nie jest absolutnie konieczna. Można wskazać inne zastosowania integracji, jak lotniczy skaning laserowy (ALS) czy kamery cyfrowe typu skaner elektrooptyczny, bez której te rozwiązania nie mogłyby funkcjonować.

5. Wyniki powyższe potwierdzają skuteczność georeferencji wprost umożliwiającej opracowanie zdjęć bez osnowy polowej. Jednak w rutynowych, pomiarowych opracowaniach zdjęć lotniczych, szczególnie stanowiących większe bloki, stosowaną nadal praktyką pozostaje proces aerotriangulacji. Proces ten na obecnym etapie jest zautomatyzowany i nie stanowi obciążenia czasowego, gwarantuje natomiast wysoką i jednorodną dokładność na całym obszarze opracowania. Integracja GPS i INS czyni go bardziej niezawodnym technologicznie i opartym na bardzo ograniczonej osnowie polowej.

6. Przystawienie się ze zdjęć analogowych na cyfrowe, połączone z opracowaniem dużych bloków zdjęć i automatyzacją technologii fotogrametrycznych, spowodowało w ostatnich latach obniżenie kosztów produkcji. Dotyczy to szczególnie samych zdjęć, numerycznego modelu terenu i cyfrowej ortofotomapy.