

## POMIARY GPS/IMU, A WYZNACZANIE ELEMENTÓW ORIENTACJI ZEWNĘTRZNEJ

**Streszczenie.** *Od kilku lat prowadzone są badania nad wykorzystaniem nowych technik pomiarowych takich jak GPS czy IMU do wyznaczania elementów orientacji zewnętrznej. Standardem jest już włączanie obserwacji GPS jako obserwacji dodatkowych w procesie wyrównania bloku aerotriangulacji. Są także pierwsze próby dołączania pomiarów IMU. Technologię połączonego wyrównania nazywa się dzisiaj zintegrowaną orientacją sensorów, w odróżnieniu od koncepcji zastąpienia tradycyjnej aerotriangulacji kombinacją pomiarów GPS/IMU, określaną mianem bezpośredniej orientacji sensorów.*

*W artykule naświetlono stan badań w tym zakresie, a także zamieszczono wyniki własnych analiz danych udostępnionych przez OEEPE w ramach testu „Integrated sensor orientation”. Zamieszczono stosowane modele matematyczne. W szczególności zajęto się problemem wyznaczania różnic kątowych, między układami inercyjnym i zdjęciami, jako elementem niezbędnym w procesie kalibracji systemu.*

### 1. Wprowadzenie.

Ostatnie lata, przyniosły nasilenie badań nad wykorzystaniem technik GPS w połączeniu z pomiarami inercyjnymi IMU (Inercjal Measurement Unit) do wyznaczania elementów orientacji zewnętrznej. W literaturze spotykamy również skrót INS (Inercjal Nawigation System), stosowany w przypadku, gdy chodzi o sprzęt IMU wraz z oprogramowaniem.

Gdy stosujemy tradycyjną aerotriangulację, do wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej niezbędna jest pewna określona liczba punktów o znanych współrzędnych terenowych. Wraz z wprowadzeniem nowoczesnych urządzeń rejestrujących powierzchnię Ziemi, takich jak np. skanery laserowe, czy kamery cyfrowe, powstał problem związany z liczbą punktów kontrolnych. Ponieważ np. dla skanerów każda linia skanowania ma inny środek rzutów, by go wyznaczyć w sposób tradycyjny, potrzebna byłaby ogromna liczba pomiarów terenowych. Zastosowanie pomiarów GPS/IMU, pozwala natomiast ograniczyć ich liczbę czy wręcz unikać ich stosowania.

W ostatnim czasie pomiary GPS stały się wręcz standardem do określania środków rzutów. Jako obserwacje dodatkowe są one wykorzystywane w aerotriangulacji w wyrównaniu równoczesnym. Terenowe punkty kontrolne (TPK) dalej stosuje się do kalibracji eliminującej błędy pomiarów GPS (tzw. dryft). Zastosowanie natomiast pomiarów inercyjnych pozwala wyznaczyć kątowe elementy orientacji zewnętrznej. Zastosowanie łączne pomiarów GPS/IMU umożliwia wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej zdjęć bez stosowania aerotriangulacji, proces ten nazywany jest bezpośrednią orientacją sensorów (direct sensor orientation). Gdy pomiary te stosuje

się jako obserwacje dodatkowe w aerotransgulacji, mówi się wtedy o zintegrowanej orientacji sensorów (integrated sensor orientation).

Problemom tym poświęcony był test OEEPE „Integrated Sensor Orientation” przeprowadzony w latach 2000/2001 [Alamus, 2001], [Heipke, 2001].

Szczegółowe badania prowadziło wiele ośrodków naukowych na świecie, między innymi takie jak np: Institute of Photogrammetry and Engineering Surveys University of Hannover [Jacobsen, 2001], czy Institute of Photogrammetry in Stuttgart University [Cramer 1999, 2001],[Halla, 1997], a także firmy jak np. Applanix Corporation w Ontario w Kanadzie [Mostafa, 2001]. Podstawowe problemy związane ze stosowaniem pomiarów GPS/IMU nasświetla między innymi artykuł wprowadzający z konferencji na ten temat w Barcelonie w 1999r. [Skaloud, 1999].

Celem niniejszego artykułu jest wskazanie tylko na niektóre zagadnienia jakie występują w przypadku stosowania pomiarów GPS/IMU, a w szczególności na problem ustalenia jednolitego układu współrzędnych. Szczegółowo omówiono proces wyznaczania różnic kątowych między układami inercyjnym, a zdjęcia. Do przeprowadzenia obliczeń własnych ilustrujących to zagadnienie wykorzystano dane jakie zostały udostępnione w teście OEEPE.

## 2. Model matematyczny.

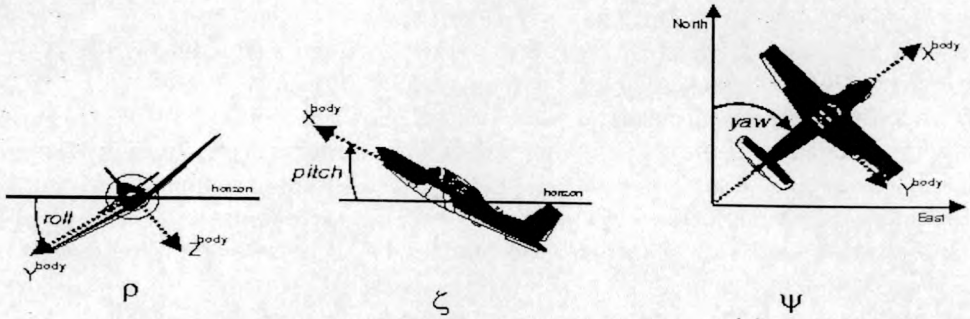
Zdefiniujemy wszystkie układy współrzędnych, z którymi możemy mieć do czynienia w przypadku, gdy chcemy wykorzystać pomiary GPS/IMU w procesie wyznaczania elementów orientacji zewnętrznej:

1. Współrzędne punktów z pomiarów GPS; dla  $X, Y$  na ogół układ płaski UTM oraz wysokości  $h$  elipsoidalne (względem normalnej do elipsoidy).
2. Pomiary kątów „nawigacyjnych” IMU wykonane są względem lokalnie przyjętego układu o środku w centrum osi układu sensorów, linii pionu lokalnego (oś  $z$ ) i kierunku osi prawego skrzydła samolotu (oś  $x$ ). Układ ten jest zmienny w czasie wraz ze zmianą położenia samolotu, tzw. układ inercjalny (w literaturze angielskiej układ „body”).
3. Pomiary punktów na zdjęciu wykonane się w układzie danego zdjęcia (kamery).
4. Współrzędne terenowych punktów kontrolnych (TPK) na ogół w terenowym układzie lokalnym (lub np. jak dla danych z testu OEEPE:  $X, Y$  w UTM i  $h$  elipsoidalne).

Niektóre z tych układów zostaną omówione poniżej.

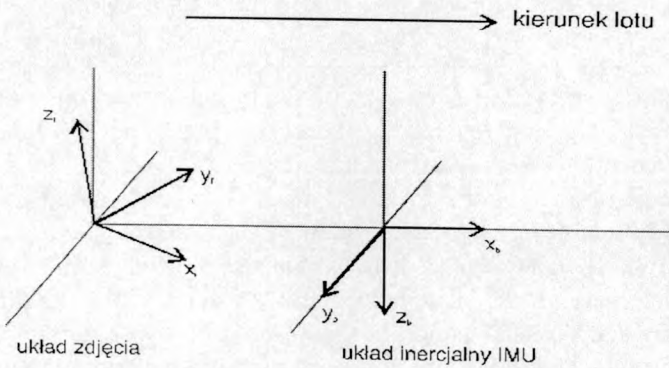
Układ inercjalny – związany z aparaturą IMU został zobrazowany na rys. 1, gdzie zaznaczono również tzw. kąty nawigacyjne: roll, pitch, yaw.

Na rys. 2 pokazano wzajemną relację między układem zdjęcia, a układem inercjalnym, a na rys. 3 przedstawiono układ geocentryczny i powiązanie z układem lokalnym, który przyjmuje się w płaszczyźnie stycznej do elipsoidy przy założeniu, że oś pionu (np. ze zwrotem takim samym lub przeciwnym niż na rysunku) to oś  $z$ , kierunek północy - oś  $y$ , a oś  $x$  - to dopełnienie do układu prawoskrętnego

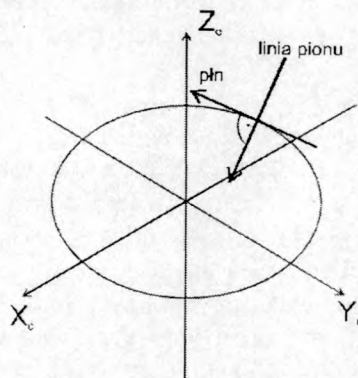


Rys 1. Kąty: roll  $\rho$ , pitch  $\zeta$ , yaw  $\psi$ .

Zachodzi więc pierwsze pytanie w jakim jednolitym układzie prowadzić obliczenia? W dalszej części artykułu spróbujemy dać na nie odpowiedź.



Rys.2. Układy zdjęcia i inercjalny.



Rys.3. Układ geocentryczny i kierunki północy oraz pionu lokalnego w punkcie.

Podstawowe problemy, gdy stosujemy pomiary GPS/IMU, związane są z:

- umocowaniem sensorów,
- synchronizacją sensorów,
- wstępnym wyrównaniem,
- kalibracją systemu.

Interesować nas będzie jedynie kalibracja systemu, a mianowicie uwzględnienie różnego położenia środków układów i różnic kątowych między osiami układów zdjęcia a inercyjnym.

W procesie wstępnego przetwarzania danych GPS/IMU odpowiednie różnice wynikające z różnego położenia środków układów: anteny GPS oraz układu IMU, względem środka rzutów, są uwzględniane na podstawie pomiarów wykonywanych technikami tradycyjnymi. Otrzymuje się odpowiednio dwa wektory dla tych różnic:  $\mathbf{dl}_{GPS}=[dX_{GPS}, dY_{GPS}, dZ_{GPS}]^T$ ,  $\mathbf{dl}_c=[dX_c, dY_c, dZ_c]^T$ .

Bardziej złożonym procesem jest wyznaczenie różnic kątowych między układem zdjęć a układem sensorów IMU. Wyznacza się je w procesie zwanym kalibracją systemu otrzymując macierz różnic kątowych między tymi układami:  $\mathbf{R}_f^b$ .

Mając zatem dane wektory różnic liniowych i kątowych między układami GPS/IMU i odpowiednio zdjęcia tradycyjne równanie:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_l = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}_l + \lambda \mathbf{R}_f^l \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -c \end{bmatrix} \quad (1)$$

można napisać w postaci:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_l = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}_l + \mathbf{R}_b^l \left( \lambda * \mathbf{R}_f^b * \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX_c \\ dY_c \\ dZ_c \end{bmatrix}_b - \begin{bmatrix} dX_{GPS} \\ dY_{GPS} \\ dZ_{GPS} \end{bmatrix}_b \right), \quad (2)$$

gdzie:

- $x, y$  - współrzędne punktu na zdjęciu w układzie zdjęcia,
- $x_o, y_o, c$  - elementy orientacji wewnętrznej,
- $X, Y, Z$  - współrzędne terenowe punktu w układzie terenowym,
- $X_o, Y_o, Z_o$  - współrzędne terenowe środka rzutów,
- $\mathbf{R}_f^l$  - macierz obrotów z układu zdjęcia do układu terenowego
- $\mathbf{R}_b^l$  - macierz obrotów z układu inercyjnego do układu terenowego,
- $\mathbf{R}_f^b$  - macierz obrotów z układu zdjęcia do układu inercyjnego
- $\lambda$  - współczynnik zmiany skali.

Ustalmy układ, w którym będą prowadzone obliczenia. W fotogrametrii używany jest ortogonalny układ prawoskrętny, układy narodowe nie są ortogonalne ze względu na krzywiznę Ziemi. Na ogół jednak w pomiarach tradycyjnych korzysta się z nich wprowadzając korekty ze względu na krzywiznę. Stosuje się też układ UTM z wysokością  $h$  względem normalnej do elipsoidy lub lokalny układ prawoskrętny ortogonalny związany z płaszczyzną styczną do elipsoidy ( $x$  - kierunek wschodni,  $y$  - północ,  $oś z$  - wzdłuż normalnej do elipsoidy).

Badania nad wpływem, na dokładność wyznaczania współrzędnych terenowych punktów, zastosowanego układu prowadził K. Jacobsen, [Jacobsen, 2001]. Stwierdził on, że w przypadku, gdy kalibrację systemu i proces „mapowania” prowadzi się w tym samym układzie nie ma istotnych różnic w dokładnościach między stosowanymi układami współrzędnych.

W artykule dalsze rozważania będą prowadzone względem ortogonalnego układu prawoskrętnego w płaszczyźnie stycznej do elipsoidy (zwanym dalej układem lokalnym) zaczepionym w punkcie położonym w pobliżu środka rozpatrywanego obszaru.

Przy tak przyjętym układzie lokalnym, na małym obszarze można przyjąć, że piony lokalne będą utożsamiane z normalną do elipsoidy ( $oś z$  - układu lokalnego).

### 3. Wyznaczanie różnic kątowych między układami inercjalnym, a zdjęcia.

Chcąc prowadzić obliczenia w układzie lokalnym w procesie bezpośredniego wyznaczania elementów orientacji zewnętrznej należy znać macierz kątów obrotów między układami inercjalnym ( $b$ ) a lokalnym ( $l$ ).

Równanie

$$R_b^l = R_{n(t_0)}^l(\pi, 0 - \frac{\pi}{2}) \cdot R_{e_i}^{n(t_0)}(L_0, B_0) \cdot R_{n(t_i)}^{e_i}(L_i, B_i) \cdot R_b^{n(t_i)}(\rho, \zeta, \psi) \quad (3)$$

określa macierz tych obrotów między tymi układami.

Jeśli zastosujemy prawoskrętne układy matematyczne (tzn. kierunek północy przyjmujemy jako  $oś y$ ) to równanie to będzie miało postać:

$$R_b^l = R_e^{l(t_0)}(L_0, B_0) \cdot R_{l(t_i)}^e(L_i, B_i) \cdot R_{n(t_i)}^{l(t_i)}(\pi, 0, -\frac{\pi}{2}) \cdot R_b^{n(t_i)}(\rho, \zeta, \psi), \quad (4)$$

gdzie:

$\rho, \zeta, \psi$  – odpowiednio kąty nawigacyjne roll, pitch i yaw,

$B_0, B_i$  – szerokości geodezyjne w punkcie środkowym ( $0$ ) i dowolnym ( $i$ ) obszarze,

$L_0, L_i$  – długości geodezyjne w punkcie odpowiednio środkowym i dowolnym obszarze.

Macierze  $R$  oznaczają natomiast macierze obrotów między następującymi układami:

$n(t_i)$  – układ prawoskrętny w dowolnym punkcie obszaru w czasie  $t_i$ , oś z względem osi pionu lokalnego ( $x, y$  - w płaszczyźnie horyzontu), zwany też układem nawigacyjnym

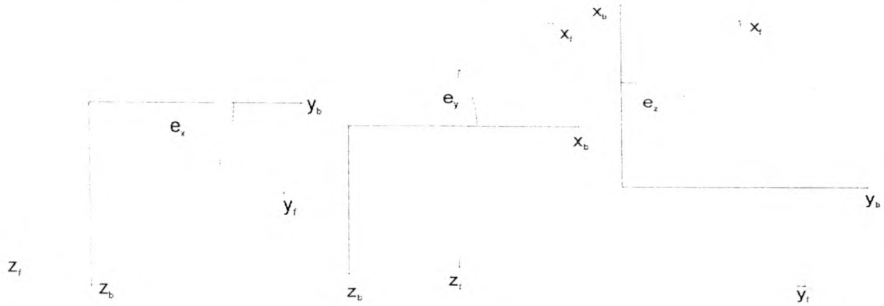
$l_0, l(t_i)$  – układ lokalny terenowy w danej chwili czasu  $t_i$  i  $t_0$  (w artykule przyjęto układ w płaszczyźnie stycznej do elipsoidy : oś  $y$  - północ, oś  $z$  – wzdłuż normalnej do elipsoidy, oś  $x$  – skierowana tak, aby układ był układem prawoskrętnym),

$e$  – układ geocentryczny.

W dalszych obliczeniach stosowano równanie (4).

Wyznaczając elementy orientacji zewnętrznej dysponujemy danymi ze zdjęcia, a więc konieczna jest znajomość przejścia od układu inercjalnego, dla którego znane są kąty nawigacyjne  $\rho, \zeta, \psi$ , do układu zdjęcia.

Należy zatem wyznaczyć kątowe różnice między tymi układami zwane w literaturze ang. „boresight misalignment”. Oznaczmy je przez  $e_x, e_y, e_z$ , odpowiednio dla różnic między osiami  $x, y$  i  $z$  (rys.4), [Bäumker, 2001].



Rys. 4. Różnice kątowe między układem inercjalnym (b), a układem zdjęcia (f).

Jeśli przyjmiemy oznaczenia jak na rys. 4, to możemy napisać macierz obrotów, dla różnic kątowych przy przejściu z układu nawigacyjnego do układu zdjęcia, w postaci:

$$R_b^f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & e_z & -e_y \\ -e_z & 1 & e_x \\ e_y & -e_x & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Założono tu, że różnice te są bardzo małe, zatem możemy stosować macierz obrotów dla małych kątów.

Odwrotnie przy przejściu od układu zdjęcia do układu nawigacyjnego mamy:

$$R_f^b = (R_b^f)^{-1}.$$

Otrzymujemy zatem równanie

$$R_f^l * R_b^f = R_b^l, \quad (6)$$

gdzie niewiadomymi są  $e_x, e_y, e_z$ .

Elementy macierzy  $R_f^1$  znane są na podstawie znajomości kątów  $(\omega, \varphi, \kappa)$  z aerotriangulacji (macierz obrotów), a macierz  $R_b^1$  jest wyznaczona z równania (4) na podstawie znajomości kątów nawigacyjnych  $(\rho, \zeta, \psi)$ .

Wprowadzając oznaczenia  $R_f^1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$  oraz  $R_b^1 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$

mamy

$$\begin{bmatrix} 0 & -a_{i3} & a_{i2} \\ -a_{i3} & 0 & a_{i1} \\ -a_{i2} & -a_{i1} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i1} - a_{i1} \\ b_{i2} + a_{i2} \\ b_{i3} + a_{i3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Rozwiązując ten układ możemy wyznaczyć niewiadome  $e_x, e_y, e_z$ .

W zapisie macierzowym mamy:

$A_i * \mathbf{x} = B_i + \mathbf{v}_i$ , gdzie  $i$  oznacza numer zdjęcia, a  $\mathbf{v}_i$  wektor poprawek. Uwzględniając wszystkie zdjęcia w bloku ( $n$ -zdjęć) mamy

$$\mathbf{x} = \left( \sum_{i=1}^n (A_i^T * A_i) \right)^{-1} * \left( \sum_{i=1}^n (A_i^T * B_i) \right) \quad (8)$$

#### 4. Praktyczne zastosowanie.

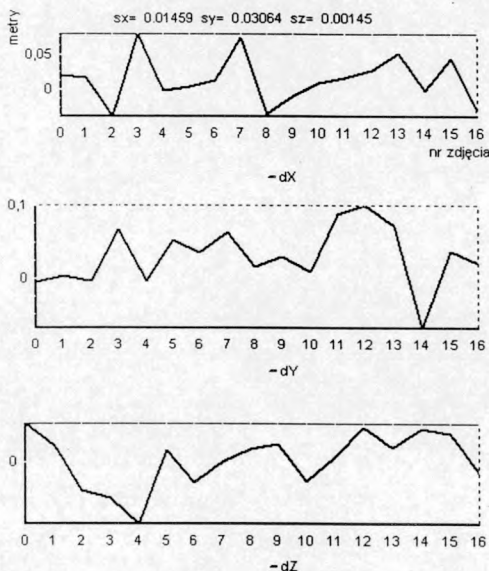
W latach 2000/2001 organizacja OEEPE zorganizowała test pt. „Integrated sensor orientation”. Udostępniła wówczas dane GPS/IMU dwóch kompanii z nalotów na pole testowe Fredrikstad w Norwegii, w skalach 1:5000 i 1:10000. Celem było, w etapie pierwszym, wyznaczenie parametrów kalibracji systemu, a w drugim elementów orientacji zewnętrznej przy zastosowaniu łącznie danych GPS/IMU.

Korzystając z danych z nalotów wykonano własne obliczenia dotyczące wyznaczenia różnic katowych  $(e_x, e_y, e_z)$  między układami inercjalnym, a kamery.

Na tym etapie niezbędna jest znajomość minimalnej liczby TPK, w celu wykonania tradycyjnej aerotriangulacji.

Aerotriangulację wykonano korzystając z programu M. Stevensa AS-WIN, stosując jako obserwacje dodatkowe pomiary GPS.

Na rys. 6 przedstawiono przykładowo różnice  $(dX, dY, dZ)$  między współrzędnymi środków rzutów otrzymanych z pomiarów GPS i z aerotriangulacji dla jednego szeregu zdjęć bloku w skali 1:5000 kompanii 1, gdzie  $s_x, s_y, s_z$  oznaczają kolejno wartości średnie dla wszystkich trzech współrzędnych..



Rys. 6. Różnice między współrzędnymi środków rzutów z pomiarów GPS i z aerotriangulacji (po uwzględnieniu pomiarów GPS) dla zdjęć 1 szeregu z bloku 1:5000 kompanii 1.

Obliczenia niewiadomych  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  wykonano wykorzystując program własny. Analizowano bloki w skali 1:5000 dla obu kompanii oraz częściowo bloki w skali 1:0000 (ze względu na dużo danych obciążonych błędami pomiaru współrzędnych płowych zwłaszcza dla kompanii 2).

Pierwszym etapem było wyznaczenie różnic kątowych między układami dla poszczególnych szeregów bloków osobno, a następnie dla całych bloków.

Na rys. 5 przedstawiono różnice kątowe dla bloków 1:5000 i 1:10000 kompanii 1. Następnie obliczono, korzystając z równania (8),  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  dla bloków zdjęć. Wyniki zawiera tabela 1. W obliczeniach nie uwzględniono zmian związanych z upływem czasu.

Po powtórny przeliczeniu złożenia macierzy  $R_f^l * R_b^f$  z uwzględnieniem obliczonych różnic otrzymano różnice w kątach rzędu  $10^{-15}$  stopnia, a zatem praktycznie nieistotne.

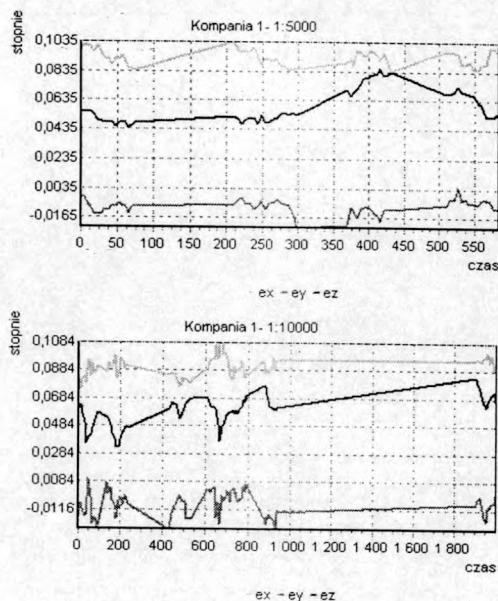
Tabela 1

Różnice kątowe dla obu kompanii.

o / kąty w	$e_x$	$e_y$	$e_z$
Kompania 1 1:5000	0.092727	-0.008713	0.059715
1:10000	0.090267	-0.008550	0.059147
Kompania 2 1:5000	0.118764	0.053499	-0.183298
1:10000	0.121590	0.057073	-0.177990



Różnice między kompaniami dla różnic kątowych układów są rzędu  $10^{-3}$  stopnia.



Rys. 5 Różnice kątowe  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  między układami zdjęcia i nawigacyjnym dla bloków z obu nalotów kompanii I.

## 5. Podsumowanie.

Wyznaczanie różnic kątowych między układami inercyjnym, a zdjęcia jest tylko jednym z problemów jakie występują w procesie wyznaczania elementów orientacji zewnętrznej z wykorzystaniem pomiarów GPS/IMU. Pominięto w artykule zagadnienia związane np. z wstępnym przygotowaniem danych GPS/INS, które to problemy rozwiązują kompanie dostarczające sprzęt pomiarowy, a także problem wyznaczania różnic między współrzędnymi środków wyznaczonymi w aerotriangulacji, a pomiarami GPS. W obliczeniach korzystano z danych po aerotriangulacji z uwzględnieniem obserwacji GPS.

W procesie kalibracji często wyznacza się także poprawki do stałej kamery i jeśli to jest potrzebne tzw. dryft. Kalibracja stałej ma jednak sens jedynie wówczas, gdy do obliczeń wykorzystuje się zdjęcia zrobione z różnej wysokości.

Na świecie prowadzone są w tej chwili również badania, aby wyeliminować całkowicie pomiar TPK na polach testowych w terenie przez wykonywanie specjalnego lotu kalibracyjnego, a różnice kątowe  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  wyznaczać na podstawie kalibracji systemu przeprowadzonej w warunkach laboratoryjnych [Bäumker, 2001]. Dokładność pomiarów w przeważającej części związana jest jednak z jakością sprzętu GPS/IMU i utrzymaniem parametrów niezależnie od czasu i wpływu warunków zewnętrznych.

## Literatura.

Alamus R., Baron A., Talaya J.,(2001), Integrated Sensor Orientation at ICC, mathematicval models and experiences, OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation", Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Sept. 17/18, 2001 (on CD-ROM).

Bäumker M., Heimes F.-J.,(2001), Neue Kalibrations- und Recthenverfahren zur directen Geog von Bild- und Scannerdaten mittels der Positions- und Winkelmessungen eines hybriden Navigationssystems, i Mitteilungen Institut für Geodasie, Heft 19, Uiversitat Innsbruck, pp. 3-16.

Cramer M.,(1999), Direct geocoding-is aerial triangulation obsolete?, Photogrammetric Week, 1999, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp.59-70.

Cramer M., (2001), Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie, Dissertationen, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Cramer M., (2001), Performance of GPS/Inertail Solutions in Photogrammetry, Photogrammetric Week 2001, Wichmann Verlag, Heidelberg.

Halla N., Stallmann, Cramer M., (1997), Geometric proessing of high resolution airborne scanner imagery using GPS-INS and grid control points, Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 7-10 July 1997.

Heipke Ch., Jakobsen K., Wegemann H., (The OEEPE Test on Integrated Sensor Orientation, OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation", Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Sept. 17/18, 2001 (on CD-ROM).

Jacobsen K., (2001). Aspect of handling image orientation by direct sensor orientation, ASPRS. Annual Congress, St. Louis.

Mostafa M. M.R., (2001), Digital Multi-Sensor system – Calibration and Performance Analysis, OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation", Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Sept. 17/18, 2001 (on CD-ROM).

Skaloud Jan, (1999), Problems in Direct-Georeferensing by INS/DGPS in the Airborne Environment, Proceedings, ISPRS Workshop on "Direct versus Indirect Methods os Sensor Orientation", WG III/1, Barcelona 25-26, 1999, pp7-15.

Recenzował: dr inż. Zdzisław Kurczyński