

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Metody odtworzenia kursu z danych GPS dla bezzałogowego statku powietrznego

DAMIAN WIERZBICKI¹, KAMIL KRASUSKI²

¹WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I GEODEZJI,
ZAKŁAD FOTOGRAMETRII I TELEDETEKCJI

²ZESPÓŁ TECHNIK SATELITARNYCH, DĘBLIN

Słowa kluczowe: fotogrametria, BSL, GPS, INS, kurs, odchylenie standardowe

STRESZCZENIE:

Zastosowanie techniki satelitarnej GNSS dla celów wykonywania nalotów fotogrametrycznych z niskiego pułapu umożliwia wyznaczenie pozycji i orientacji bezpilotowego statku latającego. W artykule przedstawiono rezultaty wyznaczenia kursu z danych GPS dla bezpilotowego statku latającego oraz określono różnicę kursu z danych GPS i INS. Eksperyment lotniczy został zrealizowany w 2015 r. nad rzeką Liwiec z użyciem platformy Trimble UX5. W artykule zaprezentowano również i opisano metody odtworzenia kursu z danych GPS dla bezpilotowego statku latającego.

The methods of course angle recovery from the GPS data for unmanned aerial vehicle

Keywords: photogrammetry, unmanned aerial vehicle, GPS, INS, course angle, standard deviation

ABSTRACT:

Application of GNSS observation for the purpose of performing photogrammetric flights from low altitude allows to determine the position and orientation of the unmanned aerial vehicle. The article presents the results of determination the course angle from the GPS data for unmanned aerial vehicle and the difference of course angle from GPS and INS data was obtained. The experiment was implemented above the Liwiec river in year 2015 using the Trimble UX5 platform. In the paper methods of course angle recovery were also presented and described.

1. WSTĘP

Współczesne kierunki badań i rozwoju fotogrametrii lotniczej skupiają swoją uwagę na technologii wykorzystywania danych pozyskanych z bezałogowych statków latających (BSL). Zastosowanie aparatury BSL do wykonywania nalotów fotogrametrycznych jest znacznie tańsze w eksploatacji i o wiele bardziej ekonomiczne od konwencjonalnej metody bazującej na wystaniu samolotu z całą załogą statku powietrznego w celu wykonania zdjęć lotniczych. Ponadto należy nadmienić, że zobrazowania lotnicze wykonane przez BSL charakteryzują się pikselem terenowym GSD o rozmiarze mniejszym niż 10 cm [11]. Technologia BSL jest obarczona również niedogodnościami związanymi z niestabilną trajektorią lotu statku powietrznego, na co mają wpływ głównie czynniki zewnętrzne (prędkość wiatru, opad atmosferyczny). Oddzielną grupę błędów popełnianych podczas wykonywania nalotu tworzą tzw. błędy osobowe (błędy operatora bezałogowego statku powietrznego), np. brak odpowiedniego doświadczenia w pilotażu statkiem powietrznym, nieumiejętność obsługi technicznej BSL, słaba znajomość oprogramowania sterującego ruchem BSL, błędy podczas opracowania surowych danych z BSL, wyciąganie nieodpowiednich wniosków na podstawie uzyskanych wyników itp. [1]. Mimo wszystko warto podkreślić, że technologia wykorzystywania BSL jest bardzo popularna w Polsce, a główne kierunki badań rozwijają się głównie wokół dziedzin związanych z:

- monitoringiem kłesk żywiołowych (bezpieczeństwo osób i mienia) [10],
- naukami: geodezją, kartografią, fotogrametrią, teledetekcją, nawigacją, ornitologią [7, 8, 16],
- zastosowaniem militarnym na potrzeby wojska, straży granicznej itp. [14, 15],
- wykonywaniem lotów BSL w oparciu o procedury prawa lotniczego [9, 14].

Przy wykonywaniu wszelkich operacji lotniczych z użyciem BSL podstawowym parametrem nawigacyjnym jest określenie pozycji statku powietrznego oraz orientacji w przestrzeni. Zazwyczaj dla BSL bazową konstrukcją do wyznaczenia pozycji w czasie rzeczywistym tworzą sensory GPS oraz INS [5]. W przypadku techniki satelitarnej sensor GPS umożliwia określenie współrzędnych XYZ (współrzędne geocentryczne) lub BLh (współrzędne elipsoidalne), prędkości oraz kursu. Końcowe

produkty sensora INS opierają się na odczytach 6 parametrów z jednostki IMU, tzn. 3 parametrów przyspieszenia oraz 3 kątów orientacji w przestrzeni. Najważniejszym elementem orientacji jest wiarygodne wyznaczenie kursu bezałogowego statku powietrznego. Kurs statku powietrznego jest definiowany jako różnica pomiędzy kierunkiem północy (ang. North) a podłużną osią statku powietrznego [6]. Przedział liczbowy dla kursu statku powietrznego przyjmuje wartości od 0° do 360° i jest zawsze zliczany na prawo od kierunku północy N. W technice satelitarnej wartości kursu odnoszone są do położenia anteny odbiornika GPS w układzie lokalnym ENU (ang. East-North-Up) [4]. Dla techniki INS wskazania kursu statku powietrznego odnoszą się do układu wewnętrznego statku powietrznego (ang. body-frame) i wyznaczone są przez jednostkę IMU. Umiejętność integracji wartości kursu z techniki GPS i INS jest kluczowa dla bezpieczeństwa lotu oraz nawigowania statkiem powietrznym, przez co również podwyższana jest dokładność wyznaczenia pozycji BSL.

W prezentowanym artykule przedstawiono rezultaty wyznaczenia kursu z danych GPS dla eksperymentu lotniczego z użyciem bezałogowego statku latającego. Eksperyment lotniczy został zrealizowany w 2015 r. nad rzeką Liwiec w województwie mazowieckim. Obliczenia kursu statku powietrznego zostały wykonane w programie Scilab 5.4.1 na podstawie zgromadzonych danych z platformy Trimble UX5. W artykule przedstawiono również rezultaty porównania dla wartości kursu z danych GPS oraz sensora INS. Rezultaty badań przeprowadzonych w ramach eksperymentu lotniczego „Liwiec” zostały zaprezentowane w artykule w formie graficznej oraz tabelarycznej.

2. MODEL MATEMATYCZNY WYZNACZENIA KURSU Z SENSORA GPS

Model matematyczny wyznaczenia kursu z danych GPS w głównej mierze bazuje na wykorzystaniu w obliczeniach przekształceń (czytaj transformacji) pomiędzy układami współrzędnych. W pierwszym etapie przekształcenia stosowane są reguły transformacji Helmerta, które umożliwiają wyrażenie współrzędnych geodezyjnych BLh za pomocą współrzędnych geocentrycznych XYZ [16]:

$$\begin{cases} X = (R+h) \cdot \cos B \cdot \cos L \\ X = (R+h) \cdot \cos B \cdot \sin L \\ Z = (R \cdot (1-e^2) + h) \cdot \sin B \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

a, b – parametry wielkiej i małej półosi elipsoidy WGS-84,

$a = 6378137.0$ m,

$b = 6356752.314245$ m,

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}},$$

e^2 – mimośród pierwszy,

$e^2 = 0.006694380023$,

$$R = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B}},$$

R – promień krzywizny pierwszego wertykału elipsoidy WGS-84,

(X, Y, Z) – współrzędne geocentryczne bezzałogowego statku powietrznego,

(B, L, h) – zarejestrowane współrzędne bezzałogowego statku powietrznego w układzie elipsoidalnym BLh.

W tym miejscu należy podkreślić, że współrzędne bezzałogowego statku powietrznego w układzie elipsoidalnym BLh są parametrami wyznaczonymi przez sensor GPS w ramach określenia pozycji BSL. Dodatkowo współrzędne bezzałogowego statku powietrznego w układzie elipsoidalnym BLh są zapisywane w pliku tekstowym „*.csv” przez oprogramowanie sterujące ruchem BSL jako jeden z finalnych produktów przeprowadzonego lotu. Współrzędne B (szerokość geodezyjna) i L (długość geodezyjna) są podane w jednostce stopni, zaś wysokość elipsoidalna (h) jest wyrażona w metrach. Jednocześnie w pliku „*.csv” są zapisane również kąty orientacji BSL, które zostały zarejestrowane przez sensor INS w trakcie trwania lotu. Wartości kątów orientacji z jednostki IMU są wyrażone w stopniach.

Kolejny etap wyznaczenia kursu BSL odbywa się z wykorzystaniem przekształcenia pomiędzy współrzędnymi geocentrycznymi XYZ a współrzędnymi w układzie lokalnym anteny ENU [18]:

$$\begin{cases} E = -\sin L \cdot \Delta X + \cos L \cdot \Delta Y + 0 \cdot \Delta Z \\ N = -\cos L \cdot \sin B \cdot \Delta X - \sin L \cdot \sin B \cdot \Delta Y + \cos B \cdot \Delta Z \\ U = \cos L \cdot \cos B \cdot \Delta X + \sin L \cdot \cos B \cdot \Delta Y + \sin B \cdot \Delta Z \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

(E, N, U) – współrzędne anteny odbiornika GPS w układzie lokalnym ENU.

Na tym etapie współrzędne statku powietrznego w układzie XYZ oraz ENU są wyrażone w metrach. Warto zaznaczyć, że wyznaczenie współrzędnych BSL w układzie ENU odbywa się tylko dla ($n-1$) epok pomiarowych w przedstawionym algorytmie obliczeniowym. Taka konstrukcja wpływa oczywiście na pełne odtworzenie kursu BSL i powoduje uwzględnienie warunków początkowych dla wyznaczenia kursu z danych GPS.

Ostateczna wartość kursu z danych GPS jest określona na podstawie wyrażenia [2]:

$$\psi_{GPS} = \arctg\left(\frac{E}{N}\right) \quad (3)$$

lub alternatywnej zależności [3]:

$$\psi_{GPS} = \arctg\left(\frac{V_E}{V_N}\right) \quad (4)$$

gdzie:

ψ_{GPS} – wyznaczany kurs z techniki GPS,

V_E – prędkość bezzałogowego statku powietrznego w układzie ENU wzdłuż osi East,

V_N – prędkość bezzałogowego statku powietrznego w układzie ENU wzdłuż osi North.

Wartości kursu bezzałogowego statku powietrznego na podstawie równania (3) lub (4) są wyrażone w radianach i mogą być również eksponowane w mierze stopniowej. Równania (3) i (4) do wyznaczenia kursu BSL są tożsame i mogą być stosowane zamiennie oraz stosownie do potrzeb użytkownika, w odniesieniu do danych wejściowych z pliku „*.csv”.

Na potrzeby przeprowadzonego eksperymentu oraz w nawiązaniu do równania (2) przyjęto, że układ lokalny ENU odbiornika GPS pokrywa się z układem wewnętrznym bezzałogowego statku powietrznego. Dodatkowo założono, iż dla epoki początkowej wartości kursu z danych GPS i INS są identyczne. Takie podejście jest spowodowane sekwencyjną procedurą obliczeniową kursu z danych GPS dla epok pomiarowych ($n-1$) z uwzględnieniem równania (2). Wyznaczenie kursu z danych GPS umożliwi określenie parametru różnicy kursu w odniesieniu do wartości zarejestrowanych przez INS [2]:

$$d\psi = \psi_{INS} - \psi_{GPS} \quad (5)$$

gdzie:

ψ_{INS} – kurs zarejestrowany przez IMU,

$d\psi$ – różnica kursu z danych GPS i INS.

Poza tym dla parametru różnicy kursu możliwe jest również określenie dokładności w postaci odchylenia standardowego [13]:

$$m_{d\psi} = \sqrt{\frac{v_{d\psi,i} v_{d\psi,i}}{n-1}} \quad (6)$$

gdzie:

$m_{d\psi}$ – odchylenie standardowe parametru różnicy kursu,

$v_{d\psi,i} = d\psi_i - \overline{d\psi}$,

i – epoka pomiarowa,

$d\psi$ – średnia wartość różnicy kursu dla wszystkich epok pomiarowych,

n – liczba obserwacji.

3. EKSPERYMENT BADAWCZY I REZULTATY

W ramach eksperymentu badawczego został przeprowadzony test lotniczy z użyciem platformy bezałogowej UX5 (Rys. 1). Lot testowy został przeprowadzony w 2015 r. na rzekę Liwiec na potrzeby wykonania ortofotomapy obszaru dorzecza rzeki. W czasie wykonywanego lotu zostały pozyskane zdjęcia lotnicze opracowywanego terenu oraz parametry nawigacyjne samego lotu w pliku tekstowym „*.csv”. Pozycja BSL jest określana za pomocą jednoczesnościowego odbiornika GPS (C/A-L1 GPS), będącego wewnętrznym produktem firmy Trimble. Należy dodać, że odbiornik GPS rejestruje pozycję BSL z częstotliwością 10 Hz. Platforma Trimble UX5 zaliczana jest do grupy „minibezałogowców” (ang. mini UAV) i jest stosowana w fotogrametrii lotniczej do wykonywania zdjęć z niskiego i średniego pułapu wysokości. Ponadto platforma bezałogowa Trimble UX5 posiada możliwość automatycznej kontroli startu, lotu i lądowania. Zdjęcia lotnicze pozyskiwane są z wykorzystaniem automatycznego wyzwolenia migawki aparatu. W Tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry techniczne dotyczące systemu Trimble UX5.



Rysunek 1 Trimble UX5 na wyrzutni przed startem
[źródło: opracowanie własne]

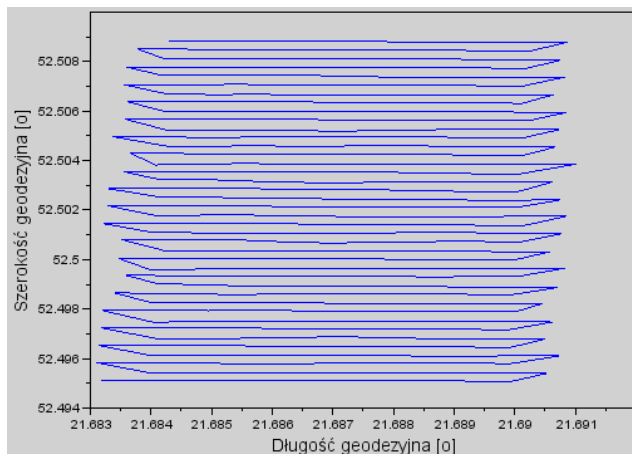
Figure 1 The Trimble UX5 – before flight

Tabela 1 Parametry techniczne platformy Trimble UX5 [12, 19]

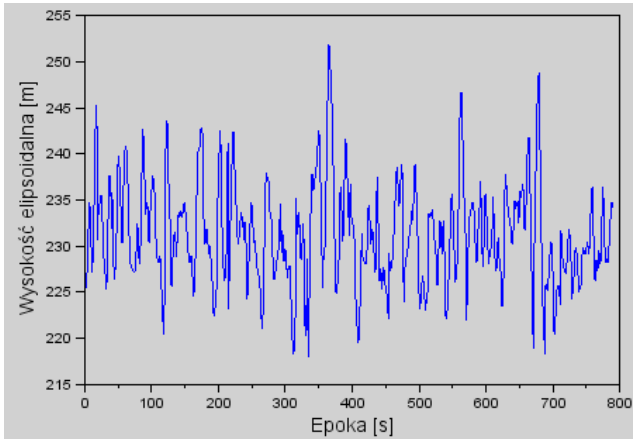
Table 1 The technical parameters of Trimble UX5 platform

Typ	Jednolity korpus ze skrzydłami
Waga	2,5 kg
Rozpiętość skrzydeł	1 m
Powierzchnia skrzydeł	34 dm ²
Wymiary	100 x 65 x 10 cm
Materiał	Pianka EPP; Węglowa konstrukcja ramy; Elementy kompozytowe
Napęd	Śmigło napędzające – elektryczny silnik komutatorowy

Bezpieczeństwo wykonywanego lotu jest kontrolowane automatycznie, jednak istnieje możliwość ingerencji operatora poprzez kontrolę awaryjnych procedur bezpieczeństwa. Start platformy bezałogowej Trimble UX5 jest możliwy wyłącznie z zastosowaniem wyrzutni mechanicznej. System może operować przy prędkości wiatru nie przekraczającej wartości 18 m/s oraz w warunkach pogodowych nie gorszych niż lekki deszcz. Urządzenie może pozyskiwać zobrażenia z pułapu wysokości od 75 m do 750 m z rozdzielczością terenową piksela od 0,024 m do 0,24 m. Do pozyskania danych obrazowych została wybrana kamera SONY NEX-5R, która jest jednym z częściej wybieranych sensorów montowanych na pokładzie bezałogowych statków latających. Wykonane zdjęcia lotnicze są zapisywane w uniwersalnym formacie JPEG. W przypadku platformy Trimble UX-5 zdjęcia są wykonywane z zastosowaniem super jasnego obiektywu Voigtlander o ogniskowej 15 mm i maksymalnej wartości przysłony F4.5 [12].

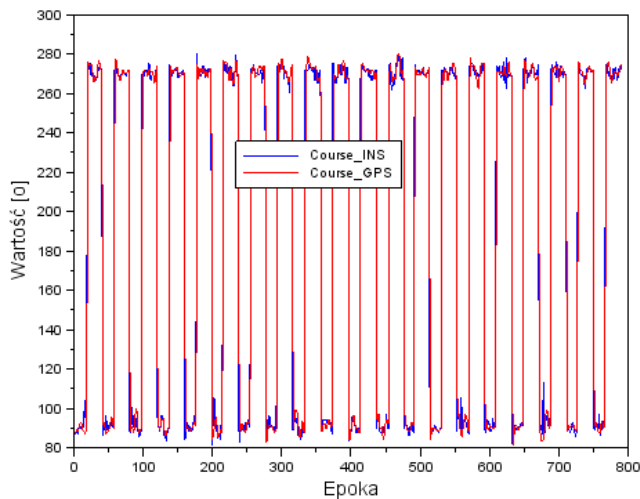


Rysunek 2 Trajektoria pozioma platformy Trimble UX5
Figure 2 Horizontal trajectory of Trimble UX5 platform



Rysunek 3 Trajektoria pionowa platformy Trimble UX5
Figure 3 Vertical trajectory of Trimble UX5 platform

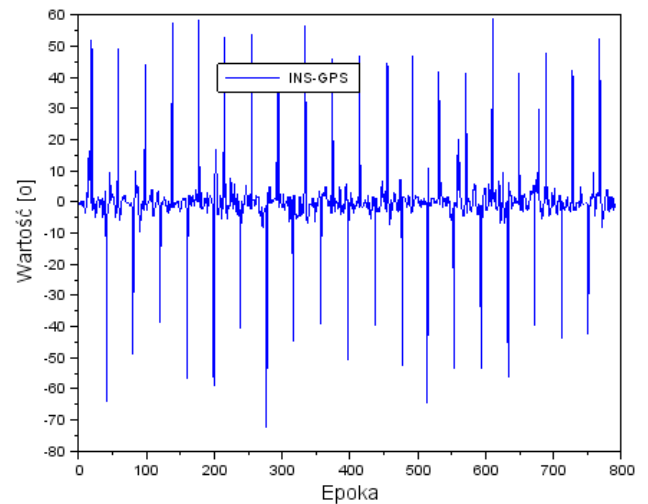
W ramach eksperymentu został wykonany nalot testowy w lipcu 2015 r. w godzinach 11:00 – 12:00 czasu lokalnego. Pozyskane obrazy posłużyły do produkcji ortofotomapy obrazowanego obszaru. Średnia wysokość lotu wynosiła 103 m nad terenem płaskim, rolniczym i po części zabudowanym. Nalot zaplanowano w oprogramowaniu „Trimble Aerial Imaging”. Ustawienia kamery zdefiniowano w trybie manualnym, natomiast ostrość obiektywu ustawiono na nieskończoność. Czułość ISO ustawiono w trybie AUTO. Przysłona miała wartość 4,5. W nalocie pozyskano 789 obrazów z pułapu 100 m, gdzie terenowy rozmiar piksela wyniósł 0,033 m. Pokrycie podłużne i poprzeczne wynosiło 75%. Nalot wykonywano w kierunku wschód-zachód.



Rysunek 4 Wartość kursu z danych GPS i INS
Figure 4 The course value from GPS and INS data

W trakcie opracowania danych z lotu testowego, wartości kursu z jednostki IMU zostały porównane z wynikami obliczonymi dla sensora GPS. Rysunek 4 przedstawia uzyskane wartości

kursu dla techniki INS (kolor niebieski) i metody GPS (kolor czerwony). Wartość średnia różnicy $d\psi$ dla prezentowanych danych wyniosła $0,08^\circ$, a odchylenie standardowe $m_{d\psi}$ równo $11,62^\circ$. Obliczona różnica kursu z danych GPS i INS pokazuje, że charakter zmian tego parametru jest podobny do szumu białego (wartość średnia dąży do 0, a odchylenie standardowe jest znacznie większe od 0). Rozrzut otrzymanych wyników parametru $d\psi$ wyniósł odpowiednio od $-72,35^\circ$ do $58,81^\circ$, z wartością mediany na poziomie $-0,39^\circ$ (Rys. 5). Duża dyspersja parametru $d\psi$ występuje tylko podczas skrętu bezzałogowego statku powietrznego na skutek zmiany kierunku lotu. Taka sytuacja pokazuje pewne słabości prezentowanej metody badawczej i wymusza zastosowanie algorytmów umożliwiających wyeliminowanie pomiarów odstających na Rysunku 5.



Rysunek 5 Różnica kursu z surowych danych GPS i INS
Figure 5 The course difference from raw GPS and INS data

W celu wykrycia i wyeliminowania pomiarów odstających dla rezultatów z Rys. 5 zaproponowano w pracy następujący warunek [19]:

$$d\psi_i \leq k_1 \cdot M_\psi \quad (7)$$

gdzie:

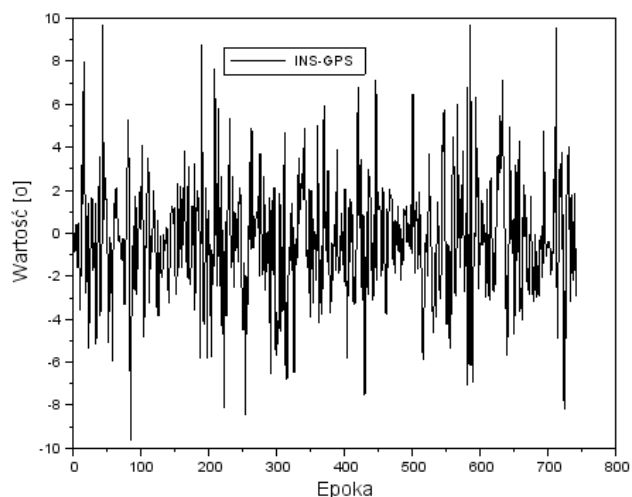
$d\psi_i$ – różnica kursu z surowych danych GPS i INS dla każdej epoki pomiarowej,

k_1 – liczba całkowita, $k_1 = 3$,

M_ψ – dokładność odczytu kursu na podstawie metryki instrumentu Trimble UX-5, $M_\psi = 2^0 \div 3^0$.

Równanie (7) określa pomiary, które nie przekraczają kryterium granicznego oraz nie zostaną usunięte z dalszej analizy (Rys. 6). Na podstawie równania (7) wykryto około 40 pomiarów odstających, które zdecydowanie przekraczają zakładane kryterium graniczne. Dla pozostałych pomiarów (Rys. 6) została wyznaczona ponownie wartość

średnia różnicy kursu oraz parametr odchylenia standardowego. Po zastosowaniu równania (7) średnia różnica kursu wynosi $-0,39^\circ$, ale odchylenie standardowe zmalało do $2,53^\circ$, co skutkuje zmniejszeniem się błędu średniego o około 79% w odniesieniu do wartości z wykresu nr 5. Dyspersja wyników parametru $d\psi$ wyniosła odpowiednio od $-9,65^\circ$ do $9,74^\circ$, z wartością mediany równą $-0,44^\circ$.



Rysunek 6 Różnica kursu z surowych danych GPS i INS (po wyeliminowaniu pomiarów odstających)

Figure 6 The course difference from raw GPS and INS data (after blunder measurements eliminated)

W artykule zastosowano również metodę naprawy pomiarów odstających dla rezultatów z Rysunku 5, jak poniżej [19]:

$$\begin{cases} d\psi_{\max} > k_1 \cdot M_\psi \\ \psi_k = \psi_{GPS} + d\psi_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

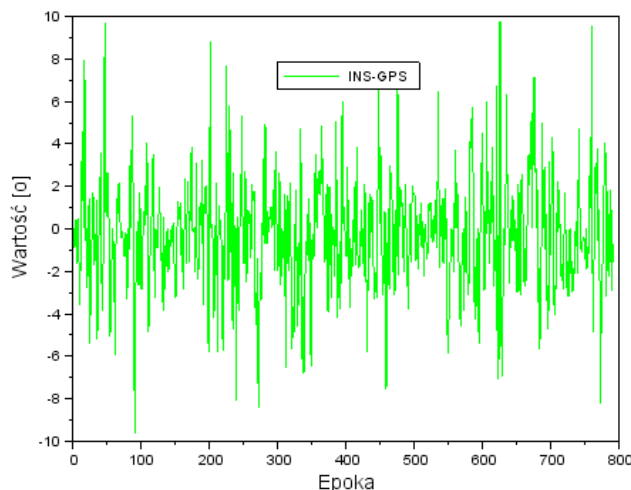
gdzie:

$d\psi_{\max}$ – wartości różnicy kursu z danych GPS i INS przekraczające zdecydowanie kryterium graniczne,

ψ_k – ostateczny kurs z danych GPS po uwzględnieniu naprawionych rezultatów z równania (8).

Na podstawie równania (8) wartości kursu z danych GPS, które zdecydowanie przekraczały kryterium graniczne z równania (7), zostały naprawione i ponownie wykorzystane w obliczeniach (Rys. 7). Na tej podstawie określono ponownie wartość średnią różnicy kursu z danych GPS i INS oraz odchylenie standardowe $m_{d\psi}$. Po zastosowaniu równania (8) średnia różnica kursu jest równa $-0,30^\circ$, a odchylenie standardowe wynosi już $2,44^\circ$, co skutkuje zmniejszeniem się błędu średniego o około 80% w odniesieniu do otrzymanych wartości z Rysunku 5. Warto dodać, że mediana

dla zbioru danych z wykresu nr 7 wynosi dokładnie $-0,20^\circ$.



Rysunek 7 Różnica kursu z surowych danych GPS i INS (po naprawie pomiarów odstających)

Figure 7 The course difference from raw GPS and INS data (after blunder measurements repaired)

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono rezultaty wyznaczenia kursu z danych GPS dla bezzałogowego statku powietrznego na potrzeby wykonywania nalotów fotogrametrycznych. W pracy przedstawiono i scharakteryzowano metody badawcze, wraz z podaniem algorytmu obliczeniowego, mające na celu określenie różnicy kursu i jego odchylenia standardowego z wykorzystaniem danych GPS i INS. Dane wejściowe w procesie obliczeniowym w post-processingu stanowią współrzędne BSL zapisane w formacie „*.csv” (tzw. plik tekstowy log). Obliczenia numeryczne zostały zrealizowane w edytorze numerycznym Scilab 5.4.1 dla danych GPS i INS, pozyskanych z platformy bezzałogowej Trimble UX5. W ramach prezentowanego artykułu wykonano eksperyment lotniczy, dzięki któremu pozyskano zobrazenia lotnicze terenu oraz parametry nawigacyjne lotu z danych GPS i INS, które wykorzystano w obliczeniach. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i testów wyciągnięto następujące wnioski:

- zastosowanie techniki GPS i INS umożliwia uzyskanie podobnych rezultatów kursu bezzałogowego statku powietrznego,
- średnia różnica kursu z surowych danych GPS i INS wynosi $0,08^\circ$ z odchyleniem standardowym $11,62^\circ$,
- zastosowanie metody eliminującej pomiary odstające z techniki GPS pozwala na odtworzenie

różnicy kursu na poziomie $-0,39^{\circ}$ z odchyleniem standardowym $2,53^{\circ}$,

- zastosowanie metody eliminującej pomiary odstające z techniki GPS poprawiło dokładność wyznaczenia różnicy kursu o około 79% (względem rozwiązania dla surowych danych GPS i INS – patrz Rys. 5),

- zastosowanie metody naprawy pomiarów odstających z techniki GPS pozwala na odtworzenie

różnicy kursu na poziomie $-0,30^{\circ}$ z odchyleniem standardowym $2,44^{\circ}$,

- zastosowanie metody naprawy pomiarów odstających z techniki GPS poprawiło dokładność wyznaczenia różnicy kursu o około 80% (względem rozwiązania dla surowych danych GPS i INS – patrz Rys. 5).

LITERATURA

- [1] Adamski M., Proces szkolenia operatorów Bezzałogowych Statków Powietrznych, *Logistyka*, nr 3, 16-24, 2015.
- [2] Angrisano A., Petovello M., Pugliano G., Benefits of combined GPS/GLONASS with low-cost MEMS IMUs for vehicular urban navigation, *Sensors* 2012, 12, 5134-5158; doi:10.3390/s120405134.
- [3] Bevely D. M., Navigation for control of ground vehicles, Department of Mechanical Engineering, 5th Annual Summer Workshop, NDIA Intelligent Vehicles Symposium, 2006.
- [4] Bieda R., Grygiel R., Wyznaczanie orientacji obiektu w przestrzeni z wykorzystaniem naiwnego filtru Kalmana, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 90, nr 1, 2014.
- [5] Bieńczyk R., Janiszewski J., Komorek A., Kowalik R., Rypulak A., Smolak M., Koncepcja wykorzystania sieci neuronowych w BSP, *Logistyka*, nr 6, 1925-1934, 2014.
- [6] Ciećko A., Grzegorzewski M., Ćwiklak J., Oszczak S., Grunwald G., Baber K., Wykorzystanie systemów satelitarnych w bezpiecznej nawigacji powietrznej, *Logistyka*, nr 3, 744-750, 2015.
- [7] Ćwiklak J., Założenia projektowe bezzałogowego statku powietrznego wykorzystywanego do odstraszenia ptaków i monitorowania lotniska, *Logistyka*, nr 6, 2819-2831, 2014.
- [8] Dąbrowski R., Jenerowicz A., Ocena możliwości inwentaryzacji wybranych elementów infrastruktury kolejowej na podstawie wielospektralnych danych obrazowych pozyskanych z pułapu bezzałogowego statku latającego, *Logistyka*, nr 6, 2973-2981, 2014.
- [9] Godlewski Ł., Wykonywanie lotów przez BSL w polskiej przestrzeni powietrznej, PAŻP, Warszawa, 18.03.2013 r.
- [10] Jackowski S., Chrzan M., Koncepcja wykorzystania samolotów bezzałogowych i załogowych w celu zapewnienia łączności na terenach objętych klęskami żywiołowymi, *Logistyka*, nr 6, 4633-4645, 2014.
- [11] Kędzierski M., Fryškowska A., Wierzbicki D., Opracowania fotogrametryczne z niskiego pułapu, WAT, ISBN 978-83-7938-047-3, Warszawa, 2014.
- [12] Kedzierski, M., Wierzbicki D., Radiometric quality assessment of images acquired by UAV's in various lighting and weather conditions, *Measurement*, 76, 156-169, 2015.
- [13] Krasuski K., Wierzbicki D., Wyznaczenie kursu bezzałogowego statku powietrznego na podstawie danych GPS i INS, *Pomiary Automatyka Robotyka*, R. 19, nr 4, 63-68, 2015, doi: 10.14313/PAR_218/63.
- [14] Nowak D., Rogalski T., Możliwości wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych w polskiej przestrzeni powietrznej, *Logistyka*, nr 6, 7949-7955, 2014.

- [15] Nowakowski M., Zagadnienia rozwoju bezałogowych statków powietrznych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych, *Logistyka*, nr 6, 3129-3139, 2011.
- [16] Osada E., *Geodezja*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001.
- [17] Osada E., *Geodezyjne pomiary fotogrametryczne*, Wydawca: UxLan, ISBN 978-83-60221-02-0, Wrocław, 2014.
- [18] Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 2013.
- [19] Wierzbicki D., Krasuski K., Wykorzystanie techniki GPS do wyznaczenia kątów heading, pitch i roll – część I, *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, Lotnictwo i Inżynieria Bezpieczeństwa*, artykuł zaakceptowany do druku, ukaze się w numerze 1, 2016.
- [20] uas.trimble.com, aktualna na listopad 2015.