

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Określenie współrzędnych środka rzutu w aerotriangulacji cyfrowej z użyciem danych z Bezzałogowego Statku Powietrznego

DAMIAN WIERZBICKI<sup>1</sup>, KAMIL KRASUSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I GEODEZJI,  
ZAKŁAD TELEDETEKCJI I FOTOGRAMETRII

<sup>2</sup>WYDZIAŁ GEODEZJI, KARTOGRAFII I KATASTRU NIERUCHOMOŚCI, STAROSTWO POWIATOWE  
W RYKACH

**Słowa kluczowe:** Bezzałogowy Statek Powietrzny, GPS, aerotriangulacja cyfrowa, elementy orientacji zewnętrznej

#### STRESZCZENIE:

W ostatnim czasie można zaobserwować nieustannie zwiększające się zainteresowanie zastosowaniem Bezzałogowych Statków Powietrznych do pozyskiwania obrazów z niskiego pułapu. W przeciwieństwie do klasycznych statków powietrznych przystosowanych do realizacji nalołów fotogrametrycznych, Bezzałogowe Statki Powietrzne wyposażone są w jednoczesotliwościowe odbiorniki GPS. W takim przypadku typowa dokładność wyznaczenia współrzędnych platformy wynosi kilka metrów. W artykule przedstawiono możliwość określenia współrzędnych środka rzutu dla każdego wykonanego zdjęcia z użyciem technologii Bezzałogowych Statków Powietrznych. Współrzędne środka rzutu zostały wyznaczone w oparciu o technikę satelitarną GPS oraz metodę niezależnych wiązek w ramach wykonanej aerotriangulacji cyfrowej. Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników stwierdzono, że średnia różnica współrzędnych środka rzutu z rozwiązania GPS i aerotriangulacji cyfrowej jest mniejsza niż 1,2 m. W artykule zastosowano również model regresji liniowej w celu określenia zmian współrzędnych środka rzutu z rozwiązania GPS i aerotriangulacji cyfrowej.

# Determination the coordinates of the projection center in the digital aerial triangulation using data from Unmanned Aerial Vehicle

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle, GPS, digital aerial triangulation, elements of exterior orientation

## ABSTRACT:

In recent times, it can be observed constantly increasing interest in the use of unmanned aerial vehicles to obtain imaging with low altitudes. In contrast to conventional aircraft adapted to carry out photogrammetric flights, unmanned aircraft are equipped in single frequency GPS receivers. In this case the typical accuracy of the designation of the coordinate platform is about a few meters. The article presents the opportunity to determine the coordinates of the center line for each image taken with the use of technology UAV. Coordinates of the projection center were determined on the basis of GPS satellite technology and the method of independent beams made in the framework of digital aerial triangulation. Based on the survey and the results obtained, it was found that the mean difference of coordinates of projection center between GPS solution and aerial triangulation method is less than 1.2 m. In paper, the model of linear regression was also applied for present the coordinates changes of projection center between GPS solution and aerial triangulation method.

## 1. WSTĘP

Wraz ze wzrostem poziomu technologicznego oraz obniżeniem kosztów produkcji Bezzałogowych Statków Powietrznych (BSP) stają się one coraz ciekawszą alternatywą dla obrazowania powierzchni Ziemi w stosunku do kosztów realizacji projektów przy wykorzystaniu tradycyjnych technologii obrazowania z pułapu lotniczego. Ponadto w niektórych przypadkach zastosowanie do obrazowania platform załogowych może być w ogóle niemożliwe. W takich sytuacjach bezzałogowe platformy obrazujące mogą stanowić istotny ekwiwalent w realizacji projektów pozyskiwania zobrazowań na potrzeby tworzenia produktów fotogrametrii lotniczej [8]. Zastosowanie BSP z zamontowaną kamerą kompaktową oferuje możliwość pozyskiwania wysokorozdzielczych zobrazowań stereo dla niewielkich obszarów. Dzięki takim danym możliwe jest przeprowadzenie procesu aerotriangulacji cyfrowej, opracowanie numerycznego modelu terenu, wykonanie ortorektyfikacji oraz opracowanie ortofotomapy cyfrowej.

Wykorzystanie BSP w celu pozyskania danych obrazowych dla potrzeb fotogrametrii wiąże się z szeregiem różnorodnych aspektów, które do tej pory nie miały miejsca w klasycznej fotogrametrii lotniczej. Aspekty te dotyczą przede wszystkim rodzaju stosowanych BSP oraz sensorów obrazujących zamontowanych na ich pokładzie. Istot-

nym aspektem są również rozwiązania dotyczące rejestracji przybliżonych elementów orientacji zewnętrznej. Do ich rejestracji stosowane są najczęściej jedno- lub dwuczęstotliwościowe odbiorniki GPS oraz sensory inercyjne rejestrujące wychylenia platformy. Ponadto budowa sensorów INS oparta jest w dużej mierze na układach mikroelektromechanicznych typu MEMS. Dokładność wyznaczenia wartości kątowych w jednostkach inercyjnych wynosi od  $0,3^\circ$  do  $1^\circ$  dla kątów nachylenia poprzecznego oraz podłużnego, natomiast dla kąta skręcenia dokładność ta jest niższa i wynosi około  $2^\circ$  [3, 6]. W przypadku niskobudżetowych platform bezzałogowych stosunkowo mała dokładność jest powodowana głównie przez błędy występujące w pomiarach akcelerometrycznych, żyroskopowych oraz magnetometrycznych [10]. Istotnym czynnikiem w rejestracji pozycji platformy jest również odtworzenie wiarygodnych współrzędnych BSP w czasie wykonywanego lotu. Do najbardziej rozpowszechnionych metod określenia pozycji BSP należą modele filtracji Kalmana, mające na celu podwyższenie dokładności wyznaczanych współrzędnych BSP oraz redukcję błędów pomiarowych [1]. Pozycja BSP jest wówczas wyrażona w układzie geocentrycznym ECEF lub układzie geodezyjnym BLH [14]. Typowa dokładność wyznaczenia współrzędnych BSP z wykorzystaniem sensora GPS wynosi kilka metrów dla odbiornika jednoczęstotliwościowego [8]. Wyznaczenie współrzędnych BSP pozwala rów-

niez na określenie współrzędnych środka rzutu dla każdego zdjęcia wykonywanego podczas lotu. Przybliżone współrzędne środka rzutu aparatu kamery są obliczane przy pomocy współrzędnych pozycji BSP oraz parametrów ekscentru, determinujących położenie aparatu kamery na platformie bezzałogowej [2].

Celem prezentowanej pracy była możliwość określenia współrzędnych środka rzutu dla każdego zdjęcia wykonanego przez BSP. W tym celu zastosowano dwie metody badawcze, tj. technikę satelitarną GPS oraz metodę niezależnych wiązek w ramach wykonanej aerotriangulacji cyfrowej. Zastosowanie techniki satelitarnej GPS pozwala na wyznaczenie tylko przybliżonej wartości współrzędnych środka rzutu przez BSP w czasie wykonywania lotu. W takich przypadkach konieczne jest zastosowanie alternatywnego rozwiązania do określenia współrzędnych środka rzutu, zazwyczaj w postaci metody aerotriangulacji cyfrowej. Wykorzystanie metody aerotriangulacji cyfrowej zapewnia podwyższenie dokładności wyznaczenia współrzędnych środka rzutu oraz pozwala na ewentualną eliminację pomiarów odstających z techniki satelitarnej GPS. Różnice w wartości współrzędnych dla obu metod badawczych zostały obliczone i przedstawione w pracy w formie tabelarycznej i graficznej. Dane do obliczeń pochodzą z eksperymentu fotogrametrycznego, zrealizowanego nad rzeką Liwiec w 2015 r. Całość prezentowanego artykułu podzielono na pięć części: wstęp, metodyka badań, eksperyment badawczy, rezultaty i dyskusja, wnioski końcowe.

## 2. METODYKA BADAŃ

W tym rozdziale opisano i zaprezentowano modele matematyczne dla wyznaczenia współrzędnych środka rzutu z użyciem metody GPS oraz metody niezależnych wiązek.

### 2.1 Metoda satelitarna GPS

Podstawowe równanie obserwacyjne w systemie GPS można zapisać następująco [13]:

$$l = \rho + c \cdot (dtr - dts) + Trop + Rel + Ion + bias + M_l \quad (1)$$

gdzie:

$l$  – pomiar kodowy C/A na częstotliwości L1,  
 $\rho$  – odległość geometryczna między satelitami GPS a odbiornikiem; zawiera informacje na temat parametrów ruchu obrotowego Ziemi, precyzyjnych współrzędnych anteny satelity i odbiornika,

centrum fazowego anteny satelity i odbiornika oraz efektów pływowych i dynamicznych, prędkości ruchu płyty kontynentalnej itp.,

$$\rho = \sqrt{(X_r - X_s)^2 + (Y_r - Y_s)^2 + (Z_r - Z_s)^2},$$

$(X_r, Y_r, Z_r)$  – pozycja samolotu w układzie geocentrycznym,

$(X_s, Y_s, Z_s)$  – pozycja satelity GPS na orbicie,

$c$  – prędkość światła,

$dtr$  – chód zegara odbiornika dla obserwacji GPS,

$dts$  – chód zegara satelity GPS,

$Trop$  – opóźnienie troposferyczne dla obserwacji GPS,

$Ion$  – opóźnienie jonosferyczne dla obserwacji GPS,

$Rel$  – efekty relatywistyczne dla obserwacji GPS,

$bias$  – sumaryczny wyraz dla opóźnień sprzętowych w systemie GPS,

$M_l$  – efekt wielotorowości i szum pomiarowy.

W równaniu (1) niewiadomymi parametrami są współrzędne BSP (w układzie geocentrycznym XYZ), wyznaczone w określonym interwale czasu (np. co 0,5 s lub 1 s), oraz poprawka chodu zegara odbiornika. Równanie (1) podlega wyznaczeniu w procesie stochastycznym z użyciem filtru Kalmana lub metody najmniejszych kwadratów. Finalne współrzędne BSP podlegają korekcji ekscentru względem położenia aparatu kamery na platformie bezzałogowej, jak poniżej [2]:

$$\begin{bmatrix} X_{kr} \\ Y_{kr} \\ Z_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$(X_{kr}, Y_{kr}, Z_{kr})$  – współrzędne środka rzutu aparatu kamery,

$(e_x, e_y, e_z)$  – parametry ekscentru aparatu kamery.

### 2.2 Metoda aerotriangulacji cyfrowej

Podstawowym zadaniem aerotriangulacji cyfrowej jest określenie elementów orientacji zewnętrznej (EOZ) oraz wyznaczenie współrzędnych fotopunktów. Aerotriangulacja cyfrowa ma na celu powiązanie współrzędnych fotopunktu z terenu  $(X_T, Y_T, Z_T)$  oraz danych obrazowych  $(x_k, y_k)$ , jak poniżej [9]:

$$x_k - x_0 = -f_k \left[ \frac{r_{11}(X_T - X_{kr}) + r_{21}(Y_T - Y_{kr}) + r_{31}(Z_T - Z_{kr})}{r_{13}(X_T - X_{kr}) + r_{23}(Y_T - Y_{kr}) + r_{33}(Z_T - Z_{kr})} \right] \quad (3)$$

$$y_k - y_0 = -f_k \frac{r_{12}(X_T - X_{kr}) + r_{22}(Y_T - Y_{kr}) + r_{32}(Z_T - Z_{kr})}{r_{13}(X_T - X_{kr}) + r_{23}(Y_T - Y_{kr}) + r_{33}(Z_T - Z_{kr})} \quad (4)$$

gdzie:

$(x_k, y_k)$  – współrzędne obrazowe fotopunktu,  
 $(x_0, y_0)$  – współrzędne punktu głównego kamery,  
 $f_k$  – stała kamery,  
 $(X_T, Y_T, Z_T)$  – współrzędne terenowe fotopunktu,  
 $(X_{kr}, Y_{kr}, Z_{kr})$  – współrzędne środka rzutu aparatu kamery, wyrażone w układzie terenowym,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix},$$

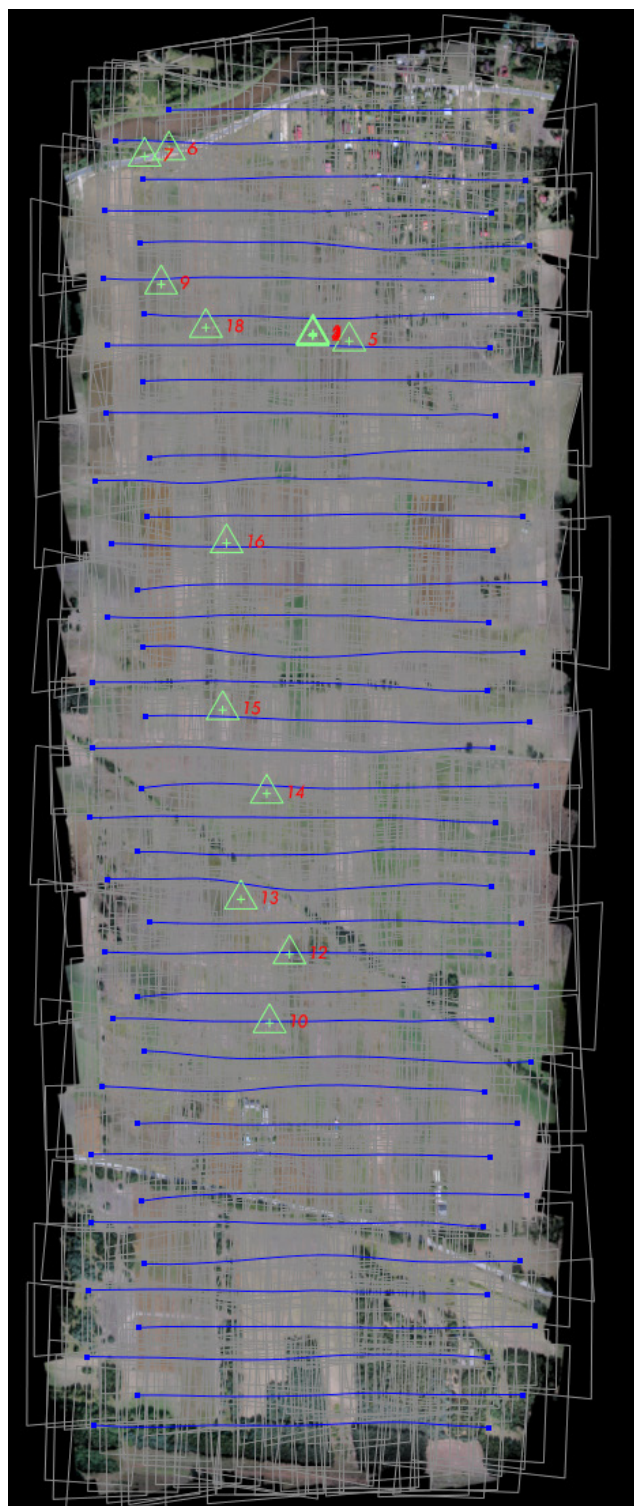
$R$  – macierz transformacji, będąca funkcją kątowych elementów orientacji zewnętrznej zdjęcia,  
 $(\varpi, \varphi, \kappa)$  – elementy kątowe orientacji zewnętrznej.

W aerotriangulacji cyfrowej z użyciem BSP najbardziej preferowane jest zastosowanie metody niezależnych wiązek w celu określenia EOZ. Model matematyczny metody niezależnych wiązek bazuje na warunku kolinearności, który umożliwia powiązanie układu obrazowego z układem terenowym. W metodzie niezależnych wiązek EOZ są wyznaczone w procesie iteracyjnym z wykorzystaniem stochastycznego podejścia przy wyrównywaniu pomiarów. Ponadto proces wyrównania pomiarów oparty jest o metodę najmniejszych kwadratów [11].

### 3. OPIS EKSPERYMENTU BADAWCZEGO

Aerotriangulację bloku obrazów z niskiego pułapu wykonano w oprogramowaniu UASMaster w oparciu o algorytm wyrównania metodą niezależnych wiązek. Po zdefiniowaniu orientacji wewnętrznej obrazów oraz wprowadzeniu przybliżonych elementów orientacji zewnętrznej każdego obrazu wykonano manualny pomiar 14 fotopunktów (Rys. 1).

Punkty wiążące wygenerowano w sposób automatyczny za pomocą algorytmów opartych na dopasowaniu powierzchniami (Area Based Matching), dopasowaniu cechami (Feature Based Matching) [4, 7], a także algorytmu opartego na minimalizacji funkcji kosztów (Cost Based Matching) [12]. Po wyrównaniu dokonano korekty operatorskiej pomiaru punktów na obrazach oraz wyeliminowano punkty o liczbie wiązań mniejszej niż trzy w celu zwiększenia niezawodności sieci.



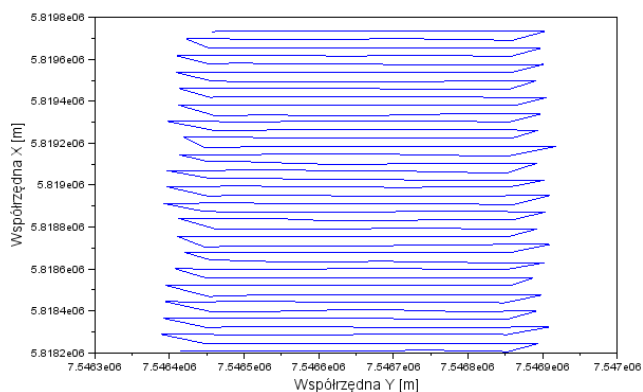
Rysunek 1. Geometria bloku testowego

Figure 1. Geometry of study block

Źródło: opracowanie własne

Dane źródłowe do aerotriangulacji pozyskano za pomocą płatownca Trimble UX-5 wyposażonego w kamerę Sony NEX-5R. Nalot zrealizowano na obszarze testowym w lipcu 2015 roku. Warunki fotografowania były dobre, tzn. niebo było pokryte niewielką ilością chmur kłębiastych, a średnia

prędkość wiatru wynosiła około 2 m/s. Ustawienia kamery zdefiniowano w trybie manualnym, natomiast ostrość obiektywu ustawiono na nieskończoność. Wybrany obszarem testowym były okolice miejscowości Starowola nad rzeką Liwiec, znajdującej się 60 km na północny wschód od Warszawy (Rys. 2). Teren opracowania był płaski oraz częściowo zalesiony. Blok testowy składał się z 789 obrazów położonych w 40 szeregach, pozyskanych z pułapu 100 m nad powierzchnią terenu, natomiast średnia wysokość elipsoidalna lotu wynosiła 230 m. Nalot wykonano w kierunku wschód – zachód, przy założeniu, że pokrycie poprzeczne i podłużne wynosi 75%. Na obszarze testowym pomierzono 14 sygnalizowanych fotopunktów z wykorzystaniem techniki RTK w systemie GPS. Dokładność wyznaczenia współrzędnych terenowych fotopunktów wynosiła 0,03 m. Podstawowe parametry bloku testowego w ramach przeprowadzonego wyrównania zostały określone w Tabeli 1.



**Rysunek 2.** Trajektoria lotu BSP w płaszczyźnie poziomej  
**Figure 2.** Trajectory flight of UAV in the horizontal plane  
 Źródło: opracowanie własne

**Tabela 1.** Parametry bloku testowego

**Table 1.** Parameters of study block

Źródło: na podstawie programu UASMaster

Układ współrzędnych	PUWG 2000/7
Format zapisu obrazów	JPEG
Liczba szeregów	40
Kamera/ogniskowa obiektywu [mm]	NEX 5/15.51
Średnie pokrycie podłużne/ poprzeczne [%]	75/75
Wysokość pułapu [m]	100
Liczba fotopunktów	14
Teoretyczny terenowy wymiar piksela [m]	0,04
Czas trwania nalotu	50 min

Odczyty współrzędnych BSP pochodzą z urządzenia Trimble UX-5, które posiada zamontowany odbiornik jednoczęstotliwościowy (C/A – L1) firmy Trimble. Odbiornik może rejestrować i odświeżać współrzędne BSP z częstotliwością do 10 Hz. Ponadto należy dodać, że współrzędne BSP są zapisywane w uniwersalnym formacie tekstowym „log”, łącznie z danymi kątów obrotu HPR (Heading, Pitch, Roll) [14]. Typowa dokładność współrzędnych BSP otrzymanych z urządzenia Trimble UX-5 wynosi kilka metrów.

#### 4. REZULTATY I DYSKUSJA

W tym rozdziale dokonano porównania współrzędnych środka rzutu ( $X_{kr}$ ,  $Y_{kr}$ ,  $Z_{kr}$ ), wyznaczonych w oparciu o technikę GPS oraz metodę aerotriangulacji cyfrowej. Na tej podstawie określono różnicę współrzędnych środka rzutu ( $X_{kr}$ ,  $Y_{kr}$ ,  $Z_{kr}$ ) z techniki GPS i metody aerotriangulacji cyfrowej, jak poniżej:

$$\begin{cases} DX = X_{kr}^{GPS} - X_{kr}^{AERO} \\ DY = Y_{kr}^{GPS} - Y_{kr}^{AERO} \\ DZ = Z_{kr}^{GPS} - Z_{kr}^{AERO} \end{cases} \quad (5)$$

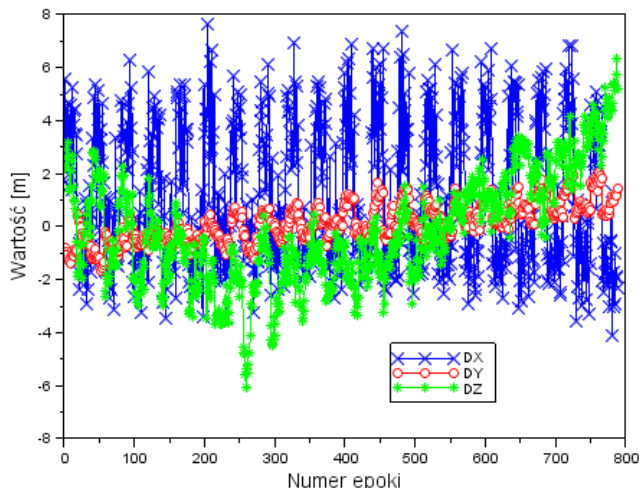
gdzie:

( $X_{kr}^{GPS}$ ,  $Y_{kr}^{GPS}$ ,  $Z_{kr}^{GPS}$ ) – współrzędne środka rzutu z techniki GPS,

( $X_{kr}^{AERO}$ ,  $Y_{kr}^{AERO}$ ,  $Z_{kr}^{AERO}$ ) – współrzędne środka rzutu z metody aerotriangulacji cyfrowej.

Wartości parametrów DX, DY oraz DZ zostały zaprezentowane na Rysunku nr 3 i w Tabeli nr 2. Przeciętna wartość parametru DX wynosi 1,13 m przy rozrzucie wyników od -4,12 m do 7,65 m. Ponadto odchylenie standardowe dla parametrów DX wynosi 2,89 m, a mediana jest równa 0,43 m. Przeciętna wartość parametru DY wynosi 0,17 m przy rozrzucie wyników od -1,65 m do 2,19 m. Ponadto odchylenie standardowe dla parametrów DY wynosi 0,75 m, mediana jest równa 0,13 m. Przeciętna wartość parametru DZ wynosi -0,15 m przy rozrzucie wyników od -6,08 m do 6,34 m. Ponadto odchylenie standardowe dla parametrów DZ wynosi 2,12 m, a mediana jest równa -0,43 m. Spośród obliczonych parametrów DX, DY oraz DZ najmniejsza dyspersja (rozrzut) wyników jest zauważalna dla parametru DY. W dodatku parametr DY ma najmniejsze wartości odchylenia standardowego oraz mediany. Z kolei największy rozrzut wyników oraz odchylenie standardowe są widoczne dla wartości parametru DX. Zestawienie podstawowych parametrów statystycznych dla

wartości DX, DY oraz DZ zostało przedstawione w Tabeli nr 2.



**Rysunek 3.** Wartości parametrów DX, DY oraz DZ  
**Figure 3.** The values of parameters DX, DY and DZ  
 Źródło: opracowanie własne

**Tabela 2.** Charakterystyka statystyczna parametrów DX, DY oraz DZ

**Table 2.** Statistical characteristics of parameters DX, DY and DZ

Źródło: opracowanie własne

Parametr	Parametr DX	Parametr DY	Parametr DZ
Wartość przeciętna [m]	1,13	0,17	-0,15
Odchylenie standardowe [m]	2,89	0,75	2,12
Dyspersja wyników [m]	(-4,12 ÷ 7,65)	(-1,65 ÷ 2,19)	(-6,08 ÷ 6,34)
Mediana [m]	0.43	0.13	-0.43

Na Rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono trendy parametrów DX, DY oraz DZ z wykorzystaniem modelu regresji liniowej, jak poniżej [5]:

$$\begin{cases} DX = Q_X \cdot a_X + b_X \\ DY = Q_Y \cdot a_Y + b_Y \\ DZ = Q_Z \cdot a_Z + b_Z \end{cases} \quad (6)$$

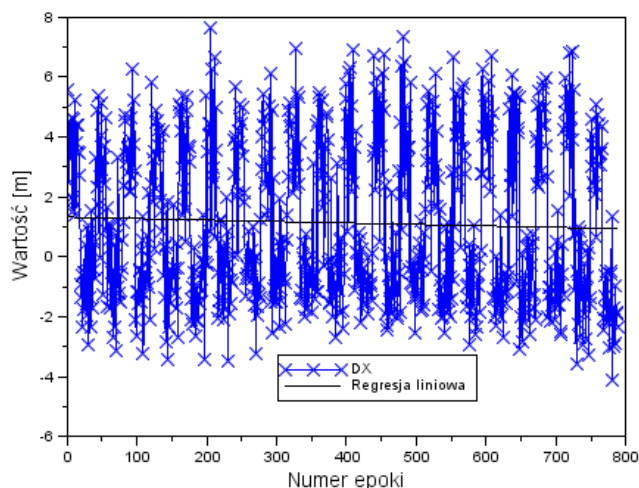
gdzie:

$(a_X, b_X)$  – wyznaczone współczynniki dla parametru DX,

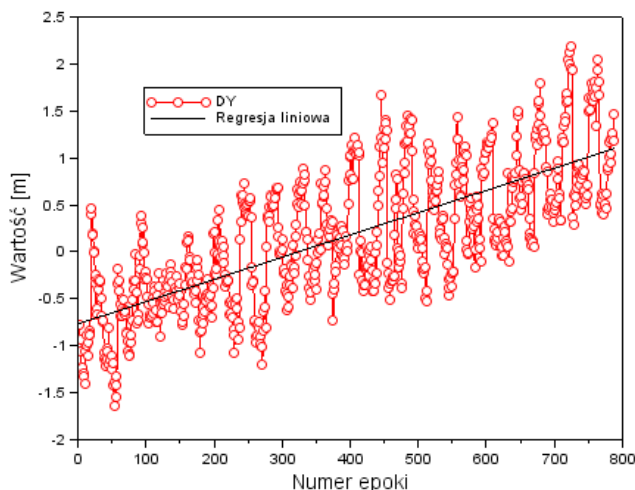
$(a_Y, b_Y)$  – wyznaczone współczynniki dla parametru DY,

$(a_Z, b_Z)$  – wyznaczone współczynniki dla parametru DZ,

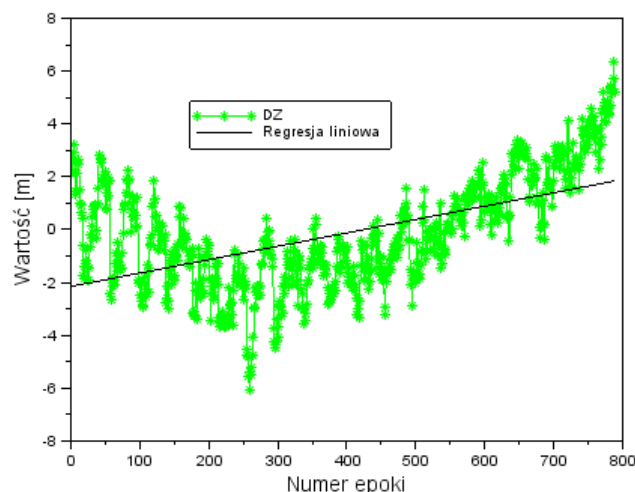
$(Q_X, Q_Y, Q_Z)$  – macierze pełnego rzędu; macierze zawierają pochodne cząstkowe względem wyznaczanych współczynników liniowych.



**Rysunek 4.** Regresja liniowa dla parametru DX  
**Figure 4.** Linear regression for DX parameter  
 Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 5.** Regresja liniowa dla parametru DY  
**Figure 5.** Linear regression for DY parameter  
 Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 6.** Regresja liniowa dla parametru DZ  
**Figure 6.** Linear regression for DZ parameter  
 Źródło: opracowanie własne

**Tabela 3.** Charakterystyka współczynników regresji liniowej

**Table 3.** Characteristics of the coefficients of the linear regression

Źródło: opracowanie własne

Parametr	Parametr DX	Parametr DY	Parametr DZ
Wartości współczynników ( $a_x, a_y, a_z$ ) [m]	$-4,87 \cdot 10^{-4}$	$2,37 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-3}$
Wartości współczynników ( $b_x, b_y, b_z$ ) [m]	1,33	-0,77	-2,16
Błąd dopasowania regresji liniowej [m]	2,67	0,49	1,78

Wartości współczynników zostały określone za pomocą metody najmniejszych kwadratów oddzielnie dla każdego parametru DX, DY i DZ. Na Rysunku 4 określono trend zmian wartości parametru DX w funkcji epoki pomiarowej. Charakter zmian rezultatów dla parametru DX jest ujemny, o czym świadczy wartość współczynnika  $a_x$ . Ponadto błąd dopasowania regresji liniowej względem uzyskanych wartości parametru DX wynosi prawie 2,7 m i jest największy dla parametru DX. Charakter zmian parametrów DY i DZ jest rosnący, co oznacza odpowiednio, że współczynniki liniowe  $a_y$  oraz  $a_z$  są większe od 0. Należy dodać, że współczynniki liniowe  $b_y$  oraz  $b_z$  mają ujemne wartości, natomiast współczynnik  $b_x$  jest dodatni. Trzeba zwrócić uwagę, że błąd dopasowania regresji liniowej jest najmniejszy dla parametru DY i wynosi niecałe 0,5 m. W przypadku parametru DZ błąd dopasowania regresji liniowej wynosi około 1,8 m. Sumaryczne zestawienie obliczonych współczynników liniowych oraz błędu dopasowania regresji liniowej dla wartości DX, DY oraz DZ zostało zaprezentowane w Tabeli nr 3.

## 5. WNIOSKI

W pracy zaprezentowano rezultaty badań dotyczących określenia współrzędnych środka rzutu z użyciem danych z BSP. Wykorzystano dwie metody badawcze, tj. metodę pozycjonowania absolutnego (w ramach techniki GPS) oraz metodę niezależnych wiązek (w ramach aerotriangulacji cyfrowej) do określenia charakterystyki współrzędnych środka rzutu dla trzech składowych XYZ. Dane źródłowe w teście badawczym pochodzą z eksperymentu fotogrametrycznego, wykonanego nad rzeką Liwiec w 2015 r. Na podstawie przeprowadzonych testów badawczych i wykonanych obliczeń sformułowano następujące wnioski:

- różnica współrzędnych środka rzutu z techniki GPS i metody aerotriangulacji cyfrowej jest najmniejsza dla składowych Y i Z, zaś największa dla składowej X;
- ponadto wartości parametrów mediany, dyspersji wyników oraz odchylenia standardowego są również najmniejsze dla współrzędnej Y, zaś największe dla składowej X;
- model regresji liniowej pozwala na określenie trendu zmian różnicy współrzędnych środka rzutu z techniki GPS i metody aerotriangulacji cyfrowej;
- wyznaczony błąd dopasowania regresji liniowej jest najmniejszy dla składowej Y, zaś największy dla składowej X.

## Podziękowania

Publikacja artykułu została sfinansowana przez Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej w ramach pracy badawczej RMN/802/2016.

## LITERATURA

- [1] Bieda R., Grygiel R., Wyznaczanie orientacji obiektu w przestrzeni z wykorzystaniem naiwnego filtra Kalmana, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90, nr 1, 2014.
- [2] Butowtt J., Kaczyński R., Fotogrametria, WAT, Warszawa, 2010, ISBN 83-89399-40-7.
- [3] Chao H., Coopmans C., Di L., Chen Y., A comparative evaluation of low-cost IMUs for unmanned autonomous systems, In: Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 2010 IEEE Conference on 2010, pp. 211-216.

- [4] Förstner W., Gülch E., A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features, In: Proceedings of the ISPRS Intercommission Workshop on Fast Processing of Photogrammetric Data, 1987, pp. 281-305.
- [5] Garguła T., Rachunek wyrównawczy – przykłady opracowania ćwiczeń, Wydawnictwo GEODPIS Andrzej Jagielski, Kraków 2005.
- [6] Goodall C., Carmichael S., Scannell B., The Battle Between MEMS and FOGs for Precision Guidance, Analog Devices Technical Article MS-2432, 2013.
- [7] Grün A., Adaptive least squares correlations: a powerful matching techniques, South African J. Photogramm, Remote Sensing and Cartography, 14 (3), pp. 175-187, 1985.
- [8] Kędzierski M., Wierzbicki D., Methodology of improvement of radiometric quality of images acquired from low altitudes, Measurement, Volume 92, October 2016, p. 70-78. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.06.003.
- [9] Kędzierski M., Fryškowska A., Wierzbicki D., Opracowania fotogrametryczne z niskiego pułapu, ISBN 978-83-7938-047-3, WAT, Warszawa 2014.
- [10] Kolecki J., Wykorzystanie jednostki IMU typu MEMS do określenia przybliżonych elementów orientacji zdjęć naziemnych, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 24, str. 133-143, 2012.
- [11] Osada E., Geodezyjne pomiary fotogrametryczne, ISBN 978-83-60221-02-0, Wrocław 2014.
- [12] Saile J., High Performance Photogrammetric Production, Photogrammetric Week 2011, pp. 21-27.
- [13] Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms, ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 2013.
- [14] Wierzbicki D., Krasuski K., Metody odtworzenia kursu z danych GPS dla bezzałogowego statku powietrznego, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, nr 1, 2016.