Marta LALAK

Polish Air Force University (Lotnicza Akademia Wojskowa)

ANALYSIS OF ACCURACY OF THE GENEROUS ORTHOPHOTOMAP ON THE BASIS OF DIGITAL AERIAL PHOTOS COLLECTED FOR THE AIRPORT DĘBLIN

Analiza dokładności ortofotomapy wygenerowanej na podstawie cyfrowych zdjęć lotniczych pozyskanych dla lotniska Dęblin

Abstract: The article presents the technological process of generating an orthophotomap based on photos obtained from the aviation ceiling. To achieve the intended goal, it was necessary to design and measure a field photogrammetric matrix. A method of GNSS technique measurement was chosen for the measurement of the photopoints. The aim of the research was to generate an orthophotomap and to evaluate the impact of parameter selection on the orthophotomap accuracy. The obtained ortho-images were compared with the orthophotomap obtained from the resources of the Central Geodesic and Cartographic Documentation Center. Based on the obtained results, it was found that the change of parameters during the generation of intermediate products does not significantly affect the accuracy of the resulting orthophotomap.

Keywords: aerial photogrammetry, orthophotomap, accuracy analysis, Digital Terrain Model

Streszczenie: W artykule przedstawiono proces technologiczny generowania ortofotomapy na podstawie zdjęć pozyskanych z pułapu lotniczego. W tym celu konieczne było zaprojektowanie i pomiar polowej osnowy fotogrametrycznej. Do pomiaru fotopunktów wykorzystano techniki GNSS. Celem badań było wygenerowanie ortofotomapy i ocena wpływu doboru parametrów na jej dokładność. Otrzymane ortoobrazy porównano z ortofotomapą z zasobu Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, iż zmiana parametrów podczas generowania produktów pośrednich nie wpływa znacząco na dokładność wynikowej ortofotomapy.

Słowa kluczowe: fotogrametria lotnicza, ortofotomapa, analiza dokładności, numeryczny model terenu

1. Introduction

Airport construction, including the entire infrastructure necessitates land survey in the field. In this case, technical standards of land survey performed on the airport site are clearly defined in „World Geodetic System – 1984 (WGS-84)”[4]. Infrastructure facilities, air navigation obstacles and navigational aids are subject to land survey [8].

Digital orthophotomap is the raster, orthogonal and cartometric image of the terrain which was created by the digital projection of aerial photographs (analogue, scanned or directly obtained by digital or satellite cameras). In the course of processing, distortion caused by geometry and terrain is removed from the photo [6, 9]. Ortho-images with a high spacial resolution are of increasing significance for many applications [10]. Orthophoto map becomes the source of information about a terrain, which is used in the process of obstacle mapping requiring particular accuracy. The process of orthophotomap generation consists of several stages, the accuracy of which affects directly the final product, which is an orthophotomap. The processes include the following: digital aerotriangulation, Digital Terrain Model generation. The creating of a high quality orthophoto map, complying with technical standards both national and industry, is highly professional [2]. The number of photopoints used in the process of aerotriangulation affects orthophotomap accuracy [1]. Orthophotomap accuracy can be connected with the possibility of photogrammetry software used in the orthorectification process. Several new, commercial, photogrammetry programs have been created but they are much cheaper and adapted to drone-based image processing. Examples of such software is Agisoft Photoscan Professional or Pix4Dmapper Pro [7]. Photogrammetric works accuracy obtained thanks to the above mentioned software is comparable to the recognised, photogrammetric systems present on the market for 20-30 years [3].

The aim of this research paper is to present the analysis of orthophotomap accuracy for the area of Dęblin airport on the assumption of various scenarios and calculation strategies.

2. Material and method

2.1. Materials

The research was conducted for the area around Dęblin airport, covering an area of about 50 km². This was achieved by using data obtained from Geodesy and Cartography Centre. The test block consisted of 20 digital aerial photographs. The photographs are characterised by spatial resolution of 0.25 m. Longitudinal coverage

equals 60% and tranverse coverage is 30%. The photographs were taken with UltraCam Xp with camera constant equal to 100.500 mm. Aerial photographs are taken on the request of GUGIK or AERiMR in order to create an orthophotomap. This orthophotomap is used to update topography data base (as a contractor's or base controller's material) and as up-to-date basis to draw vector agricultural parcels by farmers applying for agricultural subsidies. Airborne laser scanning is made along with the photographs. Photogrammetry flight parameters such as photo scale, altitude AGL, longitudinal and tranverse coverage and camera constant are chosen according to orthophotomap technology and its assumed, final accuracy. Orthophotomap development takes place in digital photogrammetric workstation. Generous digital elevation model is used to carry out ortho correction (orthoretrification) and it is an indirect product not the final one.

Fig. 1. A section of an aerial photograph for Dęblin airport, pixel parameters 25x25 cm (GSD)

2.2. Field photogrammetric matrix design and measurement

Photogrammetric matrix as a set of points with specific coordinates, identified both in the field and aerial photograph, is used for image orientation determination according to the given coordinates. In the process of aerotriangulation, a new photogrammetric matrix was designed at an area of examination on the basis of field survey. It provides situational details of accuracy group I (fence corners, kerbs were chosen).

The coordinates of 62 natural photo points were identified and measured at the area of examination, with the use of GNSS technique. Field coordinates of the

photopoints were determined with mean error $m_{x,y,z} = \pm 5$ cm. Identification accuracy is determined to 2 pixels, that is 0.5 m.

Fig. 2. Examples of situational details providing field photogrammetric matrix points (natural photo points)

Fig. 3. The location of field photogrammetric matrix

2.3. Methodology of the research

The process of orthophotomap generation was based on 5 photopoints and 24 control points. The points with RMS X, Y, Z errors below 0.25 m were selected for image alignment. The ground control points were selected so as their RMS X, Y, Z error to fall within the limits of 0.25 m and 0.50 m.

Image alignment in Agisoft PhotoScan program occurs on the basis of exterior orientation elements. Higher accuracy setting helps to receive more precise camera

position as well as enables the program to process images in original size. Medium accuracy alignment results in image scale reduction. The highest setting of alignment accuracy contributes to image overscaling. Maximum accuracy is recommended only for scientific reasons due to extended processing time.

Generating the point cloud is based on approximate camera position. The setting of high quality point cloud may be used for accurate details reproduction and image geometry but this operation needs a long processing time. Maximum accuracy setting involves original image processing which lengthens dense point cloud generation process considerably. Each successive step means image scaling by a factor of 4. There is a possibility of filtering the cloud while it is being generated. If an examined area is characterised by small details, a mild filtering mode is recommended. If the area does not contain the details, aggressive filtering mode is recommended. It is possible to choose an indirect method between a mild and aggressive one called moderate filtering.

The software enables Digital Terrain Model generation and visualisation. It is possible to generate Digital Terrain Model on the basis of dense and sparse point cloud. The creation of a model can be performed with an active interpolation, where Digital Elevation Model will be generated for the whole study area. An active interpolation setting is advisable.

The creation of orthophotomap is based on previously generated Digital Terrain Model. During the process we have a possibility of choosing the method of image fusion. Default orthophotomap generation for image fusion uses mosaicking. Orthophotomap generation mode enables field pixel size setting.

Fig. 4. Orthophotomap generation model in Agisoft PhotoScan with the selection of parameters

Figure 4 presents a simplified model of orthophotomap generation along with the possibilities of parameters choice for particular steps of orthorectification process.

The research was based on different parameter selection of point cloud generation. Figure 5 presents a detailed selection of parameters.

Fig. 5. Options of parameters selection in orthophotomap generation

3. Research results

Accuracy investigation of orthophotomap was based on checking an absolute accuracy expressed by mean error m_{orto} . A set of 10 ground control points with known terrain coordinates and well visible on aerial photographs has been used. Distances between the points excluded from the image orientation process, measured on the orthophotomap as well as corresponding distances calculated on the basis of terrain measurement coordinates, have been presented in tables 1-5. The distances have been selected so that they are distributed on the entire survey area and have maximum length. Tables 1-5 present options of parameters selection for the point cloud.

Table 1

The results of accuracy analysis for Option I

No.	Distance	Distance based on coordinates [m]	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.37	3203.46	-0.09
2	3-64	5630.66	5630.73	-0.07
3	5-43	7195.11	7195.08	0.03
4	6-23	3867.72	3867.77	-0.05
5	39-51	5094.63	5094.58	0.05

Table 2

The results of accuracy analysis for Option II

No.	Distance	Distance based on coordinates [m]	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.37	3203.30	0.07
2	3-64	5630.66	5630.70	-0.04
3	5-43	7195.11	7195.09	0.02
4	6-23	3867.72	3867.60	0.12
5	39-51	5094.63	5094.55	0.08

Table 3**The results of accuracy analysis for Option III**

No.	Distance	Distance based on coordinates [m]	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.37	3203.41	-0.04
2	3-64	5630.66	5630.69	-0.03
3	5-43	7195.11	7195.20	-0.09
4	6-23	3867.72	3867.68	0.04
5	39-51	5094.63	5094.70	-0.07

Table 4**The results of accuracy analysis for Option IV**

No.	Distance	Distance based on coordinates [m]	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.37	3203.46	-0.09
2	3-64	5630.66	5630.61	0.05
3	5-43	7195.11	7195.21	-0.10
4	6-23	3867.72	3867.66	0.06
5	39-51	5094.63	5094.67	-0.04

Table 5**The results of accuracy analysis for Option V**

No.	Distance	Distance based on coordinates [m]	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.37	3203.30	0.07
2	3-64	5630.66	5630.69	-0.03
3	5-43	7195.11	7195.04	0.07
4	6-23	3867.72	3867.80	-0.08
5	39-51	5094.63	5094.56	0.07

Average of the differences between the value calculated and measured has been estimated on the basis of five measured sections. Mean square error of the orthophotomap generated was 0.05 m.

Fig. 6. Mean square errors of the orthophotomap for option I-V

Accuracy assessment of the orthophotomap was based on the distance measured between the points on the orthophotomap obtained from CODGiK and the one generated from aerial photographs at five different parameters settings. A set of 10 ground control points with known terrain coordinated and well visible on aerial photographs was used for this purpose. Distances between the points excluded from the image orientation process, measured on the orthophotomap obtained from the resource along with corresponding distances on the orthophotomap generated with different parameter settings have been presented in tables 1-5. Tables 6-10 present options of parameter selection for the point cloud generated.

Table 6

The results of accuracy analysis for Option I

No.	Distance	Distance measured on orthophotomap from resource	Distance measured on orthophotomap generated	Difference [m]
1	1-30	3203.41	3203.32	0.09
2	3-64	5630.69	5630.73	-0.04
3	5-43	7195.05	7195.13	-0.08
4	6-23	3867.69	3867.74	-0.05
5	39-51	5094.68	5094.73	-0.05

Table 7**The results of accuracy analysis for Option II**

No.	Distance	Distance measured on orthophotomap from resource	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.41	3203.34	0.07
2	3-64	5630.69	5630.73	-0.04
3	5-43	7195.05	7194.96	0.09
4	6-23	3867.69	3867.70	-0.01
5	39-51	5094.68	5094.60	0.08

Table 8**The results of accuracy analysis for Option III**

No.	Distance	Distance measured on orthophotomap from resource	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.41	3203.53	-0.12
2	3-64	5630.69	5630.63	0.06
3	5-43	7195.05	7195.14	-0.09
4	6-23	3867.69	3867.75	-0.06
5	39-51	5094.68	5094.75	-0.07

Table 9**The results of accuracy analysis for Option IV**

No.	Distance	Distance measured on orthophotomap from resource	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.41	3203.43	-0.02
2	3-64	5630.69	5630.64	0.05
3	5-43	7195.05	7195.00	0.05
4	6-23	3867.69	3867.60	0.09
5	39-51	5094.68	5094.72	-0.04

Table 10

The results of accuracy analysis for Option V

No.	Distance	Distance measured on orthophotomap from resource	Distance measured on orthophotomap [m]	Difference [m]
1	1-30	3203.41	3203.34	0.07
2	3-64	5630.69	5630.78	-0.09
3	5-43	7195.05	7195.13	-0.08
4	6-23	3867.69	3867.77	-0.08
5	39-51	5094.68	5094.61	0.07

Average of the differences between the value calculated and measured has been estimated on the basis of five measured sections. Mean square error of the orthophotomap generated was 0.05 m.

Fig. 7. Mean square errors of the orthophotomap for option I-V

A section of the orthophotomap generated for the area limiting Dęblin airport is presented in fig. 8 (GSD 25x25cm).

Fig. 8. A section of the orthophotomap generated for Dęblin military airport, spatial resolution of 0.25 m

4. Conclusions

This paper tackles the issue of orthophotomap generation for the area around the airport, with strictly defined accuracy assumptions. The results of the analysis of orthophotomap accuracy for Dęblin military airport were presented on the basis of the research material. The inspection of orthophotomap accuracy was based on the examination of absolute accuracy expressed by mean error m_{orto} . A set of 10 ground control points with known terrain coordinated and well visible on aerial photographs was used for this purpose. Distances between the points excluded from the image orientation process on the orthophotomap along with corresponding distances calculated from coordinates obtained from field measurement. Additionally, distances have been measured on the orthophotomap obtained from resource as well as corresponding distances on the orthophotomap generated at different parameter settings. On the basis of the research conducted it has been stated that:

- differences between the distances measured on the orthophotomap generated and resource data reached ± 10 cm,
- differences between the distances measured on the orthophotomap and corresponding distances calculated on the basis of coordinates obtained from field measurement, oscillated around ± 10 cm,
- option III (filtration inactive) caused the biggest mean square error while analysing differences between the resource data and the orthophotomap generated,

- point cloud filtration quality setting affects its generation time,
- analysis based on the differences between field measurement data and orthophotomap data showed that option IV (moderate filtering) caused the biggest mean square error,
- mean square error of the orthophotomap generated reached 0.5 m when comparing orthophotomap data and field measurement data,
- mean square error of the orthophotomap generated reached 0.5 m when comparing orthophotomap data and resource data.

As a result of the research conducted, it has been stated that orthophotomap accuracy for Dęblin military airport reached 0.5 m. The accuracy obtained complies with accuracy requirements of collecting information about obstacles within airports [5].

Acknowledgment

This paper has been supported by the Polish Air Force University, Faculty of Aeronautics, Department of Air Navigation.

5. References

1. Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P.: Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle, *Measurement*, Vol. 98, February 2017.
2. Braun J.: Aspects on True-Orthophoto Production. *Photogrammetric Week '03*. Dieter Fritsch (ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg 2003.
3. Ginia R., Pagliarib D., Passonib D., Pintob L., Sona G., Dosso P.: UAV photogrammetry: block triangulation comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, UAV-g2013, 4–6, Rostock, Germany, 2013.
4. ICAO: World Geodetic System – 1984 (WGS-84), 2002.
5. ICAO: Załącznik 14 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym lotniska, Tom I Projektowanie i eksploatacja lotnisk, Wydanie siódme, lipiec 2016.
6. Kurczyński Z.: *Fotogrametria*, Warszawa 2014.
7. Petrie G.: Commercial Operation of Lightweight. *Geoinformatics*, 16, 2013.
8. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2003 r. w sprawie warunków, jakie powinny spełniać obiekty budowlane oraz naturalne w otoczeniu lotniska (Dz. U. z dnia 24 lipca 2003 r.).
9. Schenk T.: *Introduction to Photogrammetry*. The Ohio State University, 2005.
10. Thrower N.J.W.: Jensen J.R.: *The Orthophoto and Orthophotomap: Characteristics, Development and Application*, *The American Cartographer*, 3:1, 2013.

ANALIZA DOKŁADNOŚCI ORTOFOTOMAPY WYGENEROWANEJ NA PODSTAWIE CYFROWYCH ZDJĘĆ LOTNICZYCH POZYSKANYCH DLA LOTNISKA DĘBLIN

1. Wprowadzenie

Budowa lotniska łącznie z całą infrastrukturą wymaga wykonania pomiarów geodezyjnych w terenie. W tym przypadku standardy techniczne wykonywanych pomiarów geodezyjnych na terenie lotniska są określone jednoznacznie w „Podręczniku Światowego Systemu Geodezyjnego – 1984 (WGS-84)” [4]. Pomiarom geodezyjnym na terenie lotniska podlegają obiekty infrastruktury, przeszkody lotnicze, pomoce nawigacyjne [8].

Ortofotomapa cyfrowa jest rastrowym, ortogonalnym i kartometrycznym obrazem terenu, który powstał w wyniku cyfrowego przetworzenia zdjęć lotniczych (analogowych, skanowanych albo pozyskanych bezpośrednio kamerami cyfrowymi) lub satelitarnych. W trakcie przetwarzania usunięte zostają zniekształcenia występujące na zdjęciu spowodowane geometrią i rzeźbą terenu [6, 9]. Ortoobrazy o wysokiej rozdzielczości przestrzennej mają coraz więcej zastosowań [5]. Ortofotomapa staje się źródłem danych o terenie, wykorzystywanym w procesie tworzenia m.in. map przeszkodowych, które mają ściśle określone wymagania dokładnościowe. Proces generowania ortofotomapy składa się z kilku etapów, których dokładność wpływa bezpośrednio na dokładność produktu wynikowego. Do procesów tych należą m.in. aerotriangulacja cyfrowa, generowanie numerycznego modelu terenu. Wytworzenie wysokiej jakości ortofotomapy, spełniającej wymagania norm technicznych (krajowych lub branżowych) pozostaje w zakresie wysokiego profesjonalizmu [6]. Na dokładność ortofotomapy ma wpływ m.in. liczba fotopunktów wykorzystywana w procesie aerotriangulacji [7]. Dokładność ortofotomapy może być związana z możliwościami oprogramowania fotogrametrycznego wykorzystywanego w procesie ortorektyfikacji. Ostatnio pojawiły się nowe komercyjne programy fotogrametryczne, zdecydowanie tańsze i dostosowane do przetwarzania zdjęć wykonywanych również z dronów, np. Photoscan Professional firmy Agisoft czy Pix4Dmapper Pro firmy Pix4D [8]. Ich dokładność jest porównywalna z uznanymi, obecnymi na rynku od 20–30 lat systemami fotogrametrycznymi [9].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników analizy ortofotomapy dla obszaru lotniska w Dęblinie przy założeniu różnych scenariuszy i strategii obliczeniowych.

2. Materiał badawczy i metoda badawcza

2.1. Materiały

Badania przeprowadzono dla obszaru wokół lotniska wojskowego Dęblin, o powierzchni ok. 50 km². W tym celu wykorzystano dane pobrane z zasobu Centralnego Ośrodka Geodezyjnego i Kartograficznego. Blok testowy składał się z 20 cyfrowych zdjęć lotniczych. Zdjęcia charakteryzują się rozdzielczością przestrzenną na poziomie 0,25 m. Pokrycie podłużne zdjęć jest równe 60%, a pokrycie poprzeczne 30%. Zdjęcia wykonano kamerą UltraCam Xp o stałej kamery $ck = 100,500$ mm. Zdjęcia lotnicze wykonywane są na zlecenie Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii lub Agencji Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa, w celu opracowania ortofotomapy. Służy ona do aktualizacji baz danych topograficznych (jako materiał wykonawczy lub kontrolera bazy) oraz jako aktualny podkład do rysowania wektorowych granic działek rolnych przez rolników składających wnioski o dopłaty bezpośrednie. Równocześnie ze zdjęciami wykonywany jest lotniczy skaning laserowy. Parametry nalogu fotogrametrycznego, takie jak skala zdjęć, wysokość fotografowania, pokrycie podłużne i poprzeczne oraz stała kamery, są wybierane stosownie do technologii opracowania ortofotomapy i zakładanej jej końcowej dokładności. Opracowanie ortofotomapy odbywa się na fotogrametrycznych stacjach cyfrowych. Generowany ze zdjęć cyfrowy model wysokości służy do przeprowadzenia ortokorekcji (ortorektyfikacji) i jest produktem pośrednim, a nie końcowym.

Rys. 1. Fragment zdjęcia lotniczego dla lotniska Dęblin, wymiar piksela 25x25 cm (GSD)

2.2. Projekt i pomiar polowej osnowy fotogrametrycznej

Osnowa fotogrametryczna jako zbiór punktów o określonych współrzędnych, zidentyfikowanych zarówno w terenie, jak i na zdjęciu lotniczym, służy do wyznaczania orientacji zdjęć względem przyjętego układu współrzędnych. W procesie aeriotriangulacji, na podstawie wywiadu terenowego, na obszarze opracowania zaprojektowano osnowę fotogrametryczną, którą stanowiły szczegóły sytuacyjne I grupy dokładnościowej (wybierano narożniki ogrodzeń, załamania krawędzi chodnika).

Rys. 2. Przykłady szczegółów sytuacyjnych, stanowiących punkty polowej osnowy fotogrametrycznej (naturalne fotopunkty)

Na obszarze opracowania zidentyfikowano i pomierzono współrzędne 62 fotopunktów naturalnych, z wykorzystaniem techniki GNSS. Współrzędne terenowe fotopunktów zostały wyznaczone z błędem średnim $m_{x,y,z} = \pm 5$ cm. Dokładność identyfikacji określa się na 2 piksele, czyli 0,5 m.

Rys. 3. Rozmieszczenie punktów polowej osnowy fotogrametrycznej

2.3. Metodyka badań

Ortofotomapę wykonano w oparciu o pięć fotopunktów i 24 punkty kontrolne. Do wyrównania zdjęć wybrano punkty z błędem RMS X, Y, Z poniżej 0,25 m. Punkty kontrolne wybrano tak, aby ich błąd RMS X, Y, Z mieścił się w granicach między 0,25 m a 0,50 m.

Wyrównanie zdjęć w programie Agisoft PhotoScan następuje na podstawie elementów orientacji zewnętrznej. Wyższe ustawienia dokładności pomagają uzyskać dokładniejszą pozycję kamery. Dodatkowo przy wysokiej dokładności program przetwarza zdjęcia o oryginalnym rozmiarze. Ustawienie średniej dokładności wyrównania powoduje zmniejszenie skali obrazu. Najwyższe ustawienia dokładności wyrównania powodują przeskalowanie obrazu. Najwyższa dokładność jest zalecana tylko do celów badawczych ze względu na wydłużony czas przetwarzania.

Rys. 4. Schemat procesu generowania ortofotomapy w programie Agisoft PhotoScan wraz z doбором parametrów

Chmura punktów jest generowana na podstawie przybliżonej pozycji kamery. Ustawienie wysokiej jakości chmury punktów może być wykorzystywane do wiernego odtworzenia szczegółów i geometrii obiektów, jednak operacja ta wymaga długiego czasu przetwarzania. Ustawienie najwyższej dokładności oznacza przetwarzanie oryginalnych zdjęć, co znacznie wydłuża proces generowania gęstej chmury punktów.

Każdy kolejny krok oznacza zmniejszenie rozmiaru obrazu o współczynnik 4. Podczas generowania chmury punktów istnieje możliwość jej filtrowania. Jeśli badany obszar charakteryzują małe szczegóły, zaleca się ustawienie łagodnego trybu filtrowania. W przypadku kiedy powierzchnia opracowania nie zwiera drobnych szczegółów, zaleca się tryb filtrowania agresywnego. Istnieje możliwość wyboru pośredniej metody między filtracją łagodną a agresywną zwanej filtracją umiarkowaną.

Oprogramowanie umożliwia generowanie i wizualizację numerycznego modelu terenu. Możliwe jest generowanie NMT na podstawie gęstej i rzadkiej chmury punktów. Tworzenie modelu można przeprowadzić przy włączonej interpolacji, gdzie DEM będzie generowany dla całego obszaru opracowania. Zalecane jest ustawienie włączonej interpolacji.

Rys. 5. Warianty doboru parametrów w procesie generowania ortofotomapy

Ortofotomapa jest wykonywana w oparciu o wcześniej wygenerowany numeryczny model terenu. W trakcie tego procesu mamy możliwość wyboru metody łączenia obrazów. Domyślnie generowanie ortofotomapy do łączenia obrazów wykorzystuje mozaikowanie. Tryb generowania ortofotomapy daje możliwość ustawienia terenowego wymiaru piksela.

Rys. 4 przedstawia uproszczony schemat generowania ortofotomapy wraz z możliwościami doboru parametrów dla poszczególnych etapów procesu ortorektyfikacji.

Badania przeprowadzono przy różnym doborze parametrów generowania chmury punktów. Rys. 5 przedstawia szczegółowy dobór parametrów.

3. Wyniki badań

Kontrola dokładności ortofotomapy została oparta na sprawdzeniu dokładności bezwzględnej wyrażonej przez błąd średni m_{orto} . W tym celu wykorzystano zbiór 10 punktów kontrolnych o znanych współrzędnych terenowych, dobrze identyfikowalnych na zdjęciach lotniczych. W tab. 1–5 zamieszczono odległości pomiędzy punktami niebiorącymi udziału w procesie orientacji zdjęć, pomierzone na ortofotomapie oraz odpowiadające im odległości obliczone ze współrzędnych z pomiaru terenowego. Odcinki te zostały dobrane w taki sposób, aby rozłożone były na całym obszarze opracowania oraz charakteryzowały się maksymalną długością. Tabele 1–5 przedstawiają warianty doboru parametrów dla generowanej chmury punktów.

Tabela 1

Wyniki analizy dokładności dla Wariantu I

Lp.	Odcinek	Odległość obliczona na podstawie współrzędnych [m]	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,37	3203,46	-0,09
2	3-64	5630,66	5630,73	-0,07
3	5-43	7195,11	7195,08	0,03
4	6-23	3867,72	3867,77	-0,05
5	39-51	5094,63	5094,58	0,05

Tabela 2**Wyniki analizy dokładności dla Wariantu II**

Lp.	Odcinek	Odległość obliczona na podstawie współrzędnych [m]	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,37	3203,30	0,07
2	3-64	5630,66	5630,70	-0,04
3	5-43	7195,11	7195,09	0,02
4	6-23	3867,72	3867,60	0,12
5	39-51	5094,63	5094,55	0,08

Tabela 3**Wyniki analizy dokładności dla Wariantu III**

Lp.	Odcinek	Odległość obliczona na podstawie współrzędnych [m]	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,37	3203,41	-0,04
2	3-64	5630,66	5630,69	-0,03
3	5-43	7195,11	7195,20	-0,09
4	6-23	3867,72	3867,68	0,04
5	39-51	5094,63	5094,70	-0,07

Tabela 4**Wyniki analizy dokładności dla Wariantu IV**

Lp.	Odcinek	Odległość obliczona na podstawie współrzędnych [m]	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,37	3203,46	-0,09
2	3-64	5630,66	5630,61	0,05
3	5-43	7195,11	7195,21	-0,10
4	6-23	3867,72	3867,66	0,06
5	39-51	5094,63	5094,67	-0,04

Tabela 5

Wyniki analizy dokładności dla Wariantu V

Lp.	Odcinek	Odległość obliczona na podstawie współrzędnych [m]	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,37	3203,30	0,07
2	3-64	5630,66	5630,69	-0,03
3	5-43	7195,11	7195,04	0,07
4	6-23	3867,72	3867,80	-0,08
5	39-51	5094,63	5094,56	0,07

Na podstawie pięciu pomierzonych odcinków wyliczono wartości średnie różnic pomiędzy wartością obliczoną a pomierzoną. Średni błąd kwadratowy wygenerowanej ortofotomapy wyniósł 0,05 m.

Rys. 6. Błędy średniokwadratowe ortofotomapy dla wariantu I-V

Kontrolę dokładności ortofotomapy wykonano również w oparciu o pomiar odległości między punktami na ortofotomapie pobranej z zasobu CODGiK oraz ortofotomapie wygenerowanej ze zdjęć lotniczych przy pięciu różnych ustawieniach parametrów. W tym celu wykorzystano zbiór 10 punktów kontrolnych o znanych współrzędnych terenowych, dobrze identyfikowalnych na zdjęciach lotniczych. W tab. 1–5 zamieszczono odległości pomiędzy punktami niebiorącymi udziału w procesie orientacji zdjęć, pomierzonymi na ortofotomapie pobranej z zasobu oraz odpowiadające im odległości na ortofotomapie wygenerowanej przy różnych ustawieniach parametrów. Tabele 6–10 przedstawiają warianty doboru parametrów dla generowanej chmury punktów.

Tabela 6**Wyniki analizy dokładności dla Wariantu I**

Lp.	Odcinek	Odległość zmierzona na ortofotomapie z zasobu	Odległość zmierzona na wygenerowanej ortofotomapie	Różnica [m]
1	1-30	3203,41	3203,32	0,09
2	3-64	5630,69	5630,73	-0,04
3	5-43	7195,05	7195,13	-0,08
4	6-23	3867,69	3867,74	-0,05
5	39-51	5094,68	5094,73	-0,05

Tabela 7**Wyniki analizy dokładności dla Wariantu II**

Lp.	Odcinek	Odległość zmierzona na ortofotomapie z zasobu	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,41	3203,34	0,07
2	3-64	5630,69	5630,73	-0,04
3	5-43	7195,05	7194,96	0,09
4	6-23	3867,69	3867,70	-0,01
5	39-51	5094,68	5094,60	0,08

Tabela 8**Wyniki analizy dokładności dla Wariantu III**

Lp.	Odcinek	Odległość zmierzona na ortofotomapie z zasobu	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,41	3203,53	-0,12
2	3-64	5630,69	5630,63	0,06
3	5-43	7195,05	7195,14	-0,09
4	6-23	3867,69	3867,75	-0,06
5	39-51	5094,68	5094,75	-0,07

Tabela 9

Wyniki analizy dokładności dla Wariantu IV

Lp.	Odcinek	Odległość zmierzona na ortofotomapie z zasobu	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,41	3203,43	-0,02
2	3-64	5630,69	5630,64	0,05
3	5-43	7195,05	7195,00	0,05
4	6-23	3867,69	3867,60	0,09
5	39-51	5094,68	5094,72	-0,04

Tabela 10

Wyniki analizy dokładności dla Wariantu V

Lp.	Odcinek	Odległość zmierzona na ortofotomapie z zasobu	Odległość zmierzona na ortofotomapie [m]	Różnica [m]
1	1-30	3203,41	3203,34	0,07
2	3-64	5630,69	5630,78	-0,09
3	5-43	7195,05	7195,13	-0,08
4	6-23	3867,69	3867,77	-0,08
5	39-51	5094,68	5094,61	0,07

Na podstawie pięciu pomierzonych odcinków wyliczono wartości średnie różnic pomiędzy wartością obliczoną a pomierzoną. Średni błąd kwadratowy wygenerowanej ortofotomapy wyniósł 0,05 m.

Rys. 7. Błędy średniokwadratowe ortofotomapy dla wariantu I-V

Fragment ortofotomapy wygenerowanej dla obszaru obejmującego powierzchnie ograniczające lotnisko w Dęblinie przedstawia rys. 8 (GSD 25x25cm).

Rys. 8. Fragment wygenerowanej ortofotomapy dla lotniska wojskowego w Dęblinie, rozdzielczość przestrzenna 0,25 m

4. Wnioski

W pracy poruszono problematykę generowania ortofotomapy dla terenu wokół lotniska, przy ściśle określonych założeniach dokładnościowych. Na podstawie

pozyskanego materiału badawczego przedstawiono rezultaty analizy dokładności ortofotomapy dla lotniska wojskowego w Dęblinie. Kontrola dokładności ortofotomapy została oparta na sprawdzeniu dokładności bezwzględnej wyrażonej przez błąd średni m_{orto} . W tym celu wykorzystano zbiór 10 punktów kontrolnych o znanych współrzędnych terenowych, dobrze identyfikowalnych na zdjęciach lotniczych. Pomierzono odległości pomiędzy punktami niebiorącymi udziału w procesie orientacji zdjęć na ortofotomapie oraz odpowiadające im odległości obliczone ze współrzędnych z pomiaru terenowego. Dodatkowo pomierzono odległości na ortofotomapie pobranej z zasobu oraz odpowiadające im odległości na ortofotomapie wygenerowanej przy różnych ustawieniach parametrów. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- różnice między odcinkami mierzonymi na wygenerowanej ortofotomapie a danymi pobranymi z zasobu sięgały do ± 10 cm,
- różnice między odcinkami pomierzonymi na ortofotomapie oraz odpowiadającymi im odległościami obliczonymi ze współrzędnych z pomiaru terenowego oscylowały w granicach ± 10 cm,
- wariant III (brak filtracji) spowodował największy błąd średniokwadratowy podczas analizy opartej na różnicach między danymi z zasobu a wygenerowaną ortofotomapą,
- ustawienie jakości filtrowania chmury punktów wpływa na czas jej generowania,
- analiza oparta na różnicach między danymi z pomiaru terenowego i danymi z ortofotomapy pokazała, iż wariant IV (filtracja punktów umiarkowana) spowodował największy błąd średniokwadratowy,
- średni błąd kwadratowy wygenerowanej ortofotomapy przy porównaniu danych z ortofotomapy i danych z pomiaru terenowego wyniósł 0,5 m,
- średni błąd kwadratowy wygenerowanej ortofotomapy przy porównaniu danych z ortofotomapy i danych z zasobu wyniósł 0,5 m.

W wyniku prowadzonych badań stwierdzono, iż dokładność ortofotomapy dla lotniska wojskowego w Dęblinie wyniosła 0,5 m. Uzyskana dokładność spełnia wymagania dokładnościowe zbierania informacji o przeszkodach terenowych w obrębie lotnisk [5].

Podziękowanie

Artykuł został sfinansowany w ramach badań statutowych przez Lotniczą Akademię Wojskową na 2019 rok.

5. Literatura

1. Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P.: Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle, *Measurement*, Vol. 98, February 2017.
2. Braun J.: Aspects on True-Orthophoto Production. *Photogrammetric Week '03*. Dieter Fritsch (ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg 2003.
3. Ginia R., Pagliarib D., Passonib D., Pintob L., Sona G., Dosso P.: UAV photogrammetry: block triangulation comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, UAV-g2013, 4–6, Rostock, Germany, 2013.
4. ICAO: Podręcznik światowego systemu geodezyjnego – 1984 (WGS-84), 2002.
5. ICAO: Załącznik 14 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym lotniska, Tom I Projektowanie i eksploatacja lotnisk, Wydanie siódme, lipiec 2016.
6. Kurczyński Z.: *Fotogrametria*, Warszawa 2014.
7. Petrie G.: Commercial Operation of Lightweight. *Geoinformatics*, 16, 2013.
8. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2003 r. w sprawie warunków, jakie powinny spełniać obiekty budowlane oraz naturalne w otoczeniu lotniska (Dz. U. z dnia 24 lipca 2003 r.).
9. Schenk T.: *Introduction to Photogrammetry*. The Ohio State University, 2005.
10. Thrower N.J.W.: Jensen J.R.: *The Orthophoto and Orthophotomap: Characteristics, Development and Application*, *The American Cartographer*, 3:1, 2013.