

**USING IMAGE MATCHING AND AIRBORNE LASER SCANNING  
POINT CLOUDS FOR GENERATING CANOPY HEIGHT MODEL**

**WYKORZYSTANIE CHMUR PUNKTÓW Z DOPASOWANIA OBRAZÓW  
I LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO DO GENEROWANIA  
WYSOKOŚCIOWYCH MODELI KORON**

**Anna Płatek-Żak, Dorota Zawieska**

Department of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems  
Faculty of Geodesy and Cartography, Warsaw University of Technology

KEY WORDS: image matching, airborne laser scanning, Biebrza National Park, Canopy Height Model

ABSTRACT: The aim of this experiment is the evaluation of using aerial data for generating the Canopy Height Model (CHM). The area of interest is the part of Biebrza National Park. The data used in the experiment were aerial photos and LiDAR point clouds. The acquisition of data was part of the HabitARS project, The innovative approach supporting the monitoring of non-forest Natura 2000 habitats using remote sensing methods. During the experiment, Canopy Height Models were generated using image matching and airborne laser scanning (ALS) point clouds and were compared with each other. ALS data are better for generating CHM - the shape of the canopy is mapped more precisely and the boundaries between tree canopies are more clearly marked. More details of forest stands are visible on ALS products. There are quite significant differences in height values between models on the edges of the forest stand and in the free spaces between trees. Vegetation is often a source of errors in matching images, so the image matching point cloud has different characteristics. Errors in height appear mainly on the edges of the canopies and shaded areas. However, image matching point clouds can be used in multi-time analyses when historical ALS data is unavailable.

## 1. INTRODUCTION

Traditional forest management is time-consuming (Næsset & Økland, 2002). It is required to regularly perform an inventory of forest areas which generates high costs (Stepper *et al.*, 2015a). It is worth noting that photogrammetric data like aerial images and ALS point clouds provide valuable information about the terrain. Analyses of using this data in forestry solutions are still an ongoing research problem. One of the issues that should be studied is generating Canopy Height Model (CHM) (Quan *et al.*, 2021; Mielcarek *et al.*, 2018). Many forest characteristics can be determined based on the photogrammetric data and products. The most important parameters include the height and the diameter of individual trees, the number of trees, the biomass assessment, forest stand cover, indicators describing the condition of the forest stand and many others (Ullah *et al.*, 2017).

Aerial images are remote sensing data sources used in forestry for applications like inventory and monitoring (Hall, 2003; Caylor, 2000). Acquisition of that data should take into consideration many factors, including the season, flight time and flight altitude. Multispectral and hyperspectral images are used in forestry widely (Będkowski, 2010). They and their products are used to update forestry databases. Analysis of aerial images allows for the determination of attributes describing the tree stand. It is possible to determine tree species based on image classification without field work. Aerial images are the source for many analyses like monitoring forest changes and natural disaster effects, examining the health condition of the forest stand or planning fire protection (Okła, 2010).

Another data type used in forestry widely is aerial laser scanning point cloud. The primary application is generating the Canopy Height Model (CHM) (Ullah *et al.*, 2017). CHM provides information about the trees' absolute height and the forest stand's spatial structure. The major problem during CHM processing is the appearance of data pits, which reduce the CHM quality and it is an ongoing research problem (Quan *et al.*, 2021; Mielcarek *et al.*, 2018). Many methods of pit-free CHM generation are being developed and tested (Khosravipour *et al.*, 2014; Khosravipour *et al.*, 2016; Hao *et al.*, 2019; Ben-Arie *et al.*, 2009; Quan *et al.*, 2021; Mielcarek *et al.*, 2018). CHM is a very useful product. Based on it, individual trees can be detected, and their characteristics can be determined, which allows the conduct of "precise forestry" (Weżyk, 2006). Aerial laser scanning technology allows research on hard-to-reach areas because the laser beam has the ability to penetrate through vegetation and can reach the ground surface (Będkowski & Weżyk, 2010).

CHM is generated primarily based on ALS data, but ALS point clouds are unavailable everywhere. Aerial images are acquired more often and regularly, so they can be utilised to generate CHM when ALS data is not available (Ullah *et al.*, 2017; White *et al.*, 2015). Image-matching algorithms allow the production of dense point clouds. It is possible to determine some forest characteristics, for example tree height based on image matching point clouds with accuracy similar to accuracy for ALS-based metrics (White *et al.*, 2013). Using aerial imagery with an ALS-based Digital Terrain Model can aid forest management (Stepper *et al.*, 2015b).

This research aims to compare the results of Canopy Height Models generation from image matching point clouds and airborne laser scanning point clouds. The main purpose is the evaluation of the possibility of using the aerial data to generate the CHM. The CHMs generated using image matching point clouds were compared with those from airborne laser scanning. The correct generation of point clouds from image matching allows to obtain reliable information about the forest biome. Image matching point clouds are useful in areas where ALS data are unavailable and performing terrain inventory is complicated.

## 2. STUDY AREA AND PROJECT DATA

The area of interest is located in Biebrza National Park in eastern Poland - Podlaskie voivodeship, the district of Mońki, Trzcianne (Figure 1). A lot of protected plant and animal species are found in this terrain. High biodiversity characterises this area.

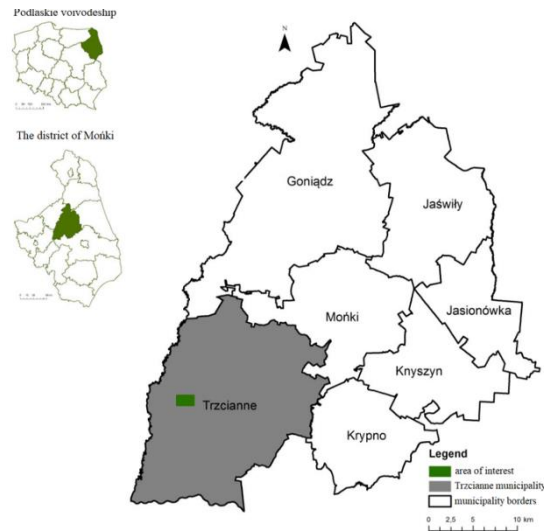


Figure 1. Location of the area of interest.  
Rysunek 1. Położenie obszaru zainteresowania.

The project data comes from the HabitARS project: The innovative approach supporting monitoring of non-forest Natura 2000 habitats, using remote sensing methods. The project was carried out in 2016–2019 as part of the BIOSTRATEG II program and funded by The National Centre for Research and Development in Poland.

Input data consisted of set of aerial images. They were obtained during three data acquisition missions: 04-05 June 2016, 28 August 2016 and 15 September 2016. Each flight mission was performed in the east-west direction. The images were taken using IGI DigiCAM system and Hasselblad digital camera (focal length equals 50 mm). Ground Sampled Distance equals 8.8 cm. Moreover, aerial laser scanning point clouds were used. They were acquired simultaneously with aerial images during three flight missions in 2016. The Riegl LMS-Q680i scanner was used. The mean point cloud density equals 15 points/ m<sup>2</sup>.

### 3. METHODOLOGY

The area of interest was hard-to-reach, wetland terrain, so the ground control points were not set. Image adjustments were conducted based on exterior orientation parameters, which were measured with GPS and INS.

Pix4D Mapper software was used for image processing. The errors of determined exterior orientation parameters in the coordinate system ETRS89 / Poland CS92 are similar to the expected accuracy of the exterior orientation elements obtained by measuring the position of the camera in flight with a GPS and INS receiver. In hard-to-reach areas, it is often impossible to set up ground control points, but direct georeferencing ensures satisfactory accuracy.

The first step was a test of different input settings for the generation of dense point clouds. Pix4D Mapper and data from June 2016 were used. Tested variants are presented in Table 1. The following parameters were considered: image scale which defines the scale of the images at which additional 3D points are computed, the density of the densified point cloud, minimal number of images in which each point is correctly re-projected, and size of the window used to match the densified points in the original images.

Table 1. Tested settings of dense point cloud generation  
Tabela 1. Testowane parametry generowania gęstej chmury punktów

Variant	Parameters			
	Image scale	Points density	Minimal image number	Matching window size
1	1	Optimal	3	7
2	0.5	Optimal	3	7
3	0.25	Optimal	3	7
4	0.13	Optimal	3	7
5	0.5	High	3	7
6	0.5	Low	3	7
7	0.5	High	2	7
8	0.5	High	4	7
9	0.5	High	5	7
10	0.5	High	6	7
11	0.5	High	3	9

The results of generating point clouds based on image matching were compared with ALS data for quality assessment. Each different variant had parameters of cloud-to-cloud distance and mean density determined (Table 2). Out of all tested variants, variant 7 turned out to yield the most satisfying results. It has the lowest value of cloud-to-cloud distance and one of the highest average point density. All other sets of images were processed using the variant 7 settings.

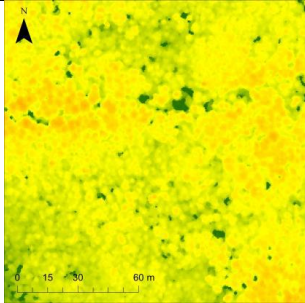
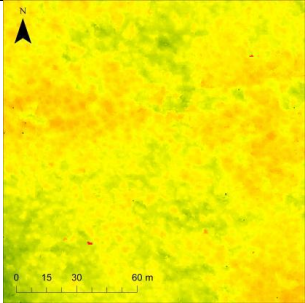
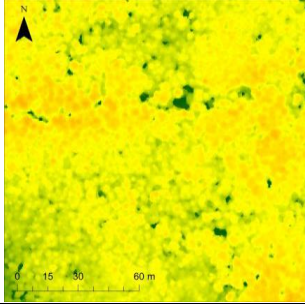
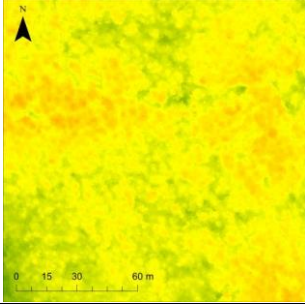
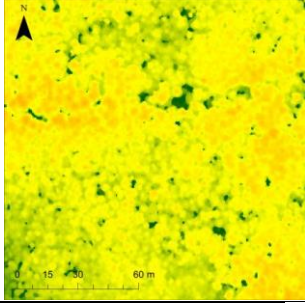
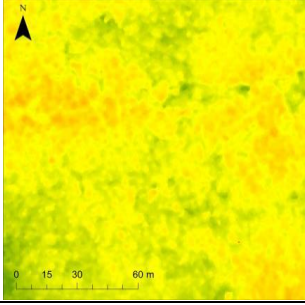

Table 2. Comparison of dense point cloud variants  
Tabela 2. Porównanie wariantów wygenerowanych chmur punktów

Variant	Mean cloud-to-cloud distance [m]	Standard deviation of cloud-to-cloud distance [m]	Mean density [points/m <sup>2</sup> ]
1	0.525	0.292	23.5
2	0.378	0.265	6.4
3	0.407	0.287	1.4
4	0.471	0.344	1.3
5	0.409	0.268	21.0
6	0.391	0.280	1.5
7	0.320	0.252	25.5
8	0.392	0.295	22.3
9	0.407	0.283	21.5
10	0.421	0.300	20.6
11	0.391	0.292	23.8

The next stage of the experiment was the Canopy Height Model generation (Table 3). FUSION software was used for this purpose. A median filter with a window size of 3x3 pixels was applied. It enabled proper smoothing of tree crowns, removed unnecessary details and noise, and maintained the actual height values of the forest stand. The fragment of the forest stand presented in Table 3 is also presented on the orthophotomap (Fig. 2).

Table 3. Canopy Height Models generated based on ALS and image matching point clouds from three data sets

Tabela 3. Zestawienie Wysokościowych Modeli Koron wygenerowanych na podstawie danych ALS i chmur punktów z dopasowania obrazów dla trzech terminów

Data acquisition period	ALS point cloud	Image matching point cloud
04-05 June 2016		
28 August 2016		
15 September 2016		
Forest stand height [m]		

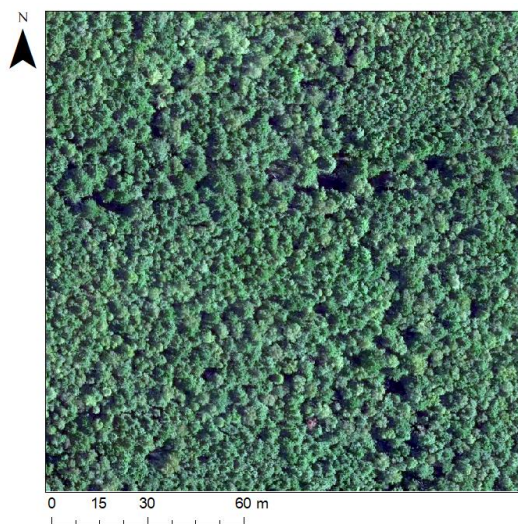


Figure 2. Example of forest stand shown on ortophotomap  
Rysunek 2. Przykładowy fragment drzewostanu przedstawiony na ortofotomapie

The CHM based on ALS data allows for a detailed representation of tree crowns. The boundaries of individual crowns are clear. Small gaps between the trees are also visible. On the other hand, CHM based on image matching point clouds shows tree crowns in less detail compared to ALS data. The borders of the crowns are fuzzy. The gaps between the trees are not visible. This is due to the shaded area visible on the images, which resulted in inferior image matching conditions and, thus, noises in the generated point cloud. To sum up, the differences between CHM based on ALS data and point clouds from image matching are not significant in terms of height in dense forest stands. The biggest differences occur in the shape of individual crowns and in the height values in free spaces in forest stand.

#### 4. RESULTS

The final part of the experiment includes a comparison of image matching point clouds with ALS point clouds based on generated CHMs in terms of height values (Table 4). Firstly, dense forest stand was analysed. The highest height differences are found at the edges of the crowns. Moreover, shaded areas cause errors in determining the correct height values. Details are not visible on them. Subsequently, the ecotone between dense forest stands and the open space of meadows and peat bogs was analysed. Just as for dense forest, the greatest height differences occur in shaded areas and at the edges of the forest. The absolute values of the height differences reach over 10 m. Analysing individual trees, the highest differences are found at the tree crown edges.

Mean values of height differences were determined for each flight mission (Table 4) and histograms of differences were generated (Table 5). The mean height differences for Canopy Height Models total: -1.36 m for June 2016, -0.72 m for August 2016 and -.54 m for September 2016. Analyzing the histograms, there is a dominance of negative values of height differences for each flight mission. The ALS data presents lower height values compared to

image matching point clouds. The forest stand proves to be a challenging research area. Varying illumination conditions make an impact on the results of image matching algorithms in forest stands. Image matching point clouds may, therefore, be noisy and overestimate the height of the stand. This is especially visible in free spaces between trees.

Table 4. Differences in height values between Canopy Height Models generated based on ALS and image matching point clouds from three data sets acquired in three different periods

Tabela 4. Różnice wysokości w Wysokościowych Modelach Koron wygenerowanych na podstawie danych ALS i chmur punktów z dopasowania obrazów z trzech terminów

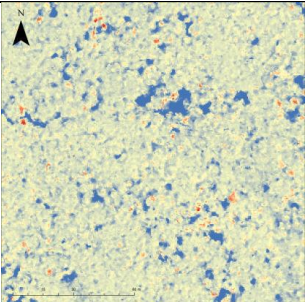
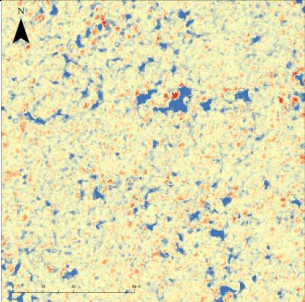
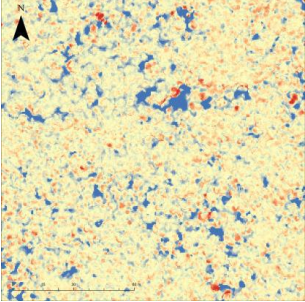
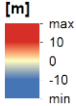
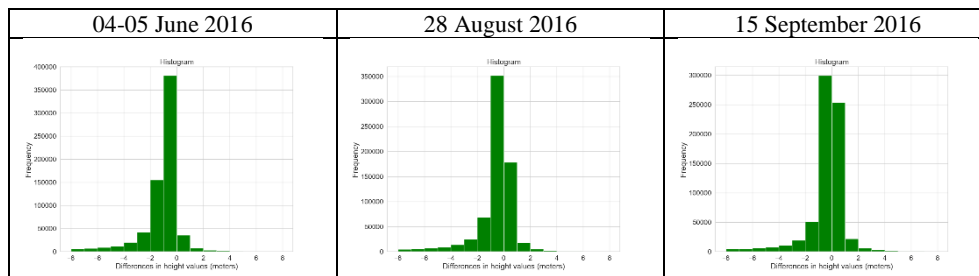
Data acquisition period	Height differences values	Mean value of height differences [m]	Standard Deviation [m]	RMS values [m]
04-05 June 2016		-1.36	2.50	2.85
28 August 2016		-0.72	2.21	2.33
15 September 2016		-0.54	2.08	2.15
Legend:				

Table 5. Histograms of differences in height values between Canopy Height Models generated based on ALS and image matching point clouds from three data sets acquired in three different periods

Tabela 5. Histogramy różnic wartości wysokości w Wysokościowych Modelach Koron wygenerowanych na podstawie danych ALS i chmur punktów z dopasowania obrazów z trzech terminów



Moreover, two types of point clouds were compared (Table 5). Parameters like density, tree tops, forest stand boundaries and cover were compared. Analysing point cloud density, it is noticeable that for ALS data, the highest density of the point clouds occurs at the area with forest stand – the point cloud density exceeds 100 points per 1 m<sup>2</sup> for medium and high vegetation areas and 15 points per 1 m<sup>2</sup> for low vegetation areas. The increased density in areas with high and medium vegetation is a result of the multiple reflection of the laser beam from both the trees and the ground surface. For the point clouds from the image matching, density is homogeneous and similar for the entire area - it is up to 250 points per 1 m<sup>2</sup>. The average density equals 30 points per 1 m<sup>2</sup>. Lower density occurs on the edges of the image block. This is due to the smaller image overlap in these places.

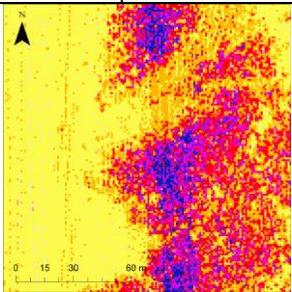
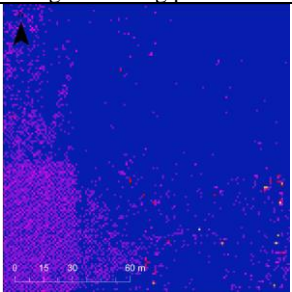
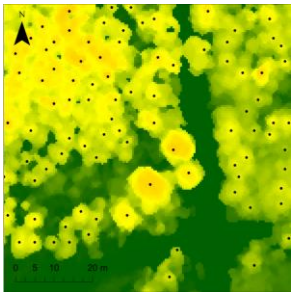
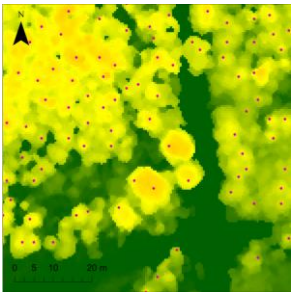
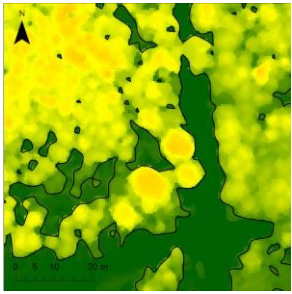
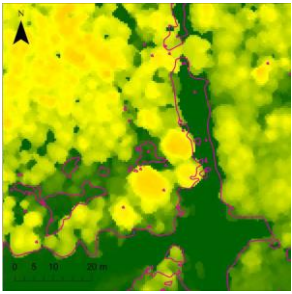
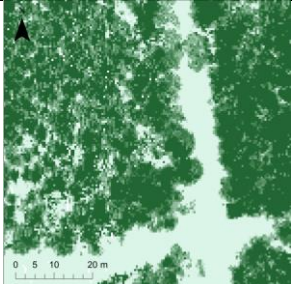
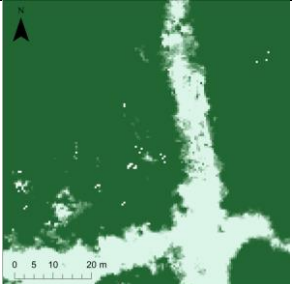
The next analysed parameters are tree top locations. 4728 tree tops were obtained for ALS data and 4644 tree tops were obtained for image matching point cloud. The number of tree tops from the image matching point cloud is similar to the number of tree tops from ALS data and the location of tree tops does not differ significantly.

The boundaries of forested areas with vegetation higher than 3m were generated. There are differences between boundaries depending on data source. The boundaries generated based on ALS data have the most clearly visible free spaces between trees, while the boundaries based on image matching point cloud have obscured spaces between trees. There are shifts in the outer border of the forest stand.

The possibility of identifying the forest stand cover was also tested. In the first place, forest stand cover based on ALS data was checked. In forest areas, the parameter of the cover ranges from 60% to 100%. In expanses, values close to 0% are predominant. Forest stand cover values are more uniform for image matching point cloud results. The majority of values are either 0% or 100%.



Table 6. Comparison of selected parameters of ALS and image matching point clouds from 15 September 2016  
 Tabela 6. Porównanie wybranych parametrów chmur punktów dla danych z 15 września 2016 r.

Parameter	ALS point cloud	Image matching point cloud	Legend
Density			<p>[points/m<sup>2</sup>]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1 - 5</li> <li>6 - 10</li> <li>11 - 15</li> <li>16 - 20</li> <li>21 - 25</li> <li>26 - 30</li> <li>31 - max</li> </ul>
Tree tops			<p>Forest stand height [m]:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>≥30</li> <li>15</li> <li>0</li> </ul> <p>Tree tops based on ALS data: ●</p> <p>Tree tops based on image matching point clouds: ●</p>
Forest stand boundaries			<p>Forest stand height [m]:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>≥30</li> <li>15</li> <li>0</li> </ul> <p>Forest stand boundaries based on ALS data: □</p> <p>Forest stand boundaries based on image matching point clouds: □</p>
Forest stand cover			<p>[%]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>High : 100</li> <li>Low : 0</li> </ul>

## **5. SUMMARY AND CONCLUSIONS**

The aim of the experiment is to compare using image matching and airborne laser scanning point clouds for generating Canopy Height Model. Commercial software allows to generate point clouds based on aerial images with various parameters that can be used for Canopy Height Model generation. The characteristics of this point cloud differ from the characteristics of ALS data. Vegetation is a source of errors in image matching because of similar textures and repeating elements. The most significant height differences appear in places of shade, like the edges of the crowns.

Canopy Height Models were generated in two different ways: by utilizing ALS data and by image matching point clouds. While both data types are useful for CHM generation, there are some impactful differences in tree crown shapes when using different data types. CHM based on ALS data resulted in the boundaries of individual trees being sharper, whereas the tree crown boundaries of CHM based on image matching are fuzzy, and the free spaces between the trees are not easy to recognize. Shaded areas in image matching cause errors in determining the correct height values. The differences in height between CHMs are greatest for these shaded areas and at the edges of the forest stand – where the absolute values of height differences reach over 10 m. When it comes to the density of point clouds, these created with image matching are homogenous for the whole area, while ALS data is more diverse – with the highest density for areas with forest stand.

Forest stand characteristics are determined based on the generated CHMs. The first analysed parameters were the number and location of tree tops. There are no significant differences between these two types of input data. The most noticeable difference is in the boundaries of a forest stand. The boundaries created by using ALS products are more accurate and map more free spaces between trees.

To sum up, using the airborne laser scanning point cloud is better for generating the Canopy Height Model. The shape of the crowns is more accurately visualized and more details of the objects are visible. Moreover, its density is adequate in many forest applications. Acquisition of information about the ground under the vegetation and more detailed forest stand characteristics is a great advantage of this technology.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

This paper and the research behind it would not have been possible without sharing data by coordinators, especially Katarzyna Osińska-Skotak, BEng, PhD, DSc from the HabitARS project: The innovative approach supporting monitoring of non-forest Natura 2000 habitats, using remote sensing methods. The project was carried out in 2016–2019 as part of the BIOSTRATEG II program and funded by The National Centre for Research and Development in Poland.

Wojciech Ostrowski, BEng, PhD has also contributed to this experiment realization. He shared his knowledge and experience in selecting parameters for the processing of aerial photos.

## LITERATURE

- Ben-Arie, J. R., Hay, G., Powers, R., Castilla, G., St-Onge, B., (2009). Development of a pit filling algorithm for LiDAR canopy height models. *Computers & Geosciences*, 35(9), 1940–1949. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2009.02.003>
- Będkowski, K. (2010). Specyfika fotogrametrii leśnej. In: Okła, K. (ed). *Geomatyka w Lasach Państwowych. Część I. Podstawy*, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warsaw.
- Będkowski, K., Wężyk, P., (2010). Lotniczy skanowanie laserowy, In: Okła, K. (ed) *Geomatyka w Lasach Państwowych. Część I. Podstawy*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warsaw.
- Hall, R. J. (2003). The Roles of Aerial Photographs in Forestry Remote Sensing Image Analysis. In: Wulder, M. A., Franklin, S.E. (eds) *Remote Sensing of Forest Environments*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0306-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0306-4_3)
- Hao, Y., Zhen, Z., Li, F., Zhao, Y., (2019). A graph-based progressive morphological filtering (GPMF) method for generating canopy height models using ALS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.008>
- Jule, C. (2000). Aerial Photography in the Next Decade, *Journal of Forestry*, 98(6), 17–19, <https://doi.org/10.1093/jof/98.6.17>
- Khosravipour, A., Skidmore, A. K., Isenburg, M., Wang, T., & Hussin, Y. A. (2014). Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 80(9), 863-872. <https://doi.org/10.14358/PERS.80.9.863>
- Khosravipour, A., Skidmore, A. K., & Isenburg, M. (2016). Generating spike-free digital surface models using LiDAR raw point clouds: a new approach for forestry applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.005>
- Mielcarek, M., Stereńczak, K., Khosravipour, A., (2018). Testing and evaluating different LiDAR-derived canopy height model generation methods for tree height estimation *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.002>
- Næsset, E., Økland, T., (2002). Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, 79(1), 105–115. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00243-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00243-7)
- Okła, K., (2010). Możliwości wykorzystania teledetekcji i fotogrametrii w Lasach Państwowych. In: Okła K. (ed), *Geomatyka w Lasach Państwowych. Część I. Podstawy*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warsaw.
- Quan, Y., Li, M., Hao, Y., Wang, B., (2021). Comparison and Evaluation of Different Pit-Filling Methods for Generating High Resolution Canopy Height Model Using UAV Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 13(12):2239. <https://doi.org/10.3390/rs13122239>
- Stepper, C., Straub, C., Pretzsch, H., (2015a). Assessing height changes in a highly structured forest using regularly acquired aerial image data. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 88 (3), 304-316. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu050>

- Stepper, C., Straub, C., Pretzsch, H., (2015b). Using semi-global matching point clouds to estimate growing stock at the plot and stand levels: Application for a broadleaf-dominated forest in central Europe. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(1), 111–123. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0297>
- Ullah, S., Adler, P., Dees, M., Datta, P., Weinacker, H., Koch, B., (2017). Comparing image-based point clouds and airborne laser scanning data for estimating forest heights. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10(1), 273-280. <https://doi.org/10.3832/ifer2077-009>
- Wężyk, P., (2006). Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki*, 4(4), 120-132.
- White, J. C., Wulder, M., Vastaranta, M., Coops, N., Pitt, D., & Woods, M. (2013). The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests*, 4(3), 518-536. <https://doi.org/10.3390/f4030518>
- White, J. C., Stepper, C., Tompalski, P., Coops, N. C., Wulder, M.A., (2015). Comparing ALS and image-based point cloud metrics and modelled forest inventory attributes in a complex coastal forest environment. *Forests* 6 (10), 3704-3732. <https://doi.org/10.3390/f6103704>

## **WYKORZYSTANIE CHMUR PUNKTÓW Z DOPASOWANIA OBRAZÓW I LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO DO GENEROWANIA WYSOKOŚCIOWYCH MODELI KORON**

**SŁOWA KLUCZOWE:** dopasowanie obrazów, lotniczy skaning laserowy, Biebrzański Park Narodowy, Wysokościowy Model Koron

**STRESZCZENIE:** Monitorowanie stanu lasu jest niezbędne do prowadzenia racjonalnej gospodarki leśnej. Wykorzystanie w tym celu zdjęć lotniczych i danych z lotniczego skaningu laserowego jest bardzo przydatne. Dane fotogrametryczne są dostępne dla całego obszaru Polski, więc wskazane jest ich wykorzystanie w prowadzeniu gospodarki leśnej. Głównym celem przeprowadzonych badań jest ocena wykorzystania danych lotniczych w generowaniu Wysokościowych Modeli Koron (ang. Canopy Height Model – CHM). Obszarem zainteresowania jest fragment Biebrzańskiego Parku Narodowego. Wykorzystano zdjęcia lotnicze i chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego pozyskane w ramach projektu HabitARS: Innowacyjne podejście wspierające monitoring nieleśnych siedlisk przyrodniczych Natura 2000 z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych. Projekt był realizowany w latach 2016-2019 jako część programu BIOSTRATEG II i finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Podczas badań wygenerowano Wysokościowe Modele Koron przy użyciu chmury punktów z dopasowania obrazów i lotniczego skaningu laserowego, a następnie porównano je ze sobą. Dane ALS są lepsze przy generowaniu CHM – kształt koron jest przedstawiony bardziej precyzyjnie i granice między drzewami są wyraźniej odwzorowane. Więcej szczegółów drzewostanu jest widocznych na produktach wygenerowanych z wykorzystaniem danych ALS. Występują znaczące różnice wysokości między modelami, szczególnie na granicy drzewostanu i przestrzeniach między drzewami. Technologia lotniczego skaningu laserowego posiada zdolność przenikania wiązki lasera przez szatę roślinną i pozwala uzyskać więcej informacji o przekroju drzewostanu. Zapewnia pozyskanie informacji o gruncie znajdującym się pod roślinnością. Roślinność jest często źródłem błędów w dopasowaniu obrazów i wygenerowana chmura punktów ma inne właściwości. Błędy w wysokości pojawiają się głównie na obrzeżach koron i w obszarach zacienionych. Jednak chmury punktów z dopasowania obrazów mogą być użyte w analizach czasowych, gdy historyczne dane ALS nie są dostępne.

### **1. WPROWADZENIE**

Tradycyjna gospodarka leśna jest czasochłonna ([Næsset & Økland, 2002](#)). Inwentaryzacja obszarów leśnych musi być wykonywana regularnie, co generuje wysokie koszty ([Stepper et al., 2015a](#)). Należy zwrócić uwagę, że dane fotogrametryczne takie jak zdjęcia lotnicze i chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego dostarczają wartościowej informacji o terenie. Analizy nad wykorzystaniem tego typu danych w leśnictwie są nadal aktualnym problemem badawczym. Jednym z zagadnień, które powinno być badane, jest generowanie Wysokościowych Modeli Koron (ang. Canopy Height Model – CHM) ([Quan et al., 2021](#); [Mielcarek et al., 2018](#)). Na podstawie danych fotogrametrycznych można wyznaczyć wiele parametrów charakteryzujących drzewostan. Wśród najważniejszych parametrów można wymienić: wysokość i pierśnicę pojedynczych drzew, liczbę drzew, szacowanie biomasy, zwarcie drzewostanu, wskaźniki opisujące zdrowotność drzewostanu i wiele innych ([Ullah et al., 2017](#)).

W zastosowaniach leśnych takich jak inwentaryzacja czy monitoring siedlisk, zdjęcia lotnicze są źródłem danych teledetekcyjnych ([Hall, 2003](#); [Caylor, 2000](#)). Przy pozyskiwaniu zdjęć dla zastosowań leśnych należy wziąć pod uwagę porę roku, czas wykonywania nalotu

oraz wysokość lotu. W leśnictwie wykorzystywane są zdjęcia multispektralne i hiperspektralne ([Będkowski, 2010](#)). Produkty fotogrametryczne mają zastosowanie w aktualizacji leśnych baz danych. Na podstawie danych fotogrametrycznych można określić zmiany drzewostanu, wyznaczyć wybrane wskaźniki roślinności czy sklasyfikować występujące gatunki. Ponadto dane te wykorzystywane są w wielu analizach takich jak monitoring skutków katastrof naturalnych czy planowanie ochrony przeciwpożarowej ([Okła, 2010](#)).

Lotniczy skaning laserowy również ma wiele zastosowań w leśnictwie. Przede wszystkim wykorzystywane jest do generowania Wysokościowego Modelu Koron ([Ullah et al., 2017](#)). Pozwala uzyskać informację o wysokości drzew oraz piętrach drzewostanu. Proces generowania CHM jest dość skomplikowany. Jedną z trudności przy opracowywaniu CHM jest tworzenie tzw. „data pits”, które obniżają jakość końcowego produktu ([Quan et al., 2021](#); [Mielcarek et al., 2018](#)). Dlatego wiele metod generowania CHM jest opracowywanych i testowanych ([Khosravipour et al., 2014](#); [Khosravipour et al., 2016](#); [Hao et al., 2019](#); [Ben-Arie et al. 2009](#); [Quan et al., 2021](#); [Mielcarek et al., 2018](#)). CHM jest bardzo przydatnym produktem. Na jego podstawie możliwe jest wyznaczanie parametrów określających pojedyncze drzewa, dzięki czemu można prowadzić leśnictwo precyzyjne ([Weżyk, 2006](#)). Zdolność wiązki lasera do przenikania szaty roślinnej i docierania do powierzchni gruntu jest szczególnie przydatna na terenach trudno dostępnych ([Będkowski & Weżyk, 2010](#)).

Do generowania CHM wykorzystywane są przede wszystkim dane z lotniczego skaningu laserowego, ale są miejsca, gdzie dane te nie są pozyskiwane często. W przypadku braku danych ALS, możliwe jest wykorzystanie zdjęć lotniczych, które są pozyskiwane częściej i bardziej regularnie ([Ullah et al., 2017](#); [White et al., 2015](#)). Dopasowanie obrazów pozwala na wygenerowanie chmury punktów z wysoką dokładnością. Wyznaczone na ich podstawie charakterystyki drzewostanu mogą być porównywalne z tymi wyznaczonymi na podstawie danych ALS ([White et al., 2013](#)). Połączenie wykorzystania zdjęć lotniczych z cyfrowym modelem terenu opartym na ALS może pomóc w prowadzeniu gospodarki leśnej ([Stepper et al., 2015b](#)).

Głównym celem niniejszej pracy jest porównanie chmur punktów z dopasowania obrazów z chmurami z lotniczego skaningu laserowego w generowaniu Wysokościowych Modeli Koron. Eksperyment miał na celu ocenę możliwości wykorzystania danych lotniczych do wygenerowania CHM. Prawidłowe wygenerowanie chmur punktów pozwala na uzyskanie wiarygodnych informacji o biomie lasu. Chmury punktów dopasowujące obrazy są przydatne w obszarach, w których dane ALS nie są dostępne, a inwentaryzacja terenu jest trudna.

## 2. OBSZAR ZAINTERESOWANIA I WYKORZYSTANE DANE

Obszar zainteresowania położony jest w Biebrzańskim Parku Narodowym, we wschodniej Polsce - województwo podlaskie, powiat Mońki, gmina Trzcianne (Rys. 1). Charakteryzuje się dużą bioróżnorodnością i występuje na nim wiele chronionych gatunków roślin i zwierząt.

W eksperymencie wykorzystano dane pozyskane w ramach programu projektu HabitARS: Innowacyjne podejście wspierające monitoring nieleśnych siedlisk przyrodniczych Natura 2000 z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych. Projekt był realizowany w latach 2016-2019 jako część programu BIOSTRATEG II i finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Danymi wejściowymi były zdjęcia lotnicze, które były pozyskane w trakcie trzech nalotów wykonanych w terminach: 04-05 czerwca 2016, 28 sierpnia 2016 i 15 września 2016. Każdy nalot był wykonywany w kierunku wschód-zachód. Zdjęcia wykonano z wykorzystaniem systemu IGI DigiCAM, w oparciu o kamerę cyfrową Hasselblad z obiektywem stałooogniskowym 50 mm. Terenowy rozmiar piksela wynosi 8.8 cm.

Ponadto wykorzystano chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego, które pozyskane zostały również w trakcie trzech kampanii pomiarowych w 2016 r. jednocześnie ze zdjęciami lotniczymi. Wykorzystany został skaner Riegl LMS-Q680i. Średnia gęstość użytych chmur punktów wynosi 15 pkt/m<sup>2</sup>.

### **3. METODOLOGIA**

Obszar zainteresowania był trudno dostępnym, podmokłym terenem, więc nie wyznaczono osnowy pomiarowej. Aerotriangulację bloku zdjęć wykonano w oparciu o elementy orientacji zewnętrznej. Były one pomierzone w trakcie lotu z wykorzystaniem technologii GPS i INS.

Zdjęcia opracowano przy użyciu oprogramowania Pix4D Mapper. Błędy wyznaczonych parametrów orientacji zewnętrznej w układzie współrzędnych ETRS89 / Poland CS92 są zbliżone do oczekiwanej dokładności elementów orientacji zewnętrznej uzyskanej poprzez pomiar położenia kamery w locie z odbiornikiem GPS i INS. W trudno dostępnych obszarach często nie ma możliwości założenia osnowy pomiarowej, ale georeferencja wprost zapewnia zadowalającą dokładność.

Kolejnym etapem było przetestowanie w oprogramowaniu Pix4D Mapper różnych ustawień generowania gęstych chmur punktów dla danych z czerwca 2016. Wykorzystane warianty ustawień przedstawiono w Tabeli 1. Uwzględniono takie parametry jak: skalę obrazów, dla której wyznaczane są punkty, gęstość wynikowej chmury punktów, minimalną liczbę obrazów, na których są widoczne pojedyncze punkty oraz rozmiar okna dopasowania punktów na zdjęciach.

Wygenerowane chmury punktów porównano z danymi ALS. Dla każdego wariantu wyznaczono odległość między chmurami punktów i wyznaczono średnią gęstość (Tabela 2). Odległość między chmurami jest wyznaczona poprzez znalezienie dla punktów porównywanej chmury najbliższego punktu w chmurze odniesienia i obliczeniu odległości euklidesowej. Wariant 7 miał najmniejszą odległość od chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego i jedną z największych gęstości. Wybrano wariant 7 jako najbardziej satysfakcjonujący i zgodnie z nim wygenerowano chmury dla pozostałych terminów.

Kolejnym etapem eksperymentu było wygenerowanie Wysokościowych Modeli Koron z wykorzystaniem oprogramowania FUSION (Tabela 3). Zastosowano filtr medianowy

o rozmiarze okna 3x3 piksele. Zapewniało to prawidłowe wygładzenie koron drzew, usunięcie zbędnych detali i szumów oraz zachowanie rzeczywistych wartości wysokościowych drzewostanu. Przedstawiony w tabeli 3 fragment drzewostanu zaprezentowano również na ortofotomapie (Rys. 2). Drzewostan jest zwarty z niewielką liczbą luk. CHM wygenerowany na podstawie danych ALS pozwala na szczegółowe przedstawienie koron drzew. Granice poszczególnych koron są wyraźne. Niewielkie luki między drzewami również są widoczne. Z kolei CHM wygenerowany przy użyciu chmur punktów z dopasowania obrazów przedstawia korony drzew w sposób mniej szczegółowy. Granice koron są rozmyte. Luki między drzewami nie są widoczne. Wynika to z zacielenia obszarów luk na zdjęciach, co spowodowało gorsze warunki dopasowania obrazów, a tym samym zaszumienie wygenerowanej chmury punktów. Reasumując, różnice pomiędzy CHM wygenerowanymi na podstawie ALS a chmurami punktów z dopasowania obrazów nie są znaczące pod względem wysokości w obszarach zwartego drzewostanu. Największe różnice występują w odwzorowaniu kształtu pojedynczych koron oraz w wartościach wysokości w miejscach występowania luk.

#### **4. WYNIKI**

Chmury punktów z dopasowania obrazów porównano z chmurami punktów ALS na podstawie wygenerowanych Wysokościowych Modeli Koron pod względem wartości wysokości (Tabela 4). W przypadku drzewostanów zwartych największe różnice wysokości występują na krawędziach koron i w miejscach zacielenionych. Zacielenione obszary powodują gorsze warunki dopasowania zdjęć, przez co wynikowe chmury punktów są w tych miejscach zaszumione, a wygenerowane na ich podstawie modele zawierają błędy wysokości. Wiele szczegółów nie jest widocznych w miejscach zacielenionych. W przypadku ekotonu pomiędzy zwartym drzewostanem a otwartą przestrzenią łąk i torfowisk największe różnice wysokości występują w obszarach zacielenionych i na obrzeżach lasu. Wartości bezwzględne różnic wysokości sięgają ponad 10 m. W przypadku pojedynczych drzew największe różnice występują na krawędziach koron drzew.

Dla poszczególnych terminów wyznaczono średnie wartości różnice wysokości (Tabela 4) i wygenerowano histogramy różnic (Tabela 5). Średnie różnice wysokości Wysokościowych Modeli Koron wynoszą: -1.36 m dla czerwca 2016, -0.72 m dla sierpnia 2016 i -0.54 m dla września 2016. Analizując histogramy, dla każdego terminu występuje przewaga ujemnych wartości różnic wysokości. Dane ALS prezentują niższe wartości wysokości w porównaniu z chmurami punktów z dopasowania obrazów. Drzewostan jest wymagającym obszarem do analizy. Szczególnie zmienne warunki oświetlenia mają wpływ na działanie algorytmów dopasowania obrazów w terenach zalesionych. Chmury punktów z dopasowania obrazów mogą być więc zaszumione i zawyżać wysokości drzewostanu. Szczególnie widoczne jest to w miejscu występowania luk.

W ramach eksperymentu porównano chmury punktów (Tabela 5). Porównano takie parametry jak gęstość chmur punktów, wierzchołki drzew, granice drzewostanów i zwarcie drzewostanu. Analizując gęstość chmur punktów zauważono, że dla danych ALS największe zagęszczenie chmur punktów występuje na obszarze ze średnią i wysoką roślinnością - gęstość chmur punktów przekracza 100 punktów na 1 m<sup>2</sup>. W przypadku obszarów o niskiej



roślinności gęstość wynosi 15 punktów na 1 m<sup>2</sup>. Zwiększone zagęszczenie na obszarach o wysokiej i średniej roślinności wynika z wielokrotnego odbicia wiązki lasera od drzew i ziemi. Gęstość chmur punktów z dopasowania obrazu jest jednorodna na całym obszarze - wynosi do 250 punktów na 1 m<sup>2</sup>. Średnie zagęszczenie wynosi 30 punktów na 1 m<sup>2</sup>. Mniejsze zagęszczenie występuje na krawędziach bloku zdjęć. Wynika to z mniejszego wzajemnego pokrycia zdjęć w tych miejscach.

Kolejnym analizowanym parametrem było położenie punktów reprezentujących wierzchołki drzew. Dla danych ALS uzyskano 4728 wierzchołków drzew, a z chmury punktów dopasowującej obraz uzyskano 4644 wierzchołki drzew. Liczba wierzchołków drzew z chmury punktów z dopasowania obrazów jest podobna do liczby wierzchołków drzew z danych ALS. Położenie wierzchołków drzew nie różni się znacząco.

Wygenerowano granice drzewostanów wyższych niż 3 m. Istnieją różnice między granicami w zależności od źródła danych. Granice wygenerowane na podstawie danych ALS mają lepiej widoczne wolne przestrzenie między drzewami. Następują przesunięcia zewnętrznej granicy drzewostanu.

Sprawdzono także możliwość określenia zwarcia drzewostanu. W pierwszej kolejności zbadano pokrycie drzewostanów na podstawie danych ALS. Na terenach zalesionych zwarcie kształtuje się na poziomie 60-100%. Na otwartych przestrzeniach dominują wartości bliższe 0%. W przypadku chmury punktów z dopasowania obrazów wartości zwarcia drzewostanów są bardziej jednorodne. Większość wartości wynosi 0% lub 100%.

## **5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI**

Celem eksperymentu było porównanie wykorzystania chmur punktów z dopasowywania obrazów i chmur punktów z lotniczego skanowania laserowego w celu wygenerowania Wysokościowego Modelu Koron. Komercyjne oprogramowanie umożliwia generowanie chmur punktów na podstawie zdjęć lotniczych o różnych parametrach, które można wykorzystać do generowania CHM. Charakterystyka chmury punktów z dopasowania obrazów różni się od charakterystyki danych ALS. Roślinność jest źródłem błędów w dopasowaniu obrazów ze względu na podobne tekstury i powtarzające się elementy. Największe różnice wysokości pojawiają się w miejscach zacienionych.

Wysokościowe Modele Koron wygenerowano na dwa różne sposoby: wykorzystując dane ALS i chmury punktów z dopasowania obrazów. Oba typy danych są przydatne do generowania CHM, choć istnieją pewne istotne różnice w kształtach koron w zależności od danych wejściowych. CHM na podstawie danych ALS spowodował, że granice poszczególnych drzew były ostrzejsze, natomiast granice koron drzew CHM na podstawie chmur punktów z dopasowania obrazów są rozmyte, a wolne przestrzenie między drzewami nie są łatwe do rozpoznania. Zacienione obszary w dopasowywaniu obrazów powodują trudności w dopasowaniu obrazów i w określaniu prawidłowych wartości wysokości. Różnice wysokości pomiędzy CHM są największe właśnie na obszarach zacienionych oraz na obrzeżach drzewostanu – gdzie bezwzględne wartości różnic wysokości sięgają ponad 10 m. Jeśli chodzi o gęstość chmur punktów, te utworzone metodą dopasowywania obrazów są

jednorodne dla całego obszaru, natomiast dane ALS są bardziej zróżnicowane – z największym zagęszczeniem dla obszarów z drzewostanem.

Na podstawie wygenerowanych CHM określono charakterystykę drzewostanu. Pierwszym analizowanym parametrem była liczba i położenie wierzchołków drzew. Nie ma znaczących różnic pomiędzy tymi dwoma typami danych wejściowych. Najbardziej zauważalna różnica występuje w granicach drzewostanu. Granice utworzone przy użyciu produktów ALS są dokładniejsze i wyznaczają więcej wolnych przestrzeni między drzewami.

Podsumowując, do generowania Wysokościowego Modelu Koron lepiej sprawdza się wykorzystanie chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego. Kształt koron jest dokładniej odwzorowany i przedstawionych jest więcej szczegółów koron. Ponadto jego gęstość jest wystarczająca w wielu zastosowaniach leśnych. Ogromną zaletą tej technologii jest pozyskiwanie informacji o podłożu pod roślinnością oraz bardziej szczegółowa charakterystyka drzewostanu.

## **PODZIĘKOWANIE**

Niniejsza praca i leżące u jej podstaw badania nie byłyby możliwe bez udostępnienia danych przez koordynatorów, w szczególności dr hab. inż. Katarzynę Osińską-Skotak, prof. PW z projektu HabitARS: Innowacyjne podejście wspierające monitorowanie nieleśnych siedlisk Natura 2000 z wykorzystaniem teledetekcji metody. Projekt realizowany był w latach 2016-2019 w ramach programu BIOSTRATEG II i finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Dr inż. Wojciech Ostrowski również przyczynił się do realizacji tego eksperymentu, dzieląc się swoją wiedzą i doświadczeniem w zakresie doboru parametrów do przetwarzania zdjęć lotniczych.

Details of authors:/Dane autorów:

mgr inż. Anna Płatek-Żak  
e-mail: anna.platek@pw.edu.pl

dr hab. inż. Dorota Zawieska, prof. PW  
e-mail: dorota.zawieska@pw.edu.pl

Submitted 1.12.2023  
Accepted 31.12.2023

