

SURVEYING WITH PHOTOGRAMMETRIC UNMANNED AERIAL VEHICLES

Krystian Pyka¹, Paweł Wiącek¹, Mirosław Guzik²

¹ AGH w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska

² GEOXY sp. z o.o.

KEYWORDS: UAV, bundle adjustment, orthomosaic, stereo, point cloud

ABSTRACT: The paper presents how to carry out measurements with UAV in order to meet the requirements set for geodetic measurements by Polish technical regulations. First, a review of literature focused on the influence of various factors shaping the accuracy of photogrammetry with UAV was made. Then, on the basis of the author's experience, a number of recommendations constituting a set of good practices in planning, taking photographs with UAV and their processing and final measurement were formulated. Key elements of the method, such as image coverage, number and distribution of GCP (ground control point), balanced aerotriangulation alignment, methods for measuring field details, the extent to which orthomosaics and point clouds are used as survey material, were identified.

It was found that careful observance of the given rules makes photogrammetry with UAV usable as a method of situation and elevation measurements. At the same time, it was pointed out that special care should be taken when measuring building contours. In this case, stereo or mono measurement on multiple images was indicated as the appropriate method. Orthomosaic measurement was recommended for field details visible without obscuration on all photographs covering a given fragment, and for details requiring less accuracy than buildings.

1. INTRODUCTION

One of the effects of the dynamic development of unmanned aerial vehicles (UAV) is the development of low-altitude photogrammetry. Photogrammetry from UAV has many advantages: field work takes a short time, it is not necessary to enter the property, compared to photogrammetry from manned aircraft it is less sensitive to weather conditions, the most problems are caused by strong winds. This new segment of photogrammetry has several years of experience, clearly confirming its usefulness in horizontal and vertical coordinates measurements performed as part of the so-called land surveying works within the meaning of the Polish Geodetic and Cartographic Law. Photogrammetry with UAV has not been formally included in Polish regulations on geodesy and cartography. Although years ago, analog photogrammetry had its own technical guidelines, but it is difficult to talk about a significant relationship between analog and UAV-based technology. In the technical standards for horizontal and vertical measurements ([Rozp., 2011](#)) the term "geodetic photogrammetry survey" was introduced, but the related regulations were inconsistent. In the update of standards for land surveying measurements, made in 2020, abandoned the technical

guidelines dedicated to surveying methods, limiting itself to the listing of methods used for the implementation of the measurement network ([Reg., 2020a](#)). New standards allow the use of any method that guarantees the required accuracy. The selection of the measurement method is decided by the head of surveying works, who is responsible for the quality of the results. Along with the results of surveying works, the state geodetic and cartographic resource is provided with documentation describing the method along with engineering justification of the obtained accuracy. While preparing documentation for measurements made with the help of photogrammetry with UAV, doubts arise: how to include method description in technical report, which elements of the method should be specified and how to prove that the method provides required accuracy. The purpose of this article is to formulate good practices in the use of photogrammetry with UAV, which, if followed, give a high probability of obtaining the accuracy required by the regulations.

It should be noted that the regulation concerning the rules of creating spatial databases of aerial and satellite imagery, orthophotomap and digital terrain model ([Reg., 2020b](#)) does not refer to photogrammetry with UAV. This document concerns the taking of images and derived products and their collection in the state geodetic and cartographic resource, but does not include photogrammetry as a geodetic method of measuring terrain details.

Looking through the literature, it is easy to find publications about using UAVs for "mapping" or supplying 3D databases. But most articles focus on the accuracy of aerotriangulation, orthomosaics, or the quality of a dense point cloud, giving little importance to the measurement of details in a land surveying sense.

[Kurczynski et al. \(2016\)](#) investigated whether photogrammetry with UAV is suitable for measuring building contours and boundaries of registered land parcels. The performed experiment confirmed that obtaining a horizontal accuracy < 10 cm is within the range of the method, but the problem lies in the identification of field details (building corners, boundary break points). The measurement of buildings by stereoscopic and monoscopic methods from multiple images was tested, while boundaries were measured on orthophotos. In spite of site photo overlap of 80% and front overlap of 60%, the completeness of building measurements was not enough. The monoscopic method proved to be slightly more accurate and efficient than the stereoscopic one. The monoscopic measurement was realized with the use of the automatic function of indicating by the software the images on which the detail is depicted, and in the stereo measurement such functionality was not used.

[Stöcker et al. \(2019, 2020\)](#) analyzed the accuracies obtained from UAV images in terms of measurements for a cadastre. The study areas ranged from 0.14 to 8.70 km², GSD in the range of 2.1 to 5.8 cm. The publication gives the following recommendations for the overlap of images: in general 70/70%, for areas with a predominance of vegetation and especially forest areas increase the coverage to 80-90%, higher coverage also when the purpose is to identify the ground contours of buildings. The authors recommend using seven evenly spaced GCPs for a block of images. This is not a large number considering that the images were taken without measuring the centers of projections using the RTK/PPK technique, with the survey areas being almost rectangular in three cases and slightly irregular in the others. Particularly noteworthy is the conclusion formulated by the authors that the accuracies obtained from aerotriangulation on check points are usually better than the accuracy of measurement on orthomosaics. Therefore, they suggest performing an additional check on the orthomosaic to make sure that the results are acceptable for the cadastre.

In the development of photogrammetry with UAV, the introduction of direct georeferencing by measuring the position of projection centers with RTK and derived

techniques was important. [Przybilla et al. \(2020\)](#) analyzed the advantages of using RTK systems and the effect of GCP distribution on the accuracy of photogrammetric studies. DJI Phantom 4 RTK and DJI Matrice 210 v2 RTK were used for the study. The results confirmed that RTK allows the accuracy of measuring the coordinates of the centers of projections at the level of a few centimeters. At the same time, it was noted that during the flight, situations that affect the reduction of the measurement accuracy may occur. Analysis of results obtained from different alignment scenarios showed that RTK systems allow performing high quality photogrammetric studies with a limited number of GCP. Authors recommend using minimum one GCP, thanks to which reduction of height errors to the level of a few centimeters was achieved, irrespective of the survey area. Uncertainty in the determination of focal length during the self-calibration process was identified as the cause. This effect was particularly noticeable over an area with small height differences.

[Wiacek \(2020\)](#) investigated how and to what extent: the parameters of the alignment process, methods of georeferencing, and the number of GCP affect the accuracy of aerotriangulation. In the study, flights made with a BIRDIE unmanned aircraft, equipped with a Sony RX1R II camera, were used. During a single flight, the study area was multiple time covered with images, thus creating nine variants of flight configurations varying in terms of GSD (flight altitude), number of images, and row orientation. Taking into account different configurations of factors affecting the alignment process, a total of 1152 variants were identified, which were then analyzed using ANOVA to determine whether individual factors have a statistically significant effect on the alignment process. Among the results of the analyses, it was found that a factor that has a very large impact on accuracy is the way camera distortion is modeled. In the case of the Sony RX1R II camera, which was analyzed in this paper, distortion has very large values and irregular distribution. For this camera, a significant reduction of the development errors was noticed when additional calibration parameters were applied ([Tang et al., 2012](#)). The results of the study confirmed that: (1) the number of GCP improves accuracy, with a negligible increase in accuracy above nine GCP, (2) the use of the PPK technique to measure the centers of projections allows obtaining alignment accuracy within single centimeters without the use of GCP. The paper also points out that performing a study using rows located at different heights relative to the terrain allows to increased accuracy. It was shown that the alignment parameters, such as the accuracy of measuring points on the photos or the a priori accuracy of the photo coordinates, have a significant effect on the final accuracy. At the same time, it was noted that some of these parameters show intergroup dependencies, so the way of selecting their values should be done with care and in-depth analysis.

[Ferrer-González et al. \(2020\)](#) presented an analysis of the effect of the number and distribution of GCPs on alignment accuracy for studies covering areas with linear characteristics. The authors highlighted the need to place Ground Control Points along the edges of the study area.

2. RECOMMENDATIONS FOR PHOTOGRAMMETRY WITH UAV

While formulating the guidelines, the following aspects concerning photogrammetric measurements with UAV were separated:

- UAV flight planning, including location of GCP and check points,
- aerotriangulation with verification of control photopoints

- measurement of terrain details (or elements thereof),
- measurement of details on orthomosaic,
- height measurements of unmarked pickets in the field,
- measurement of situational details of II and III group,
- composition of technical report.

In the following part, the rules of conduct for individual issues are formulated. The main point of the guidelines is formed by the first three aspects, which are dedicated to the situational survey of the field details of the 1st group and the height measurements of the ground details. It should be emphasized that it is recommended to perform situational and height measurements by means of measurements on images (point 3.3). Cases of admissibility of measurements on products resulting from photogrammetry processing such as orthomosaics, DSM and dense point cloud are given in par. 3.4 and 3.5. Criteria for situational measurements of details of II and III group are given in par. 3.7 presents the contents of the technical report of a photogrammetric measurement.

2.1. UAV flight planning, including location of GCP and check points

- a) GSD (ground sampling distance) of the images should be ≤ 3 cm, pixel size of the orthomosaics should be ≤ 3 cm,
- b) the designed side and front image overlap should be at least 70% for urbanized areas. For agricultural areas, and especially when a significant part of the flight area is covered by high vegetation, it is recommended to increase the coverage to 80%. Increased coverage is also recommended when weather conditions significantly affect flight stability,
- c) at least 10 GCPs should be placed in the flight area; GCPs should be located in the corners of the flight area, at the edges of the area along the main direction of the flight and inside the area; if the study consists of several flights, it is necessary to use GCPs in the strip of mutual coverage between flights; coordinates of the GCPs should be determined by geodetic field measurements
- d) at least 10 check points shall be located in the flight area, evenly distributed in places maximally distant from the GCPs; coordinates of the check points shall be determined by geodetic field survey, for measurement of GCP and check points the RTK/RTN method is recommended
- e) if during the flight the image coordinates were measured using the PPK/RTK/RTN method, it is acceptable to reduce the number of GCPs; in the case of resignation from using GCPs, the layout of check points, apart from the location inside the block, should additionally include the corners and edges of the flight area.

The requirements shown are for a block of images obtained from a single flight. In case the area of study requires several flights, each of them should meet the requirements independently. Height measurements over flat terrains, referred to in section 3.4, are an exception. In their case it is recommended to perform a double flight taking into account changes in flight altitude. Such flights should be processed within one alignment process.

GCPs, including check points, may be terrain details or signaled points. In the closest surroundings of a point, the terrain should be flat or slightly sloping. Field details that are the

centers of symmetrical elements (e.g. the centers of sewage) are preferable. The recommended shape of the signaled points is a cross, which may be limited to arms forming the letter L. Signaled points shall be painted on a hard surface or shall be ground-attached boards or ribbons 3 x GSD wide and > 6 x GSD long from the center of the sign. The sign color should contrast with the background: white for a dark background, orange for a gray background. Sign surface should be matte.

2.2. Aerotriangulation with accuracy verification

- a) it is recommended to perform aerotriangulation separately for each flight,
- b) aerotriangulation should be calculated in the projection coordinate system with altitudes referenced to the geoid; the recommendation does not exclude preliminary calculation in the global system without the participation of GCPs,
- c) RMSE of X and Y coordinates of GCPs obtained from aerotriangulation < 3.5 cm; RMSE of H coordinate < 5 cm, where absolute values of X and Y coordinate errors (differences between reference and estimated values) must be < 7 cm, absolute values of H coordinate errors < 10 cm
- d) accuracy of aerotriangulation should be verified on check points; RMSE of X and Y coordinates < 5 cm, RMSE of H < 7 cm, where absolute values of X and Y coordinate errors < 10 cm, absolute values of H coordinate errors < 14 cm,
- e) in the case when height measurements of elements of buildings and construction equipment as well as field-marked pickets are made, then the average height errors and the differences specified in c) and d) must be smaller by at least 50%.

2.3. Measurement of field details

- a) measurement of details is carried out directly on the images, i.e. using the stereoscopic method or by analytical forward indentation based on monoscopic measurement on at least three images,
- b) in the case of the stereoscopic method, details should be measured on two stereoscopic models; the final result is the arithmetic mean of X and Y coordinates, the difference of X, Y and H coordinates from two measurements may not exceed 5 cm; if the height measurement concerns an element of terrain detail with the required accuracy of 5 cm (Rozp., 2020a) then the difference H may not exceed 2.5 cm,
- c) in case of monoscopic measurement on N images ($N \geq 3$), additionally calculate the indentation from at least one pair of images selected from among N images - the differences of coordinates may not exceed the values given for stereoscopic measurement.

2.4. Horizontal measurements on an orthomosaic

Horizontal measurements of details of the 1st group on the orthomosaic is acceptable if the detail lies on the terrain and can be distinguished from the surrounding background. These conditions are often met by above ground elements of underground utilities.

- a) orthomosaic pixel size ≤ 3 cm,
- b) DSM or DTM obtained from a dense point cloud within the developed photogrammetric project should be used for orthorectification; an alternative is to use DTM from airborne laser scanning; note that DSM and DTM developed automatically require at least visual verification and artifact correction before orthorectification
- c) accuracy of orthorectification should be verified on all check points; average error of X and Y coordinates < 6 cm, absolute values of differences of X and Y coordinates < 8 cm; moreover, differences between heights obtained from height model used for orthorectification and H coordinates of GCPs and check points should be checked, absolute values of differences < 20 cm,
- d) before measuring details lying in the close surroundings of objects rising above the terrain (trees, buildings, cars) it should be checked whether the DSM/DTM does not show deformations extending to the place of measurement; if the condition is not fulfilled, it is recommended to measure the detail using stereoscopic or monoscopic measurement,
- e) it is recommended to measure the details twice in a way that guarantees the independence of observation; the final result is the arithmetic mean of the measured coordinates, while for the horizontal measurements the difference of the X and Y coordinates from the two measurements may not exceed 5 cm; an optional form of verification is the measurement of the detail on 2-3 orthorectify images.

2.5. Height measurement of unmarked pickets in the field

For unmarked pickets in the field, a height measurement using a point cloud from automatic photo matching and a digital terrain model (DTM) or digital surface model (DSM) derived from point cloud processing is acceptable.

- a) the principles of image capture and aerotriangulation given in sections 2.1 and 2.2 shall be followed
- b) DTM and DSM grid resolution ≤ 10 cm,
- c) point cloud density in the surrounding of the picket ≥ 10 points /m²,
- d) used data should be visually evaluated to eliminate artefacts,
- e) measurement should be limited to locations for which height distortions due to vegetation can be excluded.

2.6. Horizontal measurement of the details from II and III group

- a) the maximum GSD of the photos should be ≤ 10 cm, the pixel size of an orthoimage (orthomosaic) or an orthophotomap cannot be larger than the GSD of the photos,
- b) requirements given in point 2.2) have to be fulfilled for 3 times increased accuracy parameters (mean errors and maximum differences) when measuring details of group II, and for measuring details of group III an increase by 5 times is acceptable.

2.7. Technical report contents

- a) basic characteristics of the equipment used to take the photos: type of aircraft, nominal cruising speed, camera calibration parameters, camera calibration method or information about the lack of calibration and determination of the internal orientation elements by self-calibration, matrix type, pixel size, detector size [μm], nominal focal length of the lens, the way the lens was focused,
- b) parameters of taken images: GSD (minimum and maximum), nominal side and front overlap of images, minimum and maximum flight altitude, lighting conditions: cloud cover of the sky or other meteorological phenomena influencing taken images, days and time of beginning and end of taking the images,
- c) description of method of signaling and measuring coordinates of GCP and check points, including mean errors of coordinates,
- d) description of method of measuring coordinates of check points mentioned in 2.2 d) with the average coordinate errors or information on the use of data gathered in the available spatial databases (such as Polish Land Survey database),
- e) in case of using satellite positioning for measurement of centers of image projections - information about equipment and measurement technique,
- f) report on aerotriangulation alignment,
- g) coordinate lists necessary to document that the conditions mentioned in points 2.2 and 2.4 are met.

3. ADDITIONAL RECOMMENDATIONS

Software used for photogrammetric processing with UAV often minimizes user involvement in controlling the progress of each step. Critical for the final accuracy is aerotriangulation. An integral element of aerotriangulation of BSP images is self-calibration, that is, estimation of camera parameters: focal length, principal point position, distortion parameters. The increasing number of aerotriangulation unknowns is less significant than the fact that calibration parameters are correlated with unknowns that are the basic aim of aerotriangulation, i.e. elements of photo orientation. The user should examine the scope that the software leaves for controlling the aerotriangulation. It is valuable to be able to control balanced aerotriangulation alignment and correct distortion removal.

3.1. Aerotriangulation - balanced alignment

Balanced alignment takes place when the quotient of the average errors of observations declared before aerotriangulation alignment and the average errors after alignment is within the range of 0.75 to 1.25. The rule applies to coordinates of GCPs, external orientation elements measured during the flight, and to the accuracy of point identification on images in pixels.

If the GCPs are measured with RTK technique, it is recommended to give the accuracy on the level of 2-3 cm (average errors of coordinates). If there is the option of separating the accuracy of X, Y and H, then the height component should be given as 1.5 times greater than the horizontal accuracy. It is recommended to declare the accuracy of GPCs on images as >

0.5 pixel. The effects of too high input accuracies for aerotriangulation should show up on check points, but with their small number or unrepresentative distribution the phenomenon may be unnoticeable.

It should also be considered that even a single erroneous measurement of a point on an image can have an impact on the aerotriangulation accuracy. It is recommended to verify the average errors of measurement of points on the images, their value should not exceed 1 pixel.

3.2. Self-calibration

The cameras used in the UAV should be treated as non-metric, as they do not guarantee the constancy of the internal orientation elements over time. For this reason, it is recommended to determine the calibration parameters by self-calibration.

In order to verify the correctness of the self-calibration process, it is beneficial to observe the distribution of the residual errors of the photo after distortion removal. The distribution of these errors should be random and the magnitudes smaller than 1 pixel. The systematic distribution of residual errors may suggest the incompatibility of the camera distortion model with its real character. Lens distortion is usually effectively modeled by functions describing radial and tangential distortion, through parameters k and p , respectively. It is worth noting that it is not always necessary to use the full list of lens distortion parameters. In order to choose the correct parameterization of the lens distortion model, it is recommended to start the process with a minimum number of parameters and gradually increase it. A specific type of distortion occurs for cameras with Rolling Shutter sensors, then it is necessary to use an additional correction model. It is ineffective to try to remove Rolling Shutter distortion by including the parameters of potential matrix affine, which usually occur together with the lens distortion model (as b_1 and b_2).

Note that the accuracy of determining camera calibration parameters also depends on their constancy during the raid. For this reason:

- in the case of varifocal lenses, the focal length of the lens must not be allowed to change throughout the flight (mechanical locking of the moving elements is recommended),
- changing focus of the camera (Auto Focus mode) during the flight may cause significant errors in the alignment process,
- cameras equipped with moving image stabilization elements (optical stabilization and/or mechanical stabilization) should not be used for photogrammetric measurements. These systems cause shifts of the principal point between successive images.

As it was mentioned at the beginning of this chapter, in case of cameras used in UAV, it is recommended to determine calibration parameters by self-calibration. However, it may be helpful to calibrate the camera on the calibration field in advance, but the parameters determined in this way should be treated as approximate values. The performed tests show that especially lens distortion parameters are relatively constant between flights, and the biggest fluctuations concern the coordinates of the principal point. The parameters determined on the calibration field make it possible to verify if the adjustment process did not falsify the results of the self-calibration due to strong correlation between the external and internal orientation elements. Such situation can occur for example when performing a

flight over flat terrain, where there is no significant change in the scale of images between the imaging.

While performing calibration on the calibration field, it should be remembered that the focal length and focus of the lens should be set to the working distance (according to the planned flight).

3.3. Use of UAVs equipped with RTK/PPK

To measure the exterior orientation elements, GNSS (center of image projection position) and INS (image spatial orientation angles) techniques are used. In simpler solutions, GNSS receivers of navigation class are used, but there is a widespread use of RTK (or equivalent PPK technique). Navigation class gives accuracy of a few meters and RTK a few centimeters. For angular measurements, a low-end INS (the so-called MEMS type), with accuracies of a few degrees, is usually used.

The use of RTK has a very positive impact on the accuracy of aerotriangulation, significantly reducing the need to use GCPs. Positive impact of RTK is manifested in reduction of deformation of vertical profile of flight rows, an error typical for photogrammetry when there is low density of GCPs along flight rows.

3.4. Height measurements

For photogrammetric measurements, the correlation between the exterior and interior orientation elements has the greatest impact on the accuracy of height measurements. With flat terrain, there is a high probability that the flight altitude and focal length will have large uncertainties. This will decrease the measurement accuracy of the terrain detail element located above the terrain, mainly the H coordinate will be distorted.

For photogrammetric height measurements, it is recommended to use UAV with RTK/PPK system. When the UAV is equipped with navigation GNSS, it is recommended to increase the number of photopoints and their distribution, taking into account the greatest possible height variation.

Another method to increase measurement accuracy is to take photos with variable flight altitude, which reduces correlations of unknowns estimated during aerotriangulation. An alternative is to make a second flight at a different altitude, but it is sufficient for it to cover parts of the area being measured (15-25%).

3.5. Corridor mapping

Areas with an elongated shape (corridors) present special challenges for the photogrammetric method. It is recommended to design at least three rows orientated parallel to the main axis of the study area. Ground control points (including check points) should be located along both edges of the study area and with lower density in the axis, and their number should be greater than planned for an area of more regular shape. The use of UAVs equipped with an RTK/PPK receiver is strongly recommended.

3.6. Performing photogrammetric flights in mountain and foothill areas

Photogrammetric flights in mountain and foothill regions require special attention to safety (separation from terrain obstacles) and proper planning of the mission.

In case of classic flight configuration (with constant absolute altitude) terrain denivelations influence the change of terrain pixel size and the value of side and front overlaps. This influence is proportional to the quotient of the difference in terrain elevation in the study area to the relative altitude of the flight. In the case of small denivelations reaching at most 20% of the flight altitude, the change of the imaging scale has a positive effect on the accuracy of photogrammetric block alignment by reducing the correlation between the elements of external and internal camera orientation. However, in the case when on the study area the ground denivelations exceed the value of 20% of the flight altitude it is necessary to plan the photogrammetric mission with a variable absolute altitude (constant flight altitude in relation to the terrain).

3.7. Additional control measurement

If the processing software does not offer the possibility of supervising the aerotriangulation alignment and this occurs in coincidence with an unfavorable distribution of check points or their deficiency forced by field conditions, then it is worth recommending an additional control measurement. Rules for such measurement:

- a) use of an independent land survey technique, optionally one can use data collected in the available spatial databases may be used, provided that the accuracy adequate for the purpose of control measurement is ensured,
- b) when the aim of the works is a horizontal measurement of details of the 1st group, it is worthwhile to measure at least 10 field details distributed as evenly as possible in the block area, the absolute values of the differences between the X and Y coordinates should be < 10 cm
- c) when the aim of the work is the height measurement it is worth to measure the height of at least 10 points; average error of the height < 5 cm, the absolute values of the differences of the coordinates $H < 7$ cm.

It should also be kept in mind that many programs for aligning images from UAV treat check points as tie points. This may overestimate the accuracy of determining their coordinates.

4. SUMMARY

This paper presents a series of general recommendations that can be regarded as informal guidelines for the use of photogrammetry with UAVs. The recommendations are supplemented with recommendations on various aspects of photogrammetric measurement. It should be emphasized that photogrammetry with UAVs can provide accuracy of geodetic horizontal and height measurements, however it requires adherence to the described rules. They do not exhaust all the measurement cases, so it is necessary to adjust the variant solutions to the characteristics of the solved task.

Measurement of building contours should be approached with particular caution. Definitely, a stereo or multiple mono measurement on the images should be preferred. When proceeding to photogrammetric measurement of buildings, one should keep in mind that it is very difficult to make a complete measurement of contour breakpoints. In order to increase the completeness, it is recommended to use oblique images and align them together with vertical ones or cross-grid flight plan. The use of oblique images is not included in these recommendations.

BIBLIOGRAPHY

Ferrer-González, E.; Agüera-Vega, F.; Carvajal-Ramírez, F.; Martínez-Carricondo, P. UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points. *Remote Sensing*, 12, 2447.

Kurczyński Z., Bakula K., Karabin M., Kowalczyk M., Markiewicz J. S., Ostrowski W., Podlasiak P., & Zawieska D., (2016). The Possibility of Using Images Obtained From the UAS in Cadastral Works. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 41, 909-915.

Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Luhmann, T., Hastedt, H., & Eilers, M., (2020). Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 43, 485–492.

Rozp., (2011). Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego.

Rozp., (2020a) Rozporządzenie Ministra Rozwoju z 18 sierpnia 2020 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego

Rozp., (2020b). Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 20 lipca 2020 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu

Stöcker C., Nex F., Koeva, M., & Gerke M., (2019). UAV-Based Cadastral Mapping: an Assessment of the Impact of Flight Parameters and Ground Truth Measurements on The Absolute Accuracy of Derived Orthoimages. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 42, 613–617.

Stöcker C, Nex F, Koeva M, & Gerke M., 2020. High-Quality UAV-Based Orthophotos for Cadastral Mapping: Guidance for Optimal Flight Configurations. *Remote Sensing* 12(21), 3625.

Tang R., Fritsch D., & Cramer M., (2012). New rigorous and flexible Fourier self-calibration models for airborne camera calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 71, 76-85.

Wiącek P., (2020). The database for multifactorial UAV accuracy assessments. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 43, 163–172.

GLOSSARY OF TERMINOLOGY

UAV - unmanned aerial vehicle (in accordance with the Aviation Law)

UAV mission - uninterrupted UAV flight during which images are taken that form a block of images

Block of photos - appropriately planned and recorded set of photos in which there is a side and front overlap of images

GCP (Ground Control Point) - a field point with survey-grade accuracy. Clearly identified in the field and on images; usually the point is signalized in the field

Check point - A point with the same characteristics as a GCP but does not participate in the aerotriangulation process. It is only used to check the accuracy of the aerotriangulation

EO - Elements of the photo's external orientation - XYZ coordinates of the projection center and three angles defining the photo's position in relation to the terrain coordinate system

IO - elements of the internal orientation of the camera - parameters defining the central projection realized by the camera: focal length, principal point position and distortion coefficients

Orthoimage - the result of processing a single image from the centroid to the orthogonal projection together with providing the georeferencing in the selected coordinate system

Orthomosaic - the image of the earth's surface created by mosaicking orthoimages, covering the entire image processing area, optionally subdividing the orthomosaic into smaller modules to improve digitization of details

Aerotriangulation - computational process in which the elements of exterior orientation of images are estimated together with the elements of interior orientation of the camera.

Coordinate difference - The difference between a reference value (from a field measurement) and the estimated value (from the photogrammetric processing)

Coordinate Mean Error - The mean square error of the coordinate differences,

RTK (Real Time Kinematic) - satellite measurement technique using differential receivers and a single base station. Coordinates are determined in real time on the basis of corrections received from the base station and position estimation based on the previous trajectory

PPK (Post Processing Kinematic) - a satellite measurement technique using differential receivers. Coordinates are determined in the post-processing on the basis of recorded observation data from the mobile receiver and one or more base stations.

RTN (Real Time Network) - satellite measurement technique similar to RTK method with the difference that corrections are estimated on the basis of measurements from at least two base stations.

POMIARY GEODEZYJNE METODĄ FOTOGRAMETRYCZNĄ Z BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH

SŁOWA KLUCZOWE: BSP, aerotriangulacja, ortomozaika, stereo, chmura punktów

STRESZCZENIE: Artykuł przedstawia jak należy wykonywać pomiary z użyciem BSP, aby spełniały wymagania stawiane pomiarom geodezyjnym przez polskie przepisy techniczne. Wpierw dokonano przeglądu literatury skupionej na badaniu wpływu różnych czynników kształtujących dokładność fotogrametrii z BSP. Następnie, na podstawie doświadczeń autorów, sformułowano szereg zaleceń stanowiących zbiór dobrych praktyk przy planowaniu, wykonywaniu zdjęć z BSP oraz ich przetwarzaniu i końcowym pomiarze. Wskazano kluczowe elementy metody, jak pokrycie zdjęć, liczbę i rozłożenie fotopunktów, zrównoważone wyrównanie aerotriangulacji, metody pomiaru szczegółów terenowych, zakres wykorzystania ortomozaiki i chmury punktów jako materiału pomiarowego. Stwierdzono, że staranne przestrzeganie podanych zasad powoduje, że fotogrametrię z BSP można wykorzystywać jako metodę pomiarów sytuacyjno-wysokościowych. Jednocześnie zwrócono uwagę, że ze szczególną ostrożnością należy podchodzić do pomiaru konturów budynków.

1. WPROWADZENIE

Jednym z efektów dynamicznego rozwoju bezzałogowych statków powietrznych (BSP) jest powstanie fotogrametrii niskiego pułapu. Fotogrametria z BSP ma wiele zalet: prace terenowe trwają krótko, nie jest konieczne wejście na teren posesji, w porównaniu do fotogrametrii ze statków załogowych jest mniej wrażliwa na warunki atmosferyczne, najwięcej problemów sprawia silny wiatr. Ten nowy segment fotogrametrii ma za sobą kilkuletnie doświadczenia, jednoznacznie potwierdzające przydatność w pomiarach sytuacyjno-wysokościowych wykonywanych w ramach tzw. prac geodezyjnych w rozumieniu ustawy Prawo geodezyjne i kartograficzne. Fotogrametria z BSP nie doczekała się formalnego ujęcia w polskich przepisach z zakresu geodezji i kartografii. Co prawda przed laty fotogrametria analogowa miała swoje wytyczne techniczne, jednak trudno mówić o istotnym związku technologii analogowej z opartą na BSP. W standardach technicznych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych ([Rozp., 2011](#)) wprowadzono pojęcie „geodezyjny pomiar fotogrametryczny”, ale powiązane z nim zapisy były niespójne. W dokonanej w 2020 r. aktualizacji standardów pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych zrezygnowano z wytycznych technicznych dedykowanych metodom pomiarowym, ograniczając się do wymienienia metod stosowanych do realizacji osnów pomiarowych ([Rozp., 2020a](#)). Nowe standardy dopuszczają stosowanie każdej metody, która gwarantuje uzyskanie wymaganych dokładności. O wyborze metody pomiarowej decyduje kierownik prac geodezyjnych, na którym spoczywa odpowiedzialność za jakość wyników. Wraz z wynikami prac geodezyjnych do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego jest przekazywana dokumentacja, w której m.in. opisuje się metodę wraz z inżynierskim uzasadnieniem uzyskanych dokładności. Przy opracowaniu dokumentacji dla pomiaru wykonanego przy pomocy fotogrametrii z BSP rodzą się wątpliwości: jak ująć opis metody w sprawozdaniu technicznym, jakie elementy metody wyszczególnić oraz jak wykazać, że metoda zapewnia wymaganą dokładność. Celem artykułu jest sformułowanie dobrych praktyk stosowania fotogrametrii z BSP, których przestrzeganie daje wysokie prawdopodobieństwo uzyskania dokładności wymaganej przepisami.

Nadmienić należy, że przepis regulujący zasady tworzenia baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu ([Rozp., 2020b](#)) nie odnosi się do fotogrametrii z BSP. Dokument ten dotyczy wykonywania zdjęć i produktów pochodnych oraz ich gromadzenia w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym, natomiast nie ujmuje fotogrametrii jako geodezyjnej metody pomiarowej szczegółów terenowych.

Przeoglądając literaturę łatwo znaleźć publikacje poświęcone stosowaniu BSP do „mapowania” czy zasilania baz 3D. Ale większość artykułów koncentruje się na dokładności aerotriangulacji, ortomozaiki lub jakości gęstej chmury punktów, przykładając małe znaczenie do pomiaru szczegółów w rozumieniu geodezyjnym.

[Kurczyński et al. \(2016\)](#) badali, czy fotogrametria z BSP nadaje się do pomiaru konturów budynków i granic działek ewidencyjnych. Wykonany eksperyment potwierdził, że uzyskanie dokładności sytuacyjnej < 10 cm jest w zasięgu metody, jednak problem tkwi w identyfikacji szczegółów terenowych (narożniki budynków, punkty załamania granic). Testowano pomiar budynków metodą stereoskopową i monoskopową z wielu zdjęć, natomiast granice mierzono na ortofotomapie. Pomimo pokrycia podłużnego zdjęć 80%, a poprzecznego 60%, kompletność pomiaru budynków nie była wysoka. Metoda monoskopowa okazała się nieznacznie dokładniejsza oraz efektywniejsza od stereoskopowej. Pomiar monoskopowy realizowany był z wykorzystaniem funkcji automatycznego wskazywania przez program zdjęć, na których był odwzorowany szczegół, a w pomiarze stereo taka funkcjonalność nie była zastosowana.

[Stöcker et al. \(2019, 2020\)](#) analizowali dokładności uzyskane ze zdjęć z BSP w aspekcie pomiarów dla katastru. Obszary badawcze miały powierzchnię od 0.14 do 8.70 km², rozmiary GSD w zakresie 2.1 do 5.8 cm. Z publikacji wynikają następujące rekomendacje odnośnie do pokrycia zdjęć: generalnie 70/70%, dla terenów z przewagą roślinności, a w szczególności leśnych zwiększenie pokrycia do 80-90%, większe pokrycie również, gdy celem jest identyfikacja przyziemnych obrysów budynków. Autorzy zalecają stosowanie siedmiu równomiernie rozmieszczonych fotopunktów dla bloku zdjęć. Nie jest to duża liczba, zważywszy, że zdjęcia były wykonane bez pomiarów środków rzutów techniką RTK/PPK, przy czym obszary badawcze miały w trzech przypadkach kształt prawie prostokątny a w pozostałych lekko nieregularny. Na szczególne podkreślenie należy sformułowany przez autorów wniosek, że dokładności uzyskane z aerotriangulacji na fotopunktach kontrolnych są zwykle lepsze niż dokładności pomiaru na ortomozaice. Dlatego sugerują wykonanie dodatkowej kontroli na ortomozaice, aby upewnić się, czy wyniki są akceptowane dla katastru.

W rozwoju fotogrametrii z BSP istotne znaczenie miało wprowadzenie bezpośredniej georeferencji poprzez pomiar położenia środków rzutów techniką RTK i technikami pochodnymi. [Przybilla et al. \(2020\)](#) przeanalizowali zalety stosowania systemów RTK oraz wpływ rozkładu fotopunktów na dokładność opracowań fotogrametrycznych. Do badań wykorzystany został DJI Phantom 4 RTK oraz DJI Matrice 210 v2 RTK. Wyniki potwierdziły, że RTK pozwala na uzyskanie dokładności pomiaru współrzędnych środków rzutów na poziomie kilku centymetrów. Zwrócono jednocześnie uwagę, że w trakcie lotu mogą pojawić się sytuacje wpływające na obniżenie dokładności pomiaru. Analiza wyników uzyskanych z różnych scenariuszy wyrównania pokazała, że systemy RTK pozwalają na wykonywanie wysoko jakościowych opracowań fotogrametrycznych przy ograniczonej liczbie fotopunktów. Autorzy zalecają stosowanie minimum jednego fotopunktu, dzięki czemu niezależnie od obszaru opracowania uzyskiwano redukcję błędów wysokościowych

do poziomu kilku centymetrów. Jako przyczynę wskazano niepewność wyznaczenia długości ogniskowej w procesie samokalibracji. Efekt ten był szczególnie widoczny nad obszarem o niewielkich różnicach wysokości.

[Wiacek \(2020\)](#) badał jak i w jakim stopniu parametry procesu wyrównania, metody pomiaru środków rzutów oraz ilość fotopunktów wpływają na dokładność aerotriangulacji. W ramach badań wykorzystano nalot wykonany samolotem bezałogowym BIRDIE wyposażonym w aparat Sony RX1R II. W trakcie jednego lotu wielokrotnie pokryto zdjęciami obszar opracowania, tworząc w ten sposób dziewięć wariantów konfiguracji lotu zróżnicowanych pod kątem wielkości piksela terenowego, liczby zdjęć i sposobu usytuowania szeregów. Uwzględniając różne konfiguracje czynników wpływających na proces wyrównania, zidentyfikowano łącznie 1152 wariantów, które następnie analizowano za pomocą metody ANOVA w celu określenia czy poszczególne czynniki wpływają w sposób istotny statystycznie na proces wyrównania. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono między innymi, że czynnikiem mającym bardzo duży wpływ na dokładność jest sposób modelowania dystorsji kamery. W przypadku analizowanego w artykule aparatu Sony RX1R II, w którym dystorsja ma bardzo duże wartości i nieregularny rozkład zauważono istotną redukcję błędów opracowania przy zastosowaniu dodatkowych parametrów kalibracji ([Tang et al., 2012](#)). Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły, że: (1) liczba fotopunktów wpływa na poprawę dokładności, przy czym powyżej dziewięciu fotopunktów wzrost dokładności jest nieznaczny, (2) wykorzystanie do pomiaru środków rzutów techniki PPK umożliwia uzyskanie dokładności na poziomie pojedynczych centymetrów bez wykorzystania fotopunktów. W artykule zwrócono również uwagę, że wykonanie opracowania z wykorzystaniem szeregów usytuowanych na różnej wysokości względem terenu pozwala na zwiększenie dokładności. Wykazano, że parametry wyrównania, takie jak dokładność pomiaru punktów na zdjęciach czy dokładność a priori współrzędnych zdjęć, mają istotny wpływ na końcową dokładność. Jednocześnie zauważono, że niektóre z tych parametrów wykazują zależności międzygrupowe, dlatego sposób doboru ich wartości powinien być wykonywany z uwagą i pogłębioną analizą.

[Ferrer-González et al. \(2020\)](#) przedstawili analizę wpływu liczby i rozmieszczenia fotopunktów na dokładność wyrównania w przypadku opracowań obejmujących obszary o charakterystyce liniowej. Autorzy zwrócili uwagę na konieczność rozmieszczenia fotopunktów wzdłuż brzegów wstęgi opracowania.

2. ZALECENIA DLA FOTOGRAMETRII Z BSP

Formułując wytyczne wydzielono następujące zagadnienia dotyczące pomiarów metodą fotogrametryczną z BSP:

- planowanie lotu BSP wraz z lokalizacją fotopunktów i fotopunktów kontrolnych,
- aerotriangulacja wraz z weryfikacją fotopunktów kontrolnych,
- pomiar szczegółów terenowych (lub ich elementów),
- pomiar szczegółów na ortomozaice,
- pomiar wysokościowy pikiet niemarkowanych w terenie,
- pomiar sytuacyjny szczegółów sytuacyjnych II i III grupy,
- skład sprawozdania technicznego.

W dalszej części sformułowano zasady postępowania dla poszczególnych zagadnień. Oś główną wytycznych tworzą pierwsze trzy zagadnienia, które są dedykowane pomiarom sytuacyjnym szczegółów terenowych I grupy oraz pomiarom wysokościowym szczegółów naziemnych. Podkreślić należy, że rekomenduje się wykonywanie pomiaru sytuacyjnego i wysokościowego poprzez pomiar na zdjęciach (pkt.3.3). Przypadki dopuszczenia pomiaru na produktach powstałych w wyniku przetwarzania zdjęć podane są w pkt. 3.4 i 3.5. Kryteria pomiarów sytuacyjnych szczegółów II i III grupy są podane w pkt 3.6, natomiast w pkt. 3.7 przedstawiono zawartość sprawozdania technicznego z pomiaru metodą fotogrametryczną.

2.1. Planowanie lotu BSP wraz z lokalizacją fotopunktów i fotopunktów kontrolnych

- a) terenowa wielkość piksela zdjęć powinna być ≤ 3 cm, terenowy rozmiar piksela ortomozaiki ≤ 3 cm,
- b) projektowane pokrycia podłużne i poprzeczne zdjęć powinny wynosić co najmniej 70% dla terenów zurbanizowanych. Dla terenów rolnych, a w szczególności gdy znaczną część obszaru nalotu pokrywają tereny z roślinnością wysoką, zaleca się zwiększenie pokrycia do 80%. Zwiększenie pokrycia zaleca się także gdy warunki atmosferyczne wpływają negatywnie na stabilność lotu,
- c) w obszarze bloku zdjęć rozmieszcza się co najmniej 10 fotopunktów; fotopunkty lokalizuje się w narożach bloku zdjęć, na brzegach bloku wzdłuż kierunku nalotu oraz wewnątrz bloku; jeśli na opracowanie składa się kilka bloków zdjęć konieczne jest zastosowanie fotopunktów w pasie wzajemnego pokrycia bloków; współrzędne fotopunktów określa się na drodze geodezyjnego pomiaru terenowego,
- d) w obszarze bloku zdjęć rozmieszcza się co najmniej 10 fotopunktów kontrolnych, rozłożonych równomiernie w miejscach maksymalnie oddalonych od fotopunktów; współrzędne fotopunktów kontrolnych określa się na drodze geodezyjnego pomiaru terenowego, na potrzeby pomiaru fotopunktów oraz fotopunktów kontrolnych rekomenduje się wykorzystanie metody RTK/RTN.
- e) jeśli podczas lotu zostały pomierzone środki rzutów techniką PPK/RTK/RTN to dopuszcza się zmniejszenie liczby fotopunktów; w przypadku rezygnacji z fotopunktów rozmieszczenie fotopunktów kontrolnych, poza lokalizacją wewnątrz bloku, powinno dodatkowo uwzględnić naroża i brzegi bloku zdjęć.

Przedstawione wymagania dotyczą bloku zdjęć uzyskanego z jednego lotu. W przypadku gdy obszar opracowania wymaga kilku lotów, każdy z nich powinien spełniać wymagania niezależnie. Wyjątek stanowią pomiary wysokościowe nad terenami płaskimi, o których mowa w rozdziale 3.4. W ich przypadku rekomenduje się wykonanie podwójnego nalotu z uwzględnieniem zmiany wysokości przelotowej. Tego typu naloty powinny być opracowywane w ramach jednego procesu wyrównania.

Fotopunkty, w tym kontrolne, mogą być szczegółami terenowymi lub punktami sygnalizowanymi sztucznie. W najbliższym otoczeniu punktu teren powinien być płaski lub nieznacznie nachylony. Najkorzystniejsze są szczegóły terenowe stanowiące środki elementów symetrycznych (nt. środki studzienek kanalizacyjnych). Zalecanym kształtem znaków sztucznych jest krzyż, który może być ograniczony do ramion tworzących literę L. Znaki sztuczne maluje się na twardej nawierzchni albo przytwierdza się do podłoża plansze

lub wstęgi o szerokości 3 x GSD i długości > 6 x GSD liczonej od centrum znaku. Kolor znaków powinien kontrastować z tłem: biały dla ciemnego tła, pomarańczowy dla szarego. Powierzchnia znaku powinna być matowa.

2.2. Aerotriangulacja wraz z weryfikacją fotopunktów kontrolnych

- a) zaleca się wykonywać aerotriangulację oddzielnie dla każdego bloku uzyskanego z jednego lotu,
- b) aerotriangulacja powinna być obliczona w układzie współrzędnych prostokątnych płaskich wraz z wysokościami odniesionymi do geoidy; zalecenie nie wyklucza wstępnego obliczenia w układzie globalnym bez udziału fotopunktów,
- c) błąd średni współrzędnych X i Y fotopunktów uzyskanych z aerotriangulacji < 3.5 cm; średni błąd wsp. H < 5 cm, przy czym wartości bezwzględne różnic współrzędnych X i Y muszą być < 7 cm, wartości bezwzględne różnic współrzędnej H < 10 cm,
- d) dokładność aerotriangulacji powinna być zweryfikowana na fotopunktach kontrolnych; błąd średni współrzędnych X i Y < 5 cm, błąd średni wysokości < 7 cm, przy czym wartości bezwzględne różnic współrzędnych X i Y < 10 cm, wartości bezwzględne różnic współrzędnej H < 14 cm,
- e) w przypadku gdy wykonywany jest pomiar wysokościowy elementów obiektów budowlanych i urządzeń budowlanych oraz pikiet markowanych w terenie wówczas błędy średnie wysokości oraz różnice podane w ppkt. c i d muszą być mniejsze o co najmniej 50%.

2.3. Pomiar szczegółów terenowych

- a) pomiar szczegółów odbywa się bezpośrednio na zdjęciach, czyli metodą stereoskopową lub na drodze analitycznego wcięcia w przód na podstawie pomiaru monoskopowego na co najmniej trzech zdjęciach,
- b) w przypadku metody stereoskopowej należy wykonać pomiar szczegółów na dwóch modelach stereoskopowych; ostateczny wynik stanowi średnią arytmetyczną współrzędnych X i Y, różnice współrzędnych X, Y i H z dwóch pomiarów nie mogą przekraczać 5 cm; gdy pomiar wysokościowy dotyczy elementu szczegółu terenowego o wymaganej dokładności 5 cm ([Rozp., 2020a](#)) wówczas różnica H nie może przekraczać 2.5 cm,
- c) w przypadku pomiaru monoskopowego na N zdjęciach ($N \geq 3$), należy dodatkowo obliczyć wcięcie z co najmniej jednej pary zdjęć wybranej spośród N zdjęć – różnice współrzędnych nie mogą przekraczać wartości podanych dla pomiaru stereoskopowego.

2.4. Pomiar sytuacyjny na ortomozaice

Dopuszcza się pomiar sytuacyjny szczegółów I grupy na ortomozaice jeśli szczegół leży na terenie i odróżnia się od otaczającego tła. Warunki te często spełniają elementy naziemne podziemnego uzbrojenia terenu.

- a) terenowy rozmiar piksela ortomozaiki ≤ 3 cm,
- b) do ortorektyfikacji należy wykorzystać NMPT lub NMT uzyskany z gęstej chmury punktów w ramach opracowywanego projektu fotogrametrycznego; alternatywą jest wykorzystanie NMT z lotniczego skaningu laserowego; należy zwrócić uwagę, że NMPT i NMT opracowane automatycznie wymagają przed ortorektyfikacją co najmniej wizualnej weryfikacji i poprawy artefaktów,
- c) dokładność ortorektyfikacji powinna zostać zweryfikowana na wszystkich fotopunktach kontrolnych; błąd średni współrzędnych X i Y < 6 cm, wartości bezwzględne różnic współrzędnych X i Y < 8 cm; ponadto sprawdzane są różnice pomiędzy wysokościami uzyskanymi z modelu wysokościowego użytego do ortorektyfikacji a współrzędnymi H fotopunktów i fotopunktów kontrolnych, wartości bezwzględne różnic < 20 cm,
- d) przed pomiarem szczegółów leżących w bliskim sąsiedztwie obiektów wznoszących się nad terenem (drzew, budynków, samochodów) należy sprawdzić, czy NMPT/NMT nie wykazuje deformacji rozciągających się na miejsce pomiaru; w przypadku niespełnienia warunku zaleca się pomiar szczegółu za pomocą pomiaru stereoskopowego lub monoskopowego,
- e) zaleca się dwukrotny pomiar szczegółów w sposób gwarantujący niezależność obserwacji, ostateczny wynik stanowi średnią arytmetyczną mierzonych współrzędnych, przy czym dla pomiaru sytuacyjnego różnica współrzędnych X i Y z dwóch pomiarów nie może przekraczać 5 cm; opcjonalną formą weryfikacji jest pomiar szczegółów na 2-3 ortoobrazach.

2.5. Pomiar wysokościowy pikiet niemarkowanych w terenie

W przypadku pikiet niemarkowanych w terenie dopuszcza się pomiar wysokościowy z wykorzystaniem chmury punktów z automatycznego dopasowania zdjęć oraz numerycznego modelu terenu i numerycznego modelu pokrycia terenu uzyskanych z przetwarzania chmury punktów.

- a) należy zachować zasady wykonania zdjęć i aerotriangulacji podane w pkt 2.1 i 2.2,
- b) interwał siatki NMT i NMPT ≤ 10 cm,
- c) gęstość chmury punktów w otoczeniu pikiety ≥ 10 pkt /m²,
- d) wykorzystane dane powinny być ocenione wizualnie celem wyeliminowania artefaktów,
- e) pomiar należy ograniczyć do miejsc, dla których można wykluczyć zniekształcenia wysokości spowodowane roślinnością.

2.6. Pomiar sytuacyjny szczegółów sytuacyjnych II i III grupy

- a) maksymalna terenowa wielkość piksela zdjęć powinna być ≤ 10 cm, terenowy rozmiar piksela ortoobrazu (ortomozaiki) lub ortofotomapy nie może być większy od terenowego rozmiaru piksela zdjęć,
- b) W sytuacji gdy pomiar dotyczy II grupy dokładnościowej wymagania podane w punkcie 2.2 muszą być spełnione dla 3-krotnie zwiększonych błędów średnich i różnic maksymalnych, dla pomiaru szczegółów III grupy dopuszcza się zwiększenie 5-krotne.

2.7. Skład sprawozdania technicznego

- a) podstawowa charakterystyka sprzętu użytego do wykonania zdjęć: typ statku powietrznego, nominalna prędkość przelotowa, parametry kalibracji aparatu (kamery), sposób jej wykonania lub informacja o braku kalibracji i wyznaczaniu elementów orientacji wewnętrznej na drodze samokalibracji, typ matrycy, rozmiar w pikselach, rozmiar detektora [μm], nominalna ogniskowa obiektywu, sposób ogniskowania obiektywu,
- b) parametry wykonanych zdjęć: wielkość piksela terenowego zdjęcia (minimalna i maksymalna), nominalne pokrycie poprzeczne i podłużne zdjęć, minimalna i maksymalna wysokość lotu, warunki oświetlenia: pokrycie nieba chmurami lub inne zjawiska meteorologiczne mające wpływ na wykonane zdjęcia, dni oraz czas rozpoczęcia i zakończenia wykonania zdjęć,
- c) opis sposobu sygnalizacji i pomiaru współrzędnych fotopunktów i fotopunktów kontrolnych wraz z błędami średnimi współrzędnych,
- d) opis metody pomiaru współrzędnych punktów kontrolnych, o których mowa w pkt. 2.2 d) wraz z błędami średnimi współrzędnych lub informacja o wykorzystaniu danych zgromadzonych w PZGiK,
- e) w przypadku stosowania pozycjonowania satelitarnego do pomiaru środków rzutów - informacja o sprzęcie i technice pomiarowej,
- f) raport z wyrównania aerotriangulacji,
- g) wykazy współrzędnych niezbędne dla udokumentowania spełnienia warunków, o których mowa w pkt. 2.2 i 2.4.

3. DODATKOWE REKOMENDACJE

Oprogramowanie używane do opracowań pomiarowych z BSP często minimalizuje udział użytkownika w sterowaniu przebiegiem poszczególnych etapów. Krytyczny wpływ na końcową dokładność ma aerotriangulacja. Integralnym elementem aerotriangulacji zdjęć z BSP jest samokalibracja, czyli estymacja parametrów kamery: stała kamery (ogniskowa), położenie punktu głównego, parametry dystorsji. Samo zwiększenie liczby niewiadomych aerotriangulacji jest mniej znaczące niż fakt, że parametry kalibracji są skorelowane z niewiadomymi, które stanowią podstawowy cel aerotriangulacji, czyli z elementami orientacji zewnętrznej zdjęć. Użytkownik powinien sprawdzić, jakie pole działania pozostawia mu program w zakresie nadzoru nad aerotriangulacją. Cenna jest możliwość kontroli nad zrównoważonym wyrównaniem aerotriangulacji i poprawnym usunięciem dystorsji.

3.1. Aerotriangulacja - wyrównanie zrównoważone

Zrównoważone wyrównanie ma miejsce wtedy, gdy iloraz błędów średnich obserwacji deklarowanych przed wyrównaniem aerotriangulacji i błędów średnich po wyrównaniu mieści się w zakresie 0,75 do 1,25. Zasada dotyczy współrzędnych fotopunktów, mierzonych podczas wykonywania zdjęć elementów orientacji zewnętrznej oraz dokładności identyfikacji punktów na zdjęciach w pikselach.

W przypadku gdy fotopunkty są mierzone techniką RTK rekomenduje się podawać dokładność na poziomie 2-3 cm (błędy średnie współrzędnych). Jeśli jest opcja rozdzielania dokładności X , Y i H to składowa wysokościowa powinna być podana jako 1.5-krotnie większa od sytuacyjnych. Rekomenduje się deklarowanie dokładności pomiaru fotopunktów na zdjęciach jako > 0.5 piksela. Skutki sztucznie zawyżonych dokładności wejściowych do aerotriangulacji powinny się ujawnić na fotopunktach kontrolnych, ale przy małej ich liczbie lub niereprezentatywnym rozłożeniu zjawisko może być niezauważalne.

Należy mieć również na uwadze, że nawet pojedyncze błędne wskazanie punktów na zdjęciu może mieć przełożenie na dokładności aerotriangulacji. Zaleca się weryfikację błędów średnich pomiaru punktów na zdjęciach, ich wartość nie powinna przekraczać 1 piksela.

3.2. Samokalibracja

Kamery stosowane w BSP należy traktować jako niemetryczne, gdyż nie gwarantują stałości elementów orientacji wewnętrznej w czasie. Z tego powodu zaleca się wyznaczanie parametrów kalibracji w drodze samokalibracji.

W celu weryfikacji prawidłowości przeprowadzenia procesu samokalibracji korzystna jest obserwacja rozkładów błędów szczytkowych zdjęcia po usunięciu dystorsji. Rozkład tych błędów powinien mieć charakter losowy a wielkości mniejsze od 1 piksela. Systematyczny rozkład błędów szczytkowych może sugerować niezgodność modelu dystorsji kamery z jej rzeczywistym charakterem. Dystorsję obiektywu z reguły skutecznie modelują funkcje opisujące zniekształcenia radialne i tangencjalne, odpowiednio poprzez parametry k i p . Warto podkreślić, że nie zawsze jest konieczne wykorzystanie pełnej listy parametrów dystorsji obiektywu. W celu doboru właściwej parametryzacji modelu dystorsji obiektywu zaleca się rozpoczęcie procesu od minimalnej liczby parametrów i stopniowe jej zwiększanie. Specyficzny rodzaj dystorsji występuje dla kamer z matrycą typu Rolling Shutter, wtedy konieczne jest zastosowanie dodatkowego modelu korekcji. Nieskuteczne jest próba usunięcia zniekształceń Rolling Shutter przez włączenie parametrów potencjalnego afinizmu matrycy, które zwykle występują razem z modelem dystorsji obiektywu (jako b_1 i b_2).

Należy zwrócić uwagę, że dokładność wyznaczenia parametrów kalibracji kamery zależy również od ich stałości w trakcie wykonywania nalotu. Z tego względu:

- w przypadku obiektywów zmiennoogniskowych przez cały nalot nie można dopuścić do zmiany długości ogniskowej obiektywu (zaleca się mechaniczne zablokowanie elementów ruchomych),
- zmiana ogniskowania aparatu (tryb Auto Focus) w trakcie nalotu może powodować istotne błędy w procesie wyrównania,
- do pomiarów fotogrametrycznych nie powinny być wykorzystywane aparaty wyposażone w ruchome elementy stabilizacji obrazu (stabilizacja optyczna i/lub stabilizacja mechaniczna). Systemy te powodują przesunięcia punktu głównego pomiędzy kolejnymi zdjęciami.

Jak zostało wspomniane na początku rozdziału w przypadku kamer stosowanych w BSP zaleca się wyznaczenie parametrów kalibracji w drodze samokalibracji. Wykonanie wcześniejszej kalibracji kamery na polu testowym może jednak być pomocne, a wyznaczone w ten sposób parametry powinny być traktowane jako wartości przybliżone. Przeprowadzone

badania wskazują, że w szczególności parametry dystorsji obiektywu zachowują względną stałość pomiędzy nalotami, a największe fluktuacje dotyczą współrzędnych punktu głównego. Parametry wyznaczone na polu kalibracyjnym umożliwiają weryfikację czy w procesie deformacji nie doszło do zakłamania wyników samokalibracji wskutek silnej korelacji pomiędzy elementami orientacji zewnętrznej i wewnętrznej. Do takiej sytuacji może dojść np. wykonując nalot nad płaskim terenem, gdzie nie dochodzi do istotnej zmiany skali zdjęć pomiędzy zobrazowaniami.

Wykonując kalibrację na polu kalibracyjnym należy pamiętać, aby wartość ogniskowej oraz ogniskowania obiektywu były ustawione na odległość roboczą (zgodnie z planowanym nalotem).

3.3. Stosowanie BSP z RTK/PPK

Do pomiaru elementów orientacji zewnętrznej zdjęć w locie stosuje się technikę GNSS (pozycja środka rzutów) oraz INS (kąty orientacji przestrzennej zdjęcia). W prostszych rozwiązaniach wykorzystuje się odbiorniki GNSS klasy nawigacyjnej, ale rozpowszechnia się wykorzystanie RTK (lub równorzędnej techniki PPK). Klasa nawigacyjna daje dokładności kilkumetrowe a RTK kilkucentymetrowe. Natomiast do pomiar kątowych przeważnie wykorzystuje się INS niskiej klasy (tzw. typ MEMS), o dokładności kilku stopni. Zastosowanie RTK ma bardzo pozytywny wpływ na dokładność aerotriangulacji, w istotny sposób redukuje potrzebę stosowania fotopunktów. Pozytywny wpływ RTK objawia się w redukcji deformacji profilu pionowego szeregów, błędu typowego dla fotogrametrii, gdy jest mała gęstość fotopunktów wzdłuż szeregów.

3.4. Pomiary wysokościowe

Największy wpływ na dokładność pomiarów wysokościowych w przypadku pomiarów fotogrametrycznych ma korelacja pomiędzy elementami orientacji zewnętrznej i wewnętrznej. Przy płaskim terenie jest duże prawdopodobieństwo, że wysokość lotu i ogniskowa będą obarczone dużymi błędami. Wpłynie to na spadek dokładności pomiaru elementu szczegółu terenowego położonego nad terenem, zniekształcona będzie głównie współrzędna H.

Do fotogrametrycznych pomiarów wysokościowych rekomenduje się wykorzystanie BSP z systemem RTK/PPK. Gdy BSP jest wyposażony w GNSS nawigacyjny, zaleca się zwiększenie liczby fotopunktów oraz ich rozmieszczenie z uwzględnieniem jak największego zróżnicowania wysokościowego.

Inną metodą zwiększenia dokładności pomiaru jest wykonywanie zdjęć ze zmienną wysokością lotu, co zmniejsza korelacje niewiadomych liczonych podczas aerotriangulacji. Alternatywą jest wykonanie drugiego lotu na innej wysokości, przy czym wystarczy, aby obejmował on część opracowywanego obszaru (15-25%).

3.5. Opracowanie obszarów o charakterze liniowym

Obszary o wydłużonym kształcie stanowią szczególne wyzwanie dla metody fotogrametrycznej. Zaleca się projektowanie co najmniej trzech szeregów o osiach równoległych względem głównej osi obszaru opracowania. Fotopunkty (w tym kontrolne)

powinny być położone wzdłuż obu brzegów wstęgi opracowania a z mniejszą gęstością w osi, a ich liczba większa niż planuje się dla bloków o kształcie bardziej regularnym. Zdecydowanie rekomenduje się stosowanie BSP wyposażonych w odbiornik RTK/PPK.

3.6. Wykonywanie nalotów fotogrametrycznych na terenach górskich i podgórskich

Wykonywanie nalotów fotogrametrycznych na terenach górskich i podgórskich wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na bezpieczeństwo wykonywania nalotu (zachowanie separacji względem przeszkód terenowych), ale również na odpowiednie zaplanowanie misji fotolotniczej.

Przy klasycznym projekcie nalotu (wykonywanym na stałej wysokości bezwzględnej) deniwelacje terenu wpływają na zmianę wielkości piksela terenowego oraz wartości pokryć poprzecznych i podłużnych zdjęć. Wpływ ten jest proporcjonalny do ilorazu różnicy wysokości terenu na obszarze opracowania do wysokości względnej lotu. W przypadku niewielkich deniwelacji dochodzących maksymalnie do 20% wysokości lotu zmiana skali zobrazowania ma pozytywny wpływ na dokładność wyrównania bloku fotogrametrycznego zmniejszając korelację pomiędzy elementami orientacji zewnętrznej i wewnętrznej kamery. Jednak w przypadku, gdy na obszarze opracowania deniwelacje terenu przekraczają wartość 20% wysokości lotu konieczne jest zaplanowanie misji fotolotniczej ze zmienną wysokością bezwzględną (stałą wysokością lotu względem terenu).

3.7. Dodatkowy pomiar kontrolny

W przypadku gdy program nie daje możliwości nadzoru nad wyrównaniem aerotriangulacji, a występuje to w zbiegu z niekorzystnym rozkładem fotopunktów kontrolnych lub ich niedostatkami wymuszonym przez warunki terenowe, wtedy warto rekomendować dodatkowy pomiar kontrolny. Reguły wykonania takiego pomiaru:

- a) zastosowanie niezależnej techniki pomiaru geodezyjnego, opcjonalnie można wykorzystać dane zgromadzone w pzgik o odpowiedniej dla celu kontroli dokładności,
- b) gdy celem prac jest pomiar sytuacyjny szczegółów I grupy warto pomierzyć co najmniej 10 szczegółów terenowych rozłożonych w miarę możliwości równomiernie w obszarze bloku, wartości bezwzględne różnic współrzędnych X i Y powinny być < 10 cm
- c) gdy celem prac jest pomiar wysokościowy warto pomierzyć wysokości co najmniej 10 punktów; błąd średni wysokości < 5 cm, wartości bezwzględne różnic współrzędnej H < 7 cm.

Należy mieć również na uwadze, że wiele programów do wyrównywania zdjęć z BSP traktuje fotopunkty kontrolne jako punkty wiążące. Może to powodować sztuczne zawyżanie dokładności wyznaczenia ich współrzędnych.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono szereg ogólnych zaleceń, które można traktować jako nieformalne wytyczne stosowania fotogrametrii z BSP. Zalecenia są uzupełnione rekomendacjami dotyczącymi różnych aspektów pomiaru fotogrametrycznego. Należy podkreślić, że fotogrametria z BSP potrafi zapewnić dokładności stawiane geodezyjnym pomiarom sytuacyjno-wysokościowym, jednakże wymaga przestrzegania opisanych zasad. Nie wyczerpują one wszystkich przypadków pomiarowych, dlatego konieczne jest dostosowywanie wariantowych rozwiązań do charakterystyki rozwiązywanego zadania.

Ze szczególną ostrożnością należy podchodzić do pomiaru konturów budynków. Zdecydowanie powinien być preferowany pomiar stereo lub wielokrotny pomiar mono na zdjęciach. Przystępując do fotogrametrycznego pomiaru budynków, należy mieć na uwadze, że bardzo trudne jest wykonanie kompletnego pomiaru punktów załamania konturu. Aby zwiększyć kompletność, należy zastosować zdjęcia ukośne i wyrównywać je razem z pionowymi lub nalot wykonywany w układzie cross grid (prostokątny układ szeregow). Stosowanie zdjęć ukośnych nie zostało ujęte w przedstawionych zaleceniach.

SŁOWNIK TERMINOLOGICZNY

BSP – bezzałogowy statek powietrzny (zgodnie z ustawą Prawo lotnicze)

Misja BSP – nieprzerwany lot BSP, podczas którego wykonywane są zdjęcia tworzące blok zdjęć

Blok zdjęć – odpowiednio zaplanowany i zarejestrowany zespół zdjęć, w którym występuje pokrycie podłużne i poprzeczne zdjęć

Fotopunkt – punkt terenowy o pomierzonych geodezyjnie (RTK, RTN) współrzędnych XYH, jednoznacznie identyfikowany w terenie i na zdjęciach; najczęściej punkt jest sztucznie markowany w terenie

Fotopunkt kontrolny – punkt o takich samych cechach jak fotopunkt, ale nie uczestniczy w procesie aerotriangulacji, lecz wykorzystany tylko do kontroli dokładności aerotriangulacji

EOZ - elementy orientacji zewnętrznej zdjęć – współrzędne XYZ środka rzutów oraz trzy kąty określające położenie zdjęcia względem terenowego układu współrzędnych

EOW - elementy orientacji wewnętrznej kamery – parametry definiujące rzut środkowy realizowany przez kamerę: stała kamery, położenie punktu głównego i współczynniki dystorsji

Ortoobraz - wynik przetworzenia pojedynczego zdjęcia z rzutu środkowego do ortogonalnego wraz z nadaniem georeferencji w wybranym układzie współrzędnych

Ortomozajka - obraz powierzchni ziemi powstały na drodze mozaikowania ortoobrazów, obejmujący całość opracowania, opcjonalnie podział ortomozajki na mniejsze moduły dla usprawnienia digitalizacji szczegółów

Aerotriangulacja – proces obliczeniowy, w którym estymowane są elementy orientacji zewnętrznej zdjęć wraz z elementami orientacji wewnętrznej kamery.

Różnica współrzędnych - różnica pomiędzy wartością referencyjną (z pomiaru terenowego) a wartością estymowaną

Błąd średni współrzędnych - średniokwadratowy błąd różnic współrzędnych,

RTK (Real Time Kinematic) - satelitarna technika wyznaczenia współrzędnych z wykorzystaniem odbiorników różnicowych i jednej stacji bazowej. Współrzędne wyznaczone są w czasie rzeczywistym na podstawie poprawek otrzymywanych ze stacji bazowej oraz estymacji pozycji na podstawie wcześniejszej trajektorii

PPK (Post Processing Kinematic) - satelitarna technika wyznaczenia współrzędnych z wykorzystaniem odbiorników różnicowych. Współrzędne wyznaczone są w procesie post processingu na podstawie zarejestrowanych danych obserwacyjnych z odbiornika ruchomego oraz jednej lub więcej stacji bazowych.

RTN (Real Time Network) - satelitarna technika wyznaczania współrzędnych zbliżona do metody RTK z tą różnicą, że poprawki estymowane są na podstawie pomiaru z co najmniej dwóch stacji bazowych.

Details of authors:

Prof. dr hab. inż. Krystian Pyka
e-mail: krisfoto@agh.edu.pl

Mgr inż. Paweł Wiącek
e-mail: paw.wiacek@gmail.com

Mgr inż. Mirosław Guzik
e-mail: miroslaw.guzik@geoxy.pl

Submitted 1.12.2020
Accepted 31.12.2020

