

AIRBORNE LASER SCANNING IN POLAND - BETWEEN SCIENCE AND PRACTICE

Zdzisław Kurczyński¹

¹ Warsaw University of Technology, Faculty of Geodesy and Cartography, Department of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Warsaw, Poland

KEY WORDS: LiDAR, ALS, development trends, scientific research, applications, publication review, production potential

ABSTRACT: The article is a retrospective analysis of the development of airborne laser scanning technology in the country in the past twenty years, i.e. from the beginnings of this technique use in Poland to the present day. The emphasis in the text is placed on development trends and scientific and application problems in the field of technology undertaken by national research centres. The review is based on numerous publications in this field, which have been released over two decades mainly in the "Archive of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing". Therefore, the article is a presentation of the progress in the area of airborne laser scanning through an attempt to systematize and review national publications in this scope. It also presents the development of the national production potential and the level of the country's coverage with data and products derived from airborne laser scanning.

1. THE BEGINNINGS AND TRENDS OF AIRBORNE LASER SCANNING

The essence of airborne laser scanning consists in frequent sending of short laser pulses from a flying platform (plane, helicopter or unmanned aircraft) towards the ground and measuring the return times of the reflected signal. On this basis, the plane-ground distance is determined, and that is why the system is called LiDAR (Light Detection and Ranging). In addition, the trajectory of the plane (Global Navigation Satellite System - GNSS) and the inclination angles of the scanning platform (Inertial Navigation System - INS) are measured. As a result, the position from which the pulse was sent, its direction and distance to the ground point are known. Thus, the spatial position of the terrain point (XYZ) can be determined.

The scanner's optical system scans the terrain in a direction transverse to the direction of flight, resulting in a strip of terrain underneath the flying platform covered with dense reflections with a defined spatial position. We can say that the result of laser scanning is a cloud of spatial points.



The above description results in two special characteristics of scanning, distinguishing it from other systems:

- It is an active system (it "lights up" the area itself).
- From one flight we get directly the spatial location of the terrain points.

The first prototype designs of laser scanners appeared in the first half of the 1990s, the first scanners appeared on the market in the mid-1990s. The emergence and development of this technique was strongly linked to the development of GNSS and access to INS systems. In 1995 there were 3 LIDAR systems in the world working for civil purposes, and after 2000 there was a rapid development of technology. In 2004 there were already over 150 such systems (Tukaj, 2004).

Initially, LIDAR data was perceived as an ideal source of altitude data, useful for building a digital terrain model - DTM. In this context, its advantage over aerial photographs was expressed in the possibility of penetration of laser beams through vegetation, which also allowed to acquire points on the ground covered with forest. In the initial period the cost of laser scanning and data processing was high. However, the development of the scanners themselves, as well as the methods and tools (software) for processing very large amounts of data, was rapid. This resulted in an increase in the efficiency of the scanning itself, expressed as an increase in the density of laser points on the ground, but also in the processing of data, which together reduced the cost of building DTM. In this respect (construction of DTM) laser scanning became competitive with aerial photography and even gradually replaced it. Laser scanning technology soon began to be seen not only as a source of altitude data for DTM construction but also as very useful data for many other applications. The ability to automate the processing and creation of final products was crucial here.

Although the aircraft scanning technique is only just over 20 years old, it is now a mature technique. Its relatively short development history distinguishes clear trends:

1. Increase in the efficiency and density of laser points.
2. Increase in the number of registered reflections ("echoes").
3. Full-Waveform analysis.
4. Combining laser scanning with a digital camera.
5. Bathymetric scanning.
6. Multispectral scanning.
7. Single-photon scanners.
8. Unmanned platform scanning - UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

2. FIRST PUBLICATIONS AND ATTEMPTS TO USE THE LIDAR IN THE COUNTRY

The second half of the 1990s marks the beginning of the implementation of airborne laser scanning technology in the country for production. It is a period of profound political and economic changes, enabling, among other things, accession to the EU and access to aid funds. In the area of photogrammetry, it is a period of rapid development of digital photogrammetry. It was a fertile ground for national research centres to take an interest in the new laser scanning technology and then to implement it in production. As early as in

1999 the technique of airborne laser scanning was published by Kurczyński Z.: "Airborne laser scanner - a new technology for obtaining terrain data". ([Kurczyński, 1999](#)).

The year 2000 and TMCE Company can be considered as the beginning of the development of LIDAR data by national production entities for DTM production. Initially, these were data from abroad developed for foreign customers. Since 2003 the first attempts to use this technique in Poland can be dated. By 2004, about 10 air missions were performed with a clearly growing trend.

The first large scale production attempt was an initiative of the Spatial Planning Office of the City of Krakow to scan a fragment of the city. In 2005, the whole of Krakow was scanned with a density of 12 points per square metre ([Jędrychowski, 2007](#)). This was a very successful undertaking, which showed the usefulness of LIDAR data for spatial planning in a large city and showed how relatively easy it is to implement such data in the daily practice of planning services. In this respect, the Kraków initiative has become an encouraging example for other cities.

In 2009, MGGP Aero purchased the first Riegl LMS Q680i scanner in Poland. This moment significantly facilitated the implementation of the scanner technology in the production area.

While determining the issue of the development of LiDAR technology, the background of its development should be seen more broadly. At that time, large-format digital cameras also appeared, which started to quickly replace analogue cameras from production. The development of both techniques (scanning and aerial photos) was a response to the growing demand for current geodata, resulting in numerous and large projects launched at the central level (GUGiK - *The Head Office of Geodesy and Cartography*).

3. RESEARCH PROBLEMS IN THE FIELD OF ALS TAKEN BY NATIONAL CENTERS

The emergence of Airborne Laser Scanning (ALS) data, and the subsequent constant and rapid development of this technique, has triggered demand, but also the possibility of meeting it in new areas of scientific and application problems. The filtering points of the cloud, i.e. filtering points not belonging to the ground (located on roofs, trees etc.) was the first and the most important issue. Only points filtered in this way could be the basis of DTM construction. Due to very large sets of ALS points, this process had to be automated. Many, also quite sophisticated, automatic filtration methods appeared here. Separate research has included numerous ALS data applications.

The national scientific community has been quite actively involved in these research trends. It itself initiated research projects and actively participated in "top-down" large implementation projects. The results were presented at international and national conferences and in numerous publications.

National scientific events, which are a forum for the exchange of information and experience in this field have included annual symposia of the Polish Society of Photogrammetry and Remote Sensing, and the "Archive of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing" is the publishing house where this issue is most represented. Tracing these publications can provide a reliable picture of the development of leadership technology in the country. The first publications on ALS were published in the Archive in

2002, and between 2002 and 2018, 75 publications appeared in this field. Some of them had a direct impact on the resulting doctoral dissertations. In an attempt to systematize the scope of scientific interests undertaken in these publications, the following can be indicated:

- DTM construction from ALS data (filtration, accuracy assessment, discontinuity line detection, terrain surface modelling, data segmentation, etc.). - 12 publications with the predominance of Wrocław University of Life Sciences and AGH University of Science and Technology in Kraków,
- ALS data classification, generation of digital surface models - DSM – 5 publications,
- Multi-source data fusion (ALS vs. photographs, ALS vs. terrestrial laser scanning - TLS, comparisons, etc.) - 8 publications,
- Modelling 3D objects from ALS data - 5 publications,
- Radiometric calibration of intensity image, multispectral scanning - 3 publications with the predominance of the Warsaw University of Technology,
- Scanning from unmanned aerial vehicles (UAV) and gyroplanes - 3 publications,
- Processing of large data sets ALS - 2 publications.

The application areas include:

- Forestry (forest protection, tree crown segmentation, tree crown compacting, numerical tree crown model, vertical construction of stands, updating of the Forest Map, biomass estimation, etc.). - 11 publications with the predominance of the University of Agriculture in Kraków,
- 3D object modelling - 5 publications,
- Flood applications, hydraulic modelling - 6 publications,
- Archaeology, monument protection - 1 publication,
- Other (environmental applications, landscape research, marine coastline research, urban scanning, LPIS control, etc.)

4. REVIEW OF SCIENTIFIC PROBLEMS

In the field of scientific research, the most numerous group of publications are those concerning the construction of DTM from ALS data, including data filtering methods, land surface modelling, model accuracy, discontinuity line detection, product standardization, creation of new software and evaluation of available software functionality. This direction of research includes, among others, (in chronological order):

- Borkowski dealing with the problem of modelling terrain surface containing discontinuity lines ([Borkowski, 2003](#)). For this purpose, the author uses the Ritz method to solve the variance task (snake technique). He provides algorithm and test examples.
- Piechocka *et al* deal with verification of DTM quality from ALS data ([Piechocka et al. 2004](#)). The authors use the active TIN model method to build DTM.
- Tukaj takes up the problem of accuracy of ALS data processing and their standardization ([Tukaj, 2004](#)). The author quotes ASPRS standard used in USA.

- Borkowski and Józków are involved in ALS data filtration with polynomial moving surfaces methods ([Borkowski, Józków, 2006](#); [Borkowski, Józków, 2007](#); [Borkowski, Józków, 2008](#)). The authors make the evaluation of the method.
- The Wrocław University of Life Sciences team was also involved in assessing the accuracy of airborne scanning data ([Gołuch *et al.*, 2007](#)). The reference was tacheometric and GPS measurement.
- Borkowski and Sośnica took up the problem of ALS data filtration using discrete wavelet filtration ([Borkowski, Sośnica, 2009](#)).
- Korzeniowska and Łącka compared the functionality of available software for ALS data processing and visualization ([Korzeniowska, Łącka, 2011](#)).
- Pyka *et al.* compared ALS data with high-resolution airborne photographs for DTM development. They indicated the superiority of LiDAR data ([Pyka *et al.*, 2012](#)).
- Brodowska compared the operation of two methods: active TIN model and linear prediction for segmentation of terrain points from the LiDAR data ([Brodowska, 2012](#)).

The second direction of research is the problem of ALS data classification, its processing and DSM generation and visualization. Separation of this problem from the previous one (ALS data filtration) is conventional. The technological sequence of ALS data processing usually combines both these stages, i.e. filtration and classification. In this trend it is possible, among others, to indicate:

- Borkowski and Tymków use for the classification of LiDAR points neural networks, the method of greatest reliability and the k-nearest neighbours method ([Borkowski, Tymków, 2007](#)).
- Hejmanowska *et al.* present ALS data processing for DTM and DSM construction in Terrasolid software ([Hejmanowska *et al.*, 2008](#)). They address the problem of accuracy of results.
- Marmol undertakes the task of automatic detection of urbanized data and trees using Gabor filters for texture classification ([Marmol, 2012](#)).
- Twardowski and Marmol present software developed at AGH University of Science and Technology to process LiDAR point clouds, including filtering and classification using frequency algorithm ([Twardowski, Marmol, 2012](#)).
- Bratuś *et al.* used parallel calculations (GPUs) to classify data, including overlap points (in the scan series' transverse coverage bands) ([Bratuś *et al.*, 2017](#)).

Following the development of laser scanning technology, the possibilities and advantages of combining this technique with other data were quickly recognized: aerial photographs and terrestrial laser scanning - TLS (so-called multi-source data fusion). In this research direction it can be noted among others:

- Marmol combines ALS data with photographs to detect individual trees ([Marmol, 2009a, 2009b](#)).
- Fryškowska and Kędzierski integrate ALS and TLS data to build 3D models. The methods of integrating such data are presented ([Fryškowska, Kędzierski, 2010](#)).
- Warchoń and Hejmanowska address the problem of combining data from three sources: ALS, TLS and mobile terrestrial scanning ([Warchoń, Hejmanowska, 2011](#); [Warchoń,](#)

[2013](#)). They present the evaluation of accuracy by reference to the tachymetric measurement.

- Dominik compares point clouds with ALS with clouds formed by dense high-resolution aerial photographs ([Dominik, 2014](#)). The author uses Semi-Global Matching - SGM method to create dense point clouds from photographs.

3D modelling of objects on the basis of airborne laser scanning is an extensive and important topic of interest to various centers and authors. Many publications of both methodological and application character are related to it. It is often difficult to separate these two areas of activity. Among others, we can distinguish here:

- Borowiec presents a semi-automatic method of reconstruction of a 3D building based on data from airborne laser scanning ([Borowiec, 2009](#)). The main objective is to determine the shape of the roof of the building, and then to reconstruct it while maintaining the topology. The point cloud is divided into equal voxels, so that they correspond to CityGML standards, at the LoD2 level of detail. The planes are approximated in the voxels.
- Jarzabek-Rychard and Borkowski's reconstruction of building blocks is based on data segmentation ([Jarzabek-Rychard, Borkowski, 2010](#)). The analysis of two most frequently used algorithms is presented: RANSAC and growing planes.
- Borowiec uses cadastral maps, which allowed to select from a set of points those reflected from the roofs of buildings ([Borowiec, 2010](#)). Building models obtained through the integration of vector data from the registry and data from airborne laser scanning are embedded in DTM.
- Jarzabek-Rychard and Borkowski propose automatic extraction of building contours from ALS data as a basis for reconstruction of building blocks ([Jarzabek-Rychard, Borkowski, 2011](#)).
- Habib *et al.* use both ALS data and aerial photographs to generate building models. Both approaches are used: data-driven and model-driven ([Habib et al., 2011](#)).
- Borkowski and Józków conduct an analysis of the accuracy of modelling of the Castle of the Silesian Piasts in Brzeg ([Borkowski, Józków, 2012](#)). The modelling was performed at the LoD3 level of detail. Cyclone 7.1 program was used for modelling, as well as texture overlay and data conversion programs developed at the Institute of Geodesy and Geoinformatics. Accuracy was assessed by comparison with field measurements.
- Jarzabek-Rychard presents a fully automatic method of construction of three-dimensional models of buildings presented using skeleton lines ([Jarzabek-Rychard, 2012](#)). She uses his own algorithm for building contour detection only on the ALS database. The method is illustrated by the development of a small-town buildings.
- Borowiec shows how to detect and determine the roof slope of the building only on the basis of the point cloud ([Borowiec, 2013](#)). The definition of the roof shape takes place in three stages. The first stage is to find the places where the building occurs, the second is to determine the exact edges, while the third is to indicate the roof planes. Hough's transformation is used to determine the course of the roof edge of the building.
- Marjasiewicz and Malej base semi-automatic building block generation on the RANSAC algorithm implemented in Cloud Compare software ([Marjasiewicz, Malej, 2014](#)). In addition to the ALS data, they use the BDOT database to identify the ground

floors of buildings. Two experiments with different point densities were performed. The proposed methodology made it possible to create models with higher accuracy than CityGML LoD2 level.

- Cisło-Lesicka *et al.* presented a systematization of modelling methods from aerial scanning with articulation of advantages and disadvantages of parametric and non-parametric approaches ([Cisło-Lesicka et al., 2014](#)). The paper ends with a proposal for a modelling strategy in the context of the state of georeference databases in Poland, their development prospects and demand for spatial data from a social and economic point of view.
- Pilarska *et al.* presented an analysis of accuracy of building models based on point clouds from airborne laser scanning ([Pilarska et al., 2017](#)). The methodology presented in the article is based on the requirements of the CAPAP project.

Laser scanning uses near-infrared lasers. This range is completely absorbed by water. There are also scanners based on the so-called green laser (wavelength $\lambda=532$ nm) water-penetrating - so-called bathymetric scanners. They allow to measure the topography of the bottom of shallow sea or inland waters. Such scanners are usually equipped with two lasers: green and infrared.

Going further, we can meet scanners working at three wavelengths: green, infrared ($\lambda=1064$ nm) and mid infrared ($\lambda=1550$ nm). They are defined as multi-spectral scanners. This issue was approached by [Bakuła \(2015\)](#). Laser scanners are recording distance rangefinders. It soon turned out that it is also useful to register the power of penetrating signal, which gives the so-called intensity picture. The importance of intensity increases, especially in the context of point cloud classification. In the case of multispectral scanning there is a need for radiometric calibration. This issue was approached by [Pilarska \(2016\)](#).

Scanning UAV and gyroplanes. Technical progress in scanning technology leads to miniaturization of the scanners themselves. Scanning from unmanned platforms (UAV) has been developing intensively recently. The possibilities of this technique are presented in an extensive article ([Ostrowski et al., 2017](#)). The so-called gyroplanes, which are some competition for aviation platforms may be the intermediate point between aviation platforms and unmanned platforms. The specifics of scanning from gyroplanes are presented in the publication ([Kolecki et al., 2015](#); [Kolecki et al., 2017](#)).

Scanning data is associated with huge volumes. Their effective development requires high computing power. Parallel calculations based on GPUs are used here. These issues were dealt with by Dephos in the project "Research on mass storage, sharing and processing of laser data ([Będkowski et al., 2015](#)).

5. OVERVIEW OF APPLICATION PROBLEMS

There are many areas in which the LiDAR data are applicable. The attractiveness of such data is primarily determined by their high accuracy, especially altitude, high density of laser points, which translates into a good reproduction of the shape of the modelled surface and objects, and the penetration of vegetation, which is important in modelling the surface of the area covered by forest, and which is impossible from aerial photography.

The applications of laser scanning in forestry are at the forefront here. This is reflected in numerous publications in this field, e.g.:

- Detecting single trees in the point cloud and modelling the crown shape - the so-called Crown Height Model (CHM) and determining taxonomic parameters of the stand related to the tree crowns ([Weżyk, 2008](#); [Marmol, Będkowski, 2008](#); [Borowiec, Niemiec, 2018](#)),
- Integration of LiDAR data and aerial photographs ([Marmol, 2009](#); [Weżyk et al., 2016](#)),
- Determining the compaction of tree crowns ([Weżyk, Wawrzeczek, 2009](#)),
- The use of laser scanning for the creation of the Forest Numerical Map - (Polish LMN) ([Weżyk et al., 2010](#)),
- Determining the height of trees and spatial structure of the stand based on laser scanning ([Weżyk, Solecki, 2008](#); [Zarzycka, Będkowski, 2012](#)),
- Laser scanning in the protection of national parks ([Weżyk et al., 2018](#)),
- Inventory of urban greenery ([Urbański, Bakula, 2018](#)).

The main application of laser scanning data is undoubtedly the construction of precise numerical terrain models, first and foremost for **hydraulic modelling and flood risk prevention**. In this area we find publications on:

- Flood hazard maps and flood risk maps ([Kurczyński, 2012](#)),
- National DTM generation from LiDAR data - ISOK Project ([Kurczyński Bakula, 2013](#)),
- Using LiDAR data for two-dimensional hydraulic modelling ([Bakula, 2014](#)),
- Reduction of laser scanning data to create DTM for flood modelling ([Bakula, 2011](#); [Bakula, 2012](#)),
- advanced technologies in flood risk prevention - SAFEDAM Project ([Kurczyński, Bakula, 2016](#)).

Monument protection and archeology are the areas where airborne laser scanning data has found wide application and even enthusiastic reception. It turned out that such data allow us to look differently at the remains of fortifications, cemeteries, barrows, other traces of human presence and activity in past centuries, especially in areas overgrown with forest, effectively masking these remains. Laser scanning data is a new generation of geospatial data. The "removal" of a layer of vegetation, and this possibility is provided by these data, creates new opportunities for archaeologists to inventory the relics of the past ([Zawieska et al., 2013](#)). The broad interest in LiDAR data in the archaeological community has driven the development of a kind of specialised set of 'good practices' and guidelines for the use of such data in archaeological research entitled 'Recommendations for the acquisition, processing, analysis and application of LiDAR data for the identification of archaeological heritage resources under the AZP programme'. ([Bakula et al., 2016](#); [Zapłata et al., 2018](#)).

Laser scanning data, thanks to the full coverage of the country with such data within the ISOK Project and the further update thanks to the activities of the CAPAP project and GUGIK's own activities, are also used in many other applications. These include:

- control of direct payments to farmers under the LPIS ([Weżyk et al., 2009](#)),
- landscape research ([Adamczyk, Będkowski, 2007](#)),
- Survey of the maritime coastal zone ([Dudzińska-Nowak, 2007](#)),
- generating the so-called "true-orthophotomap" ([Zabrzaska-Gąsiorek, Borowiec, 2007](#)).

6. PRODUCTION POTENTIAL OF THE COUNTRY

As previously highlighted, the beginnings and development of air scanning coincided with a period of economic transition. Photo-aircraft companies were established and equipped with new planes, large-format digital aircraft cameras, airborne laser scanners, and with time, other imaging systems. These companies acquire photogrammetric data and develop them or pass them on to other companies dealing only with developing them. This equipment quickly became part of routine production.

In terms of production potential, **MGGP Aero** from Tarnów, operating five of its own planes and three helicopters, is leading the way in this market. The first Riegl LMS Q680i scanner was purchased in October 2009 and the second, identical one a year later. Currently it has 8 scanners (all Riegl companies) which are still working. The company scans on average annually 30 000 km² in surface projects and about 60,000 km of linear facilities (so-called corridors).

The company operates not only on the domestic market, it was also present in 13 European countries. The major projects carried out by MGGP Aero include:

1. 2010. KZGW. Inventory of areas after the floods in 2010 for an area of about 10 000 km².
2. 2010. IMGW Gdańsk. Pilot for ISOK project in Żuławy.
3. 2009-2016. Słowiński National Park. Scanning of Słowiński NP dunes in the period 2009 - 2016. Monitoring of earth masses movement.
4. 2010-2019 ISOK / CAPAP projects. Significant share.
5. 2011. UKSW. First ALS scanning of the Krzemionki Opatowskie archaeological site in the Świętokrzyskie Mountains.
6. 2016. Forest Management Office. Scanning 3 forest districts within the RemBioFor project - development of forest inventory methodology using ALS.
7. 2017. IMGW. Monitoring of embankments against floods.

Apart from the routine work related mainly to the development of height models, the company also handles a typical studies that require conceptual solutions:

1. 2009. KWB Adamów. First large-area laser scanning and first discoveries of surface archaeological sites.
2. 2011-2012. National Parks: Słowiński, Biebrzański, Ujście Warty, Wigierski, Wielkopolski, Ojcowski, Magurski, Karkonoski, Bieszczadzki, Tatrzański. Currently, the studies are being repeated to assess the dynamics of change.
3. 2016-2019. Innovative approach supporting the monitoring of non-forest natural habitats Natura 2000 with the use of HabitARS remote sensing methods - Habitats Airborne Remote Sensing (project of National Research and Development Centre - NCBR).

The second company present on the market is **OPEGIEKA** from Elbląg. In terms of laser scanning, the company has three planes and three scanners: Riegl Q680i (since 2011), bispectral VQ1560i-DW and VQ1560-II. Larger projects:

1. 2013-2015. Hungary. Eurosense Kft. Altitude data for flood protection purposes. All rivers in Hungary.

2. 2013-2019. ISOK 2 and CAPAP projects.
3. 08/2017 - 12/2017 (only 4 months!). Lithuania NLS - National Land Service. Obtaining data for the 10 largest cities in Lithuania with a total area of 2 500 km² and an average cloud density of 37 points/m² with photographs of ground sampling distance less than 0.10 m.
4. Turn of 2018/2019 - Gdynia Maritime Office. Sea shore monitoring.

The company has its own Data Center. It conducts research and development work in the field of machine learning algorithms. Since 2019, the company has been manufacturing artificial neural networks in ALS point clouds classification. It has conducted works related to the inventory of stands based on the data of a multispectral laser scanner within the "TreeQuant" project. It developed its own technology of single tree segmentation. It participated in a project carried out with the Warsaw University of Technology "Centre for scientific geospatial analysis, satellite calculations together with laboratories for testing/certification of geomatic products (CENAGIS)" carried out in 2019-2021. The company is present on 12 foreign markets: Turkey, Greece, Germany, the Netherlands, Norway, Lithuania, Croatia, Hungary, Slovakia, France.

Another company is GISPRO from Szczecin with two planes and two scanners Riegl-VQ780i, Riegl-Q680i. Larger projects implemented by it are:

1. Obtaining altitude data in aeronautical laser scanning technology and providing derived products under ISOK and CAPAP projects (from 2010).
2. Measuring the volume of open pit deposits and monitoring deformations.
3. Inventory of power lines, roads, railways and pipelines in Poland, Czech Republic, Germany, the Netherlands, Portugal, Denmark, Romania, Spain.
4. Archaeological inventory.

Among other things, the company is currently implementing a project aimed at developing an innovative technology of multi-sensor airborne spectral-space scanning through channel integration: RGB, NIR, RE and LIDAR for the needs of large area inventories and parameterization of forests and cultivated fields.

Last year SmallGIS company entered the market with two ultra-light aircraft and a VQ-780i scanner integrated with a medium format camera.

From the above, it can be seen that the potential of the national laser scanning is high, even beyond the current domestic demand. This is conducive to cost reduction and dissemination of this technique.

7. COUNTRY ALS DATA COVERAGE

In the development of laser scanning technology and covering the country with such data, an undoubted breakthrough was the ISOK project (IT System for Country Protection against Emergency Hazards), implemented with the use of EU funds in the years 2010 - 2015. This project was a response to the so-called Flood Directive, which requires EU countries to prepare flood hazard maps and flood risk maps. In the country, it was decided to draw up these maps based on laser scanning data, used to build a precise digital elevation model of the area. Under the Project, 92% of the country's area was covered by scanning with a density of 4 points/m² and cities with 12 points/m².

These data were used to produce DTM in GRID structure with a resolution (grid) of 1 m and height accuracy (mean error) of 0.15 m. The products have been transferred to the state surveying resource and are easily accessible, for most users free of charge (Kurczyński, 2012; Kurczyński, Bakula, 2013). They were used first of all for hydraulic modelling and creating hazard and flood risk maps. The success of the project was manifested by the great interest in its results coming from very different industries. The dissemination of these results was probably influenced by the "Training in the use of LiDAR products", carried out under the GUGiK contract for "Comprehensive organization of training in the use of LiDAR products developed under the ISOK project". The CAPAP project (Centre for Spatial Analysis of Public Administration) is based on ALS products and aims at, among other things, the task of 3D modelling on a national scale.

Currently, the whole country has ALS data coverage in a standard identical to ISOK. As a result of local initiatives, numerous local projects are implemented, mainly for the purposes of 3D modelling in cities, inventory of national parks, creation of forest management plans, inventory of transmission lines, etc. Figure 1 shows the current state of country coverage with such data.

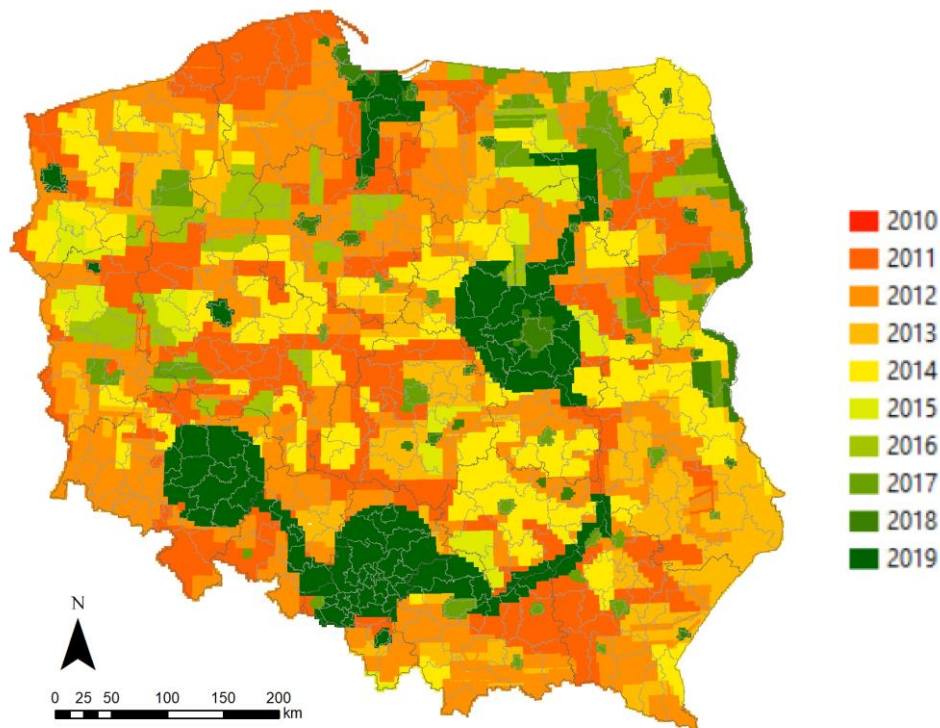


Figure 1 Country coverage with ALS data (December 2019; source: GUGiK)
Rysunek 1. Stan pokrycia kraju danymi ALS (grudzień 2019; źródło: GUGiK)

8. WHAT NEXT?

The whole country is covered with ALS data in the basic standard of 4 p./m² and the cities 12 p./m². Higher densities are present locally. The vast majority of areas is covered by the ISOK Project - 2010-2014 (Figure 1). As data and products are getting older and the problem of updating them occurs. If the digital terrain model (DTM) is seen as a product, changes (and therefore the need for updating) are slow. In addition, we know where such changes occurred (earthworks related to the construction of communication routes, open casting, etc.). The situation is different with regard to the digital surface model (DSM), here the changes take place quickly, especially in the cities (construction, changes in forest areas, etc.).

On the other hand, we regularly cover areas (especially cities) with high and very high-resolution photographs (GSD=0.05-0.10 m). In combination with the progress made in recent years in the so-called dense image matching, this is an alternative source for updating especially DSM and 3D models. According to the current status, the photographs are taken in time cycles shorter than ALS (for reasons independent of the need for DSM updates), the costs of the photographs are also lower. To sum up this thread, updating country coverage with ALS data will not be frequent. The GUGiK mentions a six-year cycle.

Another issue is related to the scanning standard, including density. The development of ALS technology (hardware, software, development methods) results in lower costs, a tendency to increase scanning density is observed. The so-called single-photon scanners, breaking down the barriers of density, performance and cost, which quite unexpectedly appeared on the market in the past 3-4 years, are a kind of eyeopener. Currently, the environment is watching these revolutionary techniques closely ([Kurczyński, 2019](#)). The coming years will show how this will translate into market reality.

Forecasting the future, we should also mention the rapid development of laser scanning from the board of unmanned vehicles. Here the development is very fast, however, it will be parallel to the development of laser scanning from manned aircraft, satisfying local needs with a limited area coverage.

LITERATURE

Adamczyk, J., & Będkowski, K. (2007). Odwzorowanie wybranych obiektów krajobrazu w danych lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17a, 1-9.

Bakuła, K. (2011). Reduction of DTM obtained from lidar data for flood modeling. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 22, 2011, 51-61.

Bakuła, K. (2012). Porównanie wpływu wybranych metod redukcji NMT w tworzeniu map zagrożenia powodziowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 19-28.

Bakuła, K. (2014). Efektywne wykorzystanie danych lidar w dwuwymiarowym modelowaniu hydraulicznym. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 23-37.

Bakuła, K., (2015). Multispectral airborne laser scanning - a new trend in the development of LiDAR technology. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 27, 25-44.

- Bakula, K., Ostrowski, W., Zapłata, R., Kurczyński, Z., Kraszewski, B., & Stereńczak K. (2016). Zalecenia w zakresie pozyskiwania, przetwarzania, analizy i zastosowania danych LIDAR w celu rozpoznania zasobów dziedzictwa archeologicznego w ramach programu AZP, https://www.nid.pl/pl/Dla_specjalistow/Badania_i_dokumentacja/zabytki-archeologiczne/instrukcje-wytyczne-zalecenia/2017_instrukcja_LIDAR_NID.PDF
- Będkowski, J., Bratuś, R., Prochaska, M., & Rzonca, A. (2015). Use of parallel computing in mass processing of laser data. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 27, 45-59.
- Borkowski, A. (2003). Modelowanie powierzchni terenu zawierającej linie nieciągłości na podstawie danych skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 13b, 307-314.
- Borkowski, A. (2007). Modelowanie linii krawędziowych powierzchni na podstawie danych skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17a, 73-82.
- Borkowski, A., & Józków, G. (2007). Ocena poprawności filtracji danych lotniczego skaningu laserowego metoda aktywnych powierzchni. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17a, 83-92.
- Borkowski, A., & Józków, G. (2008). Aproksymacja powierzchni terenu na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem modelu aktywnych powierzchni. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 21-30.
- Borkowski, A., & Józków, G. (2006). Wykorzystanie wielomianowych powierzchni ruchomych w procesie filtracji danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 16, 63-73.
- Borkowski, A., & Józków, G. (2012). Ocena dokładności modelu 3D zbudowanego na podstawie danych skaningu laserowego – przykład zamku Piastów Śląskich w Brzegu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 37-47.
- Borkowski, A., & Sośnica, K. (2009). Zastosowanie dyskretnej transformacji falkowej do filtracji danych lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 35-45.
- Borkowski, A., & Tymków, P. (2007). Wykorzystanie danych lotniczego skaningu laserowego i zdjęć lotniczych do klasyfikacji pokrycia terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17a, 93-103.
- Borowiec, N. (2009). Generowanie trójwymiarowego modelu budynku na podstawie danych lidarowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 47-56.
- Borowiec, N. (2010) Budowa modelu budynku na podstawie danych z ewidencji gruntów i budynków oraz z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21, 43-52.
- Borowiec, N. (2013). Transformata Hough'a jako narzędzie wspomagające wykrywanie dachów budynków. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25, 45 - 54.
- Bratuś, R., Musiałik, P., Pióro, P., Prochaska, M., & Rzonca, A. (2017). Zastosowanie obliczeń równoległych do klasyfikacji punktów *overlap*. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 29, 11-24.

- Brodowska, P. (2012). Porównanie działania algorytmów aktywnego modelu TIN i predykcji liniowej do segmentacji punktów terenowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, 63-71.
- Cisło-Lesicka, U., Borowiec, N., Marmol, U., & Pyka, K. (2014). Analiza przydatności lotniczego skaningu laserowego do opracowania modelu budynków 3D zgodnego ze specyfikacją INSPIRE. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 39-52.
- Dominik, W. (2014). Porównanie właściwości chmury punktów wygenerowanej metodą dopasowania obrazów zdjęć lotniczych z danymi z lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 53-66.
- Dudzińska-Nowak, J. (2007). Przydatność skanowania laserowego do badan strefy brzegowej południowego Bałtyku. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17a, 179-187.
- Fryškowska, A., Kędzierski, M. (2010). Wybrane aspekty integracji danych naziemnego i lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21, 97-107.
- Gołuch, P., Borkowski, A., & Józków, G. (2007). Ocena dokładności danych lotniczego skaningu laserowego systemu ScaLARS. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17a, 251-260.
- Habib, A., Kwak, E., & Al-Durgham, M. (2011). Model-based automatic 3D building model generation by integrating LiDAR and aerial images. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 22, 187-200.
- Hejmanowska, B., Borowiec, N., & Badurska, M. (2008). Przetwarzanie lotniczych danych lidarowych dla potrzeb generowania NMT I NMPT. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 151-162.
- Jarząbek-Rychard, M., & Borkowski, A. (2011). Building outline reconstruction from ALS data set with a priori information. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 22, 227-236.
- Jarząbek-Rychard, M. (2012). Automatyczna budowa wektorowych modeli 3D budynków na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, 99 – 109.
- Jarząbek-Rychard M., & Borkowski, A. (2010). Porównanie algorytmów RANSAC oraz rosnących płaszczyzn w procesie segmentacji danych lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21, 119-129.
- Jędrzychowski, I. (2007). Lotnicze skanowanie laserowe Krakowa. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17a, 339-345.
- Kolecki, J., Prochaska, M., Piątek, P., Baranowski, J., & Kurczyński, Z. (2017). A mapping platform for gyrocopters - the influence of the stabilization on data geometry. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 29, 63-73.
- Kolecki, J., Prochaska, M., Piątek, P., Baranowski, J., & Kurczyński, Z. (2015). Stabilizacja systemu pomiarowego dla wiatrakowca w aspekcie jakości danych LiDAR. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 27, 71-82.

- Korzeniowska, K., & Łącka, M. (2011). Generating DEM from LiDAR data – comparison of available software tools. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 22, 271-284.
- Kurczyński, Z. (1999). Lotniczy skaner laserowy – nowa technologia pozyskiwania danych o rzeźbie terenu. *Geodeta* nr 2 (45).
- Kurczyński, Z. (2012). Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego a dyrektywa powodziowa. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 209–217.
- Kurczyński, Z. (2019). Lotnicze skanery jednofotonowe i skanery Geigera kontra skanery wielofotonowe (Rewolucja nadchodzi). *Geodeta* nr 9 (292) i nr 10 (293).
- Kurczyński, Z., & Bakula, K. (2013). Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, wydanie specjalne: Monografia „Geodezyjne Technologie Pomiarowe”, 59-68.
- Kurczyński, Z., & Bakula, K. (2016). SAFEDAM - zaawansowane technologie wspomagające przeciwdziałanie zagrożeniom związanym z powodzią. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 28, 39-52.
- Marjasiewicz, M., & Malej, T. (2014). Półautomatyczne modelowanie brył budynków na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 26, 87-96.
- Marmol, U. (2009a). Wykrywanie pojedynczych drzew na podstawie zintegrowanych danych lidarowych i fotogrametrycznych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 19, 279-286.
- Marmol, U. (2009b). Integracja danych lidarowych i fotogrametrycznych w procesie automatycznego wykrywania obiektów. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 275–284.
- Marmol, U. (2012). Use of Gabor filters for texture classification of airborne images and LiDAR data. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 457–466.
- Marmol, U., & Będkowski, K. (2008). Dokładność określenia wysokości drzew na podstawie numerycznego modelu koron drzew opracowanego z wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 377-385.
- Ostrowski, W., Górski, K., Pilarska, M., Salach, A., & Bakula, K. (2017). Comparison of the laser scanning solutions for the unmanned aerial vehicles. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 29, 101-123.
- Piechocka, N., Marmol, U., & Jachimski, J. (2004). Stereometryczna weryfikacja NMT uzyskanego ze skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 14.
- Pilarska, M. (2016). Radiometric calibration of airborne laser scanning data. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 28, 79-90.
- Pilarska, M., Ostrowski, W., & Bakula, K. (2017). Analiza dokładności modelowania 3D budynków w oparciu o dane z lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 29, 155-175.

- Pyka, K., Rzepka, A., & Słota, M. (2012). Porównanie fotogrametrii i lotniczego skaningu laserowego jako źródeł danych do opracowania NMT dla celów projektowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, 311-321.
- Tukaj, R. (2004). Dokładność opracowań z wykorzystaniem pomiaru metodą skaningu laserowego — LiDAR. Standard ASPRS. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 15, 41-47.
- Twardowski, M., & Marmol U. (2012). Wizualizacja i przetwarzanie chmury punktów lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 457-466.
- Urbański, M., & Bakula, K. (2018). Analiza ubytku drzewostanów z wykorzystaniem lotniczych danych fotogrametrycznych dla warszawskiej dzielnicy Wilanów. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 30, 11-25.
- Warchoń, A. (2013). Analiza dokładności przestrzennej danych z lotniczego, naziemnego i mobilnego skaningu laserowego jako wstęp do ich integracji. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25, 255-260.
- Warchoń, A., & Hejmanowska B. (2011). Example of the assessment of data integration accuracy on the base of airborne and terrestrial laser scanning. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, 22, 411-421.
- Wężyk, P. (2008). Modelowanie chmury punktów ze skaningu laserowego w obszarze koron drzew. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 685-695.
- Wężyk, P., Hawryło, P., & Szostak M. (2016). Determination of the number of trees in the Bory Tucholskie National Park using crown delineation of the canopy height models derived from aerial photos matching and airborne laser scanning data. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 28, 137-156.
- Wężyk, P., Hawryło, P., Zięba-Kulawik, K., Szostak, M., Kuzera, J., Turowska, A., Bura, M., Wietrzyk, P., Kołodziejczyk, J., Fałowska, P., & Węgrzyn, M. H. (2018). Wykorzystanie chmur punktów lidar w ochronie czynnej borów chrobotkowych w Parku Narodowym "Bory Tucholskie". *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 30, 27-41.
- Wężyk, P., & Solecki, K. (2008). Określanie wysokości drzewostanów nadleśnictwa Chojna w oparciu o lotniczy skaningu laserowy (ALS). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 663-672.
- Wężyk, P., Szostak, M., & Tompalski, P. (2009). Porównanie dokładności metody „foto” z automatyczną analizą danych lotniczego skaningu laserowego dla celów kontroli dopłat bezpośrednich. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 445-456.
- Wężyk, P., Szostak, M., & Tompalski, P. (2010). Aktualizacja baz danych SILP oraz leśnej mapy numerycznej w oparciu o dane z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21, 437-446.
- Wężyk, P., & Wawrzeczko, E. (2009). Zastosowanie lotniczego skaningu laserowego w określaniu zwarcia koron drzew na plantach krakowskich. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 457-467.

Zabrzaska-Gąsiorek, B., & Borowiec, N. (2007). Określenie zakresu wykorzystania danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego w procesie generowania „prawdziwej” ortofotomapy. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17b, 831-840.

Zapłata, R., Bakula, K., Stereńczak, K., Kurczyński, Z., Kraszewski, B., & Ostrowski, W. (2018). Zalecenia odnośnie do pozyskiwania, przetwarzania, analizy i wykorzystania danych LiDAR w celu rozpoznania zasobów dziedzictwa archeologicznego w ramach programu AZP – między teorią a praktyką. *Kurier Konserwatorski*, 15, 95-103.

Zarzecka, M., & Będkowski, K. (2012). Analiza przestrzennej zmienności wybranych cech budowy pionowej drzewostanu na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 501–508.

Zawieska, D., Ostrowski, W., & Antoszewski M. (2013). Wykorzystanie danych lotniczego skaningu laserowego w metodyce badawczej zespołów fortyfikacji nowszej w Polsce. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25, 303-314.

LOTNICZE SKANOWANIE LASEROWE W POLSCE – MIĘDZY NAUKĄ A PRAKTYKĄ

SŁOWA KLUCZOWE: LiDAR, ALS, trendy rozwoju, badania naukowe, aplikacje, przegląd publikacji, potencjał produkcyjny

Streszczenie

Artykuł stanowi retrospektywne spojrzenie na rozwój techniki lotniczego skanowania laserowego w kraju w minionych dwudziestu latach, tj. od początków tej techniki w Polsce do współczesności. Akcent w tekście położono na trendy rozwoju oraz problemy naukowe i aplikacyjne z zakresu techniki podejmowane przez krajowe ośrodki badawcze. Podstawą przeglądu są liczne publikacje z tego zakresu, które ukazały się na przestrzeni dwóch dekad głównie w „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”. Artykuł jest więc prezentacją postępu w obszarze lotniczego skanowania laserowego poprzez próbę usystematyzowania i przeglądu krajowych publikacji z tego zakresu. Zaprezentowano w nim również rozwój krajowego potencjału produkcyjnego oraz stan pokrycia kraju danymi i produktami pochodnymi lotniczego skanowania laserowego.

1. POCZĄTKI I TRENDY ROZWOJU LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO

Istota lotniczego skanowania laserowego polega na częstym wysyłaniu z platformy latającej (samolotu, helikoptera czy bezałogowego statku latającego) krótkich impulsów laserowych w kierunku ziemi i pomiarze czasu powrotu sygnału odbitego. Na tej podstawie określana jest odległość samolot-grunt, stąd nazwa – systemu LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*). Dodatkowo, mierzona jest trajektoria samolotu (system globalnego pozycjonowania satelitarnego - GNSS) i kąty nachylenia platformy skanującej (Inercjalny System Nawigacyjny - INS). W rezultacie znane jest położenie, z którego wysłano impuls, jego kierunek oraz odległość do punktu terenowego. Można więc określić przestrzenne położenie punktu terenowego (XYZ).

Układ optyczny skanera skanuje teren w kierunku poprzecznym do kierunku lotu, w rezultacie otrzymujemy pas terenu pod platformą latającą, pokryty gęstymi odbiciami o wyznaczonym położeniu przestrzennym. Mówimy, że rezultatem skanowania laserowego jest chmura punktów przestrzennych.

Z powyższego opisu wynikają dwie szczególne cechy skaningu, odróżniające go od innych systemów:

- Jest to system aktywny (sam „oświetla” teren).
- Z jednego przelotu otrzymujemy bezpośrednio przestrzenne położenie punktów terenowych.

Pierwsze prototypowe konstrukcje skanerów laserowych zaistniały w pierwszej połowie lat 90. ubiegłego stulecia, pierwsze skanery pojawiły się na rynku w połowie lat 90. Zaistnienie i rozwój tej techniki były silnie związane z rozwojem GNSS oraz dostępem do systemów INS. W 1995 roku dla celów cywilnych pracowały na świecie 3 systemy

LIDAR, a po roku 2000 nastąpił gwałtowny rozwój techniki. W 2004 roku było już ponad 150 takich systemów ([Tukaj, 2004](#)).

Początkowo dane LIDAR postrzegano jako idealne źródło danych wysokościowych, przydatnych do budowy numerycznego modelu terenu - NMT. W tym kontekście ich przewaga nad zdjęciami lotniczymi wyrażała się możliwością penetracji promieni laserowych przez roślinność, co pozwalało pozyskiwać również punkty na gruncie porośniętym lasem. W początkowym okresie koszt skanowania laserowego i obróbki danych był wysoki. Szybko jednak następował rozwój samych skanerów, jak i metod i narzędzi (oprogramowania) do obróbki bardzo dużej ilości danych. Skutkowało to wzrostem wydajności samego skanowania, wyrażającej się wzrostem gęstości punktów laserowych na gruncie, ale i obróbki danych, co łącznie powodowało obniżenie kosztów budowy NMT. W tym zakresie (budowa NMT) skaning laserowy stał się konkurencyjny dla zdjęć lotniczych, a nawet je stopniowo wypierał. Technikę skanowania laserowego szybko zaczęto postrzegać nie tylko jako źródło danych wysokościowych dla budowy NMT, ale jako dane bardzo przydatne do wielu innych zastosowań. Kluczowe znaczenie miała tu możliwość automatyzacji procesu obróbki i tworzenia produktów końcowych.

Chociaż technika lotniczego skanowania liczy sobie tylko nieco ponad 20 lat, to obecnie jest to technika dojrzała. W jej stosunkowo krótkiej historii rozwoju można zaobserwować wyraźne trendy:

1. Wzrost wydajności i gęstości punktów laserowych.
2. Wzrost liczby rejestrowanych odbić („ech”).
3. Analiza pełnego kształtu fali odbitej (Full-Waveform).
4. Łączenie skanowania laserowego z kamerą cyfrową.
5. Skanowanie batymetryczne.
6. Skanowanie wielospektralne.
7. Skanery jednofotonowe.
8. Skanowanie z platform bezzałogowych – BSL (Bezzałogowy Statek Latający).

2. PIERWSZE PUBLIKACJE I PRÓBY UŻYCIA LIDARU W KRAJU

Początki wdrażania techniki lotniczego skanowania laserowego w kraju do produkcji to druga połowa lat 90. To okres głębokich zmian politycznych i gospodarczych, umożliwiający m.in. przystąpienie do UE i dostęp do środków pomocowych. W obszarze fotogrametrii to okres gwałtownego rozwoju fotogrametrii cyfrowej. Stanowiło to podatny grunt dla zainteresowania nową techniką skanowania laserowego przez krajowe ośrodki badawcze, a następnie wdrożenia produkcyjne. Już w 1999 roku technika lotniczego skanowania laserowego została przybliżona w publikacji: Kurczyński Z.: „Lotniczy skaner laserowy – nowa technologia pozyskiwania danych o rzeźbie terenu” ([Kurczyński, 1999](#)).

Za początek opracowania danych LIDAR przez krajowe podmioty produkcyjne dla wytworzenia NMT można uznać rok 2000 i Firmę TMCE. Były to początkowo dane z zagranicy opracowywane dla zagranicznych klientów. Od 2003 roku można datować pierwsze próby użycia tej techniki w kraju. Do 2004 roku wykonano około 10 misji lotniczych z wyraźnym rosnącym trendem.

Pierwszą próbą produkcyjną na większą skalę była inicjatywa Biura Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa skanowania fragmentu miasta. W 2005 roku, zeskanowano cały Kraków z gęstością 12 punktów na metr kwadratowy ([Jędrychowski, 2007](#)). Było to bardzo udane przedsięwzięcie, które pokazało przydatność danych LIDAR dla planowania przestrzennego w dużym mieście i wykazało, jak stosunkowo łatwo dane takie wdrożyć do codziennej praktyki służb planistycznych. Pod tym względem inicjatywa Krakowa stała się przykładem zachęcającym dla innych miast.

W 2009 roku firma MGGP Aero kupiła pierwszy w kraju skaner Riegl LMS Q680i. Moment ten znacznie ułatwił implementację techniki skanerowej w wymiarze produkcyjnym.

Determinując zagadnienie rozwoju techniki LiDAR, należy szerzej postrzeć tło jej rozwoju. W tym czasie pojawiły się także wielkoformatowe kamery cyfrowe, które zaczęły szybko wypierać z produkcji kamery analogowe. Rozwój obu technik (skanerowej i zdjęciowej) był odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na aktualne geodane, skutkujące licznymi i dużymi projektami uruchamianymi na poziomie centralnym (GUGiK).

3. PROBLEMY BADAWCZE W ZAKRESIE ALS PODEJMOWANE PRZEZ OŚRODKI KRAJOWE

Pojawienie się danych lotniczego skanowania laserowego ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*), a później stały i szybki rozwój tej techniki, wyzwoliły zapotrzebowanie, ale i możliwości ich zaspokojenia w nowych obszarach problemów naukowych i aplikacyjnych. Pierwszym i najważniejszym stał się problem filtracji punktów chmury, tj. odfiltrowania punktów nie należących do gruntu (położonych na dachach, drzewach itp.). Dopiero tak odfiltrowane punkty mogły być podstawą budowy NMT. Z racji bardzo dużych zbiorów punktów ALS proces ten musiał podlegać automatyzacji. Pojawiło się tu wiele, również dość wyrafinowanych metod automatycznej filtracji. Oddzielnymi obszarami badań były (i są nadal) liczne aplikacje danych ALS.

Krajowe środowisko naukowe dość aktywnie włączyło się w te nurty badawcze. Samo inicjowało projekty badawcze oraz brało aktywny udział w zainicjowanych „odgórnie” dużych projektach wdrożeniowych. Wyniki prac były prezentowane na konferencjach międzynarodowych i krajowych oraz w licznych publikacjach.

Wśród krajowych wydarzeń naukowych, stanowiących forum wymiany informacji i doświadczeń z tego zakresu były (i są) coroczne sympozja Polskiego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji, a wydawnictwem, na łamach którego ta problematyka jest najliczniej reprezentowana jest „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”. Prześledzenie tych publikacji może dać miarodajny obraz rozwoju techniki lidarowej w kraju. Pierwsze publikacje z zakresu ALS ukazały się w Archiwum w roku 2002, a w latach 2002-2018 ukazało się 75 publikacji z tego zakresu. Część z nich miała bezpośrednie przełożenie na powstałe rozprawy doktorskie z tego zakresu. Próbując usystematyzować zakresy zainteresowań naukowych podejmowanych w tych publikacjach, można wskazać następujące:

- Budowa NMT z danych ALS (filtracja, ocena dokładności, detekcja linii nieciągłości, modelowanie powierzchni terenu, segmentacja danych, itd.) – 12 publikacji z przewagą Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu i Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie,

- Klasyfikacja danych ALS, generowanie numerycznych modeli pokrycia terenu – NMPT - 5 publikacji,
- Fuzja danych wieloźródłowych (ALS vs. zdjęcia, ALS vs. skaning naziemny - TLS, porównania, itd.) - 8 publikacji,
- Modelowanie obiektów 3D z danych ALS - 5 publikacji,
- Kalibracja radiometryczna obrazu intensywności, skanowanie wielospektralne – 3 publikacje z przewagą Politechniki Warszawskiej,
- Skanowanie z platform bezzałogowych (BSL) i wiatrakowców - 3 publikacje,
- Przetwarzanie dużych zbiorów danych ALS - 2 publikacje.

Wśród kierunków aplikacyjnych można m.in. wymienić:

- Leśnictwo (ochrona lasów, segmentacja koron drzew, zwarcie koron, numeryczny model koron drzew, budowa pionowa drzewostanów, aktualizacja Mapy Leśnej, szacowanie biomasy, itd.) - 11 publikacji z przewagą Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie,
- Modelowanie 3D obiektów - 5 publikacji,
- Zastosowania powodziowe, modelowanie hydrauliczne - 6 publikacji,
- Archeologia, ochrona zabytków - 1 publikacja,
- Inne (aplikacje środowiskowe, badania krajobrazowe, badania morskiej strefy brzegowej, skanowanie miast, kontrola LPIS, itd).

4. PRZEGLĄD PROBLEMÓW NAUKOWYCH

W zakresie badań naukowych najliczniejszą grupę publikacji stanowią publikacje dotyczące **budowy NMT z danych ALS**, a w tym metody filtracji danych, modelowanie powierzchni terenu, dokładność modeli, detekcja linii nieciągłości, standaryzacja produktów, tworzenie nowego i ocena funkcjonalności dostępnego oprogramowania. Wśród tego kierunku badań można m.in. wskazać (w układzie chronologicznym):

- Borkowski podejmujący problem modelowania powierzchni terenu zawierającego linie nieciągłości ([Borkowski, 2003](#)). Autor wykorzystuje w tym celu rozwiązania zadania wariacyjnego (technika *snake*) metodą Ritza. Podaje się algorytm i przykłady testowe.
- Piechocka i inni zajmują się weryfikacją jakości NMT z danych ALS ([Piechocka et al. 2004](#)). Do budowy NMT autorzy wykorzystują metodę aktywnego modelu TIN.
- Tukaj podejmuje problem dokładności opracowania danych ALS oraz ich standaryzacji ([Tukaj, 2004](#)). Autor przytacza standard ASPRS stosowany w USA.
- Borkowski i Józków zajmują się filtracją danych ALS metodami wielomianowych powierzchni ruchomych ([Borkowski, Józków, 2006](#); [Borkowski, Józków, 2007](#), [Borkowski, Józków, 2008](#)). Autorzy dokonują oceny metody.
- Zespół Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu zajmował się również oceną dokładności danych lotniczego skaningu ([Gołuch et al., 2007](#)). Referencją stanowił pomiar tachimetryczny i GPS.
- Borkowski i Sońnica podjęli problem filtracji danych ALS z zastosowaniem dyskretnej filtracji falkowej ([Borkowski, Sońnica, 2009](#)).
- Korzeniowska i Łacka porównywały funkcjonalność dostępnego oprogramowania do opracowania i wizualizacji danych ALS ([Korzeniowska, Łacka, 2011](#)).

- Pyka i inni porównywali dane ALS z wysokorozdzielczymi zdjęciami lotniczymi do opracowania NMT. Wskazali wyższość danych lidarowych (Pyka *et al.*, 2012).
- Brodowska porównywała działanie dwóch metod: aktywnego modelu TIN i predykcji liniowej, do segmentacji punktów terenowych z danych lidarowych (Brodowska, 2012).

Drugi kierunek badań stanowi problem **klasyfikacji danych ALS**, ich przetworzeniu oraz generowaniu i wizualizacji NMPT oraz wizualizacji. Rozdzielenie tej problematyki od poprzedniej (filtracja danych ALS) jest umowne. Ciąg technologiczny przetwarzania danych ALS łączy zwykle oba te etapy, tj. filtrację i klasyfikację. W tym nurcie można m.in. wskazać:

- Borkowski i Tymków wykorzystują do klasyfikacji punktów lidarowych sieci neuronowe, metodę największej wiarygodności i metodę k-najbliższych sąsiadów (Borkowski, Tymków, 2007).
- Hejmanowska i inni prezentują przetwarzanie danych ALS dla budowy NMT i NMPT w oprogramowaniu Terrasolid (Hejmanowska *et al.*, 2008). Podejmują problem dokładności wyników.
- Marmol podejmuje zadanie automatycznej detekcji danych zurbanizowanych i drzew z wykorzystaniem filtrów Gabora do klasyfikacji tekstury (Marmol, 2012).
- Twardowski i Marmol prezentują oprogramowanie opracowane w AGH do przetwarzania chmur punktów LiDAR, w tym filtracji i klasyfikacji z wykorzystaniem algorytmu częstotliwościowego (Twardowski, Marmol, 2012).
- Bratuś i inni wykorzystali obliczenia równoległe (procesory graficzne GPU) do klasyfikacji danych, w tym punktów *overlap* (w pasach pokrycia poprzecznego szeregów skanowania) (Bratuś *et al.*, 2017).

Śledząc rozwój techniki skanowania laserowego widać, że szybko dostrzeżono możliwości i zalety łączenia tej techniki z innymi danymi: zdjęciami lotniczymi i skanowaniem naziemnym – TLS (tzw. **fuzja danych wieloźródłowych**). W tym kierunku badawczym można m.in. odnotować:

- Marmol łączy dane ALS ze zdjęciami do wykrywania pojedynczych drzew (Marmol, 2009a, 2009b).
- Fryškowska i Kędziński integrują dane ALS i TLS do budowy modeli 3D. Prezentowane są metody integracji takich danych (Fryškowska, Kędziński, 2010).
- Warchoń i Hejmanowska podejmują problem łączenia danych z trzech źródeł: ALS, TLS i mobilnego skaningu naziemnego (Warchoń, Hejmanowska, 2011; Warchoń, 2013). Prezentują ocenę dokładności poprzez odniesienie do pomiaru tachimetrycznego.
- Dominik porównuje chmury punktów z ALS z chmurami utworzonymi z gęstego dopasowania wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych (Dominik, 2014). Autor wykorzystuje metodę *Semi-Global Matching* - SGM do tworzenia gęstych chmur punktów ze zdjęć.

Modelowanie obiektów 3D na bazie lotniczego skaningu laserowego to obszerna i ważna tematyka będąca w polu zainteresowania różnych ośrodków i autorów. Dotyczy jej wiele

publikacji zarówno o charakterze metodycznym jak i aplikacyjnym. Trudno jest często rozdzielić te dwa obszary aktywności. Można tu m.in. wyróżnić:

- Borowiec prezentuje półautomatyczną metodę rekonstrukcji budynku 3D w oparciu o dane pochodzące z lotniczego skanowania laserowego ([Borowiec, 2009](#)). Głównym celem jest określenie kształtu dachu budynku, a następnie jego zrekonstruowanie z zachowaniem topologii. Chmura punktów dzielona jest na jednakowe woksele, tak aby odpowiadały one standardom CityGML, na poziomie szczegółowości LoD2. W wokselaach aproksymowane są płaszczyzny.
- Jarząbek-Rychard i Borkowski rekonstrukcję brył budynków opierają na segmentacji danych ([Jarząbek-Rychard, Borkowski, 2010](#)). Przedstawiono analizę dwóch, najczęściej wykorzystywanych w celu algorytmów: RANSAC i rosnących płaszczyzn.
- Borowiec wykorzystuje mapy ewidencyjne, które umożliwiły ze zbioru punktów wybrać punkty odbite od dachów budynków ([Borowiec, 2010](#)). Modele budynków pozyskane dzięki integracji danych wektorowych z ewidencji oraz danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego osadzone są na NMT.
- Jarząbek-Rychard i Borkowski proponują automatyczną ekstrakcję konturów budynków z danych ALS jako podstawę do rekonstrukcji brył budynków ([Jarząbek-Rychard, Borkowski, 2011](#)).
- Habib i inni wykorzystują do generowania modeli budynków zarówno dane ALS jak i zdjęcia lotnicze. Wykorzystuje się oba podejścia: oparte na danych (*data-driven*) jak i oparte na modelach (*model-driven*) ([Habib et al., 2011](#)).
- Borkowski i Józków przeprowadzają analizę dokładności modelowania Zamku Piastów Śląskich w Brzegu ([Borkowski, Józków, 2012](#)). Modelowanie wykonano na poziomie szczegółowości LoD3. Do modelowania wykorzystano program Cyclone 7.1 oraz opracowane w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki programy do nakładania tekstur i konwersji danych. Ocenę dokładności przeprowadzono poprzez porównanie z pomiarami terenowymi.
- Jarząbek-Rychard prezentuje w pełni automatyczną metodę budowy trójwymiarowych modeli budynków przedstawionych za pomocą linii szkieletowych ([Jarząbek-Rychard, 2012](#)). Wykorzystuje przy tym autorski algorytm wykrywania konturów budowli tylko na bazie danych ALS. Metoda jest ilustrowana opracowaniem zabudowy małego miasta.
- Borowiec przedstawia sposób wykrycia i określenia połączenia dachu budynku tylko na podstawie chmury punktów ([Borowiec, 2013](#)). Zdefiniowanie kształtu dachu odbywa się w trzech etapach. Pierwszy etap to znalezienie miejsc występowania budynku, drugi to dokładne określenie krawędzi, natomiast trzeci to wskazanie płaszczyzn dachu. Do określania przebiegu krawędzi dachu budynku wykorzystuje się transformację Hough'a.
- Marjasiewicz i Malej półautomatycznie generowanie brył budynków opierają na algorytmie RANSAC zaimplementowanym w oprogramowaniu Cloud Compare ([Marjasiewicz, Malej, 2014](#)). Oprócz danych ALS wykorzystują bazę BDOT do identyfikacji przyziemi budynków. Przeprowadzono dwa eksperymenty z różną gęstością punktów. Zaproponowana metodyka umożliwiła stworzenie modeli charakteryzujących się dokładnością wyższą niż poziom LoD2 CityGML.

- Cisło-Lesicka i inni przedstawili systematyzację metod modelowania ze skaningu lotniczego z wyartykułowaniem zalet i wad podejścia parametrycznego i nieparametrycznego ([Cisło-Lesicka et al., 2014](#)). Praca kończy się propozycją strategii modelowania w kontekście stanu georeferencyjnych baz danych w Polsce, perspektyw ich rozwoju oraz zapotrzebowania na dane przestrzenne z punktu widzenia społecznego i gospodarczego.
- Pilarska i inni przedstawili analizę dokładności modeli budynków w oparciu o chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego ([Pilarska et al., 2017](#)). Metodyka przedstawiona w artykule opiera się na wymaganiach projektu CAPAP.

Skanowanie laserowe wykorzystuje lasery pracujące w zakresie bliskiej podczerwieni. Ten zakres całkowicie jest pochłaniany przez wodę. Pojawiły się także skanery oparte o tzw. laser zielony (długość fali $\lambda=532$ nm) penetrujący wodę – tzw. skanery batymetryczne. Pozwalają one mierzyć topografię dna płytkich wód morskich czy wód śródlądowych. Takie skanery zwykle są wyposażane w dwa lasery: zielony i podczerwony.

Idąc dalej, spotyka się skanery pracujące na trzech długościach fali: zielonej, podczerwonej ($\lambda=1064$ nm) i podczerwonej średniej ($\lambda=1550$ nm). Określa się jako **skanery wielospektralne**. Problematykę tę przybliżył [Bakuła \(2015\)](#). Skanery laserowe to dalmierze, rejestrujące odległość. Szybko okazało się, że przydatna jest również rejestracja mocy penetrującego sygnału, co daje tzw. obraz intensywności. Znaczenie intensywności rośnie, szczególnie w kontekście klasyfikacji chmury punktów. W przypadku skanowania wielospektralnego pojawia się potrzeba kalibracji radiometrycznej. Problematykę tę przybliżyła [Pilarska \(2016\)](#).

Skanowanie BSL i wiatrakowce. Postęp techniczny techniki skanerowej prowadzi do miniaturyzacji samych skanerów. Intensywnie rozwija się ostatnio skanowanie z platform bezzałogowych (BSL). Możliwości tej techniki przybliży obszerny artykuł ([Ostrowski et al., 2017](#)). Pułap pośredni, między platformami lotniczymi a platformami bezzałogowymi stanowić mogą tzw. wiatrakowce, stanowiące pewną konkurencję dla platform lotniczych. Specyfikę skanowania z wiatrakowców przybliży publikacja ([Kolecki et al., 2015](#), [Kolecki et al., 2017](#)).

Dane skanerowe kojarzą się z ogromnymi zbiorami. Ich efektywne opracowanie wymaga dużych mocy obliczeniowych. Mają tu zastosowanie obliczenia równoległe, oparte na procesorach graficznych. Tymi zagadnieniami zajmowała się firma Dephos w ramach projektu „Badania nad masowym przechowywaniem, udostępnianiem i przetwarzaniem danych laserowych ([Będkowski et al., 2015](#))”.

5. PRZEGLĄD PROBLEMÓW APLIKACYJNYCH

Można wskazać wiele obszarów, w których dane lidarowe znajdują zastosowanie. O atrakcyjności takich danych decyduje w pierwszej kolejności ich wysoka dokładność, szczególnie wysokościowa, duża gęstość punktów laserowych, co przekłada się na dobrą reprodukcję kształtu modelowanej powierzchni i obiektów, oraz penetracja roślinności, mająca znaczenie w modelowaniu powierzchni terenu porośniętego lasem, a co jest niemożliwe ze zdjęć lotniczych.

Na czoło wysuwają się tu zastosowania skaningu laserowego w **leśnictwie**. Znajduje to odbicie w licznych publikacjach z tego zakresu. Można tu wskazać:

- wykrywanie pojedynczych drzew w chmurze punktów i modelowanie kształtu koron – tzw. numeryczny model koron CHM (ang. *Crown Height Model*) oraz określanie parametrów taksonometrycznych drzewostanu związanych z koronami drzew ([Weżyk, 2008](#); [Marmol, Będkowski, 2008](#); [Borowiec, Niemiec, 2018](#)),
- integracja danych lidarowych i zdjęć lotniczych ([Marmol, 2009](#); [Weżyk et al., 2016](#)),
- określanie zwarcia koron drzew ([Weżyk, Wawrzeczek, 2009](#)),
- zastosowanie skaningu laserowego dla tworzenia Leśnej Mapy Numerycznej - LMN ([Weżyk et al., 2010](#)),
- określenie wysokości drzew i przestrzennej budowy drzewostanu na bazie skaningu laserowego ([Weżyk, Solecki, 2008](#); [Zarzycka, Będkowski, 2012](#)),
- skaningu laserowego w ochronie parków narodowych ([Weżyk et al., 2018](#)),
- inwentaryzacja zieleni miejskiej ([Urbański, Bakula, 2018](#)).

Głównym zastosowaniem danych skaningu laserowego jest niewątpliwie budowa precyzyjnych numerycznych modeli terenu, w pierwszej kolejności dla potrzeb **modelowania hydraulicznego i przeciwdziałania zagrożeniom powodziowym**. W tym obszarze znajdujemy publikacje dotyczące:

- map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego ([Kurczyński, 2012](#)),
- generowanie NMT o zasięgu krajowym z danych LiDAR - Projekt ISOK ([Kurczyński Bakula, 2013](#)),
- wykorzystanie danych LiDAR do dwuwymiarowego modelowania hydraulicznego ([Bakula, 2014](#)),
- redukcja danych skaningu laserowego do tworzenia NMT dla modelowania powodziowego ([Bakula, 2011](#); [Bakula, 2012](#)),
- zaawansowane technologie w przeciwdziałaniu zagrożeniom powodziowym – Projekt SAFEDAM ([Kurczyński, Bakula, 2016](#)).

Obszarem, w którym dane lotniczego skanowania laserowego znalazły szerokie zastosowanie, a nawet entuzjastyczne przyjęcie jest **ochrona zabytków i archeologia**. Okazało się, że dane takie pozwalają spojrzeć zupełnie inaczej na pozostałości fortyfikacji, cmentarzyisk, kurhanów, innych śladów obecności i działalności człowieka w minionych wiekach, szczególnie w obszarach porośniętych lasem, skutecznie maskującym te pozostałości. Dane ze skaningu laserowego stanowią nową generację danych geoprzestrzennych. „Usunięcie” warstwy roślinności, a taką możliwość dają te dane, stwarzają archeologom nowe możliwości inwentaryzacji reliktyw przeszłości ([Zawieska et al., 2013](#)). Szerokie zainteresowanie danymi lidarowymi w środowisku archeologów stało się motorem do opracowania swego rodzaju specjalistycznego zbioru „dobrych praktyk” i wytycznych stosowania takich danych w badaniach archeologicznych pt.: „Zalecenia w zakresie pozyskiwania, przetwarzania, analizy i zastosowania danych LIDAR w celu rozpoznania zasobów dziedzictwa archeologicznego w ramach programu AZP” ([Bakula et al., 2016](#); [Zapłata et al., 2018](#)).

Dane skanowania laserowego, dzięki pełnemu pokryciu kraju takimi danymi w ramach Projektu ISOK i dalszej aktualizacji dzięki działaniom projektu CAPAP i działalności własnej GUGIK znajdują również wiele innych zastosowań. Można tu wymienić:

- kontrolę dopłat bezpośrednich dla rolników w ramach LPIS ([Weżyk et al., 2009](#)),
- badania krajobrazu ([Adamczyk, Będkowski, 2007](#)),
- badanie morskiej strefy brzegowej ([Dudzińska-Nowak, 2007](#)),
- generowanie tzw. „prawdziwej ortofotomapy” ([Zabrzaska-Gasiorek, Borowiec, 2007](#)).

6. KRAJOWY POTENCJAŁ PRODUKCYJNY

Jak podkreślano wcześniej, początki i rozwój skaningu lotniczego zbiegły się w czasie z okresem przemian gospodarczych. Powstały firmy fotolotnicze wyposażone w nowe samoloty, wielkoformatowe cyfrowe kamery lotnicze, lotnicze skanery laserowe, a z czasem i inne systemy obrazowania. Firmy te pozyskują dane fotogrametryczne i je opracowują lub przekazują innym podmiotom zimującym się tylko ich opracowaniem. Sprzęt ten szybko wszedł do rutynowej produkcji.

Pod względem potencjału produkcyjnego na tym rynku na czoło wysuwa się firma **MGGP Aero** z Tarnowa operująca pięcioma własnymi samolotami i trzema helikopterami. Pierwszy skaner Riegl LMS Q680i zakupiła w październiku 2009 roku, a drugi identyczny rok później. Obecnie dysponuje 8 skanerami (wszystkimi firmy Riegl), które nadal pracują. Firma średnio rocznie skanuje 30 000 km² w projektach powierzchniowych i około 60 000 km obiektów liniowych (tzw. korytarzowych).

Firma operuje nie tylko na rynku krajowym, była obecna również w 13 krajach europejskich. Z ważniejszych projektów zrealizowanych przez MGGP Aero można wymienić:

1. 2010. KZGW. Inwentaryzacja obszarów po powodzi w 2010 dla obszaru ok. 10 000 km².
2. 2010. IMGW Gdańsk. Pilotaż dla projektu ISOK na obszarze Żuław.
3. 2009-2016. Słowiński Park Narodowy. Skanowanie wydm Słowińskiego PN w okresie 2009 – 2016. Monitoring ruchu mas ziemnych.
4. 2010-2019 ISOK / CAPAP. Znaczący udział.
5. 2011. UKSW. Pierwsze skanowanie ALS obiektu archeologicznego Krzemionki Opatowskie w Górach Świętokrzyskich.
6. 2016. Biuro Urządzania Lasu. Skanowanie 3 nadleśnictw w ramach projektu RemBioFor - opracowanie metodyki inwentaryzacji lasów z użyciem ALS.
7. 2017. IMGW. Monitoring wałów przeciwpowodziowych.

Oprócz rutynowych prac związanych głównie z opracowaniem modeli wysokościowych, firma legitymuje się również opracowaniami nietypowymi, wymagającymi rozwiązań koncepcyjnych:

1. 2009. KWB Adamów. Pierwsze wielkoobszarowe skanowanie laserowe i pierwsze odkrycia powierzchniowych stanowisk archeologicznych.
2. 2011- 2012. Parki Narodowe: Słowiński, Biebrzański, Ujście Warty, Wigierski, Wielkopolski, Ojcowski, Magurski, Karkonoski, Bieszczadzki, Tatrzański. Obecnie następują powtórzenia opracowań dla oceny dynamiki zmian.
3. 2016-2019. Innowacyjne podejście wspierające monitoring nieleśnych siedlisk przyrodniczych Natura 2000 z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych HabitARS - Habitats Airborne Remote Sensing (Projekt NCBR).

Druga firma obecna na rynku to **OPEGIEKA** z Elbląga. W zakresie skaningu laserowego firma dysponuje trzema samolotami i trzema skanerami: Riegl Q680i (od 2011 roku), bispektralnym VQ1560i-DW i VQ1560-II. Większe projekty to:

1. 2013-2015. Węgry. Eurosense Kft. Dane wysokościowe do celów ochrony przeciwpowodziowej. Wszystkie rzeki na Węgrzech.
2. 2013-2019. ISOK 2 i CAPAP.
3. 08/2017 – 12/2017 (tylko 4 miesiące!). Litwa NLS - National Land Service. Pozyskanie danych dla 10 największych miast na Litwie o łącznej powierzchni 2 500 km²) i średniej gęstości chmury 37 pkt/m² wraz ze zdjęciami o pikselu terenowym poniżej 0.10 m.
4. Przełom 2018/2019. Urząd Morski w Gdyni. Monitoring brzegu morskiego.

Firma ma własny ośrodek przetwarzania danych tzw. Data Center. Prowadzi prace badawczo-rozwojowe w zakresie algorytmów uczenia maszynowego. Od 2019 r. produkcyjnie wykorzystuje sztuczne sieci neuronowe w klasyfikacji chmur punktów ALS. Prowadziła prace związane z inwentaryzacją drzewostanów w oparciu o dane wielospektralnego skanera laserowego w ramach projektu „TreeQuant”. Opracowała autorską technologię segmentacji pojedynczych drzew. Ma udział w projekcie realizowanym z Politechniką Warszawską „Centrum naukowych analiz geoprzestrzennych, obliczeń satelitarnych wraz z laboratoriami testowania/certyfikacji produktów geomatycznych (CENAGIS)” realizowanego w latach 2019-2021. Firma jest obecna na 12 rynkach zagranicznych: Turcja, Grecja, Niemcy, Holandia, Norwegia, Litwa, Chorwacja, Węgry, Słowacja, Francja.

Kolejną firmą jest **GISPRO** ze Szczecina dysponująca dwoma samolotami i dwoma skanerami Riegl-VQ780i, Riegl-Q680i. Większe projekty realizowane przez nią to:

1. Pozyskanie danych wysokościowych w technologii lotniczego skanowania laserowego i dostarczenie produktów pochodnych w ramach projektów ISOK i CAPAP (od 2010 r).
2. Pomiar objętości złóż kopalni odkrywkowych oraz monitoring deformacji.
3. Inwentaryzacja linii elektroenergetycznych, dróg, kolei i rurociągów w Polsce, Czechach, Niemczech, Holandii, Portugalii, Danii, Rumunii, Hiszpanii.
4. Inwentaryzacja archeologiczna.

Firma obecnie m.in. realizuje projekt, którego celem jest opracowanie innowacyjnej technologii wielosensorycznego lotniczego skanowania spektralno-przestrzennego poprzez integrację kanałów: RGB, NIR, RE oraz LIDAR na potrzeby wielkopowierzchniowej inwentaryzacji oraz parametryzacji lasów oraz pól uprawnych.

W ubiegłym roku na rynek weszła firma **SmallGIS**, dysponująca dwoma ultralekkimi samolotami i skanerem VQ-780i zintegrowanym z kamerą średnioformatową.

Z powyższego widać, że potencjał wykonawstwa krajowego w zakresie skaningu laserowego jest duży, nawet wykraczający poza bieżące zapotrzebowanie krajowe. Sprzyja to obniżaniu kosztów i upowszechnianiu się tej techniki.

7. STAN POKRYCIA KRAJU DANymi ALS

W rozwoju techniki skaningu laserowego i pokryciu kraju takimi danymi niewątpliwym przełomem był projekt ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi

zagrożeniami), realizowany z wykorzystaniem środków unijnych w latach 2010 – 2015. Projekt ten stanowił odpowiedź na tzw. Dyrektywę Powodziową, nakładającą na kraje UE obowiązek sporządzenia map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego. W kraju postanowiono te mapy sporządzić na bazie danych skaningu laserowego, wykorzystanych do budowy precyzyjnego numerycznego modelu terenu. W ramach Projektu 92% powierzchni kraju pokryto skanowaniem o gęstości 4 punkty/m², a miasta 12 punktów/m².

Z danych tych wytworzono NMT w strukturze GRID o rozdzielczości (oczko siatki) równej 1 m i dokładności wysokościowej (błąd średni) 0.15 m. Produkty trafiły do państwowego zasobu geodezyjnego i są łatwo dostępne, dla większości użytkowników bezpłatnie (Kurczyński, 2012; Kurczyński, Bakula, 2013). W pierwszej kolejności posłużyły dla modelowania hydraulicznego i wytworzenia map zagrożenia i ryzyka powodziowego. Sukcesem projektu było ogromne zainteresowanie jego wynikami pochodzące z bardzo różnych branż. Na upowszechnienie tych wyników zapewne wpływ miały „Szkolenia z Wykorzystania Produktów LiDAR”, wykonywane są w ramach zamówienia GUGiK na „Kompleksową organizację szkoleń z wykorzystania Produktów LiDAR opracowanych w ramach realizacji projektu ISOK”. Na produktach ALS opiera się realizowany w GUGiK Projekt CAPAP (Centrum Analiz Przestrzennych Administracji Publicznej) stawiający sobie za cel m.in. zadanie modelowania 3D w skali całego kraju.

Obecnie cały kraj ma pokrycie danymi ALS w standardzie tożsamym z ISOK. W rezultacie lokalnych inicjatyw są realizowane liczne lokalne projekty, głównie dla potrzeb modelowania 3D w miastach, inwentaryzacji parków narodowych, tworzenia planów urządzania lasów, inwentaryzacji linii przesyłowych itd. Rysunek 1 przedstawia aktualny stan pokrycia kraju takimi danymi.

8. I CO DALEJ?

Cały kraj jest pokryty danymi ALS w podstawowym standardzie 4 p./m², a miasta 12p./m². Lokalnie występują większe gęstości. Zdecydowaną większość obszarów pokryto w ramach Projektu ISOK – lata 2010-2014 (rys. 1). Dane i produkty się starzeją, podnoszony jest problem ich aktualizacji. Jeśli jako produkt postrzegać numeryczny model terenu (NMT) to zmiany (a więc i potrzeba aktualizacji) następują wolno. Dodatkowo wiemy, gdzie takie zmiany wystąpiły (roboty ziemne związane z budową tras komunikacyjnych, odkrywki itp.). Inaczej wygląda sytuacja w zakresie numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT), tu zmiany następują szybko, a w miastach nawet bardzo szybko (budownictwo, zmiany obszarów zalesionych itp.).

Z drugiej strony, pokrywamy regularnie (szczególnie miasta) zdjęciami o dużej i bardzo dużej rozdzielczości (GSD=0.05-0.10 m). W połączeniu z poczynionym w ostatnich latach postępowaniem w tzw. gęstym dopasowaniem zdjęć stanowi to alternatywne źródło aktualizacji szczególnie NMPT i modeli 3D. Według obecnego stanu zdjęcia wykonuje się w krótszych cyklach czasowych niż ALS (z powodów niezależnych od potrzeb aktualizacji NMPT), również koszty zdjęć są niższe. Reasumując ten wątek, aktualizacja pokrycia kraju danymi ALS nie będzie tak częsta. W GUGiK mówi się o cyklu sześcioletnim.

Kolejną kwestią jest standard skanowania, a w tym gęstość. Rozwój techniki ALS (sprzęt, oprogramowanie, metody opracowania) powoduje obniżenie kosztów, obserwuje

się tendencję wzrostu gęstości skanowania. Objawieniem tutaj są tzw. skanery jednofotonowe, przełamujące barierę gęstości, wydajności i kosztów, które dość nieoczekiwanie pojawiły się na rynku w minionych 3-4 latach. W chwili obecnej środowisko bacznie się przygląda tej rewolucyjnej technice ([Kurczyński, 2019](#)). Najbliższe lata pokażą, jak się to przełoży na rzeczywistość rynkową.

Prognozując przyszłość, należy również wspomnieć o szybkim rozwoju skanowania laserowego z pokładu bezzałogowych statków. Tu rozwój następuje bardzo szybko, będzie to jednak rozwój równoległy do skanowania z samolotów załogowych, zaspokajający lokalne potrzeby o ograniczonym zasięgu obszarowym.

Details of authors:

prof. dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński
e-mail: kurczynski@wp.pl
tel: (48) 501 081 550

Submitted 1.12.2019
Accepted 31.12.2019

