

# FOTOGRAMETRYCZNE OKREŚLENIE DEFORMACJI NAWIERZCHNI LEŚNEGO SZLAKU OPERACYJNEGO

## Streszczenie

Opisano sposób pomiaru deformacji nawierzchni odcinka leśnego szlaku operacyjnego i leżącej przy nim składnicy drewna po jednym roku użytkowania od stanu nowego. Wykorzystano technologię fotogrametrii zrealizowaną w dwóch nalotach drona. Naloty wykonano w niskim przelocie, ok. 4 m nad gruntem, co pozwoliło na otrzymanie materiału metrycznego o pikselu 3 mm. Z każdego przelotu uzyskano materiał fotograficzny, na podstawie którego otrzymano, m.in. Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT) i ortomozaikę. Różnica NMPT z drugiego i pierwszego przelotu ukazała zmiany geometrii nawierzchni obserwowanego obiektu. Analizę tych różnic ograniczono tylko do powierzchni jezdni i składnicy, ponieważ na poboczach pojawiła się sukcesja roślinna. W wynikach podano raster różnicowy, jego podstawową statystykę, histogram różnic oraz wykonane na bazie tego rastra wykresy obrazujące różnice wysokości wzdłuż trasy, w osi przepustu rurowego i w przekroju poprzecznym przy składnicy, gdzie zaobserwowano największe zmiany. Stwierdzono bardzo dużą przydatność zastosowanej technologii do kontroli deformacji korpusu szlaków i dróg, zwłaszcza tych o nawierzchniach podatnych.

**Słowa kluczowe:** leśne szlaki operacyjne, użytkowanie szlaków, kontrola geometrii nawierzchni, fotogrametria, nalot niskiego pułapu

## Wstęp

Reżim czasowy i technologiczny robót inżynierskich oraz aktualność danych wymusza korzystanie z nowoczesnych środków i sposobów zdobywania informacji o terenie. Dostępność technologii, typu fotogrametrii czy LIDAR, w znaczny sposób ułatwia ich wykorzystanie i ustanawia standard działania [1]. Budowle inżynierskie funkcjonujące na terenach zarządzanych przez PGL Lasy Państwowe muszą być realizowane według przyjętych w prawodawstwie procedur oraz cechować się trwałością konstrukcji, a w razie stwierdzenia uszkodzeń eksploatacyjnych wpływających na możliwość użytkowania tych budowli, zarządca powinien szybko reagować wykonując odpowiednie remonty.

W artykule opisano możliwości stosowania nowoczesnych metod uzyskiwania materiałów o charakterze metrycznym [2, 3, 4, 5], tzn. takich, na podstawie których można określić parametry geometryczne konstrukcji. Materiały te zawierają potrzebne informacje, mogące służyć np. określeniu stopnia zużycia nawierzchni szlaku operacyjnego związanego z jego użytkowaniem.

Do uzyskania odpowiedniego jakościowo produktu metrycznego zastosowano bezzałogowy statek powietrzny, który za pomocą zainstalowanej kamery fotograficznej zebrał dane w postaci filmu wysokiej jakości. Obróbka materiału fotograficznego, przy użyciu specjalistycznego oprogramowania, doprowadziła do powstania odpowiednich produktów metrycznych [6, 7]. Warunkiem niezbędnym jest fotografowanie obiektu wraz z założoną, widoczną na zdjęciach i pomierzoną geodezyjnie, siecią referencyjną w postaci punktów rozmieszczonych na zewnątrz robót ziemnych. Taka sieć musi być trwała, jeśli planowane jest wykonywanie kolejnych nalotów i pomiarów do porównań [8]. Można też stosować drony z odbiornikami RTK [9], co zdaniem producentów pozwala zupełnie wyeliminować sieć naziemnych punktów referencyjnych, uzyskując jednocześnie wystarczającą precy-

zję określenia współrzędnych przestrzennych.

Przedmiotem badań była płaszczyzna nawierzchni użytkowanego leśnego szlaku operacyjnego.

Celem badań było określenie wielkości deformacji nawierzchni na odcinku szlaku operacyjnego i składnicy drewna po roku użytkowania.

## Obszar badań i metodyka

Obserwacje prowadzono na odcinku szlaku operacyjnego (długość ok. 60 m) wybudowanego na terenie Nadleśnictwa Limanowa (leśnictwo Kostrza, oddz. 28). Nawierzchnia szlaku jest tłuczniowa, a w podbudowie, w miejscach podmokłych, zastosowano wzmocnienie w postaci geosyntetycznej membrany separacyjnej i dyłowania (drewno jodłowe korowane, impregnowane). Naloty bezzałogowym statkiem powietrznym wykonano 6 września 2019 roku (tuż po ukończeniu budowy) oraz 23 sierpnia 2020 roku. Szlak i składnica były w tym czasie użytkowane, jednak autorzy nie dysponują danymi na temat wielkości i intensywności transportu drewna w tym czasie.

Dla badanych funkcjonujących obiektów drogowych układ punktów referencyjnych (tzw. fotopunktów) musi być założony poza obszarami, na których wykonywany będzie transport i składowanie drewna w warunkach leśnych obszary te wykraczają poza jezdnię i nawierzchnię składnicy. Układ odniesienia nie może ulec jakimkolwiek przemieszczeniu, jeśli planuje się wykonanie kilku nalotów w innym czasie i porównywanie stanu nawierzchni z tych nalotów. W prezentowanych badaniach, obejmujących niewielki obszar, zastosowano układ dwunastu punktów, które rozłożono na obwodzie ukończonego już obiektu, a ich współrzędne przestrzenne określono klasycznym pomiarem geodezyjnym. Na podstawie współrzędnych tych punktów, w przeprowadzonym dopasowaniu fotogrametrycznym, ustala się współrzędne przestrzenne każdego piksela na zdjęciach obiektu wykonanych w czasie nalotu.

Naloty fotogrametryczne wykonano za pomocą drona DJI Mavic Pro z kamerą integralną, który był sterowany ręcznie, realizując lot poniżej koron drzew ok. 4 m nad poziomem terenu z prędkością ok.  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , z jednoczesnym nagrywaniem filmu FHD 24 klatki na sekundę (z późniejszą separacją co ok. 20. klatki). Zakładany procent pokrywania się zdjęć to 70% wzdłuż i 70% w poprzek szlaku.

Wyselekcjonowane zdjęcia opracowano w programie Agisoft Photoscan Professional 1.4.3. Dla obydwu nalołów (osobno) w pierwszym etapie zdjęcia połączono (nałożono na siebie) uzyskując rzadką chmurę punktów. Następnie dopasowano łączone zdjęcia do układu referencyjnego o znanych współrzędnych przestrzennych. W dalszych etapach powstały kolejno: gęsta chmura punktów, model przestrzenny (trójkątowa siatka mesh), numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) i ortomozaika.

## Wyniki opracowania

Najważniejsze było pozyskanie NMPT z obu nalołów. Charakteryzowały się one pikselem o wymiarach  $3 \times 3 \text{ mm}$  i w takiej rozdzielczości określona została wysokość terenu (przypisana do każdego piksela). NMPT pokazują płaszczyznę leżącą na powierzchni wszystkich fotografowanych przedmiotów (łącznie z roślinami porastającymi pobocza i skraj jezdni oraz odpadami po transporcie i składowaniu drewna (rys. 1), dlatego obcięto je do granic jezdni i składnicy. To obcięcie i doprowadzenie obu NMPT do jednakowych kształtów pozwoliło na porównanie ich i usunęło niepotrzebne informacje zakłócające pomiary (roślinność na poboczach). Różnica obu NMPT, wykonana w programie QGIS 3.16.0 Hannover, (różnica wysokości przypisanych tak samo położonym pikselom, liczona: NMPT 2020 minus NMPT 2019 - rys. 2) pokazała deformację nawierzchni jezdni i składnicy. Podstawowa charakterystyka statystyczna uzyskanych różnic przedstawia się następująco: maks.  $0,3394 \text{ m}$ , min.  $-0,1240 \text{ m}$ , średnio  $-0,0201 \text{ m}$ , odchylenie stand.  $0,0463 \text{ m}$ .

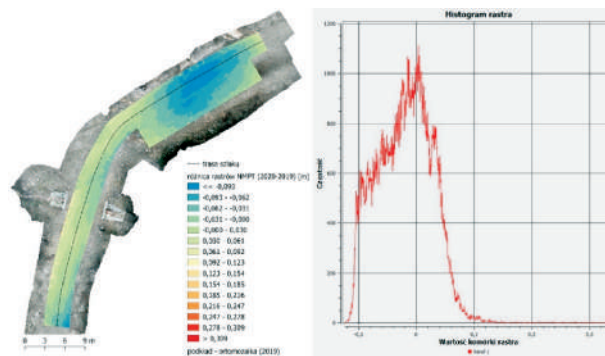
Na podstawie uzyskanego materiału pokazano różnice wysokości terenu (nie są to klasyczne przekroje w płaszczyźnie pionowej) w wybranych kierunkach: wzdłuż trasy (rys. 3), w przekroju poprzecznym wskazanym w miejscu największej deformacji jezdni (przy składnicy, rys. 4) i w osi przepustu rurowego (rys. 5). Oczywiście możliwe jest wykonanie podobnych zobrazowań w dowolnym miejscu i kierunku.



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 1. Ortomozaiki odcinka szlaku z 2019 r. (po lewej) i 2020 r. (po prawej)

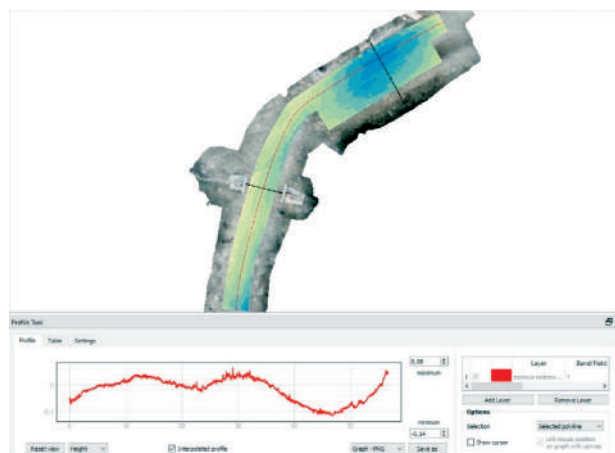
Fig. 1. Orthomosaics of the trail section: from 2019 (left) and 2020 (right)



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 2. Deformacja nawierzchni szlaku i składnicy z histogramem częstości zmierzonych różnic (w podkładzie ortomozaika z 2019 r.)

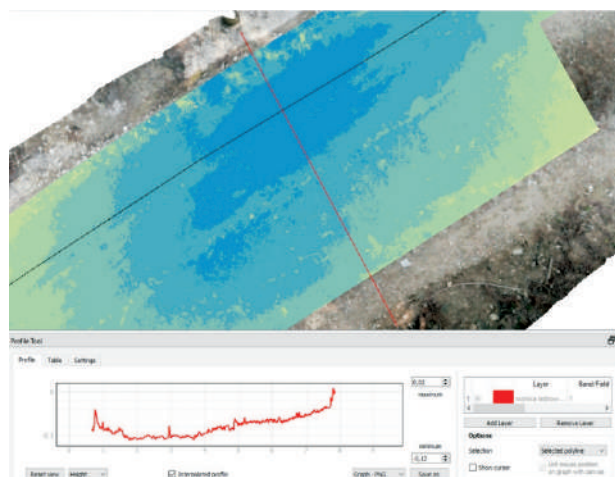
Fig. 2. Deformation of the trail and depot surface with a histogram of the frequency of the measured differences (in the orthomosaic foundation from 2019)



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 3. Deformacja nawierzchni szlaku wzdłuż przebiegu trasy (w podkładzie ortomozaika z 2019 r.). Skala barw NMPT jezdni wg rys. 2.

Fig. 3. Deformation of the trail surface along the route (in the orthomosaic foundation from 2019). The road DSM color scale as per Fig. 2.

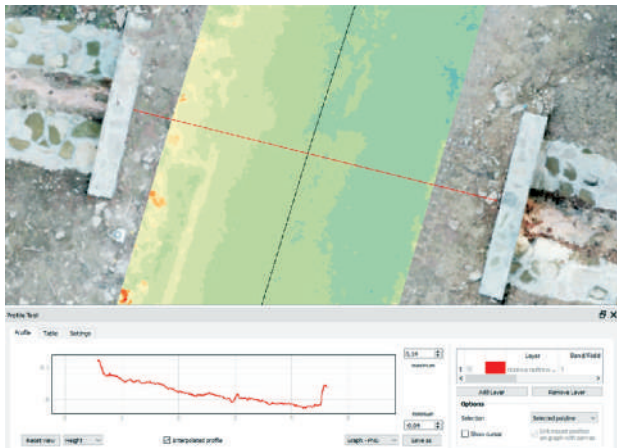


Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 4. Deformacja nawierzchni szlaku w przekroju poprzecznym przy składnicy (w podkładzie ortomozaika z 2019 r.). Skala barw NMPT jezdni wg rys. 2.

Fig. 4. Deformation of the trail surface in the cross-section at the repository (in the orthomosaic foundation from 2019). The road DSM color scale as per Fig. 2.





Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 5. Deformacja nawierzchni szlaku w osi przepustu rurowego (w podkładzie ortomozaika z 2019 r.). Skala barw NMPT jezdni wg rys. 2.

Fig. 5. Deformation of the trail surface in the axis of the pipe culvert (in the orthomosaic foundation from 2019). The road DSM color scale as per Fig. 2.

### Podsumowanie i wnioski

Zastosowana technologia precyzyjnie pokazuje zmiany geometrii nawierzchni związane z użytkowaniem obserwowanych leśnych obiektów inżynierskich.

Interpretacja zmian ukazanych w rastrze różnicowym (z fotogrametrii) powinna być prowadzona równocześnie z kontrolą spostrzeżeń na obrazie ortomozaiki, z uwagi na możliwość błędnego zaklasyfikowania przyczyny konkretnej zmiany, np. sukcesja roślinna może być odczytana jako podniesienie się poziomu gruntu. Taką właśnie sytuację zaobserwowano w kilku miejscach przy lewej krawędzi jezdni w sąsiedztwie przepustu, gdzie wykazane różnice wysokości osiągnęły ok. 30 cm (rys. 1, rys. 5). Inne, dodatnie przyrosty rzędnych (ok. 2 cm, rys. 3) mogą być efektem przesunięcia materiału nawierzchni z bardziej obciążonych śladów kół w strefę środka jezdni, możliwe jest również przesunięcie luźnych okruchów tłucznia albo też kumulacja ścióły lub innych odpadów organicznych.

Miejscowe obniżenie rzędnych nawierzchni przy składnicy (nawet o ponad 10 cm, rys. 3 i 4) to efekt dużych nacisków jednostkowych wywołanych kołami pojazdów z drewnem podczas załadunku - nastąpiło dodatkowe zagęszczenie tłucznia w nawierzchni. Ta zmiana jest wyraźnie powierzchniowa, a nie „koleinowa”, skąd może wynikać wniosek o słabszym (w całym tym miejscu) zagęszczeniu nawierzchni lub podłoża, ale po części może to być także efekt pracy pojazdów przy mygłowaniu dłużyc. Obniżeniu uległy również rzędne nawierzchni samej składnicy wykonanej z prefabrykowanych płyt żelbetowych, lecz zmiany te są znacznie mniejsze, obejmują mniejszą powierzchnię i pokazują osiadanie płyt po obciążeniu składowanym drewnem.

W osi przepustu zaznaczyły się dwie tendencje: w prawej części rzędne jezdni uległy obniżeniu o ok. 2 cm, a w części osiowej i lewej zwiększyły się o 4 do 8 cm. Kontrola obrazu

ortomozaiki z 2020 roku wyraźnie wskazuje, że jest to efekt sedimentacji drobnych frakcji gruntu naniesionych tu przez spływ powierzchniowy.

Oceniając przydatność zastosowanej technologii można stwierdzić, że wykonywanie zadań współczesnej inżynierii drogowej, również w leśnictwie, może być wspomagane nowoczesną technologią fotogrametryczną, choć drony latające na tak niskich pułapach, w bardzo bliskim sąsiedztwie drzew, w dużym stopniu narażone są na zniszczenie. Zarówno akwizycja, jak i opracowanie danych nie są trudne, choć wymagają posiadania specjalistycznego sprzętu i oprogramowania, zaś otrzymywane materiały wynikowe o charakterze metrycznym umożliwiają dowolne pomiary odległości, powierzchni, objętości, określania wysokości położenia wybranego punktu, czy uzyskiwanie przekrojów pionowych w dowolnym miejscu i kierunku. Trzeba także dodać, że poza wymienionymi cechami materiałów fotogrametrycznych, osiągnięta gęstość informacji o terenie (w przedstawianych badaniach piksel ma wielkość 3 mm), deklasuje klasyczny pomiar geodezyjny.

### Bibliografia

- [1] Mieszczak M., Oberski T.: Wykorzystanie niskobudżetowego UAS do nadzoru realizacji budowy obiektów liniowych na przykładzie inwestycji drogowej. Referat wygłoszony na XX Ogólnopolskim Sympozjum Naukowym „Fotogrametria dla geoinformacji”, Wrocław 2016.
- [2] Kurczyński Z., Preuss R.: Podstawy fotogrametrii. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2011.
- [3] Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P., Sánchez-Hermosilla López J., Mesas-Carrascosa F.J., García-Ferrer A., Pérez-Porras F.J.: Reconstruction of Extreme Topography from UAV Structure from Motion Photogrammetry. Measurement, 2018, 121, 127-138.
- [4] Brach M., Chan J.C-W., Szymanski P.: Accuracy Assessment of Different Photogrammetric Software for Processing Data from Low-cost UAV Platforms in Forest Conditions. iForest, 2019, 12, 435-441.
- [5] Gawin A. Zastosowanie naziemnej fotogrametrii cyfrowej do aktualizacji mapy numerycznej w odkrywkowych zakładach górniczych. Górnictwo i Geoinżynieria, 2009, 33, 2, 127-135.
- [6] Clapuyt F., Vanacker V., Van Oost K.: Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. Geomorphology, 2016, 260, 4-15.
- [7] Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P.: Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. Measurement, 2017, 98, 221-227.
- [8] Karwacki K.: Wykorzystanie fotogrametrii niskiego pułapu w badaniach osuwisk. Referat wygłoszony na IV Konferencji „Środowisko Informacji”. CN Kopernik, Warszawa 2018.
- [9] Ochałek A., Niewiem W., Puniach E., Cwiąkała P.: Accuracy evaluation of real-time GNSS precision positioning with RTX Trimble technology. Civil and Environmental Engineering Reports, 2018, 28, 4, 49-61.

*Prace zostały sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dotacji na utrzymanie potencjału badawczego.*

## PHOTOGRAMMETRIC MENSURATION OF THE SURFACE DEFORMATION OF THE FOREST OPERATING TRAIL

### *Summary*

*The paper describes the measurement of the deformation of the surface of the operational trail section and the adjacent timber depot after one year of use from the new condition. Photogrammetry technology was used, carried out in two drone raids. The air raids were made at a low flight, about 4 m above the ground, which made it possible to obtain a metric material with a pixel of 3 mm. Photographic material was obtained from each flight, on the basis of which, among others, the Digital Surface Model (DSM) and the orthomosaic were obtained. The difference in DSM from the second and first pass showed changes in the surface geometry of the observed object. The analysis of these differences was limited only to the road surface and the depot, because plant succession appeared on the shoulders. The results include the difference raster; its basic statistics, a histogram of differences and graphs based on this raster showing the differences in height along the route, along the pipe culvert axis and in the cross-section at the repository, where the greatest changes were observed. The study shows a very high usefulness of the technology used for the control of road body deformation, especially those with flexible surfaces.*

**Key words:** forest, operational trails, route use, pavement geometry control, photogrammetry, low-altitude flight