

ANNA MAŁEK¹⁾

ASSESSMENT OF THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR ROAD PAVEMENT CONDITION SURVEYING

OCENA ZASTOSOWANIA BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH DO INWENTARYZACJI STANU NAWIERZCHNI DROGOWEJ

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono ocenę techniki wykonywania diagnostyki cech powierzchniowych nawierzchni drogowej przy wykorzystaniu bezzałogowego statku powietrznego. Opisano możliwość wykorzystania technologii bezzałogowych statków powietrznych w diagnostyce stanu nawierzchni, metodykę badań związaną z pomiarami terenowymi, a także wykorzystaniem oprogramowania fotogrametrycznego. W części badawczej porównano wyniki pomiarów wybranych uszkodzeń nawierzchni pozyskane z ortofotomapy (stworzonej na podstawie zdjęć z naltów bezzałogowym statkiem powietrznym na czterech różnych wysokościach) z danymi pozyskanymi w terenie przy zastosowaniu taśmy mierniczej i tachimetru. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że dokładność pomiarów wybranych uszkodzeń nawierzchni (wyboje, łaty, spękania) przy zastosowanej metodyce pomiarów jest zbliżona do wykonywanej technologią wizualną (różnica nie przekracza 1 cm). Przy wykorzystaniu bezzałogowego statku powietrznego z kamerą o matrycy 1/2 cala i ogniskowej 24 mm oraz wysokości lotu 5 m istnieje możliwość wykrycia na obrazach spękań o wielkości od 1 mm, a w przypadku nalotu na 30 m – od 4 mm. Przedstawione w pracy analizy wykazały, że bezzałogowe statki powietrzne mogą być z powodzeniem wykorzystywane w diagnostyce cech powierzchniowych nawierzchni drogowych jako niezależny system wczesnego wykrywania uszkodzeń lub jako rozszerzenie tradycyjnych metod pomiarowych.

SŁOWA KLUCZOWE: BSP, diagnostyka nawierzchni, fotogrametria, modelowanie 3D, ocena uszkodzeń nawierzchni.

ABSTRACT. The article presents evaluation of road pavement surface diagnostics performed using an unmanned aerial vehicle (UAV). The work encompasses analysis of the potential for use of UAVs in pavement condition diagnostics, the methodology of field surveys and use of photogrammetry software. The experimental part includes a comparison of the results obtained for chosen types of pavement distress using orthophotomaps (created from images captured with UAV during flights at four different altitudes) and data obtained in field using a measuring tape and a total station. The results indicated that the measurement accuracy for chosen types of pavement distress (potholes, patches, cracks) obtained using typical surveying methods was similar to that obtained using aerial imaging technology (the difference does not exceed 1 cm). Using an unmanned aerial vehicle with an 1/2" image sensor, focal length of 24 mm and flight altitude of 5 m, it is possible to detect cracks from 1 mm in size; in the case of flight altitude of 30 m it is possible to detect cracks from 4 mm. The presented analyses indicate that UAVs may be successfully used in road surface feature diagnostics as an independent early damage detection system or as an extension of traditional surveying methods.

KEYWORDS: 3D modeling, assessment of pavement damage, pavement diagnostics, photogrammetry, UAV.

DOI: 10.7409/rabdim.023.017

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Geotechniki, Geologii Inżynierskiej i Geodezji, ul. Piotrowo 5, 61-139 Poznań; anna.malek@put.poznan.pl

1. WPROWADZENIE

Nieustanny wzrost natężenia ruchu pojazdów ciężarowych, przy jednoczesnym zwiększeniu ich dopuszczalnego ciężaru całkowitego, powoduje uszkodzenia nawierzchni drogowych i ich degradację [1]. Dodatkowo do uszkodzeń konstrukcji nawierzchni dochodzi na skutek działania czynników atmosferycznych, prowadzenia zabiegów utrzymaniowych w niewłaściwy sposób, a także popełnionych błędów projektowych [2-4]. Z tego względu bieżące wykonywanie działań z zakresu diagnostyki stanu nawierzchni pełni kluczową rolę w zabezpieczeniu sieci drogowej przed przedwczesnym zniszczeniem. Wykrycie uszkodzeń na wczesnym etapie daje możliwość skutecznej naprawy nawierzchni drogowej bez konieczności wykonywania drogowych zabiegów remontowych. Diagnostykę stanu nawierzchni można podzielić na dwa zakresy. Pierwszy jest związany z nośnością konstrukcji [5-7], a drugi dotyczy cech powierzchniowych, takich jak np. ubytki mieszanki mineralno-asfaltowej, spękania, nierówności [8-10]. Obecnie diagnostyka stanu nawierzchni drogowej rozwija się w kierunku pozyskiwania danych pomiarowych z wielu źródeł (urządzeń i systemów) oraz ich przetwarzania przez sztuczne sieci neuronowe w celu wykrywania i przewidywania uszkodzeń, weryfikacji sposobów naprawy, czy wykrywania miejsc niebezpiecznych [11-13]. W niniejszym artykule podjęto się oceny techniki wykonywania diagnostyki cech powierzchniowych nawierzchni drogowej przy wykorzystaniu bezzałogowego statku powietrznego (BSP), mogącej stanowić uzupełnienie tradycyjnych metod lub niezależny system prewencyjnego wykrywania uszkodzeń.

2. TECHNOLOGIA BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH DO OCENY STANU NAWIERZCHNI DROGOWEJ

Rynek bezzałogowych statków powietrznych jest bardzo duży i zorientowany na potrzeby różnych użytkowników. Obecnie nawet niskobudżetowe BSP posiadają sensory optyczne pozwalające na uzyskanie zdjęć o dużej rozdzielczości, które można później wykorzystać w różnych dziedzinach oraz traktować jako dane wejściowe np. w programach do przetwarzania obrazów czy tworzenia modeli 3D. W budownictwie drogowym bezzałogowe statki powietrzne znalazły zastosowanie głównie w branży projektowo-wykonawczej dzięki możliwości np. szybkiego wykonania inspekcji rozległego obszaru, rejestrowania postępów prac na budowie, gromadzenia danych do obliczeń objętości mas ziemnych, tworzenia wizualizacji itp. Coraz powszechniejsze staje się również wykorzystanie BSP w diagnostyce cech powierzchniowych nawierzchni dróg, szczególnie w połączeniu z technologią tworzenia modeli 3D badanej powierzchni.

1. INTRODUCTION

The continuing growth of heavy vehicle traffic, with simultaneous increase in the allowable gross vehicle weight, leads to road pavement distress and degradation [1]. Moreover, road pavements are damaged due to environmental factors, incorrect maintenance or design errors [2-4]. Therefore, ongoing monitoring and diagnostics of pavement condition are crucial to protection of road networks against premature failure. Early detection of distress enables effective rehabilitation of road pavements without the need for costly reconstruction. Pavement condition diagnostics may be divided into two areas. One pertains to pavement bearing capacity [5-7], the other – to surface features, such as loss of asphalt mixture, cracking and roughness [8-10]. Current directions in the development of pavement diagnostics include collection of measurement data from multiple sources (devices and systems) and their processing by artificial neural networks in order to detect and forecast distress, verify the effectiveness of repairs or identify dangerous locations [11-13]. This article is devoted to evaluation of road surface feature diagnostics technology incorporating the use of unmanned aerial vehicle (UAV), which may serve as an addition to traditional surveying methods or as an independent system of preventive distress detection.

2. UNMANNED AERIAL VEHICLE TECHNOLOGY IN ROAD PAVEMENT CONDITION ASSESSMENT

The UAV market is very large and oriented on meeting the needs of various users. Today even low-budget UAVs are equipped with optical sensors that enable collection of high-resolution images, which may later be used in various applications and treated as input data in image processing or 3D modeling software. In road engineering, unmanned aerial vehicles are used mostly by designers and contractors; the possibilities they provide include quick inspections of large areas, registering of progress in construction, collection of data for earthwork volume calculations, creation of visualizations etc. Use of UAVs, especially in combination with 3D-modeling technology, becomes increasingly popular in pavement surface feature diagnostics as well.

According to the authors of [14], use of adequately equipped UAVs in combination with specialized software may serve as an alternative to classic pavement surveying technologies incorporating lasers, photogrammetry, radars or ultrasound. Precision of the obtained 3D model depends

Według badań autorów publikacji [14] zastosowanie odpowiednio wyposażonych technologicznie BSP oraz specjalistycznego oprogramowania komputerowego może stanowić alternatywę dla wykonywania klasycznych pomiarów nawierzchni przy użyciu technologii laserowych, fotogrametrycznych, radarowych czy ultradźwiękowych. Precyzja utworzonego modelu 3D zależy od wielu czynników. Na jakość pozyskanych obrazów wpływają między innymi parametry kamery BSP (wielkość matrycy oraz ogniskowa obiektywu), parametry lotu (wysokość, prędkość) oraz warunki oświetleniowe (w tym ustawienie czasu naświetlania i przesłony). Interpretację jakości obrazów wykorzystywanych do analiz wykonuje się zazwyczaj na podstawie parametru *GSD* (ang. *Ground Sample Distance*), który określa odległości pomiędzy środkami sąsiednich pikseli na obrazie w odniesieniu do pomiaru rzeczywistego w terenie. Wartość *GSD* [mm/px] obliczana jest na podstawie stosunku rzeczywistego rozmiaru pojedynczego piksela matrycy i ogniskowej obiektywu do odległości pomiędzy kamerą a celem. Przyjmuje się również, że rozmiar najmniejszego widocznego szczegółu na obrazie jest większy niż wartość *GSD* średnio od 1,5 do 3 razy [15, 16].

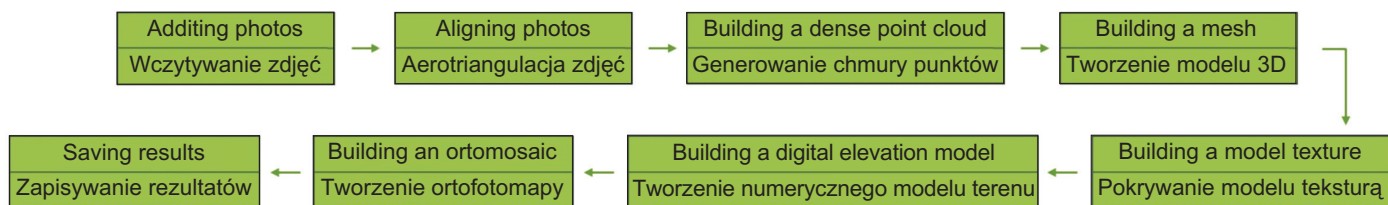
Kolejny aspekt techniczny wpływający na jakość pozyskanych obrazów stanowi system lokalizacji przestrzennej BSP. W tym wypadku wykorzystywane jest zazwyczaj precyzyjne pozycjonowanie punktu PPP (ang. *Precise Point Positioning*). Opiera się ono na danych pozyskanych z określoną dokładnością z satelitów należących do jednego z czterech systemów nawigacyjnych GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*): GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou. Z badań przeprowadzonych przez autorów pracy [17] wynika, że dokładność pozycjonowania obiektu przy użyciu danych pochodzących z kombinacji satelitów GPS oraz BeiDou zwiększa precyzję współrzędnych (X, Y, Z) odpowiednio o 28%, 6%, 7%, zaś przy użyciu kombinacji GPS, GLONASS oraz BeiDou o 25%, 20%, 19% w porównaniu do użycia tylko danych pochodzących z satelitów GPS. Zaawansowanie technologiczne wykorzystanego sprzętu również wpływa na dokładność pozyskanych danych. Z tego względu wybrane BSP do zastosowań profesjonalnych wyposażone są w precyzyjne odbiorniki GNSS wykorzystujące technologię RTK (ang. *Real-Time Kinematic*). Dzięki takiemu rozwiązaniu można osiągnąć precyzję wyznaczenia środka rzutu zdjęcia równą 1 cm dla błędu poziomego w warunkach idealnych (według danych producentów). W przypadku wykonywania pomiarów fotogrametrycznych przy użyciu BSP bez zamontowanego modułu pozwalającego wyznaczyć precyzyjnie współrzędne środków rzutów zdjęć, alternatywą jest zastosowanie osnowy fotogrametrycznej w postaci tzw. fotopunktów i punktów kontrolnych, które będą widoczne na zdjęciach. Zarówno GCP

on multiple factors. The quality of the obtained images is affected by the parameters of the UAV camera (size of the image sensor and focal length of the lens), flight parameters (altitude, velocity) and exposure conditions (including shutter speed and aperture setting). Quality of the images obtained for analyses is usually evaluated based on the Ground Sample Distance (*GSD*) parameter, which reflects the distance between centers of adjacent pixels in the image in terms of actual corresponding distance in field. The *GSD* value [mm/px] may be calculated for a given distance between the camera and the object, based on the known ratio between the actual size of a single pixel in the image sensor and the focal length. It is typically assumed that the size of the smallest detail visible in the image corresponds to the *GSD* value multiplied by a factor of 1.5 to 3.0 [15, 16].

Another technical aspect that influences quality of the collected images is the spatial location system used in UAV. In this case Precise Point Positioning (PPP) is typically used, based on data acquired with specified accuracy from satellites belonging to one of the four Global Navigation Satellite Systems (GNSS): GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. Research performed by the authors of [17] indicated that the use of two systems in combination (GPS and BeiDou) increased the precision of the three coordinates (X, Y, Z) by 28%, 6% and 7%, respectively, in comparison to data obtained from GPS only; use of three systems in combination (GPS, GLONASS and BeiDou) increased precision by 25%, 20% and 19%. The level of technical advancement of the used equipment also affects the accuracy of the obtained data. Therefore, UAVs chosen for professional applications are equipped with precise GNSS receivers using the Real-Time Kinematic (RTK) technology. This solution enables location of the center of the image with precision of 1 cm, represented by the error in ideal conditions (according to the data provided by the manufacturers). When photogrammetric surveys are performed using an UAV without precise geolocation equipment that would enable precise determination of the coordinates of the center of the image, an alternative solution may consist in introduction of photogrammetric reference points, i.e. Ground Control Points (GCP) and Check Points (CP), that would be visible in the photographs. Both types of reference points may be artificial or natural; they should be characterized by known coordinates (X, Y, Z), obtained using geodetic methods with a specified accuracy (e.g. GNSS, total station), to enable georeferencing of the orthophotomosaic. The authors of [18, 19] performed a detailed analysis of the influence of the number of

(ang. *Ground Control Points*) jak i CP (ang. *Check Points*) to punkty (sztuczne, naturalne) o znanych współrzędnych terenowych (X, Y, Z) pozyskanych metodami geodezyjnymi z określoną dokładnością (np. GNSS, tachimetr), pozwalające na nadanie georeferencji ortofotomapie. Autorzy prac [18, 19] szczegółowo analizowali wpływ liczby i sposobu rozmieszczenia punktów osnowy fotogrametrycznej na dokładność końcową ortofotomapy. Głównymi wnioskami były stwierdzenia, że zastosowanie tych punktów wpływa na poprawę dokładności wpasowania, jednakże powyżej dziewięciu punktów wpływ ten jest mało istotny. W przypadku obiektu liniowego (droga, linia kolejowa) konieczne jest rozmieszczenie punktów osnowy fotogrametrycznej wzdłuż brzegów obiektu (z mniejszą gęstością – w jego osi).

Ostatnim z zasadniczych elementów wpływających na dokładność uzyskanego modelu 3D jest rodzaj zastosowanego oprogramowania komputerowego. Obecnie wykorzystywane są automatyczne algorytmy przetwarzania obrazów pozwalające osiągnąć pożądaną dokładność w stosunkowo krótkim czasie [20]. Aktualnie programy fotogrametryczne w większości przypadków bazują na metodzie zwanej „strukturą z ruchu” (ang. *Structure from Motion*, SfM), która pozwala utworzyć model 3D na podstawie serii nakładających się obrazów 2D [21]. Dzięki takiemu rozwiązaniu nie ma konieczności posiadania wiedzy na temat wzajemnej konfiguracji zdjęć ani kalibracji kamery. Oprogramowanie automatycznie wykrywa, które zdjęcia się nakładają i mierzy wzajemne położenie punktów wiążących oraz wylicza parametry kalibracji. W wyniku ich dalszego przetworzenia powstaje ortofotomapa, czyli cyfrowy obraz terenu uzyskany przez pionowe odwzorowanie powierzchni, posiadający cechy metryczne oraz zachowujący wizualne cechy obrazu [22]. Schemat postępowania przy zastosowaniu takiego oprogramowania fotogrametrycznego do utworzenia ortofotomapy przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat postępowania przy tworzeniu ortofotomapy w oprogramowaniu fotogrametrycznym

Fig. 1. Procedure of orthophotomap creation in photogrammetric software

Autorzy publikacji [14] – wykorzystując zdjęcia pozyskane przy użyciu klasycznego cyfrowego aparatu fotograficznego (24 Mpx, wysokość obiektywu 0,5-1,2 m), BSP z kamerą (12 Mpx, wysokość lotu 5 m) oraz chmurę punktów uzyskaną za pomocą skaningu laserowego (70 Mpx, dokładność przy pomiarze odległości 2 mm) – porównali uszkodzenia

photogrammetric reference points and the manner of their placement on the ultimate accuracy of the obtained orthophotomap. The main conclusions were that usage of such points improves fitting accuracy; however, when the number of points exceeds nine, further improvement is not very significant. In the case of a linear structure (road, railroad) it is necessary to locate the photogrammetric reference points along the edges of the structure (and, with lesser frequency – along its axis).

The last essential element that affects the accuracy of the obtained 3D model is the type of software used. Automated image processing algorithms which are used today enable one to obtain the desired accuracy in a relatively short time [20]. Most of the contemporary photogrammetric programs are based on the Structure from Motion (SfM) method, which produces a 3D model from a series of overlapping 2D images [21]. This solution does not require information on the relative orientation of photographs or camera calibration. Software automatically detects overlapping parts of photographs, measures relative locations of the reference points and calculates calibration parameters. Further image processing leads to creation of an orthophotomap, i.e. a digital image of the surface obtained through vertical projection, enabling reliable measurements and retaining the visual features of an image [22]. The procedure of orthophotomap creation using such photogrammetric software is shown schematically in Fig. 1.

The authors of [14] – using photographs taken with a typical hand-held digital camera (24 Mpx, lens height of 0.5-1.2 m), UAV with camera (12 Mpx, flight altitude of 5 m) and point cloud obtained from scanning laser (70 MPx, distance measurement accuracy of 2 mm) – compared the distress identified on a road section of 90 m²

in area, based on a 3D model created using the SfM method. The *GSD* value in the case of images captured using the digital camera equaled 0.5 mm/px (processing time of approx. 8 hours); *GSD* in the case of images from UAV was 6.5 mm/px (processing time of approx. 15 minutes). The authors stated that while classic methods provide

odcinka drogi o powierzchni 90 m^2 na podstawie modelu 3D stworzonego przy zastosowaniu metody SfM. Wartość *GSD* w przypadku zdjęć wykonanych aparatem cyfrowym wyniosła $0,5 \text{ mm/px}$ (czas przetwarzania około 8 godz.), a przy zastosowaniu BSP: $6,5 \text{ mm/px}$ (czas przetwarzania około 15 min). Autorzy uznali, że klasyczne metody umożliwiają uzyskanie wyników o bardzo dużej dokładności, ale jest to proces czasochłonny, zaś BSP jest na tyle dokładne, że daje możliwość szybkiego wykrycia potencjalnych uszkodzeń nawierzchni. W pracy [23] autorzy natomiast wykonali identyfikację uszkodzeń nawierzchni miejskiego placu przy zastosowaniu amatorskiego BSP z kamerą 12 Mpx i obiektywem 25 mm. Pozyskane przy pomocy BSP zdjęcia (około 400 sztuk ze wzajemnym pokryciem) autorzy złączyli w jeden obraz w oprogramowaniu typu CAD w celu opracowania planu sytuacyjnego całego placu wraz z aktualnymi uszkodzeniami. Następnie porównali obraz pozyskany z użyciem BSP z dokumentacją projektową. W ten sposób autorzy uzyskali dane, które wykorzystali do analizy i określenia miejsc (oraz ewentualnych przyczyn) uszkodzeń konstrukcji nawierzchni placu. W publikacji [21] autorzy porównali pomiary cech powierzchniowych nawierzchni drogowej uzyskane tradycyjną metodą wizualną z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu BSP w połączeniu z metodą SfM i stwierdzili, że obie techniki dały podobne rezultaty. Maksymalna różnica przy pomiarze powierzchni uszkodzeń obiema metodami nie przekraczała $0,1\%$, a w przypadku głębokości: 1% . W badaniach autorzy wykorzystali BSP wyposażony w cztery systemy pozycjonowania (GPS, GLONASS, BeiDou i Galileo) oraz kamerę o rozdzielczości 20 Mpx pozyskującą obraz o rozdzielczości $5472 \times 3648 \text{ px}$. Wartość *GSD* wynosiła $1,5 \text{ mm/px}$ przy zastosowanej wysokości nalotu równej $5,5 \text{ m}$. W publikacji [24] przedstawiono natomiast zastosowanie BSP do pomiaru deformacji nawierzchni drogowej w wyniku ruchów masowych (aktywne osuwisko na południu Hiszpanii). W przeprowadzonych badaniach wykonano 11 nalołów BSP na wysokości od 40 m do 100 m (wartość *GSD* od 10 mm/px do 30 mm/px) z różną rozdzielczością czasową w celu uzyskania ortofotomap przy zastosowaniu metody SfM. Dzięki takiemu wykorzystaniu BSP autorom udało się wyróżnić obszar niestabilny w stosunku do otaczającego go obszaru stabilnego oraz przeanalizować kinematykę osuwiska z dużą dokładnością – około $2 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ w osiach *X*, *Y* oraz $4 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ w osi *Z*. Jak pokazują powyższe przykłady, obrazy pozyskiwane przy użyciu BSP z sensorami o odpowiedniej jakości stanowią cenne dane do analizy stanu nawierzchni drogowych. Z tego względu autorzy publikacji [20, 25] wykorzystali dane z obrazowania nawierzchni z użyciem BSP do prac z algorytmami służącymi do automatycznego określenia uszkodzeń i tworzenia systemu kontroli procesu degradacji. Autorzy pracy [25] przy wykorzystaniu

highly accurate results, they are time-consuming; the use of UAVs provides sufficient accuracy to quickly identify potential pavement distress. The authors of [23] performed pavement distress survey on a city square, using an amateur UAV with a 12-Mpx camera and 25-mm lens. The acquired images (about 400 photographs with overlapping segments) were combined into a single image using CAD software, in order to create a site plan of the entire square with up-to-date information on pavement distress. The obtained image was then compared with the design documentation. The authors used the data to analyze and identify the locations (and potential causes) of pavement structure distress. In the work [21], authors compared the measurements of road pavement surface features obtained using traditional visual method with the results obtained using UAV in combination with the SfM method; it was noted that both techniques provided similar results. The maximum relative difference between the methods did not exceed 0.1% for distress area measurements and 1.0% for depth. The authors of the work used UAV equipped with four positioning systems (GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo) and a camera with 20 Mpx image sensor, which captured images with the resolution of $5472 \times 3648 \text{ px}$. The *GSD* value equaled 1.5 mm/px at the adopted flight altitude of 5.5 m . Publication [24] presents application of UAV in measurements of road pavement deformation due to mass wasting (active landslide in southern Spain). The experiments included 11 flights at altitudes ranging from 40 m to 100 m (*GSD* values from 10 mm/px to 30 mm/px) with varying sampling time in order to obtain orthophotomaps using the SfM method. This application of UAV enabled the authors to identify the unstable area and analyze the kinematics of the landslide with high accuracy – approx. $2 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ along the *X*, *Y* axes and $4 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ along the *Z* axis. As shown by the above examples, images obtained using UAVs with sensors of adequate quality provide valuable data for pavement condition analysis. Therefore, the authors of publications [20, 25] used the pavement-imaging data from UAVs in their work focused on algorithms for automatic identification of distress and creation of degradation control systems. The authors of [25] used artificial intelligence algorithms to create a procedure of automatic distress detection (for distress exceeding 25% of road area) with Geographic Information System data export, enabling creation of a map of distressed roads in the analyzed zone. In publication [20], the authors analyzed the distress of the chosen road section using the RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) algorithm, incorporating iterative detection of planes in a dataset displaying considerable

algorytmów sztucznej inteligencji stworzyli dla obszaru testowego automatyczną procedurę lokalizacji uszkodzeń (stanowiących co najmniej 25% powierzchni danej drogi) z eksportem danych w ramach GIS (ang. Geographic Information System), tworząc mapę z zaznaczonymi uszkodzonymi drogami. W publikacji [20] autorzy do analizy powstawiania uszkodzeń dla wybranego odcinka drogi wykorzystali algorytm RANSAC (ang. *RAN*dOm *SAM*ple *CON*sensus), czyli technikę iteracyjnej detekcji płaszczyzn w zbiorze cechującym się znacznym poziomem szumu pomiarowego i dużą liczbą punktów odstających. Poprzez stworzenie segmentów na odcinku drogi i zastosowanie algorytmu monitorowali zmiany zachodzące w czasie. Powyższe przykłady pokazują, że technologia BSP może stanowić skuteczne rozwiązanie wspomagające klasyczne techniki diagnostyki stanu nawierzchni wraz z informatycznymi systemami analizy danych [26].

Istnieje również szereg czynników zewnętrznych mających wpływ na proces pozyskiwania danych. Są to m.in. warunki pogodowe takie jak deszcz, śnieg czy silny wiatr, które uniemożliwiają skuteczne wykonywanie zdjęć [27]. Czas działania baterii w BSP (zazwyczaj od 20 min do 50 min) stanowi również kolejne ograniczenie, ponieważ zgodnie z publikacją [28] w celu minimalizacji wartości błędu wpasowania podczas tworzenia ortofotomapy każdy cykl pomiarowy powinien być wykonywany w trakcie pracy jednej baterii. Problem przy późniejszych analizach obrazów również stanowią cienie na fotografowanych obiektach, których wielkość jest zależna od nasłonecznienia czy pozycji słońca w trakcie dnia. Dodatkowy problem przy wykonywaniu nalotów BSP stanowią przeszkody fizyczne (budynki, drzewa, linie elektroenergetyczne) oraz tzw. ograniczenia strefowe związane z brakiem możliwości wykonywania lotów, które występują w pobliżu lotnisk, obiektów wojskowych itp. W Polsce istnieje obowiązek informowania PAŻP (Polska Agencja Żeglugi Powietrznej) o zamiarze wykonania lotu przy użyciu BSP, co wiąże się z koniecznością uzyskania zgody na wykonanie nalotu. W tym celu jest wykorzystywana aplikacja DroneRadar. Należy również pamiętać o przestrzeganiu aktualnie obowiązujących przepisów prawa, a więc nie tylko zadbać o bezpieczeństwo pilota i otoczenia, ale również odbyć stosowne szkolenia uprawniające do pilotażu BSP. Szczegółowe wytyczne dotyczące konkretnych kategorii lotów, dopuszczalnych mas całkowitych BSP i procedur podczas przeprowadzania operacji lotniczych na terytorium Unii Europejskiej określa stosowne rozporządzenie [29].

3. CEL I ZAKRES BADAŃ

Głównym celem badań było sprawdzenie możliwości wykorzystania bezzałogowego statku powietrznego z matrycą CMOS 1/2" (niewyposażonego w moduł RTK) oraz oprogramowania fotogrametrycznego bazującego na metodzie SfM

level of noise and numerous outliers. The authors established individual segments within the road section and used the algorithm to monitor the changes in time. The above examples show that the UAV technology may serve as an effective solution that supplements classical pavement diagnostics technologies and data analysis systems [26].

There is also a number of outside factors that affect the data collection process. These factors include weather, e.g. rain, snow or strong wind, which renders effective capturing of photographs impossible [27]. UAV battery operation time (usually ranging from 20 min to 50 min) poses another limitation; according to [28], in order to minimize the fitting error in orthophotomosaic creation, each surveying cycle should be performed within a single battery cycle. Shadows of the captured objects, whose size depends on sunlight and sun position, may also pose a problem in subsequent analyses. Usage of UAV may also be hindered by physical obstacles (such as buildings, trees and power lines) or flight restriction zones introduced around airports, military structures etc. In Poland it is obligatory to inform the Polish Air Navigation Services Agency (PANS) about the planned flight and obtain the required permission. The DroneRadar app serves as a tool for such communication. It is also necessary to abide by the current regulations, i.e. not only guarantee safety of the pilot and the surroundings, but also undergo adequate training and obtain UAV pilot certificate. Detailed requirements regarding flight categories, maximum UAV mass and operational procedures in the European Union are given in a relevant regulation [29].

3. THE AIM AND SCOPE OF THE RESEARCH

The primary aim of the research was to verify the potential for use of unmanned aerial vehicle equipped with a CMOS 1/2" image sensor (without an RTK module) – combined with use of photogrammetric software based on the SfM method – in evaluation of road pavement surface features. Based on the performed literature study, it was noted that researchers usually focus on the problem of achieving maximum measurement accuracy, which generates considerable costs and makes data processing time-consuming.

During the field survey, four flights were performed at the adopted altitudes (5 m, 10 m, 20 m and 30 m) over the selected 170-m-long segment of a local road. Each flight was characterized with a determined *GSD* value and yielded a series of images with 80% longitudinal and transverse

do oceny cech powierzchniowych nawierzchni. Na podstawie przeprowadzonego studium literatury zauważono, że badacze zazwyczaj skupiają się na kwestii osiągnięcia jak największej dokładności pomiaru przy użyciu BSP, co skutkuje m.in. dużymi kosztami finansowymi oraz czasochłonnością opracowania wyników.

Podczas badań terenowych wykonano naloty na czterech założonych wysokościach (5 m, 10 m, 20 m i 30 m) nad wybranym odcinkiem drogi gminnej o długości 170 m. Dla każdego nalotu oznaczono wartości *GSD* oraz pozyskano serię obrazów z pokryciem podłużnym i poprzecznym 80%. Następnie przy wykorzystaniu oprogramowania fotogrametrycznego (metoda SfM) z pozyskanych obrazów wygenerowano dla każdej z serii pomiarowych ortofotomapy, na której wykonano pomiary wielkości wybranych uszkodzeń nawierzchni. Na koniec porównano dokładność uzyskanych wyników w stosunku do pomiarów przy zastosowaniu taśmy mierniczej oraz tachimetru elektronicznego.

4. ODCINEK BADAWCZY

Na podstawie wizji lokalnych wytypowano do badań odcinek drogi gminnej (Rys. 2) w województwie wielkopolskim o długości 170 m, który charakteryzował się złym stanem technicznym i występowaniem bardzo dużej liczby różnych uszkodzeń nawierzchni (wyboje, spękania, łaty).

Fig. 2. The test section with marked ground control points and check points

Rys. 2. Odcinek badawczy z oznaczeniem osnowy fotogrametrycznej (fotopunktów i punktów kontrolnych)

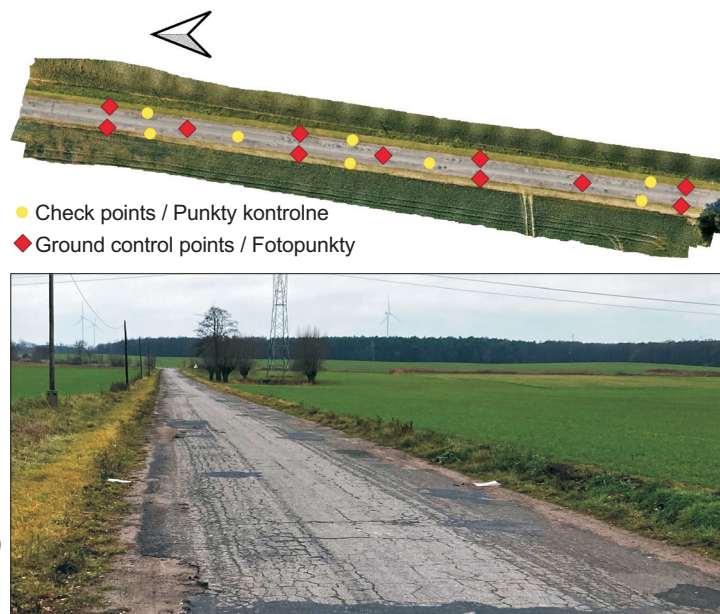
5. METODYKA BADAŃ

Na wybranym odcinku badawczym wykonano cztery serie zdjęć z wykorzystaniem BSP o wysokości nalotu równej 5 m, 10 m, 20 m i 30 m z dokładnością $\pm 0,1$ m. W celu zapewnienia właściwego pokrycia poprzecznego i podłużnego zdjęć, właściwego czasu przechwytywania obrazów, odpowiedniej prędkości lotu oraz stałej wysokości nalotu, zastosowano dostępną on-line aplikację komputerową do planowania misji. Wykorzystując fotogrametrię bliskiego zasięgu, łącznie wykonano 319 zdjęć odcinka badanej drogi. Rejestrowano obrazy o rozdzielczości 4000×3000 px. Kamera skierowana była pionowo w dół, a pokrycie poprzeczne i podłużne wynosiło po 80%. Warunki atmosferyczne w trakcie wykonywania nalotu były stabilne i jednakowe dla każdej serii pomiarowej (zachmurzenie duże, temperatura około 7°C , wiatr ze stałym kierunkiem o maksymalnych porywach do 15 km/h). Specyfikacją BSP i sensora optycznego wykorzystanego w badaniach zestawiono w Tabl. 1.

overlap. Using photogrammetric software (SfM method), the images obtained in the four survey flights were used to generate four separate orthophotomosaics, on which selected types of pavement distress were then measured. The accuracy of the obtained results was compared with the accuracy of results obtained using a measuring tape and a total station.

4. TEST SECTION

Based on field inspections, a 170-m-long section of a local road in the Greater Poland voivodeship was selected for the tests (Fig. 2). The section displayed failed technical condition, with severe distress of various types (potholes, cracks, patches).



5. TEST METHODOLOGY

Four series of photographs of the test section were taken using UAV; the flight altitudes were 5 m, 10 m, 20 m and 30 m, with ± 0.1 m accuracy. In order to guarantee adequate overlap of the photographs, proper image sampling time, flight speed and constant altitude, mission-planning computer application was used. A total of 319 photographs of the tested road section were taken using close-range photogrammetry. Resolution of the captured images equaled 4000×3000 px. The camera was aimed directly downwards, and the longitudinal and transverse overlap equaled 80%. Weather conditions were stable and uniform for each survey flight (cloudy sky, temperature approx. 7°C , steady wind direction, with gusts of up to 15 km/h). Specifications of the UAV and image sensor used in the test are given in Table 1.

Table 1. Specification of the UAV and the camera sensor
 Tablica 1. Specyfikacja BSP oraz zastosowanej kamery

Weight / Waga	[g]	570
Maximum speed / Maksymalna prędkość	[km/h]	68
Maximum range / Maksymalny zasięg	[m]	6000
Maximum battery operating time / Maksymalny czas pracy baterii	[min]	34
Vertical flight accuracy / Dokładność lotu w pionie	[m]	± 0.1
Camera image sensor / Matryca kamery	[Mpx]	48 (effective: 12 / efektywne: 12)
Maximum photo resolution / Maksymalna rozdzielczość zdjęć	[px]	8000 \times 6000
Resolution of the captured photos / Rozdzielczość wykonanych zdjęć	[px]	4000 \times 3000
ISO		100
Focal length equivalent / Ekwiwalent ogniskowej	[mm]	24
Sensor dimensions / Wymiary sensora [mm]		6.4 \times 4.8 (1/2" CMOS)
Przysłona / Aperture		f/2.8

Na odcinku badawczym założono tymczasową osnowę fotogrametryczną składającą się łącznie z 19 punktów (11 fotopunktów i 8 niezależnych punktów kontrolnych), których współrzędne zmierzono techniką RTK za pomocą ruchomego odbiornika GNSS pracującego w oparciu o dane z satelitów GPS i GLONASS. Umożliwiło to wyznaczenie położenia danego punktu osnowy z precyzją ± 2 cm sytuacyjnie (oś X , Y) i ± 5 cm wysokościowo (oś Z) w układzie współrzędnych geodezyjnych PL-2000 strefa 5 oraz PL-EVRF-2007. Punkty osnowy fotogrametrycznej (GCP i CP) oznaczono w osi jezdni za pomocą kolorowych znaczników, a na poboczach w postaci ułożonych gumowych szachownic (Rys. 2). Dzięki temu punkty te zostały jednoznacznie zidentyfikowane na pozyskanych obrazach. Pomiaru uszkodzeń na odcinku badawczym wykonywano w trzech osiach (X , Y , Z) w punktach o największej rozpiętości, gdzie X oznacza oś równoległą do osi drogi (długość uszkodzenia), Y – oś prostopadłą do osi drogi (szerokość uszkodzenia), zaś Z – głębokość uszkodzenia. W pomiarach terenowych wykorzystano taśmę mierniczą, której rozdzielczość wynosiła 1 mm, a wartość błędu obserwatora: ± 1 mm. Przy zastosowaniu tachimetru elektronicznego dokładność przy pomiarze bezlustrowym wynosiła ± 2 mm w przypadku odległości oraz 3" w przypadku pomiaru kąta. Wyniki pomiarów metodą tachimetryczną przeliczono w oprogramowaniu geodezyjnym w celu uzyskania współrzędnych przestrzennych mierzonych punktów (X , Y , Z) uszkodzeń nawierzchni. Na koniec przystąpiono do procedury komputerowej analizy obrazów przy wykorzystaniu oprogramowania fotogrametrycznego metodą SfM. Dla każdej wysokości nalotu BSP (serii zdjęć) wykonano ortofotomapę w procesie zautomatyzowanym. Algorytm postępowania przedstawia Rys. 1, zaś schemat projektowanego bloku fotogrametrycznego zaprezentowano na Rys. 3. Stosując oprogramowanie fotogrametryczne, odtworzono kształt, rozmiar i położenie obiektów oraz

Temporary photogrammetric reference was established in field, comprising of 19 reference points in total (11 ground control points and 8 independent check points), whose coordinates were determined using the RTK technology with a mobile GNSS receiver operating based on data from GPS and GLONASS satellites. It enabled determination of location of each reference point with the precision of ± 2 cm in horizontal plane (axes X , Y) and ± 5 cm vertically (axis Z) in the geodetic coordinate system PL-2000 zone 5 and PL-EVRF-2007. Reference points established along the road axis were marked with colored markers and those established along the edge of the road were marked with rubber checkered signs (Fig. 2), which enabled their definitive identification in the obtained images. Distress measurements were performed along three axes (X , Y , Z) in locations where the dimensions of distress were the greatest; X axis was assumed as longitudinal to the axis of the road (distress length), Y axis – as transverse (distress width), while Z axis corresponded to distress depth. Field surveys were performed using measurement tape, with 1-mm graduation and possible error of the observer of ± 1 mm. When the electronic total station was used, the accuracy of reflectorless measurements equaled ± 2 mm for distances and 3" for angles. Using geodetic software, the results of total station measurements were transformed into spatial coordinates of the analyzed points (X , Y , Z) of pavement distress. The captured images were then processed in photogrammetric software using the SfM method. A separate orthophotomap was generated in an automated process for each UAV flight altitude (each series of photos). The procedure is shown schematically in Fig. 1, and the layout of the designed photogrammetric block is presented in Fig. 3. Use of photogrammetric software enabled

względnej orientację obrazów (tzn. położenie przestrzenne i kątowne kamery w trakcie wykonywania zdjęcia). Aerotriangulację (odtworzenie parametrów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej zdjęć) wykonano na podstawie współrzędnych (X, Y, Z) punktów osnowy fotogrametrycznej określonych w trakcie pomiaru terenowego GNSS. Do przeprowadzenia ortorektyfikacji wykorzystano numeryczny model terenu po filtracji. Identyfikację uszkodzeń nawierzchni i pomiar ich wielkości przeprowadzono w sposób manualny w oprogramowaniu fotogrametrycznym na wygenerowanej ortofotomapie.

6. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wysokość i prędkość nalotu BSP ma kluczowe znaczenie ze względu na m.in. jakość i liczbę pozyskanych obrazów, czas lotu oraz czasochłonność późniejszego przetwarzania zdjęć w programie fotogrametrycznym. W Tabl. 2 zestawiono dane dotyczące wybranych parametrów związanych z wykonanymi nalotami BSP i analizami obrazów pozyskanych dla wybranego odcinka badawczego.

Analizując dane zestawione w Tabl. 2 można zauważyć, że czas lotu dla wysokości 30 m jest około trzy razy krótszy niż dla wysokości 5 m, a liczba wykonanych zdjęć ponad ośmiokrotnie mniejsza. Liczba wygenerowanych punktów w chmurze jest ponad dziesięciokrotnie mniejsza w przypadku nalotu na wysokości 30 m niż na wysokości 5 m. Przekłada się to na czas przetwarzania zdjęć, który dla wysokości 30 m jest ponad piętnaście razy krótszy. W przypadku analizy jakości pozyskanych obrazów dla wysokości 30 m wartość GSD wynosi 2,0 mm/px, a więc jest czterokrotnie mniejsza niż dla 5 m. W przypadku spękań dokładność oznaczania wymiarów szczeliny jest zależna od wartości GSD . Przyjmując, że rozmiar najmniejszego widocznego szczegółu na obrazie jest większy niż wartość GSD średnio od 1,5 do 3 razy [15, 16], w przypadku zastosowanej kamery w badaniach dla nalotu na wysokości 5 m można wykryć szczeliny o wielkości już od około 1 mm, zaś w przypadku nalotu na 30 m – dopiero od około 4 mm.

Table 2. Comparison of selected parameters related to capturing of photographs for photogrammetric purposes using UAV on a 170-m-long road section

Tablica 2. Porównanie wybranych parametrów związanych z wykonaniem zdjęć na potrzeby fotogrametryczne przy zastosowaniu BSP na odcinku drogi o długości 170 m

Altitude / Wysokość lotu [m]	5	10	20	30
Flight speed / Prędkość lotu [km/h]	10	10	10	10
Flight time / Czas lotu [min]	12:26	8:28	5:23	3:45
Number of photos taken [pcs] / Liczba wykonanych zdjęć [szt.]	152	111	38	18
GSD [mm/px]	0.5	1.0	1.5	2.0
Number of cloud points [pcs] / Liczba punktów w chmurze [szt.]	143 277 480	52 940 775	27 051 249	13 869 458
Processing time / Czas przetwarzania [min]	156	28	15	9

reconstruction of the shape, size and location of the objects as well as relative orientation of the images (i.e. spatial and angular situation of the camera when each image was taken). Aerotriangulation (reconstruction of internal and external orientation parameters of images) was performed based on coordinates (X, Y, Z) of the reference points determined in field GNSS surveys. Orthorectification was performed using the digital terrain model after filtration. Identification and measurements of pavement distress were performed manually in the photogrammetric software, using the generated orthophotomap.

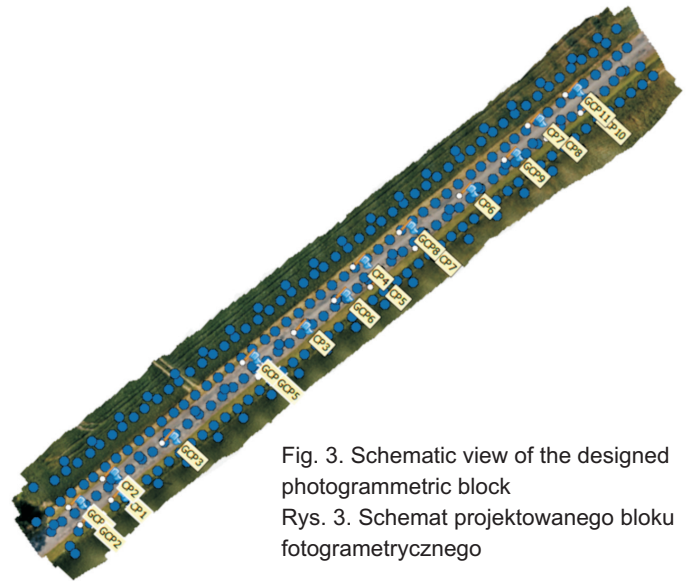


Fig. 3. Schematic view of the designed photogrammetric block
Rys. 3. Schemat projektowanego bloku fotogrametrycznego

6. TEST RESULTS AND THEIR ANALYSIS

Flight altitude and speed of the UAV is the key factor affecting the quality and quantity of the obtained images, duration of the flight and subsequent processing time of the images in photogrammetric software. Table 2 shows selected parameters related to the performed UAV flights and image analyses.

Przykładowe wyniki wpasowania lokalnego ortofotomapy (jej wewnętrznej spójności) oraz dopasowania względem globalnego układu odniesienia przedstawiono w Tabl. 3 (dla wysokości lotu 5 m). Na podstawie analizy danych dostępnych w programie fotogrametrycznym stwierdzono, że błąd na pojedynczym niezależnym punkcie kontrolnym (mówiącym o dopasowaniu względem globalnego układu odniesienia) wynosił w zależności od wysokości nalotu (im niżej, tym dokładniej) od 15 mm do 25 mm. Można uznać, że wysokość nalotu nie ma znaczącego wpływu na dokładność wpasowania ortofotomapy względem globalnego układu odniesienia przy przyjętych kryteriach pomiaru i zastosowanej sygnalizacji fotopunktów, a wartość błędu wynosi średnio 20 mm. Dokładność lokalnego wpasowania ortofotomapy (jej wewnętrznej spójności) wynosiła od 14 mm do 20 mm.

Table 3. Results of internal and external fitting of photogrammetric blocks for altitude of 5 m

Tablica 3. Wyniki wpasowania wewnętrznego i zewnętrznego bloków fotogrametrycznych dla wysokości nalotu 5 m

Marker Znacznik	X error [m] Błąd X	Y error [m] Błąd Y	Z error [m] Błąd Z	XYZ error [m] Błąd XYZ
CP1	-0.008256	0.000997	-0.008415	0.011831
CP2	0.008489	-0.000874	-0.015224	0.017453
CP3	0.007887	-0.004650	-0.003724	0.009884
CP4	0.010909	-0.000737	0.014184	0.017909
CP5	-0.011716	-0.009447	0.014218	0.020704
CP6	-0.001483	0.013447	-0.014848	0.020087
CP7	0.010528	0.006289	0.004167	0.012952
CP8	-0.011565	-0.014025	-0.002340	0.018328
GCP1	-0.002489	0.000887	0.014115	0.014360
GCP2	0.011461	0.010221	0.006589	0.016710
GCP3	0.010934	0.006445	-0.002579	0.012952
GCP4	0.013841	0.009251	0.010988	0.019947
GCP5	-0.006074	-0.009116	0.013009	0.017007
GCP6	0.006238	0.005241	-0.013075	0.015406
GCP7	-0.010044	-0.012699	-0.007723	0.017939
GCP8	0.005797	0.002547	0.007367	0.009714
GCP9	0.006196	0.013370	-0.012307	0.019199
GCP10	-0.006270	-0.010692	0.008653	0.015116
GCP11	0.009022	-0.001409	0.001118	0.009199
Control points Fotopunkty	0.008033	0.007443	0.008866	0.014090
Check points Punkty kontrolne	0.008854	0.006308	0.009640	0.014530

Wyboje to uszkodzenia o dużym stopniu szkodliwości, stanowiące ubytek mieszanki mineralno-asfaltowej o wymiarach nie mniejszych niż 15 cm × 15 cm i na głębokość większą niż grubość warstwy ścieralnej (również na krawędzi jezdni) [30].

Analyzing the data given in Table 2, one may note that flight time at the altitude of 30 m is about three times shorter than at the altitude of 5 m, and the number of the photographs taken is about eight times lower. The number of generated points in the cloud is over ten times lower in the case of flight altitude of 30 m than in the case of 5 m. It affects the processing time of images, which is over fifteen times shorter for the altitude of 30 m. Quality analysis of the obtained images indicates that *GSD* for the altitude of 30 m equals 2.0 mm/px, which is four times higher than for the altitude of 5 m. In the case of cracks, accuracy of determination of their dimensions depends on *GSD*. Assuming that the size of the smallest visible detail in the image corresponds to the *GSD* value multiplied by a factor of 1.5 to 3.0 [15, 16], in the case of the camera used, survey flight at the altitude of 5 m makes it possible to detect cracks from 1 mm in size; in the case of flight altitude of 30 m it is possible to detect cracks from 4 mm.

Example results of the local fit of the orthophotomosaic (its internal connectivity) and external fit relative to the global reference system are shown in Table 3 (for flight altitude of 5 m). Based on the analysis of data available in the photogrammetric software, it was noted that error in a single independent check point (reflecting the fit to the global reference system) ranged from 15 mm to 25 mm, depending on flight altitude (the lower the altitude, the lower the error). With the adopted survey criteria and the layout of reference points, it may be assumed that flight altitude did not significantly affect the accuracy of orthophotomosaic fitting relative to the global reference system; the average error equaled 20 mm. Accuracy of local (internal) fit ranged from 14 mm to 20 mm.

A pothole, which should be classified among the most detrimental distress types, comprises a cavity in the asphalt mixture, with the dimensions of at least 15 cm × 15 cm and depth greater than the thickness of the wearing course (also at the edge of the road) [30]. Four potholes along the analyzed test section were chosen for survey analysis. According to the methodology described in section 5, dimensions of the selected potholes were determined along the three axes (*X*, *Y*, *Z*) using three different measurement methods. The obtained values are given in Table 4. An example measurement performed in the photogrammetric software is shown in Fig. 4.

Na przedmiotowym odcinku badawczym wybrano do analizy cztery uszkodzenia nawierzchni w postaci wybojów. Zgodnie z metodyką przedstawioną w punkcie 5 określono wielkości wybranych uszkodzeń w trzech wymiarach (X, Y, Z) przy pomocy trzech metod pomiarowych i zestawiono je w Tabl. 4. Przykładowy pomiar z wykorzystaniem oprogramowania fotogrametrycznego przedstawiono na Rys. 4.

Fig. 4. Measurement of pothole dimensions using photogrammetric software

Rys. 4. Pomiar wymiarów wyboju przy zastosowaniu oprogramowania fotogrametrycznego

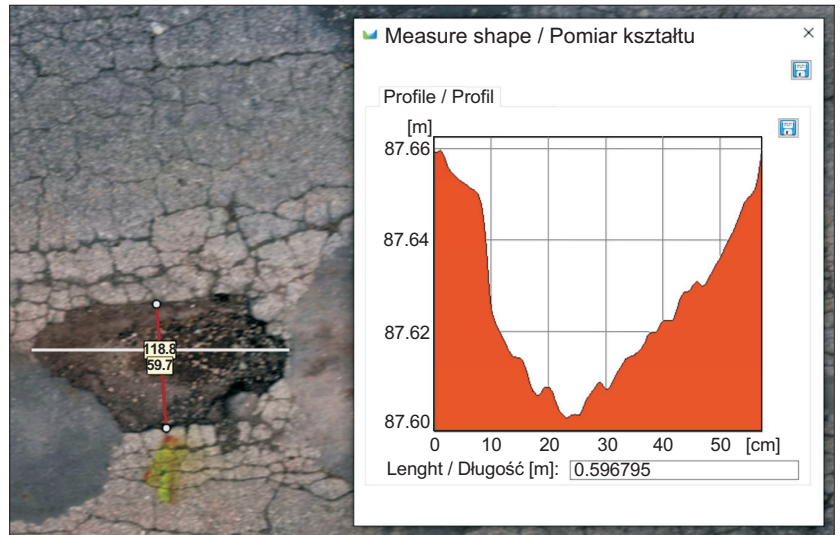


Table 4. Parameters of the selected potholes depending on the measurement method used
Tablica 4. Parametry wybranych wybojów uzyskane w zależności od zastosowanej metody pomiaru

Pothole no./ Nr wyboju	Measurement method / Metoda pomiaru		Length [cm] Długość	Width [cm] Szerokość	Depth [cm] Głębokość	
1	UAV BSP	Altitude [m] Wysokość	5	118.8	59.7	5.8
			10	119.3	59.8	5.5
			20	119.5	59.9	5.6
			30	119.0	59.5	5.5
			mean / średnia	119.2 ± 0.3	59.7 ± 0.2	5.6 ± 0.1
	Tape measure / Taśma miernicza			118.5	59.5	6.0
Total station / Tachimetr			118.9	59.8	5.9	
2	UAV BSP	Altitude [m] Wysokość	5	50.1	50.7	3.5
			10	50.4	50.8	3.6
			20	50.6	50.7	3.3
			30	50.5	50.2	3.5
			mean / średni	50.4 ± 0.2	50.6 ± 0.3	3.5 ± 0.1
	Tape measure / Taśma miernicza			50.0	51.0	4.0
Total station / Tachimetr			50.3	50.8	3.9	
3	UAV BSP	Altitude [m] Wysokość	5	64.1	59.3	4.3
			10	64.3	59.6	4.4
			20	63.9	59.2	4.6
			30	64.3	59.5	4.2
			mean / średni	64.2 ± 0.2	59.4 ± 0.2	4.4 ± 0.2
	Tape measure / Taśma miernicza			65.0	59.0	5.0
Total station / Tachimetr			64.3	59.2	4.8	
4	UAV BSP	Altitude [m] Wysokość	5	77.9	70.7	4.5
			10	77.6	70.5	4.9
			20	77.4	70.3	4.7
			30	78.2	70.8	4.6
			mean / średni	77.8 ± 0.4	70.6 ± 0.2	4.7 ± 0.2
	Tape measure / Taśma miernicza			77.0	71.0	5.0
Total station / Tachimetr			77.4	71.3	5.1	

Analizując wartości zestawione w Tabl. 4 stwierdzono, że w przypadku wykonywania serii zdjęć na cele fotogrametryczne przy zastosowaniu BSP o specyfikacji według Tabl. 1 oraz parametrów nalotów przedstawionych w punkcie 5 uzyskane wyniki są do siebie zbliżone. Porównując wartości długości i szerokości uszkodzenia w zależności od wysokości nalotu, stwierdzono, iż wartość odchylenia standardowego od wartości średniej wynosi nie więcej niż 4 mm, a w przypadku głębokości – nie więcej niż 2 mm. Porównania wyników pomiaru długości i szerokości wybranych wybojów na podstawie analizy zdjęć pozyskanych z zastosowaniem BSP z pomiarami terenowymi przy użyciu taśmy mierniczej wykazały, że wymiary uszkodzeń oznaczone tymi dwoma metodami nie różnią się więcej niż o 7 mm, zaś w przypadku tachimetru elektronicznego – nie więcej niż o 4 mm (w większości przypadków nie więcej niż o 2 mm). W przypadku pomiaru głębokości wyboju, wymiary uzyskane przy zastosowaniu taśmy mierniczej i tachimetru elektronicznego są o około 5 mm wyższe niż przy wykorzystaniu odczytów z ortofotomapy. Fakt oznaczenia mniejszych głębokości wybojów przy użyciu metody fotogrametrycznej może być spowodowany problemami z idealnym wyznaczeniem obrzeża wyboju (czarna jest zarówno powierzchnia nawierzchni, jak i brzeg wyrwy w mieszance mineralno-asfaltowej). Podsumowując pomiary zestawione w Tabl. 4 stwierdzono, że niezależnie od zastosowanej wysokości nalotu BSP (5 m, 10 m, 20 m lub 30 m) oznaczone wymiary wybojów są zbliżone do wymiarów pozyskanych metodą oceny wizualnej przy użyciu taśmy mierniczej, co potwierdza wnioski autorów pracy [21]. Przy zastosowaniu metody fotogrametrycznej można także określić wymiary łat. Oznaczone wymiary uszkodzeń charakteryzują się zbliżoną wartością do tych zmierzonych przy zastosowaniu taśmy mierniczej (różnica nie przekracza 1 cm). W przypadku metod tachimetrycznych – co potwierdzają autorzy publikacji [31] – uzyskuje się wysoką dokładność pomiarów, ale jednocześnie są one pracochłonne i kosztowne, szczególnie w przypadku ich wykorzystania do diagnostyki nawierzchni drogowej. Uzyskane wyniki pomiarów uszkodzeń na podstawie zdjęć z BSP (nawet z wysokości 30 m) charakteryzują się dosyć dobrą dokładnością w stosunku do pomiarów tachimetrem elektronicznym; maksymalna różnica wymiarów wynosi ± 4 mm. Wykonany w oprogramowaniu fotogrametrycznym model 3D drogi (Rys. 5) można wykorzystać również do wstępnej oceny równości poprzecznej lub podłużnej, stanu rowów przydrożnych itp.

7. Dyskusja i wnioski

Obecnie stosowane metody oceny cech powierzchniowych nawierzchni drogowych to głównie pomiary przy użyciu kamer multispektralnych oraz czujników laserowych umieszczanych

Analysis of the values given in Table 4 indicates that – when the series of images for photogrammetric purposes is captured using an UAV specified in Table 1 with flight parameters described in section 5 – the obtained measurement results were very similar. Comparisons of pothole dimensions measured at various flight altitudes have shown that standard deviation of pothole length and width did not exceed 4 mm; in the case of depth it did not exceed 2 mm. Comparison of pothole length and width values obtained from UAV surveys and those obtained using measuring tape indicated that the difference in dimension measurements between the two methods did not exceed 7 mm; in the case of the total station they did not exceed 4 mm (in most cases – 2mm). When pothole depth was analyzed, the values obtained using measuring tape and total station were higher by approx. 5 mm than those measured from the orthophotomosaic. The fact that depth values obtained using the photogrammetric method were lower may be associated with problems with ideal determination of the edge of the pothole (both the asphalt surface and the edge of the hole are black). General conclusion of the comparison presented in Table 4 is that pothole dimensions obtained using UAV, regardless of the flight altitude (5 m, 10 m, 20 m or 30 m), were similar to those obtained using measuring tape; this is in agreement with conclusions presented in [21]. Photogrammetric method also enables determination of dimensions of patches. The measured values were similar to those obtained using measuring tape (the difference did not exceed 1 cm). As confirmed by the authors of [31], in the case of a total station the accuracy is high, but the measurements require considerable effort and funds, especially in road pavement diagnostics. The values obtained based on images from UAV (even from the altitude of 30 m) were characterized by sufficiently high accuracy in comparison to total station measurements; the maximum difference in dimensions equaled ± 4 mm. The 3D model generated in the photogrammetric software (Fig. 5) may also be used for preliminary evaluation of longitudinal and transverse evenness, condition of roadside ditches etc.

7. Discussion and conclusions

The current methods of road pavement surface feature assessment mostly consist in measurements using multi-spectral cameras and laser sensors mounted on cars. Since such surveys are costly, there is an ongoing search for new, more economical solutions, especially for ongoing pavement condition monitoring by road administrators. The advantages of methods based on usage of one or multiple cameras installed on an unmanned aerial vehicle – apart

na samochodach. Jako że są to kosztowne zabiegi, szuka się nowych, bardziej ekonomicznych rozwiązań, szczególnie w zakresie bieżącego monitoringu stanu nawierzchni przez zarządców dróg. Przewagą metod opartych na wykorzystaniu kamery lub kamer na bezzałogowym statku powietrznym – poza czynnikiem ekonomicznym – jest możliwość jednoczesnego wykonywania pomiarów dla całej szerokości drogi (w odróżnieniu od technik wykorzystujących samochody), brak konieczności angażowania wielu osób w procedurę pomiaru i przetwarzania danych, krótki czas pracy w terenie oraz brak negatywnego wpływu na ruch drogowy (jego spowalnianie). Przeprowadzone badania wykazały, że pozyskanie obrazów przy zastosowaniu technologii BSP może stanowić zarówno samodzielną metodę pomiarową, jak i być uzupełnieniem innych metod (np. skaningu laserowego), co potwierdza spostrzeżenia innych badaczy [14, 23-28]. Dodatkowo zgromadzone obrazy mogą stanowić dane wejściowe w algorytmach głębokiego uczenia (ang. *deep learning techniques*) w celu automatycznego wykrywania uszkodzeń nawierzchni drogowych.

from the economic factor – include the possibility of simultaneous surveying of the entire width of the road (as opposed to methods using cars), limited need for personnel engaged in survey and data processing procedures, short field work and the lack of negative impact on traffic (no reductions in speed). The performed research indicated that capturing of images using UAVs may constitute an independent survey method or serve as an addition to other methods (e.g. laser scanning), which is in agreement with observations of other researchers [14, 23-28]. Moreover, the collected images may be used as input data in deep learning algorithms to automatically detect pavement distress.

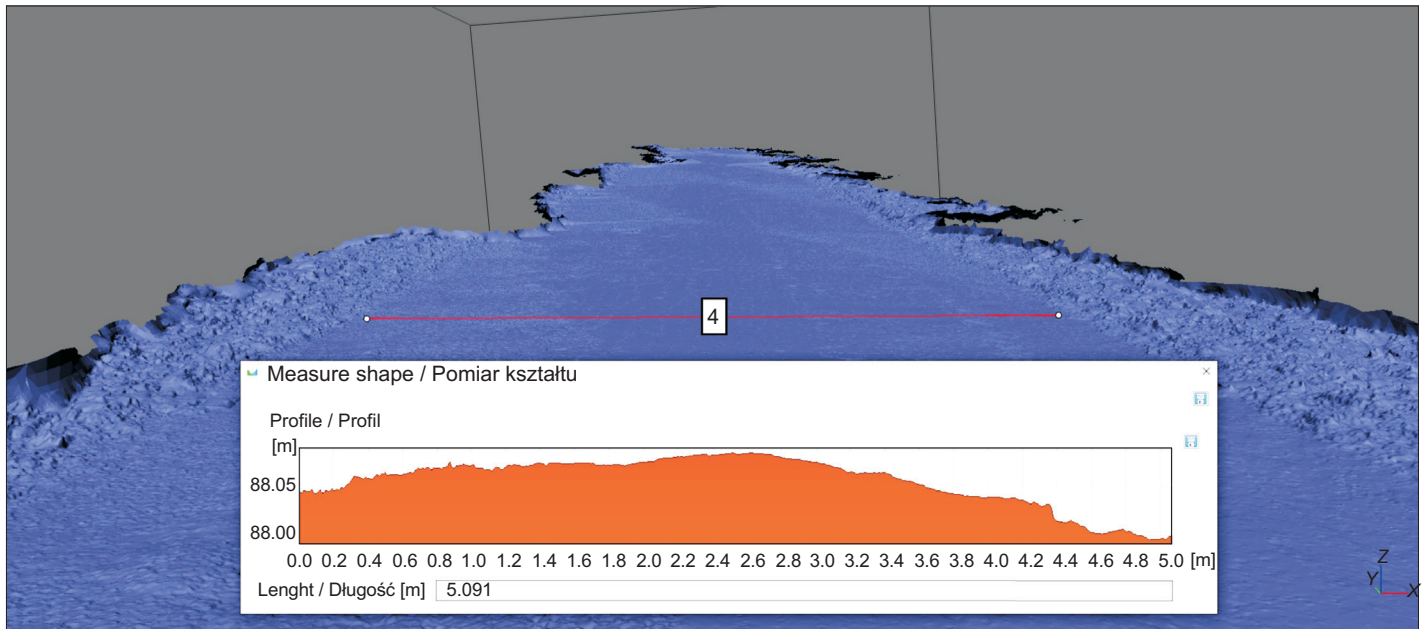


Fig. 5. Transverse evenness analysis in photogrammetric software
Rys. 5. Analiza równości poprzecznej w oprogramowaniu fotogrametrycznym

Na dokładność pomiaru uszkodzeń nawierzchni drogowej przy wykorzystaniu bezzałogowego statku powietrznego ma wpływ wiele czynników. Przede wszystkim są to: wysokość lotu, prędkość, parametry kamery (matryca, ogniskowa) oraz zniekształcenia geometrii powodowane przez nieodpowiedni kąt wykonania zdjęcia. Z tego względu w pracy porównano wyniki pomiarów wielkości uszkodzeń nawierzchni drogi na odcinku długości 170 m, oznaczone przy wykorzystaniu BSP

The accuracy of pavement distress survey using an unmanned aerial vehicle is affected by multiple factors, including: flight altitude and speed, camera parameters (image sensor, focal length) and geometric distortions caused by improper camera angle. Therefore, the presented work includes comparison of pavement distress measurements obtained using measuring tape and total station with those based on images obtained in four flights

w trakcie czterech serii nalołów na różnej wysokości (5 m, 10 m, 20 m, 30 m) oraz przy zastosowaniu taśmy mierniczej i tachimetru elektronicznego. Analizując wyniki badań zauważono, że w praktycznych zastosowaniach technologii BSP do oceny stanu nawierzchni konieczne jest zwrócenie uwagi na następujące parametry: czas lotu, wysokość lotu oraz jakość i liczba zdjęć. W przypadku nalołów wykonywanych na niskiej wysokości (np. 5 m) uzyskuje się wysoką dokładność zdjęć; niestety, czas lotu jest znacznie dłuższy (np. dla wysokości 30 m jest 3 razy krótszy niż dla 5 m), a duża liczba zdjęć powoduje, że czas przetwarzania jest piętnaście razy dłuższy dla obrazów pozyskanych z nalołu na wysokości 5 m niż na 30 m. Przy wykorzystaniu BSP z kamerą o matrycy 1/2 cala i ogniskowej 24 mm oraz wysokości lotu 5 m istnieje możliwość wykrycia na obrazach spękań o wielkości już od 1 mm, a w przypadku nalołu na 30 m – od 4 mm. Z tego względu korzystne jest zastosowanie kamery z jak największą matrycą (minimum 1 cal) i wysokości lotu około 20-30 m. Dodatkowo warto zastosować obiektyw o ogniskowej w zakresie od 35 mm do 50 mm. Wykorzystanie zdjęć z bezzałogowego statku powietrznego i oprogramowania fotogrametrycznego daje ponadto możliwość stworzenia modelu 3D nawierzchni i jej otoczenia, co pozwala na ocenę nie tylko uszkodzeń nawierzchni, ale też jej równości poprzecznej i podłużnej. Analiza literatury oraz wyników badań potwierdza, że zastosowanie technologii BSP do oceny cech powierzchniowych nawierzchni jest rozwiązaniem przyszłościowym i na obecnym etapie stanowi co najmniej alternatywę dla oceny wizualnej. Zebrane doświadczenia autorzy planują wykorzystać w kolejnych badaniach, m.in. porównać wyniki pomiarów cech powierzchniowych nawierzchni uzyskane przy zastosowaniu odpowiednio wyposażonego BSP i klasycznych pojazdów pomiarowych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Cebon D.*: Vehicle-generated road damage: a review. *Vehicle system dynamics*, **18**, 1-3, 1989, 107-150, DOI: 10.1080/00423118908968916
- [2] *Hassan Y., Abd El Halim A.O., Razaqpur A.G., Bekheet W., Farha M.H.*: Effects of runway deicers on pavement materials and mixes: comparison with road salt. *Journal of Transportation Engineering*, **128**, 4, 2002, 385-391, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:4(385)
- [3] *Chlipalski K.*: Błędy popełniane podczas budowy i eksploatacji dróg. *Drognictwo*, 10, 2007, 120-124
- [4] *Leonovich I., Melnikova I.*: Influence of temperature on the formation of damages in asphalt concrete pavements under climatic conditions of the Republic of Belarus. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **7**, 1, 2012, 42-47, DOI: 10.3846/bjrbe.2012.06
- [5] *Talvik O., Aavik A.*: Use of FWD deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for pavement condition assessment. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **4**, 4, 2009, 196-202, DOI: 10.3846/1822-427X.2009.4.196-202
- [6] *Loizos A., Al-Qadi I., Scarpas T.*: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, CRC Press, Londyn, 2017
- [7] *Požarycki A., Górnaś P., Wanatowski D.*: The influence of frequency normalisation of FWD pavement measurements on backcalculated values of stiffness moduli. *Road Materials and Pavement Design*, **20**, 1, 2019, 1-19, DOI: 10.1080/14680629.2017.1374991
- [8] *Yu S., Sukumar S.R., Koschan A.F., Page D.L., Abidi M.A.*: 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach. *Optics and Lasers in Engineering*, **45**, 7, 2007, 808-818, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2006.12.007

performed at the adopted altitudes (5 m, 10 m, 20 m and 30 m) over the chosen 170-m-long road segment. Analysis of the results indicated that it necessary to take the following parameters into account in practical applications of UAVs in pavement condition assessment: flight duration, flight altitude and the number of photographs taken. In the case of flights at low altitudes (e.g. 5 m), high accuracy of the images is obtained. However, the time of the flight is much longer (threefold longer than for the altitude of 30 m) and the considerable number of photographs makes processing of images captured from 5 m fifteen times longer than processing of images captured from 30 m. Using an UAV with an 1/2" image sensor, 24 mm focal length and 5 m flight altitude, it is possible to detect cracks from 1 mm; in the case of flight altitude of 30 m it is possible to detect cracks from 4-mm. In this respect, it is advantageous to use a camera with the largest available image sensor (minimum 1") and adopt flight altitude of about 20-30 m. It is also advisable to use lens with focal length ranging from 35 mm to 50 mm. Moreover, use of photographs from UAV in combination with photogrammetric software makes it possible to create a 3D model of the pavement and its surroundings, enabling assessment of longitudinal and transverse evenness as well. Analysis of the literature and results confirms that the use of UAV technology in pavement diagnostics is a very promising solution, which even now may serve as an alternative to traditional survey methods. The authors plan to use the acquired experience in further research, including comparisons between surface feature measurements performed using adequately equipped UAVs and typical road survey vehicles.

- [9] *Soilán M., Sánchez-Rodríguez A., del Río-Barral P., Perez-Collazo C., Arias P., Riveiro B.*: Review of laser scanning technologies and their applications for road and railway infrastructure monitoring. *Infrastructures*, **4**, 4, 2019, ID articles: 58, DOI: 10.3390/infrastructures4040058
- [10] *Zhou Y., Guo X., Hou F., Wu J.*: Review of Intelligent Road Defects Detection Technology. *Sustainability*, **14**, 10, 2022, ID article: 6306, DOI: 10.3390/su14106306
- [11] *Maeda H., Sekimoto S., Seto T., Kashiyama T., Omata H.*: Road damage detection and classification using deep neural networks with smartphone images. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **33**, 12, 2018, 1127-1141, DOI: 10.1111/mice.12387
- [12] *Ranyal E., Sadhu A., Jain K.*: Road condition monitoring using smart sensing and artificial intelligence: A review. *Sensors*, **22**, 8, 2022, 3044, DOI: 10.3390/s22083044
- [13] *Heller S., Mechowski T., Harasim P.*: Wykorzystanie badań diagnostycznych stanu nawierzchni do rozpoznania miejsc niebezpiecznych dla użytkowników drogi. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **9**, 1, 2010, 57-75
- [14] *Inzerillo L., Di Mino G., Roberts R.*: Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. *Automation in Construction*, **96**, 2018, 457-469, DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.010
- [15] *Kubišta J., Surový P.*: Spatial resolution of unmanned aerial vehicles acquired imagery as a result of different processing conditions. *Central European Forestry Journal*, **67**, 3, 2021, 148-154, DOI: 10.2478/forj-2021-0011
- [16] *Höhle J.*: Oblique aerial images and their use in cultural heritage documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XL-5/W2**, 2013, 349-354, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-349-2013
- [17] *Cai C., Gao Y., Pan L., Jian-Jun Z.*: Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. *Advances in Space Research*, **56**, 1, 2015, 133-143, DOI: 10.1016/j.asr.2015.04.001
- [18] *Tang R., Fritsch D., Cramer M.*: New rigorous and flexible Fourier self-calibration models for airborne camera calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **71**, 2012, 76-85, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.05.004
- [19] *Ferrer-González E., Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P.*: UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, **12**, 15, 2020, 2447, DOI: 10.3390/rs12152447
- [20] *Roberts R., Inzerillo L., Mino G.*: Using UAV based 3D modelling to provide smart monitoring of road pavement conditions. *Information*, **11**, 12, 2020, ID article: 568, DOI: 10.3390/info11120568
- [21] *Zeybek M., Biciçi S.*: Road distress measurements using UAV. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, **1**, 1, 2020, 13-23
- [22] *Liu Y., Zheng X., Ai G., Zhang Y., Zuo Y.*: Generating a high-precision true digital orthophoto map based on UAV images. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **7**, 9, 2018, 333, DOI: 10.3390/ijgi7090333
- [23] *Mackiewicz P., Mączka E.*: Wykorzystanie drona w identyfikacji uszkodzeń nawierzchni. *Przegląd komunikacyjny*, 2-3, 2022, 32-39
- [24] *Cardenal J., Fernández T., Pérez-García J.L., Gómez-López J.M.*: Measurement of road surface deformation using images captured from UAVs. *Remote Sensing*, **11**, 12, 2019, ID article: 1507, DOI: 10.3390/rs11121507
- [25] *Barrile V., Bernardo E., Fotia A., Bilotta G.*: Road safety: road degradation survey through images by UAV. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, **16**, 2020, 649-659, DOI: 10.37394/232015.2020.16.67
- [26] *Coenen T.B.J., Golroo A., Lo Presti D.*: A review on automated pavement distress detection methods. *Cogent Engineering*, **4**, 1, 2017, ID article: 1374822, DOI: 10.1080/23311916.2017.1374822
- [27] *Karaca Y., Cicek M., Tatli O., Sahin A., Pasli S., Beser M.F., Turedi S.*: The potential use of unmanned aircraft systems (drones) in mountain search and rescue operations. *American Journal of Emergency Medicine*, **36**, 4, 2018, 583-588, DOI: 10.1016/j.ajem.2017.09.025
- [28] *Siebert S., Teizer J.*: Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, **41**, 2014, 1-14, DOI: 10.1016/j.autcon.2014.01.004
- [29] *Rozporządzenie Wykonawcze Komisji Unii Europejskiej 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych. Dz. Urz. UE L 152 z 11.06.2019*
- [30] *Katalog typowych uszkodzeń nawierzchni bitumicznych dla potrzeb ciągłego obmiaru uszkodzeń metodą oceny wizualnej w systemie oceny stanu nawierzchni SOSN. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2002*
- [31] *Zhang A., Wang K.C.P., Fei Y., Liu Y., Chen C., Yang G., Li J.Q., Yang E., Qiu S.*: Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces with a recurrent neural network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **34**, 3, 2019, 213-229, DOI: 10.1111/mice.12409