

Wykorzystanie drona w identyfikacji uszkodzeń nawierzchni

Drone usage for pavement damage identification

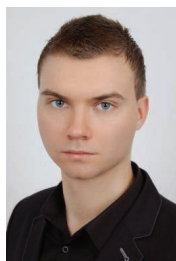


Piotr Mackiewicz

Dr hab. inż.

*Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk*

piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl



Eryk Mączka

Mgr inż.

*Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk*

eryk.maczka@pwr.edu.pl

Streszczenie: Zastosowanie w odpowiednim czasie właściwych zabiegów remontowych pozwala skutecznie wydłużyć żywotność nawierzchni drogowych. W tym celu niezbędne jest przeprowadzenie dokładnej identyfikacji uszkodzeń, a następnie na jej podstawie ocena stanu nawierzchni drogowych. W związku z rozwojem zaawansowanych technik pomiarowych oraz aplikacji komputerowych można szybciej i dokładniej monitorować uszkodzenia w nawierzchniach. W niniejszym artykule zaprezentowano sposób identyfikacji uszkodzeń nawierzchni dużego obszaru placu z wykorzystaniem drona. Dzięki tej metodzie możliwe było lepsze i szybsze zobrazowanie i zróżnicowanie różnych defektów nawierzchni co ostatecznie pozwoliło lepiej określić przyczyny i genezę tych uszkodzeń.

Słowa kluczowe: Dron; Uszkodzenia nawierzchni; DJI SPARK; Identyfikacja uszkodzeń

Abstract: The timely use of appropriate renovation measures can effectively extend the life of road surfaces. For this purpose, it is necessary to carry out a detailed identification of damage, and then on its basis to assess the condition of road surfaces. Due to the development of advanced measurement techniques and computer applications, damage to pavements can be monitored faster and more accurately. This article presents a method of identifying damage to the pavement of a large area of the square with the use of a drone. The applied method allowed to visualize and differentiate various surface defects faster and more precisely. The method also enabled determine causes and genesis of damage more greatly.

Keywords: Dron; Pavement damage; DJI SPARK; Damage Identification

Wprowadzenie

Bez właściwych zabiegów remontowych degradacja nawierzchni dróg będzie następować szybciej, co w późniejszym okresie eksploatacji będzie wiązało się ze znacznymi stratami ekonomicznymi. W celu utrzymania dróg należy przeprowadzić odpowiedni przegląd stanu nawierzchni. Jednoznaczne zidentyfikowanie uszkodzeń w nawierzchni, ich sposobu powstania i perspektyw dalszego rozwoju, wymaga zaawansowanych, często skomplikowanych badań, a następnie analiz mechanistycznych. W procesie identyfikacji powierzchni stosuje się najczęściej techniki wizualne. Są one już od dłuższego czasu uzupeł-

niane przez techniki rejestracji obrazu [2], [5], [8], metody fotogrametryczne [17], rejestracje z wykorzystaniem samolotów [6].

Mimo iż, pierwsze latające obiekty stosowano w XIX wieku (małe balony w celach wojennych), a następnie bezzałogowe samoloty sterowane radiem to właściwy rozwój dronów (bezzałogowy statek powietrzny (ang. unmanned aerial vehicle, UAV)) rozpoczął się pod koniec XX wieku. Dzisiejszy rynek dronów można podzielić na drony do zastosowań wojskowych oraz cywilnych (potrzeby prywatne, przemysłowe, badania naukowe). W dziedzinie budownictwa drogowego drony są przydatne w miejscach niedostępnych dla ruchu kołowego lub

przy dużych identyfikacji rozległych obszarów. Stosuje się rejestrację zdjęciową oraz wideo za pomocą kamer/aparatów przymocowanych do dronów [7], [9], [12], [1], [13].

Na szczególną uwagę zasługuje dotychczasowa praca [18], w której stosowano drony (zbieranie danych w postaci obrazów) do oceny stanu dróg nieutwardzonych. Autorzy [11] stosowali drony i odpowiednie oprogramowanie w projektach robót ziemnych porównując wyniki z konwencjonalną metodą geodezyjną. Względy ekonomiczne wymagające skutecznej metody do monitorowania dużych obszarów budowlanych wskazują potrzebę stosowania dronów oraz interfejsu MATLAB GUI do wykrywania i oceny

pęknięć powierzchni różnych obiektów [10].

Systematyczna prowadzona dokumentacja pozwala na przyszłe analizowanie zmian zachodzących w rozwoju uszkodzeń nawierzchni i stosowanie odpowiedniego modelu.

Aktualnie w Polsce prowadzony jest monitoring nawierzchni, stosowanych jest wiele systemów w zakresie lokalnym oraz globalnym sieci dróg. Z wykorzystaniem różnego mobilnego sprzętu identyfikowana jest nośność nawierzchni, cechy powierzchniowe oraz stan uszkodzeń. Zastosowanie techniki wideo i kamer wysokiej rozdzielczości pozwala w sposób ciągły rejestrować różne typy uszkodzeń, a następnie z wykorzystaniem różnych algorytmów (np. sztucznych sieci neuronowych) klasyfikować je i określać ich parametry.

W Polsce przez wiele lat stosowane były ręczne lub półautomatyczne systemy rejestracji. W 1989 roku wprowadzono w Polsce System Oceny Stanu Nawierzchni (SOSN) [15]. Jego podstawą była inwentaryzacja uszkodzeń i pomiarów cech eksploatacyjnych nawierzchni asfaltowych. System o charakterze identyfikacji wizualnej przez kolejne lata rozwijano i aktualizowano [14], [16]. Do inwentaryzacji i oceny wizualnej zastosowano system SOWA, który opierał się na manualnej koncepcji kodowania uszkodzeń za pośrednictwem specjalnego rejestratora podczas jazdy. Z uwagi na bezpośrednią obsługę przez człowieka zawierał on pewne aspekty oceny subiektywnej. Wykorzystując opracowania SOSN, rozwój badawczy oraz doświadczenia zagraniczne, opracowano i zebrano szczegółowe wytyczne do diagnostyki stanu nawierzchni (DSN) [4], [3]. Mimo, iż w tym systemie nie uwzględnia się jeszcze techniki UAV, to aktualnie stosowany LCMS (Pavemetrics®) – Laser Crack Measurement System, pozwala w sposób ciągły, precyzyjny i powtarzalny identyfikować uszkodzenia na powierzchni. Ta automatyczna ocena

stanu nawierzchni opiera się na wykonaniu wysokiej rozdzielczości obrazu 3D nawierzchni drogowej oraz zdjęć z wykorzystaniem kamer rejestrujących ogólny widok jezdni z przodu i z tyłu pojazdu. Specjalistyczne, „szybkoklatkowe” kamery rejestrują obraz nawierzchni pasa drogowego wraz z obrazem linii laserowej, wygenerowanej przy pomocy projektorów laserowych. W wyniku zastosowania takiej techniki powstaje obraz 3D, który służy do automatycznych analiz ukierunkowanych na wykrywanie uszkodzeń nawierzchni (w tym ich szerokości i głębokości, jeśli dotyczy).

Stosowanie dronów w drogownictwie nie jest jeszcze powszechnie stosowane i wymagane w systemach zarządzania siecią drogową w Polsce. Mimo to wiele jednostek naukowych lub firm drogowych wykorzystuje drony do rejestracji zdjęciowej i filmowej, a w szczególności do monitoringu, kontroli robót, oceny stanu uszkodzeń, oceny warunków ruchu drogowego. Wdraża się także bardziej zaawansowane rejestracje, jak np. analizy termiczne lub rejestracje numeryczne 3D, służące następnie do opracowania cyfrowych modeli powierzchni (digital surface models DSM) i cyfrowych modeli terenu (digital terrain models DTM).

Wizja lokalna pozwala to na identyfikację obszarów terenu i dróg w jednym ujęciu. Okazuje się to skuteczne w zachowaniu bezpieczeństwa osób wykonujących inwentaryzację i dostępie do odległych miejsc, które w klasycznym podejściu mogą nie być uwzględnione. Technologia dronów jest wyjątkowo skuteczna, jeśli chodzi o rejestrowanie takich uszkodzeń nawierzchni, które są trudne do zlokalizowania i odniesienia na dużych obszarach, np. na drogach startowych, placach, parkingach, rozbudowanych sieciach dróg wewnętrznych.

Treści przechwycone przez drony w dalszym etapie powinny być odpowiednio obrobione pod względem

graficznym i skalibrowane w celu opracowania wizualnych map fotograficznych o wymaganej szczegółowości.

Należy jednak zwrócić uwagę, że w specyficznych sytuacjach (np. poszukiwanie przyczyn nietypowych uszkodzeń, analiza mniejszych lokalnych obszarów) nadal niezbędna jest identyfikacja i analiza uszkodzeń w systemie „ręcznym”. W niniejszym artykule zaprezentowano zastosowanie dronu jako narzędzie pozwalające skutecznie uzupełnić typową inwentaryzację uszkodzeń nawierzchni dużego placu.

Charakterystyka placu

Celem przeprowadzonych badań oraz inwentaryzacji przez autorów była analiza przyczyn powstania uszkodzeń warstwy ścieralnej (z prefabrykowanych elementów betonowych) oraz elementów odwodnienia liniowego na nawierzchni placu przed budynkiem użyteczności publicznej. Analizy wykonano na potrzeby opracowania programu naprawczego dla nawierzchni placu. Ocenie poddano stan spękań i równości nawierzchni, uszkodzeń dylatacji i spoin oraz elementów odwodnienia liniowego. W ramach późniejszego opracowania obserwacje terenowe zweryfikowano w modelu obliczeniowym. Przeprowadzono analizy numeryczne wskazujące na przyczyny uszkodzeń. Wskazano technologie naprawcze zabezpieczające plac przed dalszą degradacją

Przedmiotowa nawierzchnia zajmuje plac o powierzchni ponad 10 000 m² na płycie garażu podziemnego. Jest to konstrukcja sztywne i szczelna, dylatowana o następującym układzie warstw:

- warstwa ścieralna z płyt i kostek betonowych / granitowych, gr. 8 cm,
- podsypka piaskowo-cementowa, gr. 3-5 cm,
- warstwa ochrona hydroizolacji z betonu C12/15 o zmiennej grubo-

ści 5 – 31 cm

- hydroizolacja,
- warstwy betonowe płyty garażu.

Wypełnienie spoin stanowi zaprawa cementowa na głębokość min. 4 cm, szerokość większości spoin wynosi od 2 do 8 mm. Widok ogólny nawierzchni przedstawiono na rys. 1.

Zastosowany sprzęt

Do inwentaryzacji uszkodzeń wykorzystano stosunkowo mało zaawansowany jak na aktualne technologie dron DJI SPARK (rys. 2). Jest to urządzenie typu quadcopter, które ukazało się na rynku w 2017 roku. Jest o małych wymiarach 143 x 143 x 55 mm i co bardzo ważne posiada masę startową tylko 300 g (150 g bez pakietu napędowego). Dla przypomnienia ówczesne polskie przepisy administracyjne regulujące loty dronami dotyczyły maszyn o ciężarze w granicach 0,6 kg do 25 kg. Drony poniżej 0,6 kg nie posiadały restrykcji w zakresie lotów przy skupiskach ludzi i w terenie zabudowanym. Aktualnie każda osoba chcąc latać dronem o masie powyżej 250g będzie musiała przejść szkolenie online oraz zaliczyć test online potwierdzający zdobycie wymaganej wiedzy.

Mała masa drona jest korzystna, gdyż większa jest jego odporność na ew. mechaniczne uszkodzenia przy upadku i potencjalnie zagrożenia dla ludzi. Dron SPARK ma składane do transportu śmigła i posiada wygodne etui pozwalające na wygony transport. Do rejestracji ujęć do dyspozycji jest kilka zautomatyzowanych programów-funkcji ułatwiających wykonywanie profesjonalnych ujęć. Po przełączeniu w tryb Sport model może poruszać się z prędkością do 50km/h. Ten tryb można również wykorzystać do szybkiego przemieszczenia się do miejsca filmowania, aby tam po jego wyłączeniu wrócić docelowej rejestracji terenu. Maksymalny czas lotu



1. Fragment analizowanego placu



2. Dron DJI SPARK z pakietem wyposażenia

fabryczny wynosi 16 minut, a maksymalna prędkość wznoszenia/opadania 3m/s. W urządzeniu zastosowano rozszerzony zestaw Combo zapewniający większy zasięg sterowania, szybsze ładowanie pakietów napędowych, większą precyzję sterowania (nadajnik RC/Wideo) i bezpieczeństwo lotu (osłony na śmigła). Stosowano pakiet zasilający LiPol 1480 mAh / 3S. Podczas inwentaryzacji wymagane było jednokrotne doładowanie (czas ładowania pakietu ok. 1 h).

Do rejestracji obrazu zastosowano kamerę: 1/2.3" matryca, 12 Mpikseli, FHD format: 1920x1080 i 30fps, obiektyw kamery 25 mm, jasność obiektywu $f = 2,6$. Sterowanie odbywało się nadajnikiem RC/Wideo pozwalającym na zasięg do 500 m. Transmisja sygnałów między modelem a nadajnikiem odbywa się cyfrowo w paśmie 2,4 GHz

dla RC i 5,8 GHz dla wideo. Sterowanie w systemie WiFi pozwala na zasięg do 100 m odległości i 50 m wysokości.

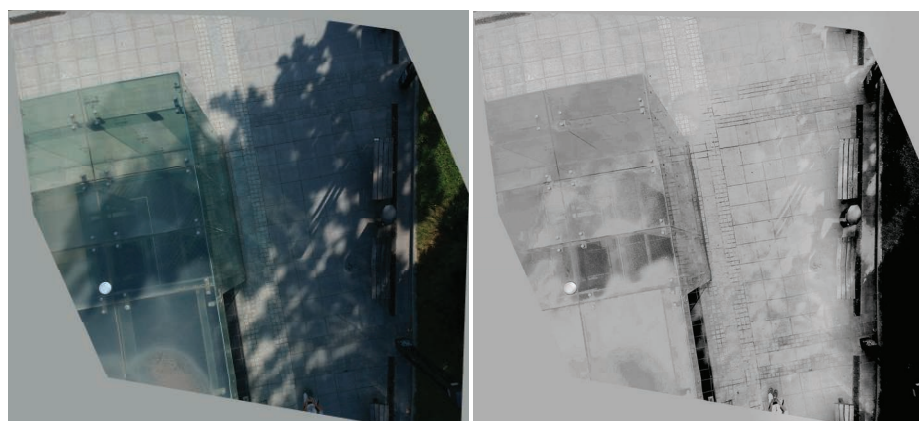
Dron wyposażony jest dodatkowo: w odbiornik GPS/Glonas, barometryczny czujnik wysokości, kompas magnetyczny, czujniki przeciw zderzeniu z przeszkodą przodem modelu, czujniki precyzyjnego lądowania i utrzymywania pozycji w pomieszczeniach zamkniętych, czujnik rozpoznawania twarzy i gestów operatora lub śledzenia wyznaczonego obiektu. W celu stabilności lotu dopuszczalna prędkość wiatru wynosi 28 km/h.

Identyfikacja uszkodzeń

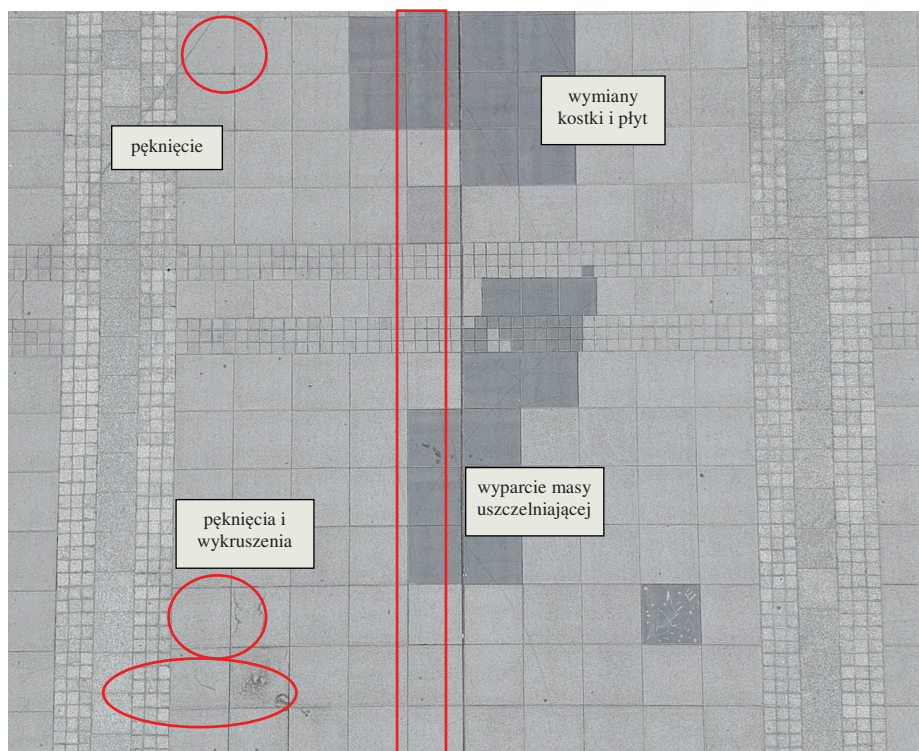
W celu szczegółowej identyfikacji uszkodzeń placu przeprowadzono serię zdjęć z wykorzystaniem drona DJI SPARK (rys. 3).



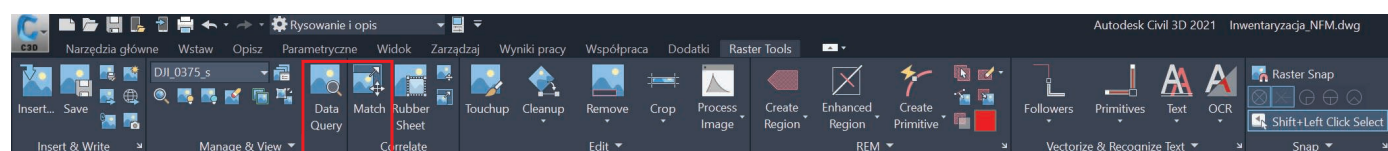
3. Przykładowe zdjęcia z drona



4. Przykładowe zdjęcia korekcy obrazu ze względu na zacienie obszaru



5. Zdjęcie fragmentu rejestrowanego placu ze zidentyfikowanymi uszkodzeniami



6. Interfejs nakładki Raster Design w środowisku Autocad Civil 3D

Rejestrację obszaru rejestrowano w postaci zdjęć o rozdzielczości 12 Mpikseli, uwzględniając „zakładkę” zdjęć co było przydatne w kolejnym etapie w kalibracji i łączeniu zdjęć. Dla analizowanego placu zarejestrowano około 400 zdjęć. Podczas inwentaryzacji panowały dobre warunki pogodowe, mały wiatr, bez opadów. Na pewnych obszarach występowało zacienie od drzew i obiektów, co wymagało w dalszym etapie dodatkowej obróbki graficznej obrazów (rys. 4).

Większość wykonanych obrazów posiadała zbliżoną charakterystykę tonalną i pozwalała na jednoznaczną identyfikację defektów nawierzchni. Przykład fragmentu placu z oznaczonymi uszkodzeniami przedstawiono na rys. 5.

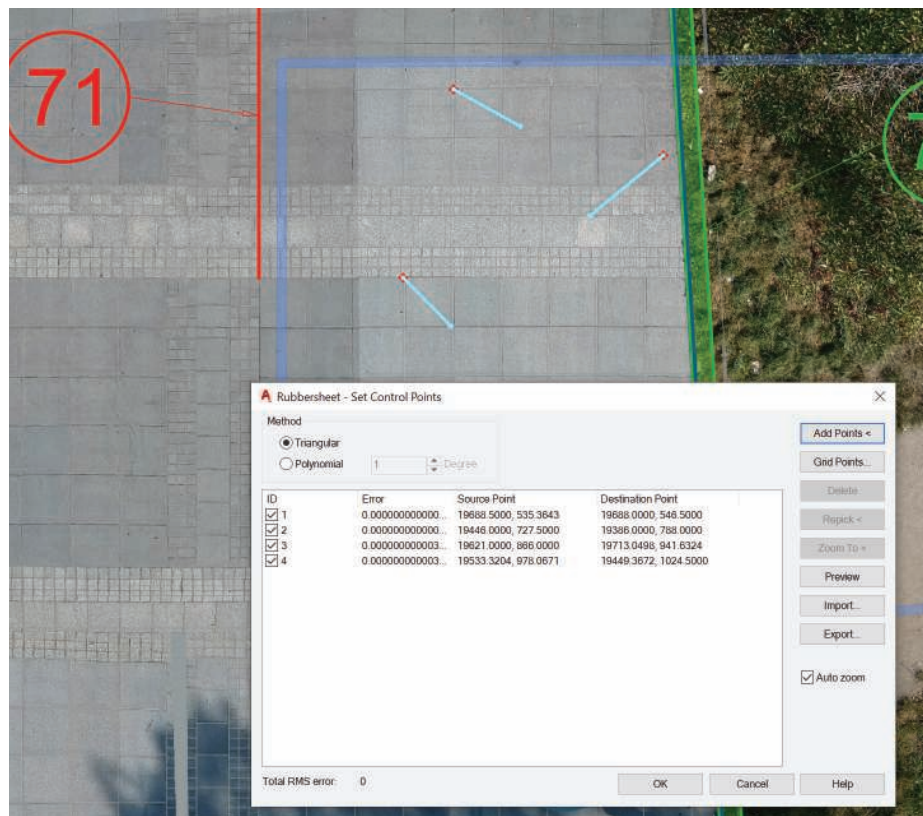
Celem stworzenia całościowej, szczegółowej mapy uszkodzeń niezbędna była także kalibracja każdego zdjęcia. Spowodowana była pewnymi zniekształceniami ze względu na krótszą ogniskową oraz aberrację na brzegach obrazu. Zastosowana krótsza ogniskowa obiektywu zapewniła na szerszy kąt obiektywu i wykonanie mniejszej liczny zdjęć. Istnieje wiele programów do obróbki zdjęć – Adobe Photoshop, Gimp, Google Picassa, jednak żaden z nich nie pozwala na bezpośrednią i sprawną modyfikację obrazów pod zastosowania inżynierskie. W środowisku Autodesk, istnieje rozszerzenie, które użytkownik może opcjonalnie doinstalować do podstawowego Autocada – Raster Design. Działa ono również w programach takich jak Autocad Map3D oraz Civil 3D. Pozwala ono na edycję zdjęć w zakresie tworzenia podkładów mapowych oraz umożliwia ich konwersję na obiekty wektorowe. Zastosowano to narzędzie do kalibracji i połączenia zarejestrowanych obrazów. W interfejsie

oprogramowania zamieszczonym na rys. 6 znajduje się wiele użytecznych opcji pozwalających na obróbkę wstawianego do środowiska CAD zdjęcia.

Jedną z ważniejszych opcji jest Match pozwalająca wskazać punkty początkowe oraz docelowe obrazu, tak aby w sposób jednoczesny wykonać przemieszczenie i skalowanie fotografii. Druga opcja Rubber Sheet umożliwia „naciągnąć” punkty charakterystyczne obrazu na stan projektowy zawarty w dokumentacji, tworząc w ten sposób widok rzeczywisty w skali 1:1. Zastosowano to m.in. przy łączeniu krawędzi jezdni, krawędzi elementów drobnowymiarowych, dyktacji, krawężników.

Przy kalibracji w narzędziu Raster Design użytkownik ma do dyspozycji dwie metody kalibrowania obrazu – „trójkątną” oraz „wielomianową”. Zastosowano metodę pierwszą, która należy do bardzo dokładnych. Przykładowy widok z użyciem opcji Rubber zaprezentowano na rys. 7.

Należy zaznaczyć, że aby stworzyć mapę stanu rzeczywistego bez deformacji, pierwotne obrazy należy kalibrować i odpowiednio kadrować na co pozwala rozszerzenie Raster De-



7. „Naciąganie” obrazu – opcja Rubbersheet

sign. Podczas rejestracji obrazów dronem każdy obszar częściowo nakładał się. Po wykonaniu kalibracji nachodzące na siebie fragmenty obrazów przycinano. W ten sposób uzyskano spójny obszar bez widocznych nieciągłości (rys. 8).

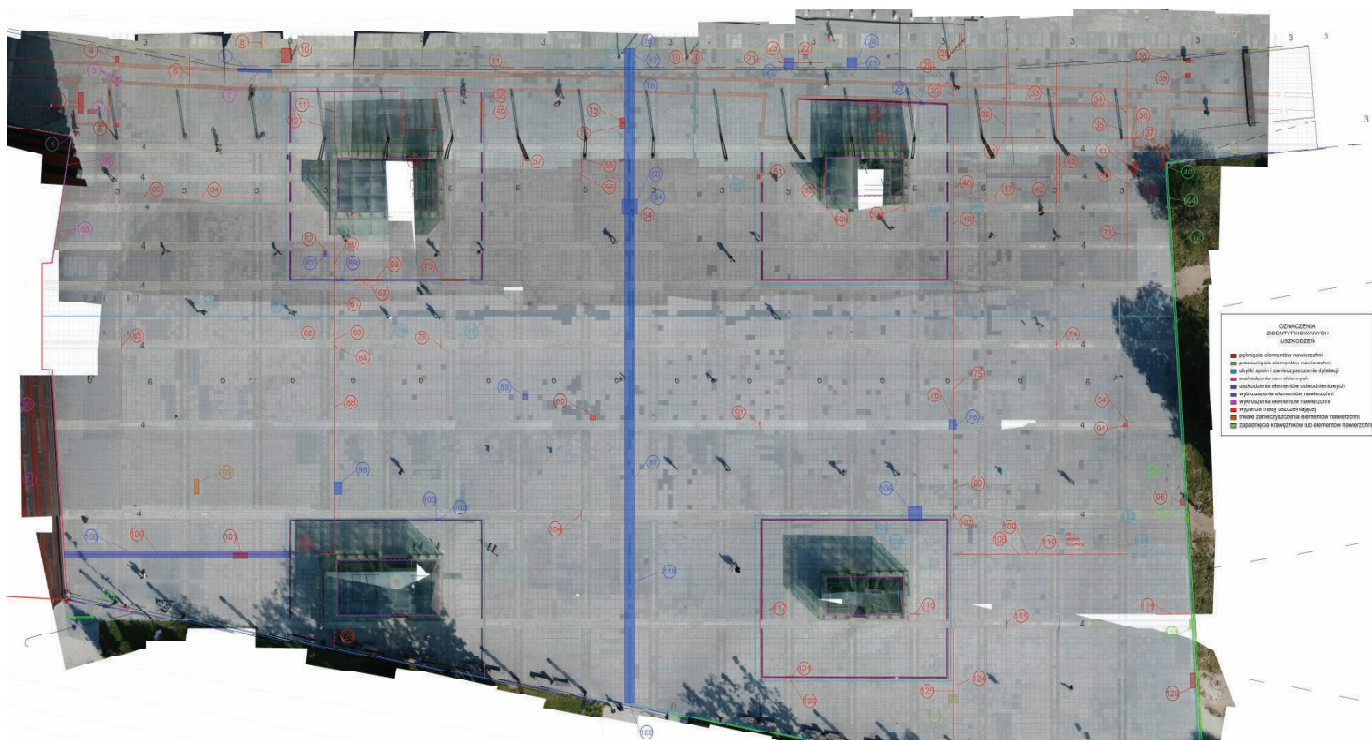
Omówione kroki postępowania

oraz możliwości oprogramowania Autocad – Raster Design pozwoliły to opracować plan sytuacyjny całego placu z uszkodzeniami oraz w dalszym etapie przeanalizować globalny charakter mechaniki pracy całego placu.

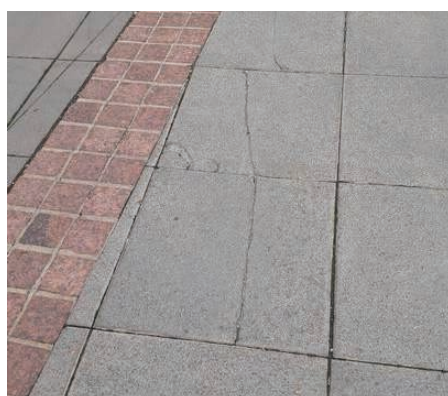
Rezultat skalibrowanego podkładu naniesiony na dokumentację projek-



8. Przykładowy rezultat skalibrowanej mapy obiektu z naniesionymi uszkodzeniami



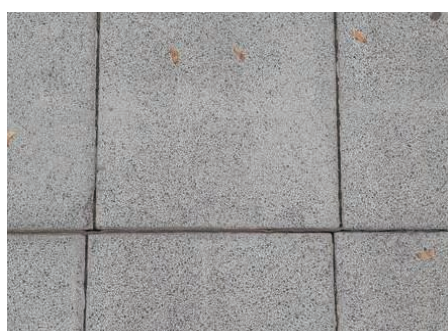
9. Plan sytuacyjny całego placu z naniesionymi uszkodzeniami



10. Przykładowe pęknięcia płyt (w środku i na krawędzi)



13. Przykładowe trwałe zanieczyszczenia elementów nawierzchni



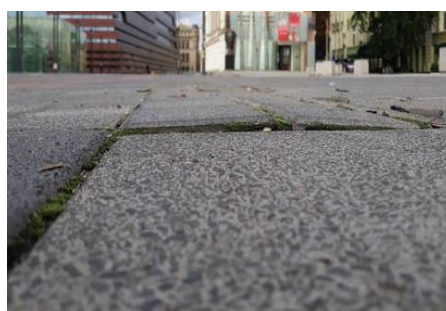
11. Przykładowe przesunięcie elementów nawierzchni



14. Przykładowe zapadnięcia/przesunięcia krawężników



12. Przykładowe wyparcia masy uszczelniającej



15. Przykładowe wyniesienie nawierzchni

tową z oznaczeniami uszkodzeń zamieszczono na rys. 9.

Analiza uszkodzeń

Wykonaną inwentaryzację uszkodzeń z drona uzupełniono i zweryfikowaną podczas klasycznej wizji lokalnej. Przeprowadzona inwentaryzacja wskazała na występowanie:

- pęknięć elementów nawierzchni
- przesunięcie elementów nawierzchni
- ubytków spoin i zanieczyszczenie dylatacji
- uszkodzeń ram okiennych
- uszkodzeń elementów odwodnienia liniowego
- wyrzuteń elementów nawierzchni
- wykruszeń elementów nawierzchni
- wyparcia masy uszczelniającej
- trwałych zanieczyszczeń elementów nawierzchni
- zapadnięć/przesunięć krawężników lub elementów nawierzchni

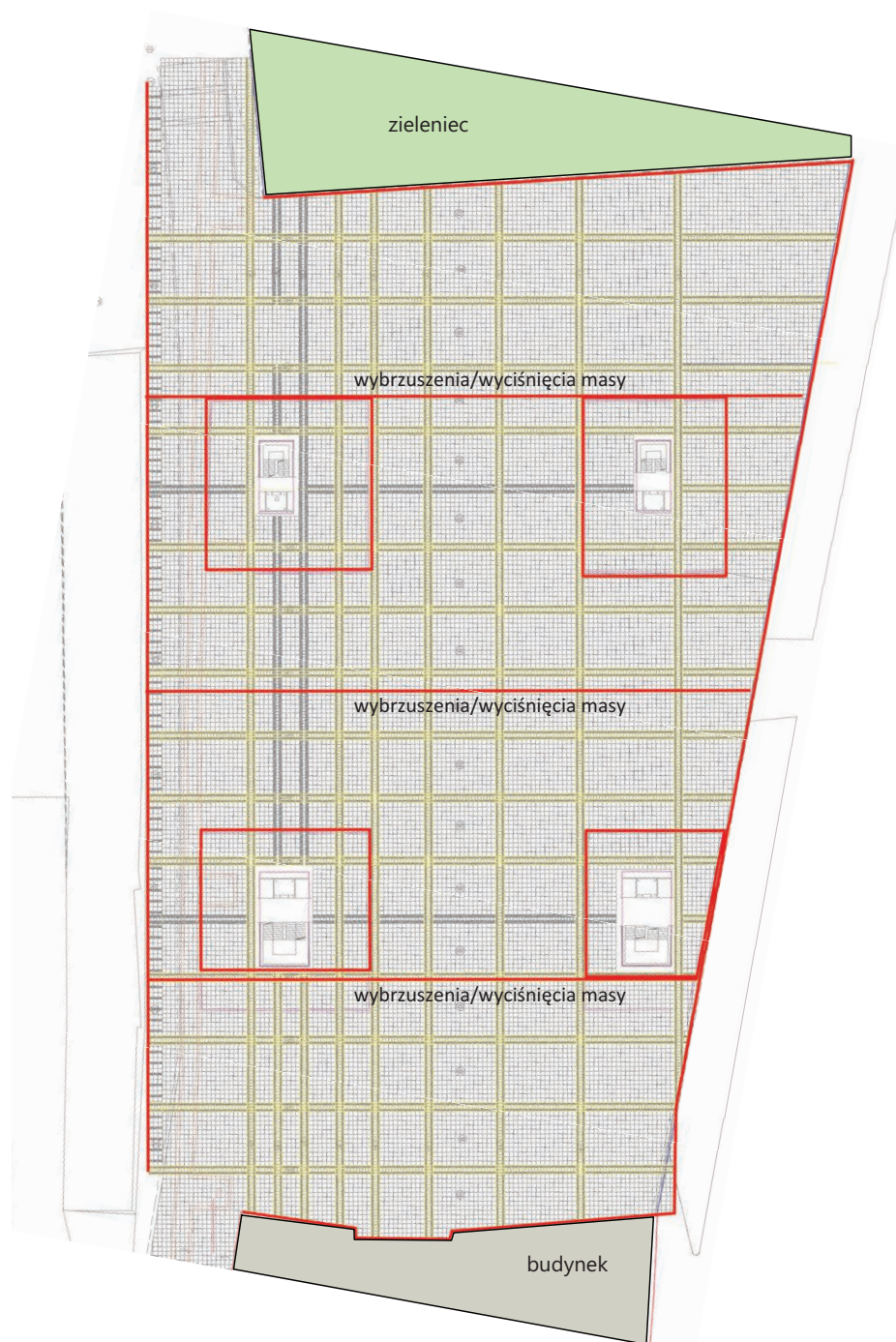
Przykładowe uszkodzenia wykonane techniką fotograficzną klasycznym aparatem zaprezentowano

na rys. 10 -15. Ta technika pozwoliła dokładniej pomierzyć różne uszkodzenia i wprowadzić je całościowy plan sytuacyjny.

Stwierdzono, że zidentyfikowane uszkodzenia są przede wszystkim następstwem oddziaływań termicznych (ograniczone możliwości przemieszczania się elementów drobnowymiarowych), a także częściowo oddziaływania pojazdów. Analiza globalna obszaru z wykorzystaniem zdjęć z drona wskazała na trzy wyraźne wybrzuszenia/wycięcia masy (1-3 cm), które określono na podstawie globalnej identyfikacji uszkodzeń (rys. 16). Należy zauważyć, że cały obszar placu aktualnie „podzielił się” na cztery płyty (o szerokościach około 40 m), z jednej strony ograniczone oddziaływaniem na budynek (bezpośrednio na ramy okienne), a z drugiej na krawężnik (który został przemieszczony w głąb zielenca). Następstwem znacznych przemieszczeń dochodzących do kilku centymetrów jest wyciskanie masy ze szczelin, lub jej wykruszanie. Uszkodzenia szczelin mogą powodować dalszą degradację niższych warstw w wyniku penetracji wody w głąb nawierzchni.

Na skutek przemieszczenia poziomego płyt nastąpiły również uszkodzenia elementów odwodnienia liniowego. Dla nich wyróżniono odrębne obszary podatne na oddziaływanie dużych sił poziomych. Stwierdzono uszkodzenia koryt oraz ściśnięcia krat rusztów, uniemożliwiające ich właściwą eksploatację.

Niektóre pęknięcia elementów nawierzchni są szersze niż 3 mm i stanowią niebezpieczeństwo wykruszenia z nawierzchni, co może stanowić zagrożenie dla ruchu pieszych. Stwierdzone przesunięcia nawierzchni (płyt) stanowią nieestetyczny element wizualny, podobnie jak plamy i inne zmiany kolorystyczne. Istotniejsze są kilkucentymetrowe deformacje krawężników, mogące mieć wpływ na zanieczyszczenie placu i wpływy wody.



16. Obszar placu wydzielony na obszary w wyniku oddziaływań termicznych

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych rozważań stwierdza się użyteczność oraz wysoką skuteczność zastosowania dronów do monitorowania uszkodzeń na dużych obszarach nawierzchni. Wykorzystanie tych urządzeń oraz odpowiedniego oprogramowania pozwala stworzyć całościowy plan sytuacyjny stanu istniejącego, który naniesiony jest na dokumentację projektową sta-

nowi kompletny materiał do analizy stanu i przyczyn uszkodzeń. Obraz ten pozwala także na opracowanie analizy kosztów oraz wdrożenia optymalnych zabiegów naprawczych na wybranych miejscach obszaru. Należy jednak pamiętać, iż urządzenia rejestrujące powinny cechować się odpowiednimi parametrami technicznymi, aby zapewnić odpowiednią dokładność obrazu. Zgodnie z aktualnymi przepisami należy przestrzegać zasad bezpieczeństwa oraz posiadać wyma-

gane szkolenia i zezwolenia w zakresie użytkowania dronów.

Zastosowanie techniki rejestracji obrazów z wykorzystaniem drona, było niewątpliwie pomocne w ocenie przyczyn uszkodzeń placu. Na nawierzchni z płyt betonowych brakowało właściwych rozwiązań technologicznych. Za przyczynę opisanych uszkodzeń o charakterze termicznym uznać należy przeszytowanie wykonanej konstrukcji oraz nie zachowany stosunek grubości oddylatowanych płyt do ich wymiarów w planie. W wyniku zbyt dużego rozstawu szczelin dylatacyjnych, a praktycznie ich braku przekroczona została długość krytyczna płyty oraz ograniczona została przestrzeń na jej przemieszczanie.

Globalne zestawienie uszkodzeń na całociowym planie wskazało kumulację spękań, wybrzuszeń nawierzchni wydzielając obszar placu na cztery duże obszary wskazujące na mechanizm pracy. Uszkodzenia wypełnień szczelin, „wybrzuszenia” nawierzchni, uszkodzenia elementów odwodnieniowych, uszkodzenia ram okiennych i inne uszkodzenia powierzchniowe nastąpiły w wyniku znacznych przemieszczeń termicznych, z powodu niewłaściwie zdylatowanego placu. W niektórych obszarach placu przyczynić się mogły do tego warunki niskiej temperatury, w których układano nawierzchnię. Taka sytuacja również spowodowała większą różnicą temperatur od okresu budowy do okresu eksploatacji w okresie letnim.

Podziękowanie Panu Leszkowi Ziolkowskiemu za udostępnienie sprzętu technicznego i wykonanie rejestracji obrazów z wykorzystaniem drona DJI SPARK. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Brooks C., Dean D., Roussi C., Colling T., Characterization of Unpaved Road Condition Through the Use of Remote Sensing, Michigan Technological University, May 2013
- [2] Cheng H.D., Miyojim M., Novel system for automatic pavement distress detection, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 12, No. 3, 1998, 145–152
- [3] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, GDDKiA, Warszawa 2019
- [4] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, GDDKiA, Warszawa 2015
- [5] Fukuhara T., Terada K., Nagao M., Kasahara A., Ichihashi S., Automatic pavement-distress-survey system, Journal of Transportation Engineering, Vol. 116, No. 3, 1990, 280–286
- [6] Herold M., Roberts D., Smadi O., Noronha V., Road Condition Mapping with Hyperspectral Remote Sensing, 2004
- [7] Nappo N., Mavrouli O., Nex F., Westen C., Gambillara R., Michetti A.M., Use of UAV-based photogrammetry products for semi-automatic detection and classification of asphalt road damage in landslide-affected areas, Engineering Geology 294, 2021, 106363
- [8] Obaidat M.T., AL-Kheder S.A., Integration of geographic information systems and computer vision systems for pavement distress classification, Construction and Building Materials, Vol. 20, No. 9, 2006, 657–672
- [9] Pan Y., Zhang X., Cervone G., Yang L., Detection of Asphalt Pavement Potholes and Cracks Based on the Unmanned Aerial Vehicle Multi-spectral Imagery, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 11, No. 10, October 2018
- [10] Sankarasrinivasan, S., Balasubramanian, E., Karthik, K., Chandrasekar, U., and Gupta, R., Health Monitoring of Civil Structures with Integrated UAV and Image Processing System, Proceedings of 11th International Multi-Conference on Information Processing, 2015
- [11] Siebert S., Teizer J., Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system, Automation in Construction, Vol. No.14, 2014, pp. 1-14
- [12] Silva L.A., San Blas H.S., García D.P., Mendes A.S., González G.V., An Architectural Multi-Agent System for a Pavement Monitoring System with Pothole Recognition in UAV Images Sensors, 2020, 20(21), 6205, October 2020
- [13] Singh C., Brooks C., DOBSON R.J., ROUSSE C., COLLING T., DEAN D., WATKINS M., Evaluating, mapping, and managing unpaved road networks using high-resolution remote sensing data, Asian Conference on Remote Sensing 2014
- [14] System oceny stanu nawierzchni SOSN, Wytyczne Stosowania, Aktualizacja związana z wykorzystaniem wyników pomiarów ugięć nawierzchni, GDDKiA, Warszawa 2010
- [15] System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN. Wytyczne stosowania, GDDP, Warszawa 1989
- [16] System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN. Wytyczne stosowania, GDDP, Warszawa 2002
- [17] Szpinek S., Koncepcja metody inwentaryzacji stanu uszkodzeń nawierzchni lotniskowej na podstawie komputerowej analizy zdjęć lotniczych, IBDiM, z. 2/93. Warszawa
- [18] Zhang C., An UAV-Based Photogrammetric Mapping System For Road Condition Assessment, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, Vol. XXXVII, Part B5, Beijing