

Drony w inspekcji kolejowych obiektów inżynierskich

Drones in the inspection of railway engineering facilities



Piotr Lesiak

Wyższa Szkoła Ekonomii i
Innowacji w Lublinie
Wydział Transportu i Informatyki
piotr.lesiak@wsei.lublin.pl

Streszczenie: W pracy pokazano walory zastosowania dronów w fotogrametrycznej inspekcji kolejowych obiektów inżynierskich, takich jak mosty i wiadukty. Przedstawiono konstrukcje dronów dedykowanych do takich badań. Omówiono metody mapowania takich obiektów. Wykonano pomiary wybranych parametrów geometrycznych przykładowej konstrukcji mostu kolejowego w programie komputerowym, na podstawie jego modelu fotogrametrycznego, który stwarza ramy dla poprawy zarządzania procesem inspekcji i utrzymania.

Słowa kluczowe: Drony; Fotogrametria; Inspekcja, Kolej; Mosty i Wiadukty

Abstract: The paper shows the advantages of using drones in the photogrammetric inspection of railway engineering facilities, such as bridges and viaducts. The designs of drones dedicated to such research are presented. Methods of mapping such objects are described. Measurements of selected geometric parameters of an exemplary structure of a railway bridge were measured in a computer program based on its photogrammetric model, which creates a framework for improving the management of the inspection and maintenance process.

Keywords: Uavs, Photogrammetry; Inspection, Railway; Bridges And Viaducts

Wstęp

Konstrukcje mostów i wiaduktów, należą do jednych z głównych obiektów inżynierskich infrastruktury kolejowej, poddawanych szczegółowej inspekcji [6, 12]. Z doświadczeń światowych wynika, że przyczyną poważnych awarii tego typu budowli, jest z reguły nierzetelna inspekcja i nieterminowe realizacje prac remontowych lub utrzymaniowych, które powinny być intensyfikowane w miarę się ich starzenia, w celu zapewnienia ich ciągłej zdolności eksploatacyjnej.

Kluczową dla kontroli i oceny aktualnego stanu technicznego takiej infrastruktury, jest metoda wizyjna, której skuteczność w dużym stopniu zależy od doświadczenia diagnostów. Jest ona pracochłonna, kosztowna, uciążliwa i szczególnie niebezpieczna, kiedy badania prowadzi się poniżej poziomu mostu czy też wiaduktu. Wykorzystuje się tu zróżnicowany sprzęt i techniki

obserwacji wizyjnej konstrukcji, a prowadzone prace inspekcyjne z reguły wymagają zamknięcia linii kolejowej, prowadzonej po tym obiekcie.

Aby zaradzić tym ograniczeniom i wspomóc takie działania diagnostyczne, w ostatnich latach coraz powszechniej wprowadza się do badań drony, zwane też angielskim terminem UAV - ang. *Unmanned Aerial Vehicle*. Ma to znacząco usprawnić wszelkie działania inspekcyjne na kolejowych obiektach inżynierskich [6, 25]. Badania mają obejmować miejsca, do których diagnostom trudno jest dotrzeć. Jednak ta idea znajduje się na etapie eksperymentów badawczych, ponieważ istnieje wiele zagadnień i przeszkód, które należy rozwiązać i pokonać, w celu jej powszechnego zintegrowania z praktyką i pełnym wdrożeniem do eksploatacji kolejowej.

Podstawowe wyzwania dotyczą zagadnień dokładności i stabilności sterowania lotem drona oraz precyzyjna jego lokalizacja. Szczególnie dotyczy to

obszarów o ograniczonej przestrzeni, jak pod mostem lub w bezpośredniej bliskości skomplikowanych konstrukcji. Należy tam się spodziewać zakłóceń lub zaniku sygnału GPS.

Metoda ta opiera się na ogromnej ilości danych obrazowych, uzyskanych z bezzałogowego sprzętu inspekcyjnego, składającego się z UAV wyposażonego w kamery wizyjne i często termowizyjne. Dodając do tego systemy laserowe, wdrażane są metody pomiaru dynamiki mostów [7, 8, 19, 20].

Użycie zautomatyzowanego przechwytywania zdjęć, umożliwia lepsze zrozumienie sytuacji poprzez kontekst przestrzenny 3D oferowany przez systemy UAV [3, 4, 13, 16, 23]. Utworzone przestrzenne mapy wizyjne, umożliwiają detekcję i powiększenie uszkodzonych elementów. Zastosowane dalej techniki przetwarzania obrazów, pozwalają w kolejnym etapie na ocenę parametrów tych uszkodzeń [1, 11, 26, 27, 30].

Pomocne mogą tu być algorytmy głębokiego uczenia, które autor wykorzystał do oceny powierzchniowych szyn kolejowych rozpoznawanych przez UAV [2]. Algorytmy te mogą posłużyć do automatycznego klasyfikowania i lokalizacji typowych uszkodzeń, charakterystycznych dla mostów i wiaduktów, jak pęknięcia i odpryski konstrukcji betonowych, korozji i deformacji konstrukcji stalowych, ubytków elementów łączeniowych (śrub, nitów), itp.

Dlatego coraz śmielej różne zarządy kolejowe na świecie, wprowadzają do inspekcji infrastruktury kolejowej drony, w tym również innych obiektów, jak konstrukcje trakcji elektrycznej, budynków i nawierzchni w tym szyn kolejowych, co było przedmiotem rozważań autora w pracach [17, 18].

W artykule skoncentrowano się na porównaniu wybranych zagadnień i praktycznych doświadczeń inspekcji mostów i wiaduktów kolejowych, korzystając z wizyjnej techniki oferowanej przez drony. Wykonano też badania parametrów geometrycznych przykładowego mostu kratownicowego, korzystając z programu komputerowego. Wykazano pełną integrację zarządzania, inspekcji i utrzymania takich obiektów inżynierskich z wynikami ich badań przez drony.

Drony dedykowane do badań kolejowych obiektów inżynierskich

Badania złożonych obiektów inżynierskich

rynych linii kolejowych, takich jak mosty i wiadukty, w trudno dostępnych miejscach, wymagają specjalnych konstrukcji dronów, gdyż ich bezpośredni kontakt z przeszkodą, jaką są elementy, typu belka, filar, podpora, itp., z reguły skończy się jego trwałym uszkodzeniem [27, 28, 29].

Dlatego technologie informatyczne dronów przeznaczonych do takich inspekcji, wyposażono w ważne inteligentne funkcje zapobiegające kolizjom, jak wykrywanie i unikanie oraz loty autonomiczne, bez sygnału GPS [15].

Pomimo ciągłego doskonalenia algorytmów dla tych konkretnych celów badawczych, sprzęt jest nadal ważny i istnieją możliwości dalszego ulepszania jego konstrukcji, zwłaszcza w odniesieniu do różnych elementów zabezpieczających przed zniszczeniem (osłony na śmigła), przystosowując go do pracy w tak trudnych warunkach [21]. Toteż jakość wykonania UAV, zobrazowanie i oprogramowanie do lotu, są wiodącymi w branży i mają kluczowe znaczenie dla właściwej, bezpiecznej inspekcji elementów mostu czy też wiaduktu kolejowego.

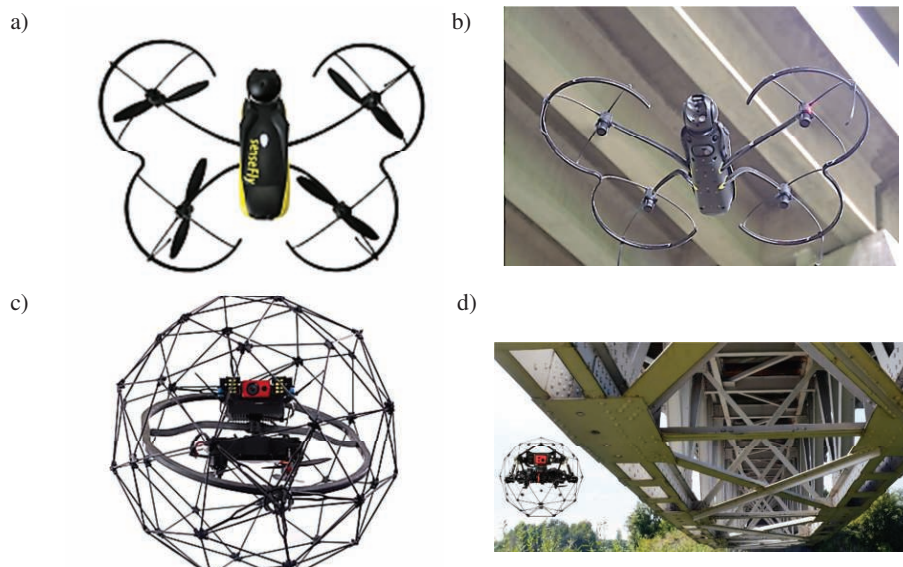
Istotne dla badań jest pole widzenia drona. Żaden pojedynczy kąt skierowania kamery nie jest optymalny dla wszystkich aspektów inspekcji. Toteż stosuje się kamery z przegubem umożliwiającym zmianę jego kąta celowania. Ta funkcja jest bardzo korzystna do kontroli, ponieważ przy odchyłaniu się prosto w górę pozwala na inspek-

cję elementów spodniej części mostu. Przy ustawieniu geometrii obiektywu prosto w dół, czyli widok z „lotu ptaka”, dokonuje się lotów nad mostem i jego mapowania, w tym okolicznych obszarów jak np. brzeg rzeki. Do zobrazowania pęknięć w betonie, skorodowanych połączeń śrubowych i nitowych, miejsc łożysk, często korzystniejszym jest takie ustawienie przegubu, żeby oś optyczna kamery zorientowana była w poziomie [9, 14].

Diagnozy potrzebują obrazów o bardzo wysokiej rozdzielczości, aby ocenić stan wielu drobnych szczegółów mostu. Stąd też kolejną kwestią jest prędkość lotu UAV. Trzeba się liczyć ze skutkami rozmywania się obrazów i pominięcia usterki, w miarę wzrostu prędkości.

Przykładem może być dron z rys. 1a i b [29], który dysponuje przełączaniem zadań kamer podczas lotu, bez konieczności lądowania. Wyposażenie w moduły zintegrowanych czujników, zapewnia mu świadomość sytuacyjną wymaganą do jego operowania w pobliżu powierzchni, tak aby uzyskać rozdzielczość obrazu poniżej milimetra. Duża elastyczność pozwala na wybór trybu lotu, który najlepiej pasuje do badanego obiektu inżynierskiego. Dysponuje autonomiczną funkcją mapowania prowadzoną bez GPS lub też interaktywnym lotem na żywo.

Do szczególnie trudno dostępnych miejsc w kolejowej budowlinie inżynierskiej, przeznaczony jest dron z rys. 1c i d [10]. Z tego profesjonalnego narzędzia korzystają najbardziej wyrafinowani użytkownicy. Może on latać w różnych środowiskach i wykonywać trudne zadania. Dlatego szczególnie jest dedykowany do inspekcji obszarów pod mostami i wiaduktami [29]. Dron otoczony jest klatką z włókna węglowego, która stanowi przegub obracający się wokół niego w trzech osiach, co pozwala mu odbijać się od przeszkód, toczyć po sufitych i ścianach. Podczas lotu w kontakcie z powierzchnią potrafi zbierać zbliżenia z dokładnością do milimetra o rozdzielczości 0,2 mm/piksel. Strumień wideo z kamery jest rejestrowany na karcie SD umieszczonej w jego głowicy. Kamera Full HD oferuje rozdzielczość 1920 x 1080 pikseli, przy 30 klatkach na sekundę oraz działa dobrze w słabym



1. Specjalne konstrukcje dronów do badań wizyjnych mostów i wiaduktów [10, 21, 29]: a) i c) drony ze specjalnymi osłonami zapobiegającymi uszkodzeniom, b) i d) drony z a) i c) podczas prac inspekcyjnych pod mostami betonowymi i kratownicowym

światło. Automatycznie skorygowana domyślnie wartość ekspozycji EV- ang. *Exposure Value*, przechwyconych obrazów, może być również zdalnie regulowana ze stacji naziemnej.

Pomimo swojej „odpornej na kolizje” konstrukcji, może podobnie jak poprzedni, natrafić na wystające fragmenty uszkodzonych elementów, np. pręty, które przechodząc przez klatkę, uszkodzą drona, zatrzymując obrót jego śmigieł. Dlatego zawsze zaleca się wcześniejsze zapoznanie się z obszarem badań, w celu zidentyfikowania potencjalnych zagrożeń.

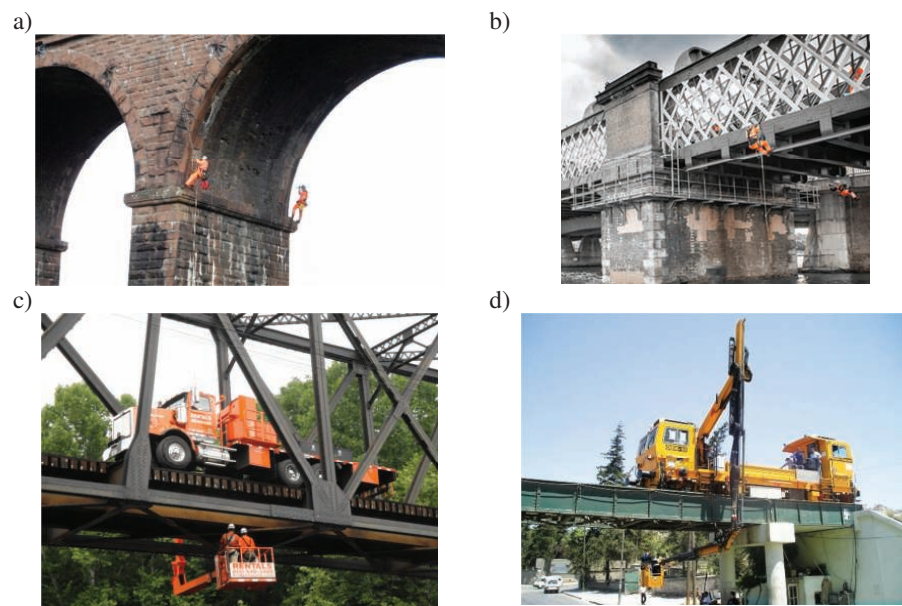
Konwencjonalne metody badań wizyjnych kolejowych mostów i wiaduktów

W obecnych warunkach technicznych, ocena stanu kolejowych konstrukcji budowlanych, jak mosty czy wiadukty, realizowana jest z reguły za pomocą konwencjonalnych praktyk, które opierają się głównie na inspekcji wizualnej (kamera, aparat fotograficzny) przeprowadzanej przez człowieka (diagnostę). W tym celu korzysta się z rusztowań, lin lub platform podnoszących, a personel badawczy wymaga specjalnego przeszkolenia i umiejętności wspinaczy, do zbierania danych, rys. 2a i b.

Lepszym rozwiązaniem jest skorzystanie z pojazdu inspekcyjnego wyposażonego w masywne ramię robota, gdyż przeprowadzenie badań odbywa się wówczas w sposób bezpieczniejszy i wydajniejszy, rys. 2c i d. Często jest to ciężarowy pojazd drogowy wyposażony w wysuwane zestawy kołowe, umożliwiające poruszanie się po torze kolejowym. Autor miał okazję obserwować badania takim pojazdem na linii PLK.

I tu występują jednak ograniczenia, ze względu na wymagania dotyczące przestrzeni roboczej takiego pojazdu, który ma duże rozmiary, a do tego powinien zrównoważyć masę ciężkiego ramienia robota. Trudności może sprawiać też przesłona mostu kratownicowego, żeby znaleźć wolną przestrzeń do manewrowania ramieniem z koszem czerpakowym, rys. 2c [22].

Ponadto przy takiej konstrukcji mostu, istnieje ryzyko potencjalnego przecoczenia istotnych informacji o



2. Klasyczne metody inspekcji wizyjnej mostów i wiaduktów przez: a) zespoły wspinaczkowe [5] i b) [26], c) i d) pojazdy z koszem czerpakowym [22]

usterkach. Ta złożona konstrukcja wymagająca szczegółowej kontroli, składa się z setek elementów nośnych, podlegającym różnym warunkom obciążenia i ekspozycji.

Dlatego drony są doskonałym narzędziem do redukcji niebezpiecznych sytuacji, eliminując zagrożenia inspekcji na dużych wysokościach, a także okazują się być szybkim i oszczędnym rozwiązaniem, w niektórych sytuacjach bez konieczności zamykania linii kolejowej na moście lub wiadukcie.

Mapowanie dronem kolejowych mostów i wiaduktów

Mapowanie jest procesem polegającym na ustalaniu miejsca i odległości pomiędzy punktami w przestrzeni 2D i 3D. Na podstawie zdjęć wykonanych przez UAV, mapowanie odbywa się z powietrza, tworząc ortofotomapy w procesie fotogrametrii. Mapy te charakteryzują się przede wszystkim rzutem ortogonalnym. Wykonane są w układzie współrzędnych płaskich prostokątnych i przedstawione w barwach rzeczywistych RGB, skalach szarości lub w barwach bliskiej podczerwieni. Charakteryzują się brakiem zniekształceń obrazów badanego mostu lub wiaduktu, jednolitą skalą dla całej ich powierzchni, odwzorowują odległości oraz kubaturę ich elementów, przy dużej dokładności pomiaru. Ponadto taka fotogrametria

niskiego pułapu, generuje obrazy o zdecydowanie większej rozdzielczości terenu, co przekłada się na kilkukrotnie wyższą szczegółowość opracowania.

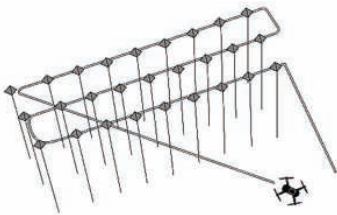
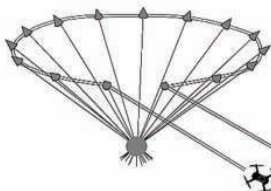
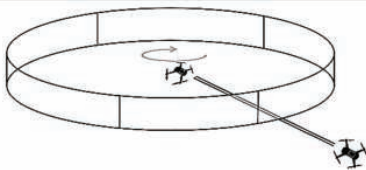
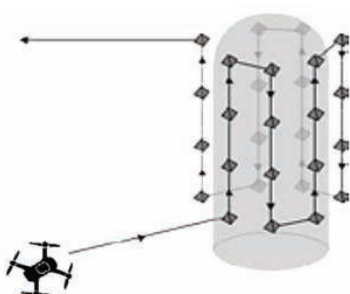
Wykorzystuje się różne metody mapowania głównych konstrukcji mostów i wiaduktów kolejowych i ich elementów podkonstrukcji, tab.1. Wybór zależy od obszaru inspekcji i konstrukcji mostu, zaplanowanej trasy lotu, ilości przekazywanych w kolejności zdjęć, które nakładają się na siebie w zakresie 50 – 70 %.

Przykład badań komputerowych mostu kolejowego

W przykładzie, wykorzystano most kolejowy, a właściwie jego fragment w postaci mola, usadowiony przyczółkiem na nabrzeżu rzeki, stanowiący fragment mostu zwodzonego na dużej rzece w USA, z jednym torem linii kolejowej, rys. 3a [29].

Nadbudowę mostu wykonano z przęsła kratownicowego, belek stropowych i podłużnic. Podkonstrukcja składa się z żelbetonowych przyczółków i filarów posadowionych na palach. Powszechnie się uważa, że takie mosty kratownicowe są najbardziej złożoną konstrukcją do kontroli. Stworzone narzędzie inspekcji wizyjnej, miało pomóc w przygotowaniu raportów i opracowaniu dokumentacji historycznej.

Tab. 1. Mapowanie dronem konstrukcji mostów i wiaduktów kolejowych

	Poziome - używa się tu mapowania top – down, czyli rejestracji obrazu mostu „z lotu ptaka”. Należy ustawić tu kilka kluczowych parametrów takich jak preferowana rozdzielczość podłoża, a aplikacja zrobi resztę tworząc linię lotu i ustawienie punktów trasy na podstawie GPS, które są automatycznie dostosowane do terenu.
	Wokół punktu – gdzie, automatycznie wyśrodkowywana jest ścieżka lotu drona wokół określonego punktu mostu lub wiaduktu. Po ustawieniu rozdzielczości/odległości, aplikacja ustala punkty przechwytywania obrazu. Stosując taką metodę, łatwo można stworzyć model 3D mostu.
	Panoramyczne - wykorzystuje wiele aplikacji. Można dokonać przeglądu wizji architektonicznej, dając niesamowity efekt w raportowaniu i dokumentacji, poprawiający jakość modeli 3D.
	Trasę niestandardową - jest idealne do kierowania dronem w złożonych środowiskach, jakimi są bez wątpienia konstrukcje mostów kratownicowych. Wykorzystując superpozycję pojedynczych lotów, można je połączyć w trasę niestandardową.
	Cylindryczne - stosuje się w kontroli i modelowaniu cyfrowym wysokich i smukłych konstrukcji mostów lub wiaduktów, np. ich podpór, filarów. Dlatego należy ustawić wysokość cylindra nad ziemią, plus wymaganą rozdzielczość obrazu i jego zakres nakładania się. Aplikacja ustawia parametry drona i punkty trasy wymagane do wykonania wymaganych zdjęć w nakładających się warstwach i wokół badanego elementu mostu.

Metoda badawcza, składała się z wcześniej zaplanowanego toru lotu na wysokości około 55 m, nad poziomem gruntu, rys. 3b. UAV zebrał ponad 141 nieruchomych zdjęć o wysokiej rozdzielczości z pirsu mostu i od góry. Wszystkie obrazy zostały oznaczone geotagami ze współrzędnymi GPS, rys. 3c [29].

W celu stworzenia obrazów ortofotomap, zastosowano narzędzia oferowane przez oprogramowanie Pix4D [24]. Efektem końcowym jest plik obrazu, który służy do pomiaru rzeczywistych odległości (autor pokazał to na rys. 3d) i powierzchni obszarów mostu, rys. 3e, przy czym dodatkowo diagnosta może powiększyć wady, aby wykonać dokładniejszą kontrolę ich deskryptorów.

Docelowym procesem było też stworzenie łatwo czytelnych obrazów wielu ortofotomap, o wysokiej rozdzielczości, przedstawiających obszary, które dia-

gnosta mógłby wykorzystać do szczegółowej inspekcji i oceny stanu mostu lub też zapamiętać jako dokumentację historyczną, rys. 3f.

Wykorzystane oprogramowanie, może też przetwarzać wszystkie dane fotogrametryczne w przestrzeń modelu 3D, tworząc chmurę punktów do przeglądania cyfrowego, rys. 4. Autor przedstawił wybrane możliwości tego narzędzia, które między innymi pozwala na obrót modelu we wszystkich osiach. Widoki modelu mostu od góry i od spodu przedstawiają rys. 4a i b. Nawigując po tym modelu i powiększając interesujące obszary mostu, można zmierzyć płaskie i przestrzenne parametry geometryczne, jak pole powierzchni, jego obwód, czy też objętość i powierzchnię oznaczonej bryły, rys. 4c. Oznaczając markerami interesujące miejsca, program podaje ich współrzędne przestrzenne, rys. 4d. Do każdego widoku, można zamieszczać

adnotacje o pliku w celu ich archiwizacji i porównania z kolejnymi pomiarami.

Korzyści stosowania modelu fotogrametrycznego

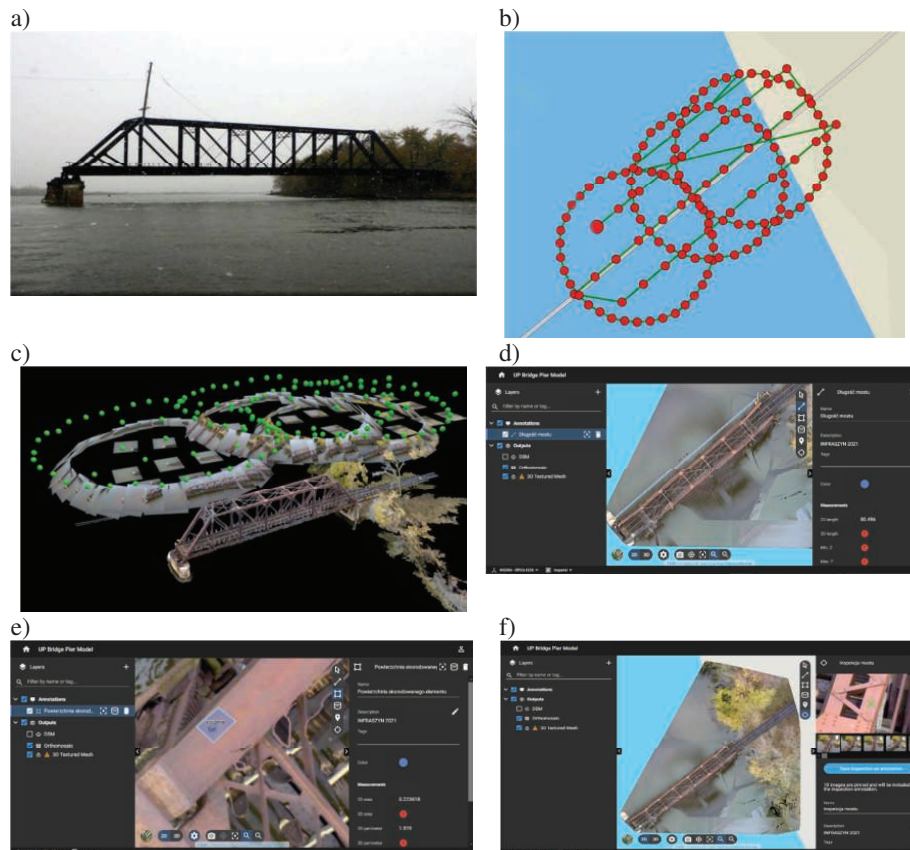
Proces inspekcji, oparty na znacznej ilości zebranych wysokiej jakości danych, stwarza ramy dla przyszłego zarządzania mostami. Stanowi to niewątpliwie postęp w porównaniu do badań ręczną kamerą, gdzie opracowanie wyników inspekcji skutkuje nieraz kilkuset stronicowym czasochłonnym raportem, którego koszt wykonania szacuje się na około 30% całego typowego projektu. Ponadto dochodzi do tego ryzyko potencjalnego przeoczenia istotnych informacji o usterkach. Dlatego szansę poprawy stwarza bieżąca inspekcja, przeprowadzana przez UAV w sposób zautomatyzowany. W efekcie powstaje obraz fotogrametryczny modelu 3D, który wnosi znaczące wartości na wszystkich głównych etapach utrzymania i zarządzania kolejowym obiektem inżynieryjnym, rys. 5.

Taki obraz można obejrzeć na monitorze komputera wraz z zapisanymi informacjami dotyczącymi stanu mostu i zakresu jego utrzymania, szacując koszty niezbędnych napraw, a także zmniejszając je poprzez integrację różnych usług. Można także zarządzać uwarunkowaniami badawczymi, związanymi z terenem i z dodatkowymi obszarami działań, które mogły zostać pominięte. Istnieje też możliwość udoskonalenia modelu poprzez ponowną inspekcję konstrukcji, jeśli pojawiły się problemy przeoczone w inwestycji, a które mogą być zrealizowane w późniejszym terminie.

Fotogrametryczny model mostu, daje też wskazówki do rutynowych jego prac utrzymaniowych, oznaczonych sygnaturami czasowymi, wraz z informacją o historycznym jego stanie, który może sugerować głębszy problem systemowy.

Wnioski

Obszar wizyjnych badań kolejowych obiektów inżynieryjnych jest znaczący, a mosty i wiadukty są wręcz klasycznym tego przykładem. Ich skomplikowa-

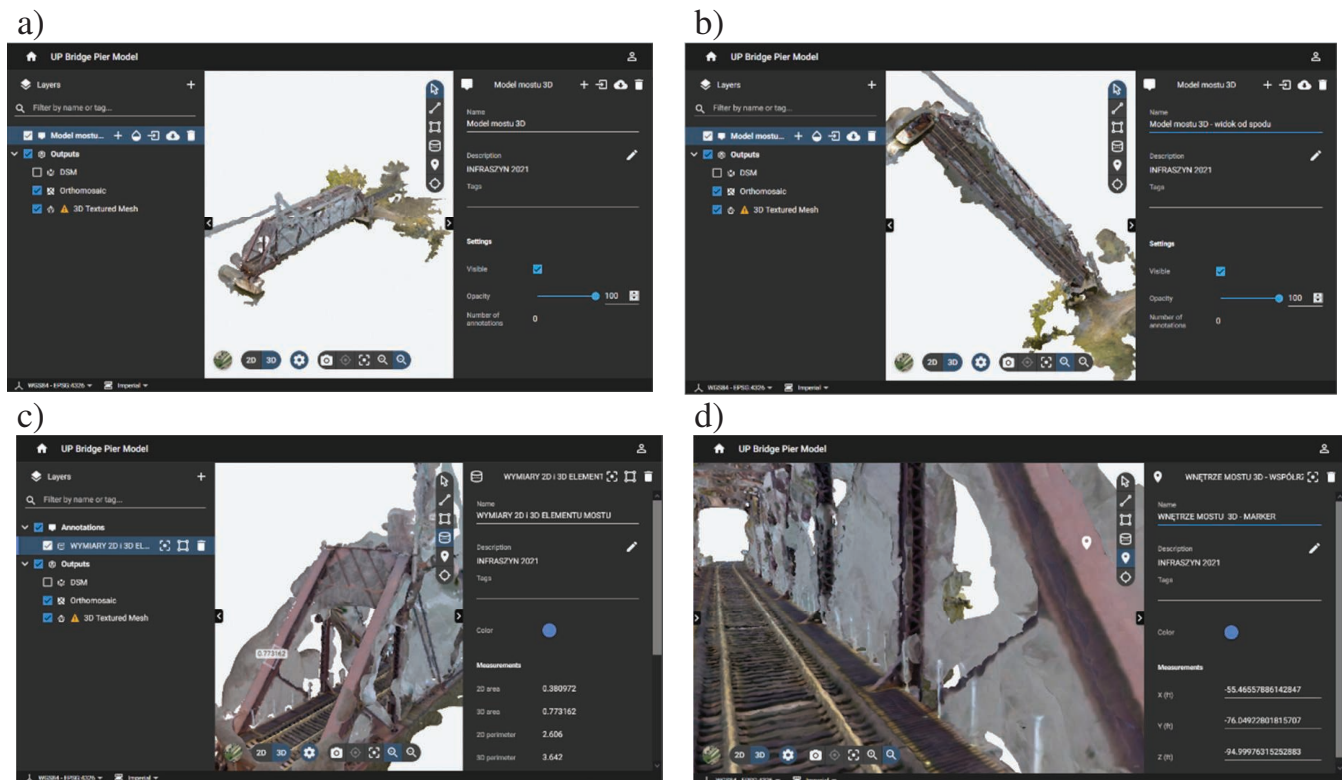


3. Przykład badania dronem kratowniczowego mostu kolejowego: a) ogólny widok górnej części badanego fragmentu mostu, b) widok interaktywnej mapy wstępnie zaplanowanego lotu drona (czerwone punkty oznaczają miejsca zdjęć), c) widok pozycji aparatu (zielona kropka) w miejscach fotografowania, d) widok ortofotomapy mostu z oznaczoną przez autora jego długością, e) widok powiększonej ortofotomapy mostu z oznaczoną przez autora powierzchnią skorodowanego fragmentu kratownicy, f) widok mostu podzielonego na 10 ortofotomap, z przeznaczeniem do szczegółowej inspekcji

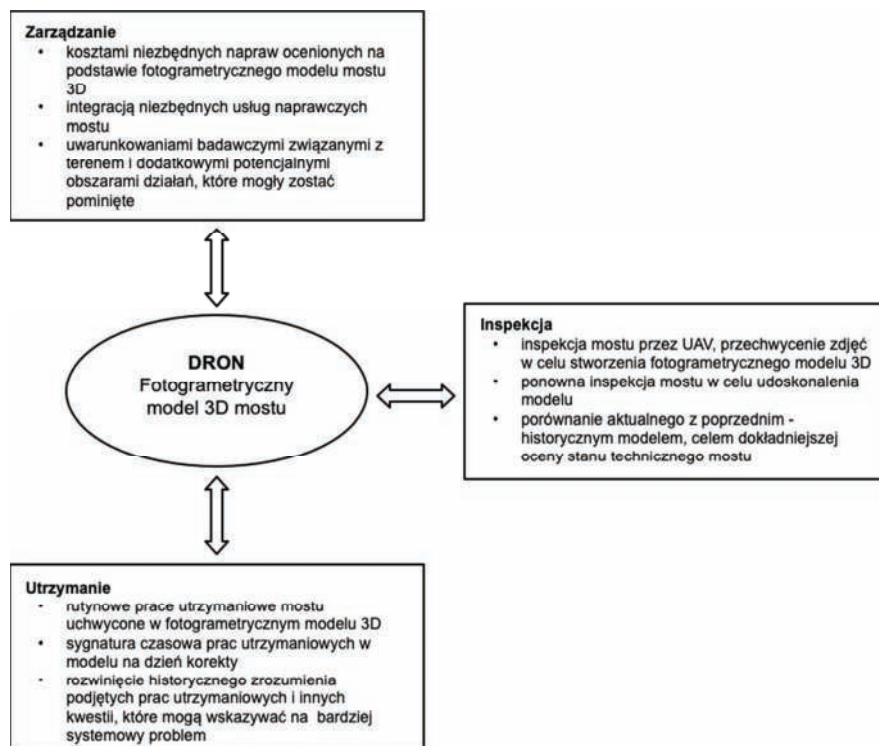
ne kształty wymagają odpowiedniego sprzętu i umiejętności, gdyż tylko wówczas możliwy jest bezpośredni dostęp diagnostów, do trudno osiągalnych miejsc.

Dlatego autor starał się pokazać zalety inspekcji kolejowych obiektów inżynierskich z wykorzystaniem dronów. W pracy zaprezentowano dedykowane do takich inspekcji rozwiązania technologiczne dronów oraz metody tworzenie map fotogrametrycznych, na podstawie zgromadzonych badań wizyjnych.

Korzystając z programu komputerowego, na przykładzie mostu kratowniczowego, pokazano badania modelu fotogrametrycznego i jego zalety w precyzyjnej inspekcji uszkodzeń. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie takiego modelowania, umożliwia większą wydajność zbierania i gromadzenia danych, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów związanych z bieżącym raportowaniem badań. Pozwala też na lepsze zrozumienie problemów przez diagnostę, poprawiając decyzje dotyczące niezbędnych napraw. Model może być stosowany podczas kolejnych inspekcji mostu, w celu stworzenia historycznych danych jego konstrukcji i ich przeglądania w całym jego



4. Widok okien programu komputerowego w przestrzeni modelu fotogrametrycznego 3D: a) widok mostu od góry, b) widok spodu mostu, c) pomiar parametrów 2D i 3D powiększonego elementu mostu, d) widok wnętrza mostu z oznaczonymi współrzędnymi markera na powiększonym elemencie powierzchni elementu mostu



5. Ramy zarządzania, inspekcji i utrzymania mostu kolejowego w oparciu o jego model fotogrametryczny

cyklu życia, zapewniając dokładniejsze zrozumienie aktualnego stanu i zarządzając procesem utrzymania. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Ayele Y.Z., Aliyari M., Griffiths D., Droguett E. L.: Automatic Crack Segmentation for UAV-Assisted Bridge Inspection. MDPI, Energies 2020, 13, 6250, DOI:10.3390/en13236250.
- [2] Bojarczak P., Lesiak P.: UAVs in rail damage image diagnostics supported by deep-learning networks. Open Engineering, 2021; 11:339–348, DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0033>.
- [3] Chen S., Laefer D.F., Mangina E., Zolanvari I., Byrne J.: UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions. Journal of Bridge Engineering, January 2019, 2019, 24(4): 05019001, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001343.
- [4] Chen S., Truong-Hong L., Laefer D.F., Mangina E.: Automated Bridge Deck Evaluation through UAV Derived Point Cloud. CERH-ITRN 2018, pp. 735–740.
- [5] Ciampa E., De Vito L., Pecce M.R.: Practical issues on the use of drones for construction inspections. XXVI AIVELA National Meeting IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1249 (2019) 012016, DOI:10.1088/1742-6596/1249/1/012016.
- [6] Drone-based rail surveys are a 'game changer'. CIOB, 14 August 2017, <http://www.constructionmanager-magazine.com/technology/drone-based-system-game-changer-rail-surveying/>, dostęp: 05.05.2021.
- [7] Garg P., Ozdagli A., Moreu F.: Railroad Bridge Inspections for Maintenance and Replacement Prioritization Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Laser Scanning Capabilities. TRB's Rail Safety IDEA Program: Sponsoring Innovation to Improve Railroad Safety and Performance. Transportation Research Board Annual Conference, Washington D. C., January 2018.
- [8] Garg P., Roya Nasimi R., Ozdagli A., Zhang S., Mascarenas D.D.L., Taha M.R., Moreu F.: Measuring Transverse Displacements Using Unmanned Aerial Systems Laser Doppler Vibrometer (UAS-LDV): Development and Field Validation. MDPI, Sensors 2020, 20, 6051, DOI:10.3390/s20216051.
- [9] Gillins D.T., Parrish Ch., Gillins M.N., Simpson Ch.: Eyes in the Sky: Bridge Inspections with Unmanned Aerial Vehicles. Oregon State University, School of Civil & Construction Engineering. Report No. FHWA-OR-RD-18-11, February 2018.
- [10] Hansen H.: Drone Review: Flyability Elios, <https://www.rotordronepro.com/drone-review-flyability-elios/>, dostęp: 5.05.2021.
- [11] Humpe A.: Bridge Inspection with an Off-the-Shelf 3600 Camera Drone. MDPI, Drones 2020, 4, 67, DOI:10.3390/drones4040067.
- [12] Id-16. Instrukcja utrzymania kolejowych obiektów inżynierskich na liniach kolejowych do prędkości 200/250 km/h. PKP PLK S.A, Warszawa 2014.
- [13] Ivashov S. I., Tataraidze, A. B., Razevig V.V., Smirnova E.S.: Railway Transport Infrastructure Monitoring by UAVs and Satellites. Journal of Transportation Technologies, 9, 2019, pp. 342–353.
- [14] Jongerius A.: The use of unmanned aerial vehicles to inspect bridges for Rijkswaterstaat. University of Twente Faculty of Engineering Technology Civil Engineering, March 25, 2018.
- [15] Jung H.J.: Lee J.H., Kim I.H.: Challenging issues and solutions of bridge inspection technology using unmanned aerial vehicles. Proc. SPIE 10598, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018, 1059802 (27 March 2018), <https://doi.org/10.1117/12.2300957>, dostęp: 05.05.2021.
- [16] Jung S., Choi D., Song S., Myung H.: Bridge Inspection Using Unmanned Aerial Vehicle Based on HG-SLAM: Hierarchical Graph-Based SLAM. Remote Sens. 2020, 12(18), 3022, <https://doi.org/10.3390/rs12183022>, dostęp: 05.05.2021.
- [17] Lesiak P.: Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów. Zeszyt 188, Tom 64, s. 41–43, DOI: 10.36137/1883P. Inspection and Maintenance of Railway Infrastructure with the Use of Unmanned Aerial Vehicles, Issue 188, Tom 64, pp. 115 – 127, 2020, DOI: 10.36137/1883E.
- [18] Lesiak P.: Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych. Przegląd Komunikacyjny, Tom LXXV, Zeszyt 9/2020, s. 15–20.

- [19] Lillian B.: UAV Carries out Extensive Inspection of Railroad Truss Bridge. Un-manned Aerial, May 18, 2017, <https://unmanned-aerial.com/uav-carries-extensive-inspection-railroad-truss-bridge>, dostęp: 05.05.2021.
- [20] Moreu F., Taha M.R.: Railroad Bridge Inspections for Maintenance and Replacement Prioritization Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Laser Scanning Capabilities. IDEA Program Final Report. Contract Number Rail Safety 32. University of New Mexico, 2016 – 2018.
- [21] Otero L.D., Gagliardo N., Dalli D., W-H Huang, Cosentino P.: Proof of Concept for Using Unmanned Aerial Vehicles for High Mast Pole and Bridge Inspections. Florida Institute of Technology, Grant No. BDV28-977-02, June 30, 2015.
- [22] PALFINGER Bridge Inspection Units, <https://www.palfinger.com/en/products/bridge-inspection-units>, dostęp: 05.05.2021.
- [23] Pan Y., Dong Y., Wang D., Chen A., Ye Z.: Three-Dimensional Reconstruction of Structural Surface Model of Heritage Bridges Using UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. Remote Sens. 2019, 11, 1204, DOI:10.3390/rs11101204.
- [24] Pix4Dmapper. The leading photogrammetry software for professional drone map-ping. <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>, dostęp: 05.05.2021.
- [25] Plotnikov M., Ni D., Price D.: The Application of Unmanned Aerial Systems In Surface Transportation - Volume II-A: Development of a Pilot Program to Integrate UAS Technology to Bridge and Rail Inspections. University of Massachusetts Amherst UMass Transportation Center, Final Report December 2019.
- [26] Rau J.Y., Hsiao K.W., Jhan J.P., Wang S.H., Fang W.C., Wang J.L.: Bridge Crack Detection Using Multi-Rotary UAV and Object-Base Image Analysis. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W6, 2017. International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 4–7 September 2017, Bonn, Germany, pp. 311–318.
- [27] Seo J., Wacker J.P., Duque L.: Evaluating the Use of Drones for Timber Bridge In-spection. United States Department of Agriculture, Forest Service Forest Products Laboratory General Technical Report FPL–GTR–258 August 2018.
- [28] Seo J., Duque L., Wacker J.: Drone-enabled bridge inspection methodology and application. Automation in Construction, Vol. 94, October 2018, pp. 112–126.
- [29] Wells J., Lovelace B.: Improving the Quality of Bridge Inspections Using Unmanned Aircraft Systems (UAS). Collins Engineers, Inc., Grant No. 1027210, Minnesota Department of Transportation, July 2018.
- [30] Zollini S., Alicandro M., Dominici D., Quaresima R., Giallonardo M.: UAV Photogrammetry for Concrete Bridge Inspection Using Object-Based Image Analysis (OBIA). MDPI, Remote Sens. 2020, 12, 3180, DOI:10.3390/rs12193180.

 14. MIĘDZYNARODOWE TARGI KOLEJOWE

TRAKO

[21–24.09.2021]

GDAŃSK – TRAKOTARGI.PL

warto **TU** być

