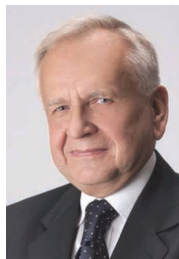


# Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn kolejowych

## Drones in visual diagnostics of defects in railway rails



**Piotr Lesiak**

Dr hab. inż.

Wyższa Szkoła Ekonomii i  
Innowacji w Lublinie, Wydział  
Transportu i Informatyki

piotr.lesiak@wsei.lublin.pl

**Streszczenie:** W artykule omówiono możliwości zastosowania dronów w diagnostyce wizyjnej toru kolejowe-go. Pokazano przykłady badań rozległych wad w główce szyny, wraz z metodą przetwarzania i analizy obrazów. Wymieniono zalety i wady takich badań. Wskazano propozycje kierunków ich wdrażania przez PKP PLK S.A.

**Słowa kluczowe:** Drony; Szyny kolejowe; Badania wizyjne; Bezpieczeństwo

**Abstract:** The paper discusses the possibilities of the use of drones in the visual diagnostics of the rail-way track. Examples of extensive defects in the railhead are shown, along with methods of image processing and analysis. Pros and cons of such a research were presented. Suggested directions for their implementation at PKP PLK S.A. were presented.

**Keywords:** Drones; Railway rails; Vision research; Safety

### Wstęp

Coraz większa liczba zarządców światowych sieci kolejowych dąży do stworzenia innowacyjnej „cyfrowej kolei”, czyli dokładnego i dynamicznego systemu, służącego między innymi do identyfikacji faktycznych i potencjalnych uszkodzeń infrastruktury kolejowej. Polega to na pozyskiwaniu danych o najwyższej jakości, dzięki czemu wspomagane są decyzje podejmowane podczas planowania i ustalania priorytetów w zakresie rozwoju, utrzymania, napraw i odnowy kolei [8].

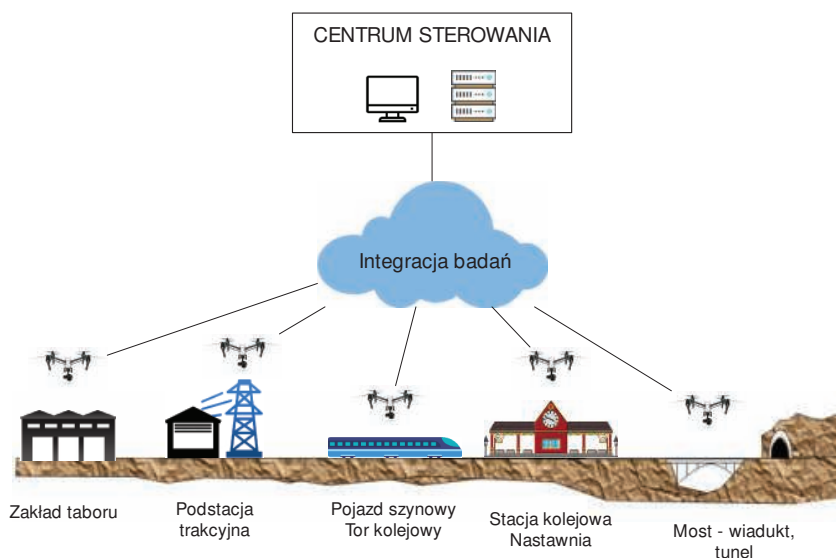
Narzędziem wspomagającym z dużym powodzeniem te zadania stały się drony, które mogą kontrolować znaczące odcinki linii kolejowych w czasie rzeczywistym. Zwane są też angielskim terminem UAV - ang. *Unmanned Aerial Vehicle*, czyli *Bezzałogowym Statkiem Powietrznym (BSP)*. Mogą one wykonywać badania wizyjne infrastruktury kolejowej w zasięgu wzroku, VLOS - ang. *Visual Line of Sight*, lub też

poza zasięgiem wzroku (sterowanie za pomocą obrazu przesyłanego z drona), BVLOS – ang. *Beyond Visual Line of Sight* [24].

Na rynku dostępne są drony, dające możliwość mocowania najwyższej jakości sprzętu do obrazowania oraz różnych sensorów, pozwalających rejestrować dane nie tylko o walorach użytkowych, ale również prowadzić

prace o jakości badań naukowych. Oprócz kamer wizyjnych, standardem są też kamery wielospektralne, termowizyjne, czujniki temperatury, laserowe, gazu, itp. [22].

Pomiar dokonywany jest z dokładnością od ułamków do pojedynczych milimetrów. Po zarejestrowaniu, nakładające się obrazy lotnicze są przetwarzane w oprogramowaniu do fotogra-



1. Referencyjna architektura nadzoru infrastruktury kolejowej oparta na dronach [6], [22]

metrii w celu wytworzenia dokładnej chmury punktów 3D. Poprzez porównanie z chmurami punktów odniesienia z poprzednich inspekcji, można monitorować zmiany infrastruktury. Dzięki referencyjnej architekturze nadzoru kolei opartej na dronach, można dokonywać szybkiego wykrywania uszkodzeń i zapobiegania wypadkom, rys. 1. Zmniejsza się też znacząco nakład siły roboczej, wprowadza oszczędność kosztów i czasu badań oraz zapewnia natychmiastowy dostęp do danych.

Rozważając przydatność dronów, jako narzędzi użytecznych na kolei, trzeba wziąć pod uwagę praktyczne możliwości techniczne w poszczególnych grupach zastosowań od najprostszych jak monitorowanie wtargnięć, odstraszanie intruzów (złodziei), wandalizm – projekt PKP Cargo [5], poprzez bardziej wyrafinowane, które to na przykład obejmują: monitorowanie i inspekcję infrastruktury takiej jak mosty i wiadukty (wykrywanie usterek jak ubytki, pęknięcia, deformacje, korozja konstrukcji oraz inteligentna konserwacja) [7], [14], [16], tunele (skrajnia) [18], [26], usterki urządzeń sterowania ruchem kolejowym [9], [24], i nawierzchni linii tramwajowych i kolejowych (deformacje i wady powierzchniowe szyn, pęknięcia podkładów, kontrola ogrzewania rozjazdów, konserwacja zwrotnic, ubytki w kon-

strukcji toru, roślinność) [1], [6], [15], [20], [21], [23], jak również uszkodzenia trakcji kolejowej (słupy i konstrukcje kratowe, izolatory, przewody, stacje transformatorowe), budynków kolejowych (stan techniczny, efektywność energetyczna, katastrofy budowlane), mapowanie inwestycji kolejowych (obrazy geodezyjne wysokiej rozdzielczości) - umowa z 2018 roku pomiędzy PKP PLK S.A. a firmą Fotoraporty Sp. z o.o.

Należy podkreślić, że rynek dronów w ostatniej dekadzie rośnie wykładniczo w skali światowej, przy czym w zastosowaniach kolejowych w 2019 roku wyniósł około 4 miliardów dolarów [8].

Dlatego w artykule skoncentrowano się na wykorzystaniu dronów do wspomagania inspekcji infrastruktury kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem wizyjnych systemów przetwarzania wad w szynach.

Światowy przegląd zastosowania dronów w inspekcji infrastruktury kolejowej oraz innowacyjne systemy wykorzystania w tym obszarze dronów autonomicznych, były przedmiotem rozważań autora w pracy [13].

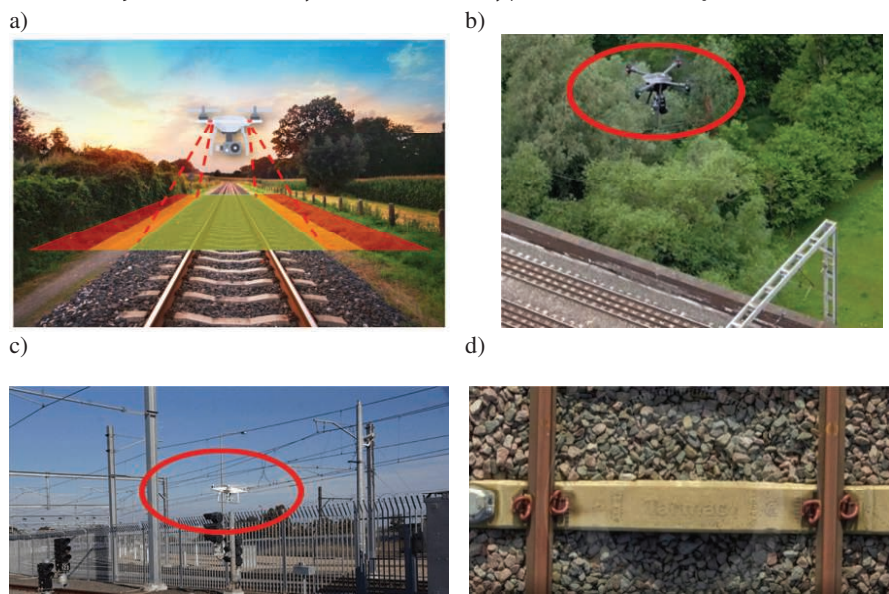
## Wizyjne badania toru kolejowego dronami

Standardowo, profesjonalne drony wyposażono w urządzenia umożliwi-

ające wykonywanie niezwykle precyzyjnych zdjęć lotniczych, korzystając z kamer Ultra 4K o rozdzielczości obrazu rzędu 100 MPx, z funkcją nagrywania wideo w UHD – ang. *Ultra High Definition* o rozdzielczości 4096x2160, z różnymi prędkościami klitek i ze zmiennym systemem widzenia – pionowo w dół lub poziomo, w zależności od badanych obiektów. Np. system *Visual Intelligence* LLC [25], może badać teren torów o wymiarach 15 x 11 metrów z wysokości 21 m, z 90% zachowaniem na siebie, przy zachowaniu prędkość 5 m/s, co przekłada się na szybkość przechwytywania wynoszącą 4 klatki na sekundę. Przy tak dużej rozdzielczości można zidentyfikować wady powierzchni toczonej główki szyn [23], oznaczenia na podkładach, jakość montażu przytwierdzeń i złączy szynowych, czy też uszkodzenia konstrukcji i powierzchni wiaduktów oraz mostów. Jest to kluczowa funkcja podczas kontroli torów kolejowych, wraz z towarzyszącą im infrastrukturą, rys. 2.

Rozwiązanie koncepcyjne to hybrydowy dron, dowożony pociągiem na miejsce badań. Początkowo zadokowany jest na końcu jadącego pociągu (ma wówczas doładowywane akumulatory), i zmierza do podejrzonej lokalizacji uszkodzonego toru, rys. 3.

Z pomocą GPS dron może wystartować, gdy pociąg się zbliża do docelowego obszaru i następnie przemieszcza się na określonej wysokości wzdłuż toru, rejestrując wizyjnie obszary z widocznymi wadami powierzchniowymi szyn, brakującymi łapkami przytwierdzeń szyn, czy też pękniętymi podkładami. W razie potrzeby dron może wylądować na szynie i dokonać bardziej szczegółowej jej kontroli podczas jazdy wzdłuż szyny za pomocą rekonstrukcji 3D. Po badaniach, UAS ponownie wystartuje i wylądować w pobliżu toru czekając na następny pociąg do dokowania, rys.3. Ten hybrydowy dron ma zdolność lądowania i startowania obejmującą 1- 2 km odcinka toru z prędkością 5-10 m/s [18] i [26].



2. Skanowanie wizyjne nawierzchni kolejowej dronem: a) poglądowa ilustracja badania [15], b) rzeczywiste badanie [4] i c) [2], d) widok podkładu (napisy) o wysokiej rozdzielczości [4], [17]

## Algorytm przetwarzania obrazów wad w szynach

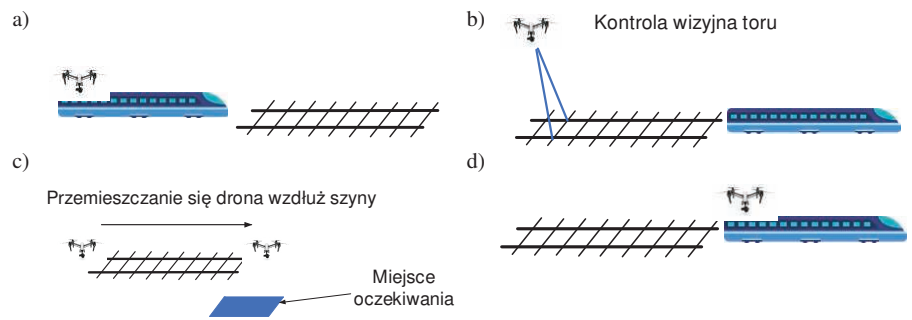
Skuteczność wizyjnej diagnostyki szyn z wykorzystaniem dronów, wymaga opracowania algorytmu przetwarzania i analizy obrazów. Podczas badań, dron powinien się cechować znaczącą odpornością na zmieniające się warunki otoczenia, co mają zapewnić jego systemy pokładowe. Toteż istotna jest tu jego dynamika i szeroko pojęta stabilność lotu na tej samej optymalnej wysokości. Do minimum powinny być wyeliminowane wibracje, gdyż mogą doprowadzić do nieostrości zdjęć [3]. Ważna tu jest także wysoka jakość optyki, a także duża dokładność lokalizacji drona, co ma zapewnić system GPS.

Jako obiekt badań eksperymentalnych, wybrano tory z małej towarowej stacji kolejowej na sieci angielskiej, o zdecydowanie złym stanie ich utrzymania. Szyny zawierają w wielu miejscach ubytki w główkach szyn, czyli wady typu *split* zarówno boczne jak i podłużne [12]. Świadczy to o dużym obciążeniu toru i zaniedbaniach w pracach utrzymaniowych.

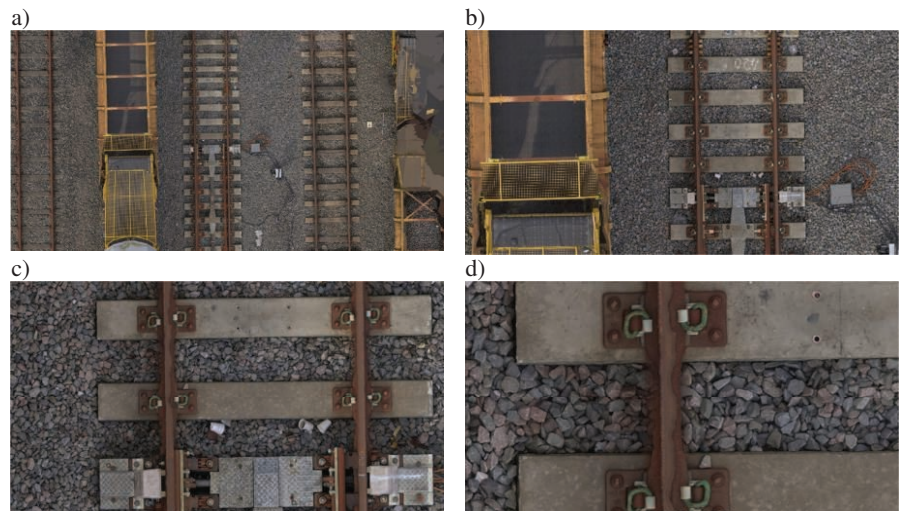
Na rys. 4 przedstawiono wynik badania tych torów, przeprowadzone przez firmę Ploverman Craven, dronem Vogel R3D z optyką o rozdzielczości 100 MPx, lecącym na wysokości 25 m nad torami [17], [19]. Poszczególne zdjęcia umieszczone na rys. 4a do d, stanowią kolejne powiększenia tego samego fragmentu stacji wzdłuż torów, wraz ze stojącym taborem. Nie trudno zauważyć, że pomimo uzupełnionej podsypki, stan szyn w wielu miejscach praktycznie uniemożliwia normalny ruch pojazdów szynowych.

W celu oceny tych znaczących uszkodzeń, które nie są zbyt finezyjne, żeby ich nie zauważyć na zdjęciach, autor zastosował dość klasyczny algorytm szczególnie przydatny do oceny geometrii wad typu *split*.

Po uzyskaniu obrazu z drona fragmentu toru, należy dokonać ekstrakcji szyn, czyli obrazów ich powierzchni tocznej główek, rys. 5. Realizuje się to w procesie zawężania obrazu do pew-



3. Scenariusz hybrydowego UAS [26]: a) transport drona pociągiem do obszaru badań, b) kontrola wizyjna toru, c) bezpośrednie badanie szyn i oczekiwanie na kolejny pociąg, d) odjazd kolejnym pociągiem



4. Wizualizacja badań torów stacyjnych dronem: a) obraz fragmentu toru z rozjazdem, b), c) i d) kolejne powiększenia obrazu tego fragmentu toru z uszkodzonymi szynami [17]

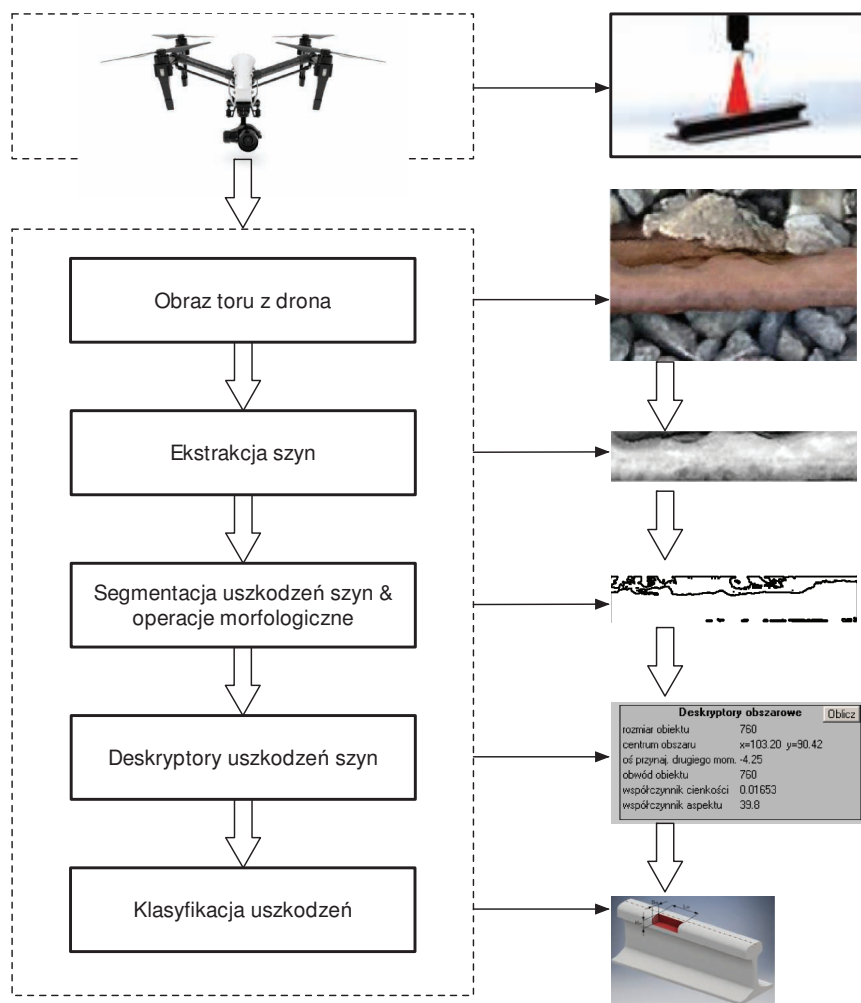
nego analizowanego dalej fragmentu (ang. *Region of Interest* – ROI), co ma decydujący wpływ na dokładność dalszej oceny uszkodzeń. Mogą tu być wykorzystane metody gradientowe wykrywające krawędzie główki szyny, metody oparte na statystykach pierwszego rzędu badających rozkład intensywności jasności wyznaczające wartość średnią, wariancję lub entropię, a także metody oparte na statystykach drugiego rzędu tzw. miary Haralicka, lub też bazujące na wielu skalach, korzystające z piramidy Gaussa lub Laplacca oraz transformatę falkową, uważaną za najbardziej zaawansowaną [10], jak w przykładzie na rys. 6d, g i j. Skorzystano w tym przypadku ze zdjęć drona, o największym powiększeniu i wybrano z nich kilka charakterystycznych próbek toru (szyna + podsypka) o wymiarach 400x400 pikseli, rys. 6a, b i c.

W kolejności zastosowano segmentację progową, uzyskując obraz binarny, na którym już można wykonywać operacje z wykorzystaniem operacji morfologicznych. W przypadku prowadzonych eksperymentów, autor po binaryzacji z progiem 120, zastosował funkcję *remove* i *dylatację*, rys. 6, dzięki której wyznaczono krawędzie obszarów uszkodzeń szyn typu *split*, rys. 6f, i, l.

Teraz można dokonać analizy wad, która jest kolejnym procesem następującym po wstępnym przetwarzaniu obrazów, tzw. preprocesingu, gdzie wyeliminowano z nich nieistotne lub zakłócające elementy z punktu widzenia zamierzonych celów analizy.

Prowadzi tu prosta droga do pomiarów poszukiwanych cech ilościowych analizowanych obrazów wad. Można tu wyznaczyć tzw. deskryptory obszarowe obrazów wad w szynach,





5. Algorytm przetwarzania obrazów uszkodzeń szyn

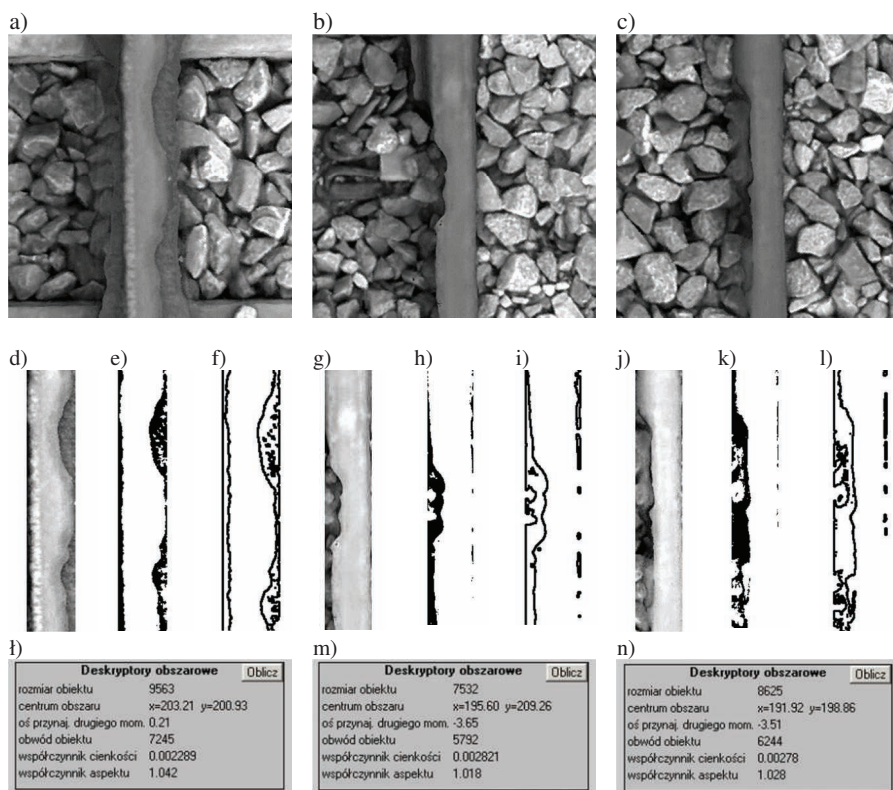
co zdefiniowano w pracy autora [10]. Dla przetworzonych próbek z rys. 6f, i, l, wyznaczono wartości deskryptorów jak rozmiar i obwód wady, centrum obszaru wady, oś przynajmniej drugiego momentu, współczynnik cienkości i aspektu. Największe uszkodzenie szyny w postaci wady *split*, ma próbka z rys. 6a. Należy też zauważyć symboliczne skręcenie osi szyny, rzędu kilku stopni dla próbek 6b i 6c, co nie wpływa na wynik pomiaru. Ze względu na podobieństwo kształtu szyny, wartości współczynników cienkości i aspektu niewiele się różnią dla poszczególnych próbek.

Dysponując znaczącą ilością danych uzyskanych z badań, najczęściej zautomatyzowanych, można zaimplementować algorytmy ich eksploracji (ang. *data mining*), pomocne przy klasyfikacji obrazów wad w szynach (pozostaje tylko kwestia wyboru klasyfikatora wad), rys. 5. Dalej to już interpretacja otrzymanych wyników i podjęcie na ich podstawie odpowiednich decyzji klasyfikacyjnych. Służą one do oceny diagnostycznej badanych szyn, np. na podstawie parametrów deskryptorów, co jest ostatecznym celem analizy. Zagadnienia te są przedmiotem odrębnych rozważań autora [11].

## Zalety i wady badania nawierzchni kolejowej dronami

Wykorzystywanie dronów w badaniach nawierzchni kolejowej zyskuje coraz więcej zwolenników na całym świecie, o czym stanowią następujące ich zalety:

- niewielki koszt badań w porównaniu do inspekcji tradycyjnej, np. pojazdami diagnostycznymi oraz zmniejszone zatrudnienie (drony na kolei zwane są też „robotnikami”), a w przypadku zastosowania dronów autonomicznych, wyposażonych w technologie sztucznej inteligencji (AI – ang. *Artificial Intelligence*) nastąpi drastyczne ograniczenie personelu badawczego, kosztów, czasu i ryzyka,
- badanie bez wprowadzania zaję-



6. Preprocessing i deskryptory obszarowe obrazów próbek uszkodzonych szyn

tości toru ani bez jakiegokolwiek ograniczenia ruchu pociągów, szczególnie w przypadku drona połączonego z systemem srk, gdyż system inspekcji miałby zakodowaną informację o lokalizacji „dom”, która zwolni drona dopiero po otrzymaniu powiadomienia z systemu sygnalizacyjnego, o niezajętości toru, a jeśli system sygnalizacyjny zgłosi zbliżający się pociąg, wtedy dron zostanie przywołany do „domu”,

- mobilność badań, czyli szybkie dostarczanie dronów na miejsce badań (pociągiem – rys. 3, samochodem),
- badania torowisk trudno dostępnych, ograniczonych wysokimi skarpami, w tunelach, na mostach i wiaduktach.

Ogólnie inspekcja infrastruktury kolejowych i wspomaganie akcji ratowniczych wypadków to dwa kluczowe obszary, w których przedsiębiorstwa kolejowe mogą znacznie skorzystać z wdrożenia technologii dronów.

Jednak stosowanie dronów nad linią kolejową może się wiązać ze znacznym niebezpieczeństwem, ryzykiem i stanowi poważne wyzwania operacyjne, a mianowicie:

- jednorazowo badane są krótkie odcinki toru, gdyż czas lotu drona wynosi 20 – 30 minut i może się to przekładać na problemy powrotu „do domu” w przypadku jakichkolwiek zakłóceń,
- istnieją pewne zagrożenia satelitarne systemu pozycjonowania GPS – ang. *Global Positioning System*, spowodowanego środowiskiem, jak mosty, wiadukty, wysokie drzewa i tym podobne przeszkody ograniczające widok nieba, ponadto stacje przekaźnikowe BTS (ang. *Base Transceiver Station*) stosowane w systemach łączności bezprzewodowej, w tym GSM, wyposażonych w anteny fal elektromagnetycznych, z reguły na wysokim maszcie oraz tzw. burze słoneczne, czyli nagłe i intensywne zmiany pola magnetycznego

Ziemi,

- podczas badania w przestrzeniach zamkniętych (tunelach), trzeba się liczyć z silnymi przepływami powietrza, które należy uwzględnić,
- większość dronów nie toleruje zderzeń fizycznych, dlatego należy odpowiednio zarządzać ryzykiem kolizji, aby uniknąć szkód zarówno po stronie dronów, jak i infrastruktury kolejowej,
- lot poniżej linii trakcyjnej pod napięciem może powodować zakłócenia pracy kompasu na pokładzie dronów i ryzyko kolizji z taborem,
- zwiększa się także ryzyko kolizji podczas obsługi dronów poza wizualną linią wzroku (BVLOS), gdyż awaria kamery lub utrata łącza wideo zmusza operatora do kontroli wzrokowej i manewrowanie, które może być trudne, a czasem nawet niemożliwe, w gęszczu obiektów kolejowych.

Dlatego światowe ośrodki naukowe we współpracy z zarządcami sieci kolejowych, badają wyjątkowe wyzwania związane ze stosowaniem dronów w operacjach do inspekcji i utrzymania infrastruktury kolejowej. Badania te obejmują gromadzenie wiedzy na temat doświadczeń i obaw operatorów kolejowych i innych osób pracujących w tym środowisku. Oczekuje się, że wyniki badań pomogą sformułować wymogi bezpieczeństwa dla bezzałogowych statków powietrznych na terenach kolejowych oraz do analizy obowiązujących przepisów i procedur regulujących ich użytkowanie.

## Wnioski

Prognozy wzrostu rynku dronów wskazują na ogromny potencjał w zakresie wykorzystania ich możliwości komercyjnych również w zakresie badań i zarządzania na kolei.

Warto też wskazać możliwości wdrażania przez PKP PLK S.A. dronów do inspekcji infrastruktury kolejowej. Zdaniem autora pole działania jest tu duże, a wybrane propozycje to:

- trakcja elektryczna, w tym inspek-

cja stanu technicznego konstrukcji stalowych (deformacje, korozja), przewodów trakcyjnych jak również badania kontaktowe z pantografem (w obrębie słupów), badania termowizyjne izolatorów (upływność elektryczna),

- wiadukty i mosty kolejowe, o różnych konstrukcjach (dynamika przemieszczeń), uszkodzenia szczególnie w miejscach trudno dostępnych,
- tor kolejowy – inwentaryzacja i akwizycja stanu technicznego (podkłady, przytwierdzenia, złącza szyn), zwrotnice i rozjazdy (dynamika, geometria, ogrzewanie - termowizja), skrajnia (również w tunelach),
- osuwające się skarpy i nasypy, drzewa zagrażające linii, zarastająca torowiska roślinność (wraz z opryskami),
- stacje (budynki, nastawnie, posterunki ruchu), perony (wiaty), urządzeń sterowania ruchem kolejowym. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Banić M., Miltenović A., Pavlović M., Čirić I.: Intelligent Machine Vision Based Railway Infrastructure Inspection and Monitoring Using UAV. *Facta Universitatis, Se-ries: Mechanical Engineering* Vol. 17, No 3, 2019, s. 357 – 364.
- [2] Both E.: Remote track inspections using drones. *Infrastructure*, 14 June 2019, <https://infrastructure-magazine.com.au/2019/06/14/remote-track-inspections-using-drones/>, dostęp: 18.05.2020.
- [3] Debevec R.: A Smart UAV Platform for Railroad Inspection. *Electronic Theses and Dissertations*. B.S. University of Central Florida, 2019, 54 s.
- [4] Drone-based rail surveys are a 'game changer'. *CIOB*, 14 August 2017, <http://www.construction-managermagazine.com/technology/drone-based-system-game-changer-rail-surveying/>, dostęp: 18.05.2020.

- [5] Drony z termowizją chronią pociągi PKP Cargo przed kradzieżami. Rynek Kolejowy, 13 styczeń 2018, <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/drony-z-termowizja-chronia-pociagi-ppk-cargo-przed-kradziejami-85224.html>, dostęp: 18.05.2020.
- [6] Flammini F., Naddei R., Pragliola C., Smarra G.: Railway Infrastructure Monitoring by Drones. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), November 2016, 6 s.
- [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, 29 s.
- [8] Inspection and monitoring of railway infrastructure using aerial drones. ESCAP /TARN/WG/2019/4. 6th session Bangkok, 10 and 11 December 2019, 16 s.
- [9] Kochan A., Rutkowska P., Wójcik M.: Inspection of the Railway Infrastructure with the use of Unmanned Aerial Vehicles. Archives of Transport System Telematics, Vol.11, Issue 2, 2018, s. 11-17.
- [10] Lesiak P., Bojarczak P.: Przetwarzanie i analiza obrazów w wybranych badaniach defektoskopowych. Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploatacji, ITE-PIB Radom 2012.
- [11] Lesiak P., Bojarczak P.: Algorytmy klasyfikacji obrazów wad w badaniach toru kolejowego. Monografia Wydziału Transportu i Informatyki WSEI w Lublinie pod red. T. Rymarczyka „Współczesne trendy technologiczne w informatycznych systemach złożonych”. Wyd. INNOVATIO PRESS, Lublin 2019, s. 41-73.
- [12] Lesiak P., Podsiadło R.: Modelowanie numeryczne geometrii wzorców wad powierzchniowych szyn kolejowych. Przegląd Komunikacyjny, Tom: LXXIV, Zeszyt 6/2019, s. 14-18,
- [13] Lesiak P.: Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów. Inspection and maintenance of railway infrastructure with the use of Unmanned Aerial Vehicles. Problemy Kolejnictwa. Zeszyt 188 (w druku).
- [14] 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, 29 s.
- [15] Project EREVOS. European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 780265. ESMERA, 2018, <http://www.esmera-project.eu/erevos/>, dostęp: 18.05.2020.
- [16] 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, s. 311-318.
- [17] Rail Surveys. Ploverman Craven. <https://plovermancraven.s3.amazonaws.com/panoramics/grange-sidings/index.html> dostęp: 18.05.2020.
- [18] Ravitharan R.: The Implementation of Unmanned Autonomous Systems for Railway Inspection. Monash University, Australia. Institute of Railway Technology, [https://www.unescap.org/sites/default/files/Item6\\_Monash\\_UAS\\_0.pdf](https://www.unescap.org/sites/default/files/Item6_Monash_UAS_0.pdf), dostęp: 18.02.2020.
- [19] Right on track. AECMagazin 24 January 2018. <https://aecmag.com/technology-mainmenu-35/1520-right-on-track-drone-surveying-ploverman-craven>, dostęp: 18.05.2020.
- [20] Singh A. K., Swarup A., Agarwal A., Singh D.: Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery. ICT Express 5, 2019, s. 250 – 255.
- [21] Smith, E.M.: A collection of computer vision algorithms capable of detecting linear infrastructure for the purpose of UAV control. MSc Thesis, Virginia Tech, USA, 2016, 101 s.
- [22] Sherrock E., Neubecker K.: Unmanned Aircraft System Applications in International Railroads. U.S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development and Technology Washington, DC 20590, February 2018, 35 s.
- [23] Wu Y., Qin Y., Wang Z., Jia L.: A UAV-Based Visual Inspection Method for Rail Surface Defects. Applied Sciences, Vol. 8, No. 7, 1028, 2018, 20 s.
- [24] Wójcik M.: Badanie stanu technicznego infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem bezałogowych statków powietrznych. Ogólnopolska Konferencja Naukowo – Techniczna, Transport Kolejowy 2017, Przeszłość – Terazniejszość – Przyszłość, UTK, s. 148 – 164.
- [25] Visual Intelligence. <https://visualintelligenceinc.com/rail-2/>, dostęp: 18.05.2020.
- [26] Zhang D., Vong Ch.H., Ravitharan R., Reichl P., Chung H.: Unmanned Aerial System (UAS) for Railway Inspection. AusRAIL 2018, Rail for a Better Future, 27-28 November 2018, Canberra, ACT, 2018, 9 s.