

dr hab. inż. Marek Karkula, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Zarządzania
Katedra Informatyki Biznesowej i Inżynierii Zarządzania
ul. Gramatyka 10, 30-067 Kraków

Kraków, 25.06.2023

✉ mkarkula@agh.edu.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Batko, pt.:

Analiza możliwości przeprowadzania oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej w oparciu o zastosowanie technologii bezzałogowych pojazdów, w tym pojazdów latających

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. PŚ
Opiekun pomocniczy ze strony Przedsiębiorstwa: dr inż. Joanna Michalska-Ćwiek

Podstawa formalna opracowania recenzji: pismo Pana dra hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport (RDILGT.512.8.2023 z dnia 2 czerwca 2023 roku), do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

1. Kryteria oceny rozprawy

Biorąc pod uwagę wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* podczas oceny rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Batko przyjęto następujące kryteria: znaczenie, aktualność i oryginalność rozwiązania problemu badawczego, stopień rozeznania i ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta w przedmiotowym obszarze badań, poprawność formułowania celów i hipotez badawczych, zasadność zastosowania metodyki badań, spójność struktury rozprawy oraz jej stronę warsztatową.

2. Ocena doboru i aktualności tematu rozprawy

Recenzowana praca została zrealizowana w Politechnice Śląskiej na Wydziale Transportu i Inżynierii Lotniczej w ramach programu MNiSW „Doktorat wdrożeniowy”. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. PŚ, natomiast ze strony przedsiębiorstwa opiekunem pomocniczym jest Pani dr inż. Joanna Michalska-Ćwiek. Zakres tematyczny rozprawy mieści się w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie: inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Tematyka rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Michała Batko dotyczy istotnego i aktualnego problemu monitoringu i oceny stanu infrastruktury kolejowej. Przedstawione w pracy zagadnienia są odpowiedzią na potrzeby gospodarcze i społeczne związane m.in. z realizowanym

i planowanym rozwojem transportu kolejowego, poprawą jego konkurencyjności w stosunku do innych gałęzi transportu oraz zwiększeniem jego interoperacyjności.

Transport kolejowy jest uważany z jeden z najbezpieczniejszych i najczystszy środek transportu. Aby nadażyć za wzrostem zapotrzebowania na usługi transportu kolejowego o określonej przez odbiorców jakości potrzebny jest system prewencyjnego wsparcia systemu infrastruktury kolejowej pozwalający utrzymywać dostępność, niezawodność i bezpieczeństwo tej infrastruktury na odpowiednim poziomie. Aby osiągnąć ten cel przeprowadzane są regularne inspekcje i prace konserwacyjne. Konieczność realizacji niniejszych zadań wynika również z regulacji prawnych nakładających obowiązki utrzymania infrastruktury kolejowej na zarządców. Zadanie to jest realizowane przez prowadzenie prac mających na celu utrzymanie stanu i zdolności istniejącej infrastruktury kolejowej do bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego.

W tradycyjnym podejściu do utrzymania infrastruktury kolejowej mamy do czynienia z czasochłonnymi, kosztownymi i wymagającymi dużego zaangażowania wykwalifikowanego personelu technicznego zarządcy procesami. Prowadzone w ten sposób prace z określoną w przepisach i regulaminach częstotliwością mają także niekorzystny wpływ na przepustowość linii kolejowych. Kolejnymi czynnikami mającymi istotny wpływ na procesy realizacji oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej są efektywność ekonomiczna tych procesów oraz zagadnienia związane z bezpieczeństwem eksploatacji urządzeń i prowadzenia ruchu kolejowego. Mimo dostępności i stosowania w praktyce szeregu nowoczesnych rozwiązań stosowanych do diagnostyki infrastruktury kolejowej żadne z tych rozwiązań, jak stwierdza Autor rozprawy *„nie zapewnia możliwości zastąpienia oględzin infrastruktury przez personel kompletnym, efektywnym ekonomicznie systemem zapewniającym w pełni bezpieczeństwo prowadzenia ruchu kolejowego”*. Z taką oceną Doktoranta można w pełni się zgodzić.

W związku z powyższym istnieje potrzeba identyfikacji i opracowania nowych metod i narzędzi pozwalających racjonalizować i optymalizować procesy diagnozowania stanu i utrzymania infrastruktury kolejowej. Wyzwanie takie podjął Autor rozprawy, a przedmiotem realizowanych przez Kandydata badań była część infrastruktury kolejowej należącej do spółki Infra SILESIA S.A. z siedzibą w Rybniku.

Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia, uważam podjętą przez Doktoranta tematykę rozprawy za istotną i oryginalną, zarówno ze względów poznawczych, jak i użytkowych. W obszarze przedmiotowym badań można zaobserwować lukę teoretyczną, metodyczną i empiryczną. Dotyczy ona braku metodyk i modeli pozwalających ująć przedmiotową problematykę w sposób systemowy, uwzględniając przy tym zastosowanie nowoczesnych rozwiązań technicznych, takich jak bezzałogowe statki powietrzne i automatyzację wybranych działań w procesach utrzymania i inspekcji infrastruktury kolejowej. Moim zdaniem postawiony w dysertacji problem i sposób jego rozwiązania można postrzegać jako próbę wypełniania tych luk.

Podsumowując ten fragment opinii uważam, że postawiony przez Pana mgr inż. Michała Batko problem badawczy ma charakter dysertabilny i w pełni nawiązuje do współczesnych osiągnięć oraz potrzeb nauki i praktyki gospodarczej i społecznej w obszarze doskonalenia systemów transportowych i procesów utrzymania ruchu w tych systemach.

3. Układ rozprawy

Treść rozprawy została przedstawiona w formie zwartego opracowania, obejmującego 164 ponumerowane strony wydruku komputerowego (w tym 143 strony tekstu zasadniczego), którego struktura zawiera: streszczenia w języku polskim i angielskim, dziesięć numerowanych rozdziałów, spis literatury oraz pięć załączników. Zauważono usterkę techniczną w postaci błędnej numeracji dwóch ostatnich rozdziałów oraz sekcji w podrozdziale 6.2. Pracę w istotnej mierze wzbogaca materiał ilustracyjny i tabelaryczny, składający się z 70 rysunków oraz 22 tabel.

Przedstawione wyniki rozprawy są efektem badań i eksperymentów, które Autor wzbogacił rozpoznaniem literaturowym. Spis źródeł zawiera 132 pozycje (55 polskojęzycznych, 77 obcojęzycznych, zdecydowana większość anglojęzycznych), a Doktorant jest współautorem jednej z nich. Przeprowadzony przegląd literatury miał na celu potwierdzenie luk badawczych i obejmował następujące zagadnienia:

- analiza aktualnych rozwiązań stosowanych w procesach inspekcji i utrzymania infrastruktury kolejowej;
- analiza aktów prawnych, regulacji i dokumentów branżowych odnoszących się do kontroli i utrzymania infrastruktury kolejowej;
- zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w diagnostyce i ocenie infrastruktury technicznej;
- wykorzystanie metod, modeli i algorytmów automatycznej detekcji obiektów z obrazów;
- oceny efektywności inwestycji infrastrukturalnych z uwzględnieniem infrastruktury kolejowej.

Nie brakuje tutaj aktualnych pozycji z obszaru przedmiotowego rozprawy, chociaż moim zdaniem bibliografia powinna być uzupełniona o ważne pozycje z prestiżowych czasopism i konferencji międzynarodowych, szczególnie to dotyczące stosowania metod naukowych w inspekcji i ocenie infrastruktury kolejowej. W moim przekonaniu w pracy zabrakło kilku istotnych, współczesnych opracowań poświęconych zastosowaniu sztucznej inteligencji w zadaniach utrzymania ruchu i inspekcji infrastruktury kolejowej, a mianowicie prac:

- Pappaterra, M.J. (2022). A Literature Review for the Application of Artificial Intelligence in the Maintenance of Railway Operations with an Emphasis on Data. In: Marrone, S., et al. *Dependable Computing – EDCC 2022 Workshops. EDCC 2022. Communications in Computer and Information Science*, vol 1656. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-031-16245-9_5;
- Liu, S., Wang, Q., Luo, Y. (2019). A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry, *Transportation Safety and Environment*, 1(3), pp. 185–204, doi: 10.1093/tse/tdz007;
- Wei, X., Yang, Z., Liu, Y., Wei, D., Jia, L., Li, Y. (2019). Railway track fastener defect detection based on image processing and deep learning techniques: a comparative study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 80, pp. 66–81, doi: 10.1016/j.engappai.2019.01.008.

Zauważono także brak konsekwencji w zapisie kilku pozycji w spisie literatury złącznikowej oraz w kilku przypadkach niekompletność opisów bibliograficznych. Uwaga ta dotyczy przede wszystkim powołań na strony internetowe – Kandydat pomijał dane dotyczące tytułu strony i autora materiału.

Pomimo powyższych uwag krytycznych stwierdzam, że Doktorant umiejętnie wykorzystuje zgromadzone źródła literaturowe w tekście rozprawy.

4. Analiza zakresu, celu oraz charakterystyka i ocena treści pracy

Dysertacja składa się z dziesięciu rozdziałów – w pierwszym z nich (*Przedstawienie istoty zagadnienia*, 2 str.) Autor zaprezentował przesłanki wyboru tematu, zwracając uwagę na istotną rolę transportu kolejowego w życiu społeczno-gospodarczym w wymiarze zarówno krajowym, jak i międzynarodowym. Jak słusznie podkreślił, jednym z warunków konkurencyjności transportu kolejowego wobec innych gałęzi transportu jest zapewnienie niezawodnej i bezpiecznej infrastruktury kolejowej. Aby osiągnąć powyższe cele wymagane jest stosowanie skutecznych metod ciągłego monitorowania infrastruktury w celu wykrycia ewentualnych jej defektów. Tradycyjne metody inspekcji i monitoringu infrastruktury kolejowej są kosztowne i czasochłonne, co skłoniło Doktoranta do podjęcia badań nad poszukiwaniem nowych, bardziej efektywnych sposobów monitoringu stanu infrastruktury kolejowej. Na podstawie analizy aktualnej literatury Autor wskazał luki badawcze w obszarze wykorzystania nowoczesnych metod diagnostyki wykorzystujących bezzałogowe statki powietrzne (BSP). Uzasadnia to prowadzenie badań realizowanych przez Doktoranta.

Rozdział drugi rozprawy, zatytułowany *Uzasadnienie celowości podjęcia tematu* (19 str.) ma charakter sprawozdawczy i stanowi szczegółowe uzasadnienie celowości prowadzonych badań. W kolejnych sekcjach tego rozdziału przedstawiono analizę aktualnego stanu zagadnień dotyczącą wykonywania inspekcji infrastruktury kolejowej za pomocą pojazdów załogowych i bezzałogowych. W podrozdziale 2.2 Doktorant przedstawił dyskusję dotyczącą wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do realizacji inspekcji infrastruktury podając przykłady i analizą zastosowań w innych niż transport kolejowy branżach, m.in. energetyce, ratownictwie medycznym, zastosowaniach wojskowych i na platformach wiertniczych. Autor przygotował również analizę dotyczącą efektywności wykonywania inspekcji za pomocą załogowych i bezzałogowych pojazdów oraz zwrócił uwagę na konieczność oceny wpływu metody monitoringu infrastruktury kolejowej na bezpieczeństwo eksploatacji urządzeń i prowadzenia ruchu kolejowego. W ostatniej części tego rozdziału Doktorant zidentyfikował obszary ryzyka związane z samym poruszaniem się dronów nad terenami kolejowymi i wokół tych terenów.

W rozdziale trzecim pt. *Cel, zakres i teza pracy* (9 str.) Autor ponownie podkreśla cel prowadzonych badań, ale tutaj odnosi się już do zagadnień inspekcji i monitoringu infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem metod konwencjonalnych oraz metod z zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych.

Lektura tej części rozprawy pozwala wskazać główny cel, który sformułował Kandydat – jest nim analiza możliwości oraz ocena przydatności bezzałogowych statków powietrznych, nazywanych również dronami do realizacji zadań automatycznej inspekcji stanu infrastruktury kolejowej.

W wyniku analizy literaturowej oraz własnych obserwacji i analiz Doktorant sformułował następujące cele cząstkowe rozprawy w treści, które według mnie można podzielić na:

- cele poznawcze – *systematyzacja wiedzy w zakresie wymogów i metodyk dotyczących utrzymania i eksploatacji infrastruktury kolejowej oraz identyfikacja metod i narzędzi stosowanych w wykrywaniu usterek tej infrastruktury oraz określenie różnic w zastosowaniu określonych metod;*
- cele użytkowe – *realizacja badań eksperymentalnych w celu weryfikacji możliwości zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w inspekcjach infrastruktury kolejowej, w tym lotów autonomicznych i automatycznego rozpoznawania usterek oraz wdrożenie nowego, kompleksowego systemu monitorowania stanu infrastruktury kolejowej za pomocą bezzałogowych statków powietrznych;*
- cel o charakterze metodycznym – *opracowanie metodyki badań eksperymentalnych i symulacyjnych dla wykrywania usterek infrastruktury kolejowej.*

W związku z postawionymi celami Autor sformułował także zakres zadań, których realizacja pozwoli na osiągnięcie wyznaczonych celów. Do zadań tych należały m.in.:

- analiza celowości podjęcia tematu w kontekście aktualnej wiedzy technicznej i literatury,
- wybór miejsca aplikacji systemu inspekcji za pomocą BSP na terenie wskazanego zarządcy infrastruktury,
- wyboru BSP oraz urządzeń na nim zainstalowanych (kamery, czujniki),
- opracowanie metodyki badań eksperymentalnych i symulacyjnych dla wykrywania usterek infrastruktury,
- przeprowadzenie lotów BSP i zebrania materiału badawczego,
- analiza wyników uzyskanych podczas badań eksperymentalnych,
- wykonanie oceny znaczenia zmiany sposobu inspekcji infrastruktury kolejowej,
- opracowanie instrukcji wykonywania inspekcji za pomocą BSP wskazującej warunki, przy których wykonanie lotów jest możliwe; wskazanie parametrów technicznych BSP,
- opracowanie wniosków końcowych i rekomendacji dalszych badań.

Realizacja tak sformułowanych celów rozprawy i zakresu związanych z nimi zadań została podporządkowana weryfikacji tezy rozprawy w brzmieniu:

zasadnym jest zastąpienie wizualnej inspekcji infrastruktury kolejowej wykonywanej przez dróżników obchodowych, poprzez monitoring z zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych, w celu zwiększenia efektywności procesu obchodów jak również zwiększenia bezpieczeństwa kolejowego

Uważam, że cele pracy zostały sformułowane poprawnie, są ścisłe i konkretne oraz poddają się operacjonizacji. Wyrażam również pogląd, że teza pracy w przytoczonym powyżej brzmieniu została określona prawidłowo.

Ważnym dla pracy jest kolejny rozdział zatytułowany *Metodologia badań* (18 str.). W rozdziale tym Pan mgr inż. Michał Batko zaprezentował metodykę realizowanych badań i założeń dotyczących opracowania systemu inspekcji i oceny stanu infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych wyposażonych w adekwatną

aparaturę. Głównym zastrzeżeniem do tej części pracy jest trochę chaotyczny sposób opisu opracowanej metodyki – brak jest w moim przekonaniu ścisłej prezentacji kolejnych elementów metodyki. W tym celu przedstawia się szkic metodyki w postaci schematu blokowego, omawiając kolejne jego elementy. Doktorant przedstawił w tej części pracy przedmiot badań – część rozległej infrastruktury kolejowej będącej własnością spółki Infra SILESIA S.A. Określił także najważniejsze komponenty prototypowanego systemu, którymi są: bezzałogowe statki powietrzne (drony), aparatura do akwizycji danych obrazowych (kamery), stacje dokujące dla dronów, podsystem przesyłu danych pomiędzy elementami sprzętowymi, algorytmy do przetwarzania obrazów i automatycznej detekcji usterek, aplikacja do wizualizacji usterek w obszarze inspekcji, narzędzia do archiwizacji zgromadzonych danych obrazowych.

Istotnym elementem przedstawionej metodyki jest opracowanie procedur doboru wymienionych komponentów systemu na podstawie określonych kryteriów. W ramach tego zadania Autor rozprawy zidentyfikował kryteria i określił ich wagi dla doboru bezzałogowych statków powietrznych, kamer, w które wyposażone były statki powietrzne oraz stacji dokujących dla dronów. Pewne wątpliwości budzi sposób doboru wag dla kryteriów – Doktorant wyznaczył te wagi na podstawie opinii trzech badaczy (wyniki przedstawione w tabelach 3–5). W tekście pracy nie wyjaśniono niestety, czy wagi dla kryteriów doboru dronów, kamer i stacji dokujących były określane przez tych samych trzech badaczy, czy były to zespoły niezależne.

Do ostatecznego wyboru komponentów sprzętowych do opracowanego systemu Kandydat wyselekcjonował pięć typów bezzałogowych statków powietrznych z różnym wyposażeniem w postaci kamer i urządzenia wyposażonego w czujnik laserowy typu LIDAR. Każde z wymienionych urządzeń zostało wykorzystane w badaniach testowych do oceny infrastruktury kolejowej przedsiębiorstwa Infra SILESIA S.A. Niestety w tekście pracy nie przedstawiono wyników oceny wyboru na podstawie zaprezentowanych w poprzednich sekcjach kryteriów i wag.

W podrozdziale 4.4 Doktorant przeprowadził dyskusję wyboru algorytmów i oprogramowania służącego do analizy materiału zarejestrowanego przez kamery zamontowane na dronach. W moim przekonaniu w charakterystyce metodyki badań zabrakło tutaj dokładniejszego opisu całego procesu wykrywania obiektów i detekcji usterek z wykorzystaniem metod widzenia komputerowego. Proces taki obejmuje kilka kroków, a najważniejsze z nich to: zebranie zbioru danych wykorzystywanych do uczenia modeli, wstępne przetwarzanie (tzw. preprocessing) danych, ekstrakcja cech z obrazów, podział zbioru na dane uczące, testowe i walidacyjne, uczenie modelu z wykorzystaniem odpowiednich algorytmów, ocena modelu i przetwarzanie końcowe. Autor skupił się w tej części pracy przede wszystkim na ocenie narzędzi i oprogramowania służącego do etykietowania obrazów w celu przygotowania tych danych do procedury uczenia modelu. Niezbyt jasne są dla mnie kryteria doboru algorytmów detekcji i klasyfikacji obiektów i usterek w obrazach. Również nieprecyzyjnie sformułowano zagadnienia do rozwiązania – detekcja obiektów w obrazie z wykorzystaniem odpowiedniego klasyfikatora, wykrywanie uszkodzeń badanej infrastruktury na podstawie analizy obrazu czy ocena parametrów tej infrastruktury i/lub jej elementów. Powyższe uwagi powinny być wyjaśnione przez Doktoranta podczas publicznej obrony.

Kolejne dwa rozdziały rozprawy stanowią cenny materiał dokumentujący badania empiryczne przeprowadzone przez Kandydata. W rozdziale piątym (*Wyniki badań*, 7 str.) Autor zaprezentował procedury badawcze dotyczące pozyskania materiału i danych do kolejnych etapów prac oraz sposobu wyboru parametrów komponentów sprzętowych systemu – bezza-

łogowych statków powietrznych oraz ich wyposażenia czyli kamer. Realizacja tych badań była konieczna – parametry lotu drona, takie jak prędkość i wysokość oraz sposób umieszczenia kamery i dobór jej parametrów stanowią kluczowe czynniki mające wpływ na jakość gromadzonych danych. Są również bardzo ważne z uwagi na zasady bezpieczeństwa związane z realizacją lotów nad czynną infrastrukturą kolejową. Wątpliwości budzi tytuł rozdziału, który sugeruje, że Autor odniesienie do wyników całości badań, a tego w niniejszym rozdziale brak – obszerniejsza analiza wyników badań jest przeprowadzona w kolejnym rozdziale. Należałoby zatem albo zmodyfikować tytuł rozdziału, albo rozważyć połączenie rozdziałów piątego i szóstego.

Bardzo interesujący jest szósty rozdział zatytułowany (*Przeprowadzenie wykrywalności usterek na podstawie zdjęć*, 49 str.) i stanowi najobszerniejszą część pracy. We wstępie rozdziału Autor rozprawy, na podstawie procedur i zasad przeprowadzania inspekcji technicznej infrastruktury kolejowej zarządcy obiektu, określił te komponenty infrastruktury, które będą poddawane inspekcji wizualnej na podstawie zdjęć. Zrealizowane badania dotyczyły oceny stanu technicznego i detekcji defektów lub stanów awaryjnych dla następujących komponentów infrastruktury i zagadnień diagnostycznych:

- szyn i podkładów kolejowych, które stanowią zasadniczą częścią nawierzchni kolejowej;
- przytwierdzenia (mocowania) szyn do podkładów kolejowych – elementy mają krytyczne znaczenie dla bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego, dosyć często ulegają uszkodzeniom, są też przedmiotem kradzieży;
- diagnostyka złącz podpartych, styków międzyszynowych i detekcja pęknięć szyn – ocena stanu tych elementów również jest istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu kolejowego;
- pomiar rozstawu szyn – zadanie diagnostyczne mające na celu detekcję zjawiska deformacji lub wyboczenia toru, określenie wartości rzeczywistych względem wartości dopuszczalnych;
- detekcja występowania tzw. krótkich wstawek szyn oraz odległości pomiędzy szynami na ich styku.
- detekcja zjawiska wybuksowań szyn – niebezpieczne i trudne do wykrycia zjawisko – ze względu na niedostateczną jakość zdjęć zastosowano metodę skanowania laserowego za pomocą metody i czujnika LIDAR.

W podrozdziale 6.2 Doktorant zaprezentował wyniki badań dla zidentyfikowanych zagadnień. Zgromadzimy materiał badawczy w postaci zdjęć wykonanych za pomocą bezzałogowych statków powietrznych został starannie wyselekcjonowany i poddany kolejnym etapom przetwarzania. W pierwszej kolejności Kandydat przeprowadził operację etykietowania zdjęć za pomocą narzędzia CVAT. Przygotowane zbiory danych podzielono na podzbiory danych treningowych i dane walidacyjnych. Wielkości zbiorów były różne dla różnych zagadnień, np. do oceny stanu szyn i podkładów zgromadzono 665 zdjęć, dla oceny stanu przytwierdzeń przygotowano 485 przypadków (449 treningowych i 36 walidacyjnych). W tym miejscu chciałbym zapytać jako recenzent jakie kryteria podziału zbioru danych na treningowe i walidacyjne zostały przyjęte przez Doktoranta.

W kolejnej sekcji (podrozdział 6.3) przedstawiona została ocena skuteczności zastosowanych algorytmów detekcji obiektów infrastruktury kolejowej. Doktorant zastosował klasyczne miary oceny jakości. Indeks Jaccarda, *IoU* – (ang. *Intersection over Unit*) jest mi-

arą stopnia dopasowania dwóch obiektów i dobrym wskaźnikiem oceny skuteczności detekcji obiektów w obrazie. W celu oceny jakości klasyfikacji wykorzystano także miary *Precision* i *Recall*. Miary te służą do określenia, jak dobrze model klasyfikacji radzi sobie ze znalezieniem i sklasyfikowaniem obiektów w określonych kategoriach. Zaprezentowane wyniki potwierdziły skuteczność zastosowanych algorytmów na akceptowalnym, wysokim poziomie. W mojej ocenie zaprezentowany w tej części rozprawy materiał stanowi istotną wartość pracy i dowodzi bardzo dobrego rozeznania Autora w podjętej tematyce. Pojawiają się jednak pytania dotyczące szczegółów badań nad wykorzystanymi algorytmami widzenia komputerowego. Autor wskazał jedynie, że do zagadnienia detekcji usterek dla złącz podpartych i styków zastosował modele wykorzystujące głębokie sieci neuronowe, a konkretnie model *RetinaNet* oparty na konwolucyjnych sieciach neuronowych (CNN). Nie przedstawiono także dyskusji dotyczącej doboru parametrów uczenia modeli. Oczekiwałbym komentarza na ten temat ze strony Doktoranta i ewentualnej dyskusji podczas publicznej obrony pracy.

W ostatniej sekcji tego rozdziału Kandydat przedstawił koncepcję docelowego modelu procesu monitoringu infrastruktury dla detekcji usterek za pomocą bezzałogowego statku powietrznego. Schematy przedstawione na rysunku 62 oraz 63 prezentują odpowiednio aktualny model decyzyjny procesu inspekcji infrastruktury (AS-IS) oraz model docelowy tego procesu (TO-BE) proponowany przez Autora rozprawy. Sposób prezentacji przebiegu procesu na rysunku 63 jest moim zdaniem jest mało czytelny – można tutaj było zastosować notację BPMN (ang. *Business Process Model and Notation*) w celu uniknięcia niejednoznaczności przepływu działań, które zauważono na schemacie blokowym przygotowanym przez Doktoranta.

W kolejnym kroku Doktorant przedstawił koncepcję systemu wspomagania decyzji w zakresie realizacji inspekcji infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych oraz algorytmów automatycznej detekcji obiektów i usterek infrastruktury. Proponowanymi komponentami rozwiązania są również: moduł wizualizacji infrastruktury z wykorzystaniem map cyfrowych i oznaczeniem lokalizacji i rodzaju usterki oraz podsystem raportowania i przeglądania zgromadzonego materiału zdjęciowego. Koncepcja rozwiązania została przedstawiona tutaj w formie opisu werbalnego, moim zdaniem cennym byłoby przedstawienie architektury prototypowego systemu w formie schematu.

W rozdziale siódmym dysertacji pt. *Uwarunkowania formalnoprawne wykonywanych lotów nad infrastrukturą kolejową*, (11 str.) Autor zaprezentował istotne dla proponowanego rozwiązania zagadnienia dotyczące ogólnych warunków i możliwości wykonywania lotów dronami oraz szczegółowych wytycznych dotyczących lotów nad obszarami infrastruktury kolejowej. Doktorant omówił również aspekty prawne dotyczące ochrony danych osobowych i kwestii dotyczących odpowiedzialności cywilnej i karnej związanej z realizowanymi podczas lotów dronów działaniami. Ten fragment pracy oceniam pozytywnie – Doktorant w sposób wyczerpujący przedstawił uwarunkowania formalnoprawne dotyczące wykorzystanie prototypowego rozwiązania.

Ważnym elementem pracy w kontekście praktycznym jest również rozdział ósmy, zatytułowany *Kalkulacja kosztów i nakładów inwestycyjnych inspekcji nową metodą*, (12 str.). Autor przeprowadził analizę i ocenę efektywności ekonomicznej proponowanego rozwiązania. Zastosowano metodę porównawczą kosztów i nakładów inwestycyjnych dla aktualnie realizowanego procesu inspekcji infrastruktury i procesu opracowanego przez Doktoranta. W wyniku przeprowadzonego badania efektywności inwestycji stwierdzono, że wykonywanie inspekcji za pomocą bezzałogowych statków powietrznych jest bardziej efektywne niż

rozwiązanie polegające na konwencjonalnym wykonywaniu obchodów. Potwierdzeniem tej tezy były również wyznaczone przez Kandydata wskaźniki NPV (ang. *net present value*) oraz wskaźniki przepływów pieniężnych (ang. *cash flow*), których wartości były korzystniejsze dla opracowanego, nowego rozwiązania.

Rozdział dziewiąty (*Podsumowanie*, 7 str.) stanowi podsumowanie dysertacji i zrealizowanych badań, natomiast w ostatnim, dziesiątym rozdziale Doktorant przedstawił wnioski wynikające z przeprowadzonych prac badawczych.

Lektura i wnikliwa analiza treści rozdziałów pozwala mi stwierdzić, że Autor podjął się trudnego zadania badawczego i wykonał je w stopniu zadowalającym. Prezentacja wyników prac badawczych świadczy także o dobrej znajomości realiów praktycznych przez Autora rozprawy. Na uwagę zasługuje fakt, że Doktorant wykonał żmudną pracę gromadzenia i przygotowania danych wykorzystywanych do trenowania algorytmów widzenia komputerowego. Pewne zastrzeżenia budzi niepełny opis i zbyt ogólna analiza stosowania konkretnych algorytmów dla rozpatrywanych zagadnień.

W mojej ocenie zaprezentowane podejście badawcze jest prawidłowe, a Doktorant posłużył się dobrze dobranymi i właściwymi do podjętej problematyki narzędziami badawczymi. Zawarte w treści pracy rozważania i uwagi, a w szczególności proponowane rozwiązania, mogą potwierdzać duże doświadczenie praktyczne Doktoranta w badanym obszarze – obsługi procesów inspekcji i oceny technicznej infrastruktury kolejowej.

5. Spostrzeżenia polemiczne i uwagi krytyczne

Obowiązkiem recenzenta jest jednak nie tylko wychwycenie pozytywnych stron pracy, lecz również wskazanie jej słabości i usterek. Niektóre z nich zostały wymienione przy referowaniu treści rozdziałów. Ale ich lista jest dłuższa. Nasunęły się także pewne spostrzeżenia i pytania, na które chciałbym, aby Doktorant udzielił odpowiedzi podczas publicznej obrony.

Pytania i spostrzeżenia ogólne

- 1) W dyskusji nad zaproponowaną metodyką i opracowanym rozwiązaniem oraz w podsumowaniu dysertacji Doktorant nie wskazał ograniczeń ich stosowania. Nie znalazłem także oceny potencjału do dalszych prac dotyczących badanego zagadnienia. Proszę o stosowny komentarz Autora rozprawy dotyczący tej uwagi.
- 2) W podrozdziale 6.2 *Oznaczenie i rozpoznawanie elementów wymagających detekcji*, s. 62–95 Doktorant przeprowadził dyskusję dotyczącą metod i algorytmów detekcji obiektów i usterek na podstawie danych obrazowych. Jak to sygnalizowałem w poprzednich sekcjach recenzji Autor dosyć pobieżnie przedstawił ocenę wyboru typu algorytmu do zagadnienia oraz ich parametrów. W związku z tym nasunęło mi się kilka wątpliwości i pytań:
 - Czy Autor podczas realizacji badań testował inne niż wskazane modele i algorytmy związane z widzeniem komputerowym i przetwarzaniem obrazu? Do rozpatrywanych w pracy problemów można stosować wiele różnych technik, np. algorytmy progowania (ang. *thresholding*), algorytmy wykrywania krawędzi (ang. *edge detection*), operacje morfologiczne (m.in.), klasyfikatory bazujące na metodach:

kaskady Haara, HOG (ang. *Histogram of Oriented Gradients*), Support Vector Machines (SVM) i wiele innych.

- Jaka była procedura doboru/dostrajania parametrów architektury modelu RetinaNet oraz hiperparametrów jego uczenia?
 - W pracy nie wspomniano również o narzędziach wykorzystywanych do konstruowania modeli i algorytmów detekcji obiektów i usterek w obrazach. Prośba o zwięzły opis zastosowanych bibliotek i narzędzi oraz komentarza dotyczącego ich wydajności.
- 3) Proces doboru, akwizycji i przetwarzania danych wejściowych stanowi w praktyce duże wyzwanie. Jednym z etapów jest ich analiza jakościowa i ewentualne wstępne przetwarzanie umożliwiające ich użycie w modelu, czyli tzw. preprocessing danych. Chciałbym zapytać czy sprawdzano w jakiś formalny sposób jakość danych wejściowych, a jeżeli tak, to jak to zrealizowano?
- 4) Czy Autor może zwięzłe przedstawić wnioski dotyczące złożoności obliczeniowej zastosowanych algorytmów oraz ich skalowalności w środowisku rzeczywistym? To zagadnienie jest istotne biorąc pod uwagę fakt przetwarzania danych w czasie rzeczywistym.

Uwagi szczegółowe

- 1) W rozprawie Doktorant używa wielu skrótowców, znaczenie części z nich została wyjaśniona w tekście, jednak moim zdaniem brakuje wykazu skrótowców używanych w pracy, co ułatwiłoby jej czytanie w szczególności osobom mniej doświadczonym w dziedzinie będącej tematem rozprawy.
- 2) Zauważono pomyłki w numeracji rozdziałów/podrozdziałów – rozdziały o numerach 7 i 8 powinny mieć numery odpowiednio 9 i 10, błędnie ponumerowano podrozdziały w rozdziale 8, a także podwójnie użyto numeru 6.2.3.
- 3) Schemat elementów systemu monitoringu infrastruktury kolejowej przedstawiony na rysunku 12 (str. 40) nie zawiera żadnego opisu – należałoby dodać opisy do schematu.
- 4) Na stronie 45 mamy następujące sformułowanie „*Kierując się kryteriami opisanymi w tabeli 6, przetestowano dwa rodzaje garaży...*”. Chodzi tutaj raczej o tabelę 5, w której Autor zestawiał kryteria i wagi dla doboru garażu dla dronów.
- 5) Podobną usterkę zauważono na str. 47 gdzie zamiast powołania na tabelę 7 powinno być odwołanie do tabeli 6.
- 6) Tytuł rozdziału piątego – *Wyniki badań* powinien być uszczegółowiony lub zmieniony – w obecnej postaci nie odzwierciedla w pełni zawartości rozdziału.
- 7) W kilku fragmentach pracy zauważono złożone, niejasne, zawile i często nieprecyzyjne sformułowania, poniżej podaję kilka przykładów:
 - Autor na str. 63 stwierdza, że „*Każdy pokład został oznaczony na zdjęciu (ang. labeled, labeling) co stało się wkładem do procesu uczenia maszynowego w dalszym procesie (ang. machine learning), aby algorytmy wiedziały, że to jest właściwy element ...*” – sformułowanie „algorytmy wiedziały” należy zastąpić bardziej precyzyjnym opisem.

- Na stronie 89 Autor stwierdza, że „*Podobnie jak przy rozpoznawaniu mocowań i złączy szyn, wykorzystując model segmentacji oraz wytrenowany już algorytm do wyznaczania mocowań szyn i śrub łukowych rozpoznano przerwy między szynami.*”. Takie stwierdzenie jest niejasne – chyba Autorowi nie chodziło tutaj o algorytm do wyznaczania mocowań szyn i śrub łukowych?
- Zdanie ze strony 140 w brzmieniu “*Tezę pracy udowodniono wykazując wysokie wskaźniki detekcji zarówno dużych (szyny, podkłady kolejowe) jak i małych obiektów infrastruktury (śruby stopowe, łukowe, wkłady), co uprawniło do stwierdzenia, że sukcesywnie można zwiększać ilość rozpoznawanych elementów infrastruktury i trenować prawidłowo dobrany model algorytmów.*” jest niejasne i nieprecyzyjne. O jaki model algorytmów Doktorantowi chodzi?

8) W pracy zauważono usterki interpunkcyjne, stylistyczne i edytorskie, nie mają one istotnego wpływu na jej ocenę merytoryczną.

5. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej stwierdzam, że praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i ważnego zagadnienia praktycznego. Na podstawie lektury rozpraw oceniam, że Kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w przedmiotowej dyscyplinie naukowej, a zaprezentowane wyniki prac empirycznych świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Ponadto uważam, iż mgr inż. Michała Batko porusza się z dużą swobodą w badanej tematyce, wykazuje umiejętność samodzielnego zdefiniowania problemu naukowego i prowadzenia badań, interpretacji i uzasadnienia wyników oraz weryfikowania hipotez na podstawie przyjętych założeń. Zaprezentowane w części empirycznej rozprawy rozważania potwierdziły dojrzałość naukową Doktoranta, który udowodnił, że jest w stanie prowadzić prace badawcze, potrafi w sposób umiejętny dokonać przeglądu literatury. Praca jest autorska, badania zostały przeprowadzone rzetelnie, zgodnie z zasadami prowadzenia badań naukowych. Doktorant posiada umiejętność zastosowania odpowiednich narzędzi i programów komputerowych do analiz i weryfikacji wyników badań oraz potrafi wyciągać właściwe wnioski z przeprowadzonych badań. Uważam, że recenzowana rozprawa, mimo przedstawionych w poprzednich częściach recenzji uwag krytycznych została wykonana na dobrym poziomie merytorycznym. Przyjęta przez mgr inż. Michała Batko, teza rozprawy została udowodniona, a wyznaczone cele konsekwentnie osiągnięte.

Do najważniejszych osiągnięć Kandydata, wnoszących postęp w wiedzy dotyczącej doskonalenia procesów utrzymania i inspekcji technicznej infrastruktury kolejowej zaliczam:

- 1) Prawidłowe sformułowanie oryginalnego tematu rozprawy oraz właściwe osadzenie go w ramach literatury przedmiotu.
- 2) Kompleksowe i systemowe ujęcie problematyki inspekcji i oceny technicznej infrastruktury kolejowej obejmujące aspekty techniczne, algorytmiczne, prawne i ekonomiczne badanego zagadnienia. Zaproponowane rozwiązanie wykorzystujące bezzałogowe statki powietrzne pozwoli na bardziej efektywną inspekcję infrastruktury kolejowej, zapewniając opłacalny, wydajny i bezpieczny sposób badania rozległych odcinków linii kolejowych.

- 3) Weryfikację i walidację wyników analiz z zastosowaniem wykorzystywanych narzędzi komputerowych oraz danych pochodzących z podmiotu gospodarczego.
- 4) Opracowanie prototypu rozwiązania w postaci systemu sprzętowo-programowego umożliwiającego realizację bezzałogowych inspekcji technicznej infrastruktury kolejowej.

Biorąc pod uwagę merytoryczne i formalne aspekty rozwiązania tematu podjętego w pracy stwierdzam jednoznacznie, że rozprawa doktorska **Pana mgr inż. Michała Batko** pt.: *Analiza możliwości przeprowadzania oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej w oparciu o zastosowanie technologii bezzałogowych pojazdów, w tym pojazdów latających* **spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** stawiane dyser-tacjom doktorskim.

Konkludując, stawiam wniosek o przyjęcie opracowania przedstawionego do recen-zji – jako rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Batko na stopień doktora nauk tech-nicznych w dyscyplinie *Inżynieria lądowa, geodezja i transport* i dopuszczenie jej do pub-licznej obrony.

dr hab. inż. ^VMarek Karkula, prof. AGH