

dr hab. inż. Anna TIMOFIEJCZUK, prof. PŚ

Politechnika Śląska

e-mail: atimofiejczuk@polsl.pl

Gliwice, 13.09.2024

## OPINIA

o pracy doktorskiej mgr. inż. Mohammada Siami Araghi

pt. *Fault Detection Procedures for Belt Conveyor Maintenance Based on AI-Driven Multisource Data Analysis*

Opinię opracowano na zlecenie Przewodniczącego rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Wrocławskiej,

### 1 Wstęp

Górnictwo, jest jednym z obszarów, w którym eksploatacja maszyn odbywa się w bardzo trudnych warunkach, a identyfikacja wszelkich awarii i niesprawności tych maszyn jest niezwykle ważna. Użytkowanie niesprawnych maszyn może prowadzić do bardzo niebezpiecznych wypadków, będących dużym zagrożeniem dla pracowników. Problemy diagnostyki maszyn i urządzenia eksploatowanych w przemyśle górnictwem są od wielu lat przedmiotem projektów naukowych i przemysłowych, których celem jest usprawnienie procedur diagnostycznych, a przede wszystkim podniesienie wiarygodności diagnozy. Głównym problemem w tym przypadku jest gromadzenie odpowiednich danych i pozyskiwanie danych o jakości pozwalającej na prowadzenie wnioskowania diagnostycznego. Stosuje się wiele metod obserwacji obiektów technicznych wykorzystywanych w górnictwie, a także wiele sposobów uzupełniania danych i podnoszenia ich jakości. Z pewnością dobrym podejściem jest gromadzenie dużych zbiorów danych, co gwarantuje weryfikację stawianej diagnozy. Jednak duże zbiory danych wymagają specjalnych metod selekcji i analizy, co obecnie jest realizowane z zastosowaniem różnorodnych podejść z obszaru sztucznej inteligencji. Ponadto, ze względu na bardzo trudne warunki panujące w kopalni, wydaje się, że sposoby gromadzenia danych, które jak najmniej angażują pracowników, są bardzo dobrym rozwiązaniem. W tym kontekście, tematyka pracy gromadzenia danych z zastosowaniem automatycznych systemów monitorowania jest bardzo aktualna.

## 2 Opis rozprawy

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów i została opracowana w języku angielskim. Na początku pracy zamieszczono streszczenia w języku angielskim i polskim, spis rysunków, spis tabel oraz spis skrótów zawartych w pracy. W streszczeniach wyróżniono słowa kluczowe dla pracy. Na końcu pracy spis literatury liczący 146 pozycji. Wraz ze streszczeniami oraz wykazem literatury rozprawa liczy 124 strony.

W rozdziale 1. pt. *Introduction & Motivation*, liczącym 12 stron, zawarto krótką charakterystykę tematu pracy, opisano przenośniki taśmowe używane w górnictwie oraz aktualne sposoby oceny ich stanu technicznego ze wskazaniem nowych metod możliwych do zastosowania. Omówiono główne problemy i wyzwania monitorowania przenośników taśmowych oraz przetwarzania i analizy danych z zastosowaniem proponowanych metod. Fragment ten opisuje podjęty problem badawczy. W rozdziale 1. zawarto także podrozdział, który omawia cel pracy doktorskiej oraz kolejny podrozdział omawiający najważniejsze podejścia rozwijane w ramach pracy, które stanowią oryginalny wkład autora. Kolejny podrozdział zawiera charakterystykę rozprawy i krótkie omówienie kolejnych rozdziałów. Rozdział 1. kończy się podrozdziałem opisującym dorobek publikacyjny autora w zakresie tematyki pracy. Biorąc pod uwagę wiek doktoranta i staż Jego pracy naukowej, zgromadzony dorobek jest imponujący. Podkreślić także należy, że element rozprawy doktorskiej, jakim jest wykaz dorobku naukowego, jest rzadko spotykany, a znacznie podnosi zrozumienie drogi naukowej doktoranta i treści zawarte w rozprawie.

Rozdział 2, zatytułowany *State of The Art. In Belt Conveyor Condition Monitoring*, liczący 20 stron, zawiera charakterystykę najczęściej występujących uszkodzeń i awarii przenośników taśmowych użytkowanych w górnictwie na całym świecie. Omawiane są także strategie utrzymania ruchu stosowane w przypadku eksploatacji przenośników. Kolejna część rozdziału poświęcona jest zastosowaniu robotów inspekcyjnych w trudnych warunkach eksploatacji maszyn i urządzeń, w tym w szczególności w górnictwie. Omawiane są także zastosowania różnych technik pomiarowych, w tym termowizji, w przypadku której pokazano także zaczerpnięte z literatury przykłady analizy zarejestrowanych obrazów. Omówiono także zastosowanie metod sztucznej inteligencji w analizie tych obrazów oraz przykład fuzji danych pochodzących z analizy obrazów termowizyjnych, obrazów zarejestrowanych w zakresie światła widzialnego oraz parametrów obserwowanych procesów.

Rozdział 3, zatytułowany *Region-based Fault Detection in IR Images*, liczący 13 stron, składa się z 10 podrozdziałów. W rozdziale tym Autor omawia kolejno zastosowanie termowizji do oceny stanu technicznego kółek w przenośnikach taśmowych oraz sposób wykrywania uszkodzeń na podstawie metody bazującej na identyfikacji obszaru na obrazie. W części tej pokazano schemat

kolejnych etapów przetwarzania i analizy obrazów stanowiący całościowe podejście stosowane przez Autora. Opisano także określanie obszaru zainteresowania na obrazie (ang. ROI, region of interest), ale także różne punkty obserwacji obiektu z użyciem kamery (ang. POV, point of view). W rozdziale 3. Scharakteryzowano także przetwarzanie wstępne (tzw. pre-processing) i normalizację obrazów termowizyjnych. Szczegółowo omówiono wybrane algorytmy, które stosowane były na tych etapach realizacji pracy, w tym identyfikację specyficznych obszarów i punktów na obrazie i wykrywanie anomalii.

Rozdział 4, zatytułowany *Thermal Fault Semantic Segmentation and Clustering*, który liczy 22 stron rozpoczyna się dłuższym wstępem charakteryzującym zawartości całego rozdziału. W kolejnych częściach opisano zaproponowaną metodologię segmentacji obrazów bazującej na podejściu semantycznym. Metodologię tą zilustrowano schematem. Następnie omówiono etapy wstępnego przetwarzania obrazów, które jest ponownie stosowane jako element podnoszący efektywność segmentacji. Pokazano także przykłady uzupełniania zarejestrowanych danych. Kolejna część rozdziału poświęcona jest zastosowaniu sieci neuronowych, ich architekturze i danym wejściowym do sieci. Przeprowadzono dyskusję efektywności ekstrakcji cech. W końcowej części rozdziału 4. przeprowadzono dyskusję i przykład zastosowania sieci neuronowej, które są wynikiem fuzji kilku podejść uczenia maszynowego. Omówiono identyfikację anomalii na podstawie obrazów termowizyjnych oraz zastosowanie różnych klasyfikatorów.

Rozdział 5, zatytułowany *Multi Sensor Information Fusion in Non-contact Measurement Systems*, liczący 13 stron zawiera wstęp dotyczący systemów pomiarowych składających się z wielu urządzeń różnych pomiarowych, co wymaga zastosowania odpowiednich podejść do fuzji rejestrowanych danych. W kolejnych częściach rozdziału Autor przedstawia proponowaną metodologię fuzji danych, która uwzględnia opisane wcześniej w pracy etapy przetwarzania i analizy danych. W rozdziale tym opisano także przetwarzanie innych sygnałów, w tym hałasu generowanego przez badane układy. W tym przypadku zastosowano analizę spektralną. W rozdziale wskazano na ważny problem niewystarczającej liczby przykładów i danych pozwalających na prawidłowe uczenie się sieci. Autor zaproponował sposoby uzupełniania zbioru danych. W kolejnej części rozdziału omówiono ekstrakcję cech z zastosowaniem sieci neuronowych czterech rodzajów architektury sieci. Rozdział kończy się częścią dotyczącą uczenia się systemu.

W rozdziale 6, zatytułowanym *Data Collection and Experimental Design*, liczącym 9 stron, zawarto opis badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Autora. Omówiono parametry obserwowanych obiektów technicznych i warunki, w jakich prowadzone były eksperymenty. Scharakteryzowano układ pomiarowy, a także omówiono używane oprogramowanie. Pokazano wybrane przykłady zarejestrowanych obrazów i porównano otrzymane wyniki wykrycia defektów na

podstawie opracowanego podejścia. Przeprowadzono dyskusję dotyczącą oceny zastosowanych miar określających efektywność zaproponowanych podejść.

Rozdział 7, zatytułowany *Results and Discussion* liczący 19 stron zawiera charakterystykę, podsumowanie i porównanie podejść pokazanych w rozdziałach 3, 4 i 5. Każda z części zredagowana jest według tego samego schematu.

W rozdział 8, zatytułowany *Conclusions and Perspectives* liczący 3 strony zawiera wnioski wynikające z przeprowadzonych eksperymentów i uwagi Autora dotyczące możliwości rozwoju opracowanych podejść.

W końcowej części pracy zawarto wykaz literatury uporządkowany według kolejności cytowania w pracy, liczący 146 pozycji.

Układ pracy jest typowy dla prac doktorskich, w których zwykle w pierwszej części określa się zakres badań, definiuje aktualny stan wiedzy na podstawie wyników badań literaturowych, a następnie formuluje się problem badawczy. Jednak układ recenzowanej rozprawy odbiega nieco od większości prac. W recenzowanej pracy nie wydzielono wyraźnie części poświęconej przeglądowi literatury. Wyniki tego przeglądu zawarte są w kolejnych rozdziałach pracy, poświęconych określonym zagadnieniom. Z tego powodu w niektórych miejscach trudno oddzielić efekty pracy Autora od przeglądu literatury. Ponadto, przeprowadzone badania eksperymentalne i testy zostały także pokazane w kilku rozdziałach. Wprawdzie w pracy zawarto rozdział 7, poświęcony dyskusji otrzymanych wyników, ale w rozdział tym wyniki te scharakteryzowano bez jednego wspólnego podsumowania. Należy jednak dodać, że za podsumowanie takie może służyć rozdział 8, zawierający wnioski. Jest to jednak podsumowanie całej pracy i uwagi o charakterze ogólnym. Opisane przeze mnie rozmieszczenie treści budzi pewien niedosyt i może prowadzić do niezrozumienia pewnych etapów pracy u czytelnika. Jeżeli Doktorant zamierza wydać rozprawę w formie monografii, sugeruję rozważyć zmiany w rozmieszczeniu treści. Praca została podzielona na rozdziały o porównywalnych długościach. Nawiązując do powyższych uwag, charakterystyka przeglądu literatury została zawarta w kilku miejscach pracy, ale nie zauważa się nadmiernych opisów badań literaturowych. Jednak ze względu na przyjęte przez Autora rozmieszczenie treści, czytelnik pracy może mieć wrażenie powtórzeń opisów pewnych podejść. Przegląd literatury udokumentowano poprzez obszerny wykaz literatury zawierający aktualne prace. Niedosyt może budzić fakt, że praca realizowana jest na polskiej uczelni, ale nie zawiera żadnych odniesień do badań prowadzonych w Polsce z zakresu zastosowania robotów mobilnych w górnictwie, w tym robotów inspekcyjnych. Prace takie były realizowane w kilku ośrodkach w Polsce. Nie zawarto także żadnych odniesień do osiągnięć polskich ośrodków w zakresie badań dotyczących zastosowania termowizji w diagnostyce maszyn czy fuzji obrazów i danych. Takie prace prowadzone są w bardzo wielu ośrodkach w Polsce.

Praca została zredagowana bardzo starannie, ale mimo zawarcia w pracy wykazu stosowanych skrótów, nie wszystkie pojęcia zostały zawarte w tym wykazie. Ze względu na bardzo dużą liczbę ilustracji zawartych w pracy, co jest jej dużą zaletą, dużą trudnością było zapewne jej sformatowanie. Jest to widoczne w wielu miejscach pozostawiono puste fragmenty stron.

### **3 Uwagi dotyczące doboru tematu, celu, tezy i zakresu rozprawy**

Temat pracy dotyczy ważnego tematu diagnostyki maszyn i urządzeń eksplodowanych w przemyśle górniczym. Jednym z najważniejszych problemów w tym przypadku są zastosowanie odpowiednich układów pomiarowych, rejestrujących możliwie najwięcej parametrów, gromadzenie danych, które są często obciążone błędami lub w przebiegach danych występują przerwy wynikające z tego, że układy pomiarowe działają niepoprawnie. Problemem jest także przesyła danych w warunkach górniczych. Przy obecnym stanie wiedzy nie jest już problemem zapis i przechowywanie tych danych, czy ich odpowiednie przetwarzanie i analiza. Przewiedzona do recenzji praca porusza wszystkie te wyżej wymienione problemy i jest częściową odpowiedzią na ich występowanie. Dobór tematu oceniam jako bardzo aktualny. Należy jednak zauważyć, że w streszczeniu pracy Autor porusza także wątek zastosowania robotów inspekcyjnych i częściowe wyłączenie człowieka, co nie jest przedstawione w dalszej części pracy. Jednak rozszerzenie pracy o tą tematykę znacznie wykraczałoby poza zwyczajowe zakresy prac doktorskich.

Cele pracy można scharakteryzować jako poszukiwanie odpowiedzi na pytanie jak zintegrować wiedzę eksperta człowieka z wynikami analizy sygnałów, np. drganiowych, czy hałasu z wynikami analizy obrazów, w tym także termowizyjnych.

Zakres rozprawy dobrano prawidłowo, stosownie do sformułowanego celu rozprawy. Należy jednak podkreślić, że biorąc pod uwagę streszczenie pracy, a także pierwsze rozdziały, zapowiadano zastosowanie robotów inspekcyjnych, co nie zostało opisane w dalszej części pracy.

### **4 Ocena merytoryczna**

Tematyka pracy, podjęta przez Doktoranta, wpisuje się w trendy rozwoju kilku dyscyplin naukowych, w tym głównie w inżynierię środowiska, górnictwo i energetykę, ale także w części w inżynierię mechaniczną oraz automatykę, elektronikę, elektrotechnikę oraz technologie kosmiczne. Podjęty przez Doktoranta temat pracy ma zdecydowanie charakter interdyscyplinarny i bardzo pozytywne jest to, że nad przygotowaniem rozprawy nadzór sprawowali promotorzy reprezentujący różne dyscypliny.

W dużej części praca ma charakter eksperymentalny i jest wynikiem wielu testów przeprowadzonych w środowisku przemysłowym. Moim zdaniem, zagadnienia dotyczące zastosowania robotów mobilnych w kopalni nie zostały w pracy wystarczająco opisane. Z takim zastosowaniem wiążą się względy bezpieczeństwa, a także bardzo ograniczona mobilność robotów. W pracy nie poruszono także wątków dotyczących gromadzenia danych, w szczególności przesyłania danych. Jednak należy podkreślić, że zakres pracy i treści w niej zawarte odpowiadają tytułowi. Moje uwagi dotyczące braku opisów zastosowania robotów wynikają z tego, że napisano o tym w streszczeniach i zawarto w pierwszych częściach pracy. Poruszenie tych wątków byłoby uzasadnione, tym bardziej, że Doktorant realizuje swoje badania w jednostce naukowej związanej z górnictwem.

#### 4.1 Elementy oryginalne

Na podstawie rozprawy oceniam, że najważniejszymi oryginalnymi osiągnięciami Doktoranta są:

1. Zastosowanie termowizji i opracowanie sposób przetwarzania obrazów termowizyjnych z zastosowaniem histogramów obrazów pozyskanych przez mobilnego robota inspekcyjnego.
2. Opracowanie i zastosowanie binarnej klasyfikacji do identyfikacji wybranych obszarów obrazów termowizyjnych odpowiadających uszkodzeniom krążników.
3. Opracowanie procedur uzupełniania zbiorów przykładów danych, w przypadkach nierównomiernego rozłożenia reprezentacji tych przykładów dla określonych przypadków.
4. Opracowanie autorskiego podejścia segmentacji danych bazującej na podejściu semantycznym.
5. Opracowanie metody fuzji wyników przetwarzania i analizy danych wynikających z obserwacji procesów i obrazów, w tym obrazów termowizyjnych.

#### 4.2 Uwagi dyskusyjne

1. W pracy, na samym początku, ale także w opisach dotyczących gromadzenia danych mowa o zastosowaniu mobilnego robota inspekcyjnego. Proszę o wyjaśnienie tego jaki robot był używany oraz o określenie tego, jakie były jego parametry dotyczące bezpiecznego użytkowania w kopalni?
2. Jednym z głównych osiągnięć Autora pracy jest opracowanie metody fuzji. Ze względu na to, że termin ten używany jest w kilku miejscach w różny sposób, proszę o wyjaśnienie, co autor rozumie pod pojęciami dane, informacja i wiedza? Czy biorąc pod uwagę te definicje, fuzja była stosowana na etapie przetwarzania informacji?

3. We wstępie Autor porusza bardzo ważny problem łączenia wiedzy eksperckiej z wynikami obserwacji diagnostycznych. Proszę o wyjaśnienie jak pozyskiwana była wiedza ekspercka, którą posługuje się w pracy Autor?

### 5 Wniosek końcowy

Podjęty i rozwiązany przez Doktoranta problem badawczy jest ważny z perspektywy rozwoju procesów technologicznych i badania nowych materiałów. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* oraz wymaganą umiejętnością zaplanowania i samodzielnego przeprowadzenia badań naukowych. Sformułowane przeze mnie uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana praca doktorska Mgr. inż. Mohammada Siami Araghi pt. *Fault Detection Procedures for Belt Conveyor Maintenance Based on AI-Driven Multisource Data Analysis* spełnia wymagania Art. 187 p.1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dziennik Ustaw 2018 poz. 1668) i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.

