

dr hab. inż. Andrzej Romanowski, prof. uczelni
Instytut Informatyki Stosowanej
Politechnika Łódzka
email: andrzej.romanowski@p.lodz.pl

Łódź, dnia 10 czerwca 2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej wykonanej w ramach programu doktorat wdrożeniowy
w dyscyplinie naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej**

Tytuł rozprawy:

**„Recommendation systems for laser beam diagnostics based on artificial intelligence
algorithms”**

Autor rozprawy: **mgr inż. Daniel Mostowski**

Rozprawa została przygotowana pod merytoryczną opieką dr hab. inż. Grzegorza Pastuszaka prof. uczelni oraz p. dr Piotra Garbata, którym Rada Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja powierzyła funkcje odpowiednio promotora oraz promotora pomocniczego. Rozprawa została złożona w ramach programu doktoratu wdrożeniowego we współpracy z firmą Perspectiva Solutions Sp. z o.o. oraz Politechniką Warszawską. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Arabasa zawartego w piśmie z dnia 6 lutego 2025r.

1) Dobór tematu, cel i zakres pracy

Głównym celem rozprawy było stworzenie systemu rekomendacyjnego, który za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego umożliwia przemysłowe monitorowanie i przewidywanie stanu wiązki laserowej w czasie rzeczywistym. Rozwiązanie takie ma na celu poprawę efektywności systemu laserowego oraz minimalizację ryzyka awarii. Tradycyjne metody diagnostyki laserowej opierają się na inspekcjach przeprowadzanych przez wykwalifikowany personel, co jest czasochłonne i nie zawsze skuteczne, w szczególności na wczesnych etapach powstawania problemów technicznych, których symptomy nie zawsze są dostrzegane przez operatorów. Z drugiej strony obiecującym trendem w praktycznych zastosowaniach jest tzw. utrzymanie predykcyjne (z ang. predictive maintenance) oparte na bieżącym zbieraniu pomiarowych danych z czujników monitorujących stan procesu, a połączonych zwykle siecią typu IoT (z ang. internet of things IoT). Analiza danych monitorujących na bieżąco za pomocą modeli i algorytmów przetwarzania oraz interpretacji może prowadzić do całkowicie- lub pół-automatycznej diagnostyki zapobiegającej awaryjnym wyłączeniom maszyn, instalacji

i procesów produkcyjnych. W związku z powyższym, automatyzacja procesu diagnostyki jest tematem, w mojej opinii, bardzo aktualnym, zarówno z punktu widzenia badawczego, jak i praktycznego, w szczególności z uwagi na fakt, że może potencjalnie przynieść wymierne korzyści praktyczne w przemyśle poprzez optymalizację procesów produkcyjnych w sektorze laserowym.

Doktorant zaproponował analizę potencjału wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji, w szczególności sieci neuronowych oraz uczenia maszynowego do parametryzacji diagnostyki i zmian trendów parametrów systemów laserowych. W ramach pracy Autor zaproponował, opracował i przeprowadził szereg symulacji, eksperymentów obliczeniowych i dokonał analizy porównawczej szeregu modeli klasyfikacji i predykcji trendów zmian wybranych parametrów związanych z oceną wiązek laserowych w przemyśle. Dobór tych metod w dobie rosnącej dostępności narzędzi i zasobów obliczeniowych oceniam jako trafny. **W związku z tym uważam także, że ww. cel projektu, jaki postawił przed sobą w ramach niniejszej rozprawy Doktorant jest aktualny, a zakres adekwatny.** Ponadto należy podkreślić fakt, że opracowane w ramach niniejszej pracy rozwiązanie może mieć konkretne zastosowanie o charakterze użytkowym.

Struktura pracy, przegląd rozdziałów

Przedstawiona do oceny rozprawa została przygotowana w języku angielskim, zawiera 166 stron tekstu głównego podzielonego na 10 rozdziałów głównych, w tym wstęp (oznaczony jako rozdział 1) i podsumowanie, a także dodatkowo wykaz literatury, spisy pomocnicze i załączniki. Wykaz literatury obejmuje 113 pozycji z różnych dziedzin wiedzy związanych z rozprawą, w tym także odnośniki internetowe. W rozdziale 2. Autor wprowadził podstawowe informacje i pojęcia dotyczące diagnostyki laserów oraz przegląd algorytmów sieci neuronowych w odniesieniu do profilowania tychże wiązek stosowanych w przemyśle. Rozdział 3 zawiera motywację praktyczną do podjęcia tematu z wyszczególnieniem założeń implementacyjnych i potencjalnych korzyści jakie może przynieść projekt. W rozdziale 4 zarysowana została metodyka podejścia do rozwiązania problemu, w tym poszczególne etapy włącznie z przygotowaniem danych, wyborem architektury sieci neuronowych, wyborem podstawowych metryk i eksperymentalnej platformy sprzętowo-programistycznej. Rozdział 5 szerzej opisuje przygotowanie i wykorzystanie syntetycznych i prawdziwych zbiorów danych obrazowych zarówno dla algorytmów segmentacji i klasyfikacji, jak i dla sekwencji danych do analizy trendów. Rozdział 6 wprowadza i opisuje wybrane architektury sieci dla problemów klasyfikacji klas obrazów wiązki laserowej utrwalonej za pomocą matrycy CCD oraz przegląd wybranych dla nich funkcji aktywacyjnych. Następnie podane są wyniki uczenia modeli, miary precyzji, czułości oraz ich średnia harmoniczna, wizualizację mapowania aktywacji klas ważonego gradientem, miary błędów kalibracji oraz wizualną analizę klasteryzacji oraz analiza niepewności w odniesieniu do różnych profili wiązki. Ponadto, przedstawiono tam także szeroką analizę wpływu różnych rodzajów i stopnia zaszumienia obrazu na wyniki dokładności modeli dla dobranych wcześniej par architektury i funkcji aktywujących. W rozdziale 7 autor przedstawił wyniki eksperymentów obliczeniowych przeprowadzonych dla celów badania możliwości wykorzystania sieci neuronowych do analizy (predykcji) trendów sekwencji kolejnych pomiarów wiązki laserowej. Wyniki zostały zaprezentowane dla

wybranych modeli (lokalnych i globalnych) w odniesieniu do miar błędu w zależności od długości horyzontu predykcji. W rozdziale 8 zaprezentowano wyniki wykorzystania sieci U-Net do segmentacji prążków dyfrakcyjnych oraz odtwarzania kształtów apertur odpowiadających wzorom dyfrakcyjnym w konfiguracjach liniowej i kołowej dla wybranych funkcji aktywacyjnych. Rozdział 9 zaś prezentuje dodatkowe osiągnięcia doktoranta bezpośrednio związane z realizacją niniejszej pracy doktorskiej; są to przede wszystkim opracowane narzędzia software'owe. W rozdziale 10 Autor podsumowuje uzyskane wyniki oraz przedstawia wnioski dotyczące niniejszej rozprawy. Przedstawiono w nim również potencjał wdrożeniowy opracowanego rozwiązania, jego ograniczenia oraz możliwe kierunki dalszych badań.

2) Zasadnicze tezy pracy, metodyka badań

W ramach pracy doktorskiej przedstawionej do recenzji Autor sformułował dwie tezy rozprawy o następującym brzmieniu (*cyt. str.159*):

T1	<i>„...The first thesis proposed that the diagnostics of laser systems could be parameterized and fully automated through neural networks.</i>
T2	<i>The second thesis explored the possibility of employing machine learning methods to determine trends in laser parameters, such as FWHM...”</i>

Postawione tezy badawcze dotyczą wykorzystania uczenia maszynowego i sieci neuronowych dla celów parametryzacji, diagnostyki i predykcji zmian parametrów systemów laserowych.

W celu eksploracji przestrzeni wyznaczonej przez obszar badawczy zarysowany tymi tezami Doktorant zaproponował metodykę badań opartych na analizie porównawczej wybranych architektur sieci neuronowych powiązanych z wybranymi funkcjami aktywującymi.

Prace eksperymentalne były prowadzone w ramach doktoratu wdrożeniowego w Politechnice Warszawskiej we współpracy z firmą Perspectiva Solutions Sp. z o.o. Najważniejsze eksperymenty zostały wykonane przez Doktoranta w oparciu o stanowisko pomiarowe z systemem laserowym Huaris oraz na platformie obliczeniowej zbudowanej przez doktoranta na bazie karty GPU (NVIDIA PNY Quadro RTX A4000).

W związku z powyższym należy stwierdzić, że w/w tezy, postawiły przed Doktorantem interesujące zadania, wymagające dobrego przygotowania teoretycznego, głębokiej znajomości specyfiki problemu, a także przeprowadzenia szeregu prac eksperymentalnych i analitycznych. Traktując tak sformułowane zagadnienie łącznie – tj. jako zestaw obejmujący obie tezy – Autor, w celu ich udowodnienia, zaproponował eksperymentalną analizę porównawczą wydajności wybranych modeli sieci neuronowych, uzupełnioną komplementarną analizą błędów oraz niepewności. Analiza ta została przeprowadzona dla szeregu konfiguracji – reprezentatywnych dla większości najpopularniejszych obecnie podejść – obejmujących różne architektury sieci neuronowych oraz odpowiednie zestawy funkcji aktywacji.

Zważywszy, że wyniki analizy są prezentowane zarówno w rozdziałach zawierających treści teoretyczne, jak i w częściach poświęconych dyskusji oraz podsumowaniu, a także biorąc pod uwagę fakt, iż Autor podsumowuje swoje osiągnięcia w sposób ogólny, bez jednoznacznego przypisania odpowiedzi do poszczególnych tez, należy wskazać, że utrudnia to nieco dokonanie szczegółowej oceny. Jednak w ocenie recenzenta, pełen zestaw uzyskanych wyników, rozpatrywany w ścisłym powiązaniu z wynikami prac symulacyjnych i eksperymentalnych, pozwala jednoznacznie **pozytywnie ocenić skuteczność dowodzenia tez postawionych w niniejszej dysertacji.**

3) Merytoryczna ocena pracy badawczej

W opinii recenzenta Autor trafnie zdecydował o wyborze eksperymentalnych badań obliczeniowych jako najistotniejszym aspekcie metodycznym prowadzonych prac empirycznych. W obliczu braku odpowiednio szerokiej bazy dostępnych wyników pomiarowych dotyczących zapisów obrazów wiązki laserowej o różnych parametrach, a w szczególności także ujęcia takich pomiarów w systematyczne sekwencje czasowe, Doktorant podjął się opracowania modelu generacji dużego zbioru danych syntetycznych. Zaproponowany przez niego model uwzględnia zarówno zróżnicowane właściwości i parametry wiązek laserowych wykorzystywanych w systemach przemysłowych, jak i spektrum charakterystycznych sygnałów diagnostycznych, jakie mogą występować w przypadku naturalnego spadku precyzji działania lasera wynikającego z długotrwałej, ciągłej eksploatacji, rozkalibrowania lub degradacji komponentów.

Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z metodyką opartą na analizie głównego problemu badawczego, który podzielono na trzy kategorie: klasyfikację, analizę trendów oraz regresję. Dla każdej z tych kategorii opracowano hipotezy badawcze, które następnie poddano analitycznemu badawczemu procesowi obejmującemu symulacje, analizę danych, eksperymenty i analizę uzyskanych wyników. Podejście takie jest dobrze ugruntowane w literaturze przedmiotu, co potwierdza dojrzałość badawczą Doktoranta. Modele teoretyczne utworzone dla ww. trzech zagadnień badawczych umożliwiły generowanie symulowanych zestawów danych oraz wstępne testowanie hipotez. W dalszych krokach po etapie wygenerowania bogatego rdzenia danych przystąpiono do prac eksperymentalnych, uwzględniających badania nad właściwą architekturą sieci neuronowych i ich parametrami. Przeprowadzono szerokie prace walidujące różne architektury pod kątem czasu trenowania, dokładności rozpoznawania klas obrazu wiązki lasera oraz wpływu funkcji aktywacji na jakość uzyskiwanych wyników. Wartym podkreślenia jest fakt szerokiej analizy wpływu szumu na uzyskiwane wyniki.

Dane syntetyczne zostały przygotowane w oparciu o symulacje numeryczne wykorzystujące istniejące oprogramowanie dedykowane do modelowania interakcji wiązki laserowej z różnymi przeszkodami i aperturami - wykorzystuje model ASM (*Angular Spectrum Method*) [24] - technikę numeryczną stosowaną do symulacji rozchodzenia się fal świetlnych lub akustycznych. Należy wskazać, że Doktorant rzetelnie opisał zastosowaną metodę generowania zbioru danych; przygotowano zbiory dla 6 klas typów dyfrakcji widocznych w obrazach wiązek lasera. Znaczącym elementem tej części pracy było również odpowiednie określenie parametrów modelu dla poszczególnych klas, co pozwoliło na elastyczne i kontrolowane generowanie różnych typów wzorców dyfrakcyjnych

w wirtualnych obrazach. Warto również zaznaczyć, że w modelu generowania obrazów odniesiono się do danych rzeczywistych, co znacząco podnosi użyteczność i wiarygodność uzyskanych wyników. Analiza taka umożliwia identyfikację istotnych wzorców, odchyłeń oraz potencjalnych anomalii w danych, co stanowi kluczowy element dla dalszych badań oraz ewentualnej optymalizacji modeli diagnostycznych. Przeprowadzenie tego etapu było niezbędne w kontekście zapewnienia wysokiej jakości i realistyczności danych symulacyjnych. Co prawda, Autor pozostawia czytelnika z pewnym niedosytem argumentacji w zakresie takich kwestii jak dlaczego akurat liczba 100 000 wygenerowanych obrazów wiązki jest wystarczająca dla treningu oraz czy głębokość 8-bit/piksel jest wystarczająca i została eksperymentalnie potwierdzona? Niemniej jednak, Autor pozostawia czytelnika z pewnym niedosytem w zakresie uzasadnienia niektórych decyzji projektowych, w szczególności dotyczących przyjętej liczby 100 000 wygenerowanych obrazów jako wystarczającej do skutecznego treningu modelu. Niewyjaśnione pozostaje również, czy zastosowana głębia obrazu (8 bitów na piksel) została poprzedzona analizą porównawczą z innymi wariantami i czy jej wybór był poparty eksperymentalną weryfikacją. W świetle całościowej rzetelności pracy, można oczekiwać, że rozwinięcie tych kwestii znacząco wzmocniłoby argumentację technologiczną w części metodycznej.

Kolejnym zbiorem danych wygenerowanym w trakcie symulacji jest zestaw służący do analizy trendów zmian parametrów obrazu wiązki laserowej w czasie. Również w tym przypadku pojawiają się arbitralnie przyjęte wartości stałe, takie jak np. 100 ramek w analizowanej sekwencji, przy czym nie przedstawiono uzasadnienia, że taka liczba jest wystarczająca z punktu widzenia jakości predykcji oraz kompletności odwzorowania analizowanego zjawiska. Podobne zastrzeżenie dotyczy liczby 10 000 próbek dla każdej z klas: Autor nie zamieścił analizy czy argumentacji, która wskazywałaby, że ten rozmiar próby jest optymalny bądź szczególnie uzasadniony ze statystycznego czy praktycznego punktu widzenia. Nie jest również jasne, czy informacja o łącznym rozmiarze zbioru danych (1,3 TB) niesie istotne znaczenie dla odbiorcy; nie wskazano bowiem, czy (tak) duża objętość danych przekłada się na wyższą jakość modelu, ani czy rozmiar ten miał znaczenie przy projektowaniu eksperymentów. Dalej, rycina 37. przedstawia przykładowy postępowanie wzorów dyfrakcyjnych w trzech wybranych klatkach sekwencji, określanych jako „kluczowe”, jednakże nie wyjaśniono, na jakiej podstawie zostały one do takowych zakwalifikowane. Brakuje również informacji na temat sposobu generowania tych symulowanych obrazów, czytelnik pozostaje bez wystarczającego wyjaśnienia, w jaki sposób maska symulacyjna pokrywa wiązkę lasera, ani jak wygląda proces modelowania zmian w czasie. W związku z powyższym, nieco niedostatecznie szczegółowe wyjaśnienia dotyczące konstrukcji zbioru danych w utrudniają zrozumienie procedury eksperymentalnej – zarówno w przypadku pierwszego, jak i drugiego zestawu danych. Warto jednak zaznaczyć, że zestaw danych pozyskanych z rzeczywistego systemu laserowego stanowi wartościową bazę referencyjną dla oceny jakości opracowanego modelu predykcji i może pełnić istotną rolę w dalszej walidacji podejścia zaproponowanego przez Doktoranta.

Kolejna część pracy poświęcona została zagadnieniu segmentacji prążków dyfrakcyjnych. Autor zdecydował się na zastosowanie rozwiązania opartego na sieciach neuronowych, jednak nie podał uzasadnienia stojącego za tym akurat wyborem. Warto zauważyć, że istnieje wiele klasycznych technik segmentacji; opartych na algorytmach deterministycznych, które również mogłyby zostać z powodzeniem wykorzystane

w analizowanym przypadku. Zastanawiający jest również brak wykorzystania operacji morfologicznych, które mogłyby istotnie poprawić jakość segmentacji obrazu, w szczególności w kontekście binaryzacji wirtualnego obrazu wiązki laserowej.

Po opisie procesu budowy zestawu danych, Autor przechodzi do przedstawienia wyników uzyskanych na etapie wstępnego przetwarzania danych. W recenzji celowo użyto słowa „uzyskanych”, ponieważ etap ten nie wnosi nowej wiedzy ani oryginalnych rozwiązań, a opiera się wyłącznie na standardowych technikach, takich jak skalowanie (scale-down), normalizacja oraz standaryzacja danych. Brak jest także szczegółowego opisu zastosowanych metod – nie wiadomo, jakie konkretne techniki zostały użyte ani według jakich parametrów. W świetle powyższego, nie wydaje się uzasadnione przedstawienie tabeli 6, która ilustruje, że zmniejszenie rozmiaru analizowanego obrazu przekłada się na krótszy czas obliczeń. Jest to wniosek oczywisty i nie wymagający dowodu. Co więcej, brak podania miary jakości (np. accuracy) uniemożliwia ocenę, czy zmniejszenie rozdzielczości nie wpłynęło negatywnie na skuteczność modelu. Pojawia się również stwierdzenie o „lepszej generalizacji modelu”, jednak nie zostało ono poparte żadnymi wynikami eksperymentalnymi, które mogłyby je uzasadnić.

W części pracy dotyczącej projektowanej architektury sieci neuronowej Autor przedstawia szczegółowy opis poszczególnych modeli sieciowych zastosowanych w badaniach. Niewątpliwie treść ta odzwierciedla aktualny, choć podstawowy stan wiedzy, i w ocenie recenzenta, powinna zostać raczej przeniesiona do części teoretycznej rozprawy. Analogicznie należałoby postąpić z podstawowym opisem funkcji aktywacji, aktualnie znajdującym się w części badawczej, który nie wnosi bezpośrednio nowej wiedzy, lecz stanowi przegląd stanu wiedzy. W części prezentacji wyników Autor nadużywa pojęć 'significant' oraz 'not significant' (tabela 14), nie wskazując jednak jednoznacznie, na jakiej podstawie dokonano kwalifikacji różnic jako istotnych lub nieistotnych. Co więcej, sposób narracji i interpretacji tych różnic jest niespójny, dla różnych przypadków przyjmuje różne kryteria, co utrudnia obiektywną ocenę wyników. Dodatkowe wątpliwości budzi tabela 15, w której przedstawiono uporządkowanie funkcji aktywacji od najlepszej do najgorszej, mimo wcześniejszego stwierdzenia, że różnice w dokładności generowania wyników są nieistotne. Brak uzasadnienia dla takiego uporządkowania osłabia przekaz i może sugerować arbitralność tej klasyfikacji. Na uwagę zasługuje natomiast, w opinii recenzenta, interesujące zestawienie wymagań obliczeniowych poszczególnych architektur w kontekście osiąganego dokładności (rys. 49) oraz liczby parametrów modelu; uważam, że jest to wartościowy element porównawczy.

Kolejnym wartym podkreślenia elementem rozprawy jest uwzględnienie w części badawczej zagadnienia wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (explainable AI). Autor podjął próbę wskazania, na podstawie jakich cech obrazu sieć neuronowa dokonuje przypisania danej wiązki laserowej do konkretnej klasy, a także które obszary obrazu mają największy wpływ na podejmowaną decyzję klasyfikacyjną (rys. 51). Takie podejście stanowi cenny wkład w kierunku zwiększenia transparentności działania modelu i może mieć istotne znaczenie w kontekście zastosowań przemysłowych. Jednocześnie szkoda, że przedstawione wyniki ograniczają się jedynie do jednej klasy, co znacząco zawęża możliwość oceny ogólności działania zastosowanej metody wyjaśniania. Rozszerzenie analizy o inne klasy pozwoliłoby lepiej zrozumieć, na ile spójnie i konsekwentnie model podejmuje decyzje w różnych przypadkach.

Ważnym aspektem rozprawy jest analiza zagadnienia oceny niepewności (uncertainty evaluation) w sieciach neuronowych. Autor przeprowadził taką analizę, opierając się na metodzie Monte Carlo Dropout, co stanowi uznane i często stosowane podejście do estymacji niepewności w modelach głębokiego uczenia. Niestety, podobnie jak w innych częściach pracy, Autor posługuje się niekiedy lakonicznymi sformułowaniami, takimi jak „easy to implement”, bez głębszego uzasadnienia wyboru metody czy odniesienia do alternatywnych rozwiązań. Zamiast przedstawić opis samego algorytmu, ogranicza się do wskazania użytej biblioteki (w tym przypadku PyTorch), co zdecydowanie obniża wartość poznawczą i metodyczną tej części pracy. Przeprowadzona analiza niepewności pozwoliła Autorowi na uzyskanie wyników związanych z czasem treningu różnych architektur sieci, przy uwzględnieniu zróżnicowanych funkcji aktywacji oraz dokładności predykcji. Jednakże również tutaj brakuje przekonującego uzasadnienia, dlaczego pewne różnice uznawane są za znaczące, a nie wskazano kryteriów statystycznych ani progów istotności; takie podejście osłabia siłę wniosków. W dalszej części Autor posługuje się zestawem metryk służących do oceny kalibracji i jakości probabilistycznych predykcji modelu. Wśród nich znalazły się: ECE (Expected Calibration Error) oraz aECE (adaptive ECE), które pozwalają na ocenę różnicy między pewnością predykcji a rzeczywistą skutecznością klasyfikacji. Zastosowano także metrykę BRIER score, określającą średni błąd kwadratowy pomiędzy przewidywanym prawdopodobieństwem a rzeczywistą etykietą klasy. NLL (Negative Log-Likelihood) posłużyła jako klasyczna miara jakości predykcji probabilistycznych, szczególnie przydatna w kontekście klasyfikacji. W analizie wykorzystano również wskaźnik AURC (Area Under the Risk-Coverage Curve), który mierzy zdolność modelu do oceny własnej niepewności i wspiera decyzje o odrzucaniu niskiej jakości predykcji. Ostatnią zastosowaną metryką była CoV@5Risk, która – choć obiecująca – nie została przez Doktoranta dokładnie opisana ani zinterpretowana, przez co jej znaczenie pozostaje nie do końca jasne dla czytelnika. Pomimo powyższych niedociągnięć, sam fakt uwzględnienia szerokiego zestawu metryk służących do oceny niepewności należy ocenić pozytywnie. Analiza ta stanowi dobrą podstawę do porównania różnych architektur sieci neuronowych pod kątem stabilności działania i jakości predykcji, choć wymaga pogłębienia i większej przejrzystości, by mogła być w pełni wartościowa z naukowego punktu widzenia.

Autor podjął próbę weryfikacji zastosowania sieci neuronowych do analizy trendów zmian w obrazach wiązki laserowej oraz klasyfikacji stanu lasera do zdefiniowanych klas diagnostycznych (a wyniki tej części pracy zostały opisane w rozdziale 7). Przeprowadzona analiza opiera się zarówno na danych symulacyjnych: sekwencjach obrazów uzyskanych w wyniku modelowania rozkładu wiązki laserowej w czasie, jak i na rzeczywistych danych pomiarowych, w postaci szeregów czasowych wartości parametru FWHM, reprezentujących jakość działania lasera. Tego rodzaju podejście należy uznać za interesujące, ponieważ umożliwia ocenę skuteczności rozpoznawania stanu lasera zarówno na podstawie sekwencji obrazów, jak i trendów zmian parametrów numerycznych. W pierwszym przypadku, tj. dla sekwencji obrazów, Autor zaproponował architektury sieci oparte na trójwymiarowych warstwach spłotowych, co trafnie odzwierciedla przestrzenno-czasowy charakter danych, czyli dwuwymiarowe obrazy analizowane w ujęciu czasowym. Podobnie jak w poprzednich częściach pracy, analiza została przeprowadzona na obrazach o zmniejszonej rozdzielczości. Niestety, dobrane wartości (s. 138) po raz kolejny nie zostały poparte w treści pracy stosowną

analizą, co utrudnia ocenę wpływu tego przeskalowania na jakość klasyfikacji. Autor przedstawił porównanie trzech architektur sieci neuronowych na podstawie czasu treningu oraz osiągniętej dokładności rozpoznawania. Wartością tej części pracy jest również refleksja nad ograniczeniami podejścia obrazowego w kontekście zastosowań praktycznych. Wskazano, że znaczący rozmiar danych oraz związane z tym koszty przechowywania i przetwarzania (np. konieczność zapewnienia odpowiedniej przestrzeni dyskowej) czynią to podejście mało efektywnym z punktu widzenia wdrożeniowego. Z tego powodu Autor zdecydował się ostatecznie zrezygnować z tej ścieżki na rzecz bardziej zoptymalizowanego podejścia.

W przypadku analizy szeregu czasowego parametru FWHM, reprezentującego właściwości lasera, Doktorant zdecydował się na przeprowadzenie analizy porównawczej przy użyciu frameworka AutoGluon [109], opracowanego przez firmę Amazon (s. 139). Spośród dostępnych w pakiecie modeli predykcyjnych wybrano cztery podejścia: AutoARIMA, Theta, Simple Feed Forward oraz DeepAR. W kolejnym kroku do porównania wpływu liczby neuronów pierwszej i drugiej warstwy ukrytej wytypowano jedynie dwa modele: Simple Feed Forward oraz model bazowy Naive. Decyzja ta nie została jednak adekwatnie uzasadniona; nie przedstawiono kryteriów, na podstawie których wyeliminowano pozostałe modele, ani nie zaprezentowano wyników porównania ich skuteczności. Brakuje także informacji, czy eliminacja AutoARIMA, Theta czy DeepAR wynikała z ich niskiej skuteczności, ograniczeń technicznych czy innych przesłanek metodologicznych. Tego rodzaju decyzje powinny być szczególnie transparentne, zwłaszcza że framework AutoGluon został przywołany właśnie w kontekście analizy porównawczej. Następnie Doktorant jednak powraca do analizy czterech modeli w kontekście eksperymentowania z oknem predykcji, dla której jako metrykę wykorzystano procentową miarę błędu MAPE. Autor prezentuje wykresy osiągające dla tych modeli różne charakterystyki MAPE dla tych samych horyzontów czasowych predykcji. Na wykresach brakuje opisu jednostki (h) dla osi poziomej, a oś pionowa ma różną skalę, co nie ułatwia analizy wzrokowej. Wydaje się także, że mając dane ilościowe prezentowana analiza jest mocno jakościowa i dotyczy bardzo zgrubnego przedziału szacowania zmian wskaźnika i patrząc na wykresy trudno je uznać za stabilne w dłuższym okresie; co najwyżej stabilny jest ich trend wzrostowy dla 3 z 4 modeli (a dla czwartego 100% MAPE trudno uznać za po prostu stabilny wynik – jest to raczej wskazówka co do całkowitej błędnej wartości szacowania w przypadku DeepAR). W konkluzji rozdziału jest wzmianka o tym, że są to wstępne wyniki, choć jednocześnie Autor deklaruje te wyniki jako fundament dalszych badań i jednocześnie najważniejszy krok w celu optymalizacji utrzymania predykcyjnego operacyjności urządzeń laserowych w firmie.

Ostatni fragment rozprawy dotyczący uzyskanych wyników dotyczy zbadania przez Doktoranta możliwości sieci typu UNet do segmentacji obrazów zniekształceń wywołanych przez dyfrakcję. W tym zakresie wykorzystano miarę IoT do porównania różnych kombinacji funkcji aktywacji i sieci UNet do segmentacji prążków dyfrakcyjnych oraz do segmentacji rekonstrukcji maski przesłony. Niestety, Autor nie wyjaśnił w tym rozdziale jaki wpływ uzyskane wyniki mają na realizację celów projektu, tj. jak wyniki te mogą zostać wykorzystane do automatycznej diagnostyki systemów laserowych i jakie mają powiązanie z pozostałymi elementami przedstawionymi w rozprawie.

W badaniach prowadzonych przez Doktoranta należy podkreślić systematyczne podejście do prac eksperymentalno-obliczeniowych, oparte na spójnej, zaproponowanej

metodyce, z wykorzystaniem odpowiedniego aparatu analitycznego oraz dobrze dobranych narzędzi pomiarowych i informatycznych. Warto zaznaczyć, że w przeprowadzonych eksperymentach Doktorant uwzględnił istotne aspekty wpływające na wiarygodność wyników, takie jak analiza niepewności, wpływ szumu pomiarowego, potencjalne błędy kalibracji, a także elementy wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (explainable AI). Zakres i sposób ujęcia tych zagadnień potwierdzają zarówno kompetencje techniczne Doktoranta, jak i jego trafność merytoryczną w doborze oraz realizacji celów badawczych.

Zaprezentowane w rozprawie szerokie, empiryczne przebadanie proponowanych konfiguracji w odniesieniu do szeregu wybranych przypadków stanowi, w mojej ocenie, solidną podstawę do dalszych prac eksperymentalnych, zarówno w kontekście przemysłowych systemów diagnostyki i monitoringu stanu urządzeń laserowych, jak i bardziej ogólnych scenariuszy predykcyjnego utrzymania ruchu, w których kluczowe znaczenie ma modelowanie niepewności oraz analiza jakości danych sensorycznych.

4) Analiza źródeł

Bibliografia z różnych dziedzin wiedzy związanych z rozprawą zawiera podstawowe pozycje dotyczące problematyki rozprawy doktorskiej. Literatura obejmuje listę 113 pozycji, w tym wydania książkowe, artykuły przeglądowe, badawcze – zarówno publikacje z uznanych wydawnictw i czasopism, jak i publikacje konferencyjne, czy publikacje techniczne i materiały edukacyjne udostępnione na stronach internetowych. Przeważają pozycje literatury dotyczące zakresu wizji komputerowej, optyki, sieci neuronowych w dużej mierze oparte na źródłach nie tylko naukowych, ale i popularnych, część listy stanowią także pozycje spoza głównego obszaru merytorycznego rozprawy prezentujące wykorzystanie omawianych metod w innych domenach. Co interesujące, w bibliografii zawarto wiele odwołań do artykułów znajdujących się w repozytorium online „arXiv” i to pomimo faktu, że nie są to pozycje najbardziej aktualne. Wydaje się, że artykuły takie jak np. z roku 2010 [112], 2013 [86], 2014[64], czy 2016[106] powinny być po ich umieszczeniu w bibliotece preprintów raczej szybko opublikowane w recenzowanym czasopiśmie; w innym przypadku można by domniemywać, że ich wartości naukowej nie potwierdzono w sposób uznany w społeczności akademickiej (w szczególności w drodze recenzji). Pojedyncze pozycje ze spisu bibliografii w ogóle trudno jest szybko zidentyfikować np. [93], albo są one cytowane za pomocą dodatkowych serwisów wyszukiwujących, co także nie ułatwia czytelnikowi szybkiej weryfikacji jakości takiej publikacji (np. poprzez serwis books.google.pl czy też semanticscholar.org). Spora część referencji prowadzi do serwisów internetowych, w tym komercyjnych, których wiarygodność trudno jest zweryfikować. Zdumiewający jest bardzo niski udział odwołań do publikacji z bazy IEEExplore (naliczyłem 3 pozycje literatury z tej bazy), która w tematyce związanej z techniczną stroną działania systemów optyki laserowej, diagnostyki przemysłowej i algorytmów przetwarzania danych jest z pewnością jednym z najbardziej aktualnych i szerokich źródeł informacji naukowej. Jeszcze skromniej prezentuje się lista odwołań do publikacji z informatycznej bazy ACM DL (jedno odwołanie). Nie przy wszystkich publikacjach internetowych, które zostały uwzględnione w spisie umieszczono datę ostatniego dostępu, co w przypadku ulotnych źródeł internetowych traktuję jako niedociągnięcie warsztatowe. W wykazie literatury nie odnalazłem niestety żadnej

pozycji, w której Autor rozprawy został wskazany jako współautor. Lista bibliografii została przygotowana dosyć czytelnie, choć przeważają pozycje nie najnowsze, a tak skromne uwzględnienie literatury (także konferencyjnej) publikowanej w ramach IEEE oraz ACM należy, w ocenie recenzenta, uznać za pewien niedostatek tej części rozprawy. Autor nie podał także odwołań do publikacji związanych bezpośrednio z rozprawą, a których jest współautorem, choć na stronie 162 wspomina o prezentacji konferencyjnej oraz publikacji w czasopiśmie.

5) Ocena strony redakcyjnej i wizualnej rozprawy

Rozprawa przedstawiona do recenzji została przygotowana z dużym naciskiem na przejrzystość, a jej forma drukowana ma postać książki w poręcznym formacie wydanej przez Politechnikę Warszawską w bardzo estetycznej postaci, co od razu pozytywnie nastawia czytelnika i zachęca do zapoznania się z zawartością. Sam układ treści jest nieco zbliżony do spotykanego czasami w systemie anglosaskim książkowo-raportowego stylu, który przejawia się tym, że przy kolejno wprowadzanych do użytku pojęciach i metodach następuje, często bardzo obszerne i szczegółowe, zapoznanie czytelnika z danym zagadnieniem. Taka prezentacja ma sporo zalet, ale w przeciwieństwie do bardziej tradycyjnego układu, gdzie zwykle w pierwszej części następuje wyczerpujący przegląd literatury oraz ewentualnie niezbędne do zapoznania się podstawy teoretyczne zastosowanego aparatu narzędziowego, stanowić to może także dodatkowe wyzwanie dla osób, które są bardziej zorientowane w szczegółach stosowanych przez Doktoranta technik, metod, algorytmów i architektur. Może to prowadzić do rozproszenia uwagi i, w mojej ocenie niejednokrotnie, utrudnia także wyłowienie faktycznego wkładu badawczego Autora z ciągłego tekstu rozprawy. Zrozumienie koncepcji prezentowanej przez Autora ułatwiają za to w większości dobrej jakości ilustracje, co prawda w tekście rozprawy mogłoby się ich znaleźć więcej, a niektóre z nich mogłyby być nieco szerzej skomentowane przez Doktoranta. Należy wskazać, że rozprawa zawiera szereg rycin i wykresów przedstawionych w załącznikach, ale nie zostały one w dostatecznym stopniu skomentowane w treści pracy. Trudny do uchwycenia jest czasami klucz do wyboru tych obrazów, które znalazły się w tekście głównym kosztem innych, które zostały w załączniku; ich wybiórczość i sposób prezentacji w połączeniu z brakiem uzasadnienia może postawić czytelnika w niepewności co do intencji narracyjnej Autora i co do znaczenia oraz wagi prezentowanych przez niego rezultatów pracy badawczej. Nie mniej jednak jakość większości zawartych w rozprawie ilustracji jest odpowiednia, dosłownie kilka mogłoby być lepiej oznaczonych (np. bardzo interesująca rycina Figure 28 – elementy stanowiska pomiarowe nie zostały niestety oznaczone na fotografii ani w podpisie; Figure 29, 38 ma nieco rozmazane opisy, Figure 36, 36 mają zdecydowanie zbyt małe opisy, itp.), a sama konwencja podpisów przygotowanych niebieską kursywą czcionki mniejszego rozmiaru też nie ułatwia ich czytania przez np. osoby krótkowzroczne. W kilku miejscach pojawiły się także błędy odwołań, najprawdopodobniej powstałe na etapie generowania pliku pdf (np. drugi akapit strona 73., czy wiersz 3., strona 146: *...and Figure 66Błąd!*).

Autor nie ustrzegł się także drobnych błędów formatowania, w szczególności w kilku miejscach kolejne pojedyncze zdania rozpoczynają się od wcięcia, a jednocześnie nie stanowią listy wypunktowanej (np. strony 144, 158, czy choćby formatowanie spisu ilustracji), ale pozostaje to bez większego negatywnego wpływu na czytelność i odbiór

całości tekstu. Całkiem dobrze, w tym kontekście, należy ocenić warstwę językową rozprawy, która została przygotowana w poprawnym, zrozumiałym dla docelowego czytelnika języku angielskim.

6) Oryginalność i przydatność rozprawy

W opinii recenzenta zarówno tematyka rozprawy, zastosowane metody badawcze, jak i uzyskane wyniki noszą cechy oryginalności. Warto w tym miejscu podkreślić, że brak dostępnych zbiorów danych obrazowych dotyczących diagnostyki systemów laserowych dodatkowo uwydatnia unikalny i oryginalny charakter przeprowadzonych badań oraz zasadność podjęcia się przez Doktoranta rozwiązania tego problemu w ramach rozprawy. Istotnym aspektem przeprowadzonych badań jest również ich użyteczny charakter. Poza zastosowaniem w systemach wykorzystywanych przez firmę współrealizującą badania, poruszony problem wpisuje się w szerszą klasę zagadnień z zakresu predykcyjnego utrzymania ruchu (*predictive maintenance*), spotykanych w wielu istotnych i praktycznych zastosowaniach przemysłowych – wszędzie tam, gdzie stosowane są systemy laserowe. Przykładem dalszego rozwoju i kolejnych zastosowań mogą być linie produkcyjne wykorzystujące lasery do cięcia i znakowania materiałów, w których stabilność parametrów wiązki ma kluczowe znaczenie dla jakości i powtarzalności procesu. Przygotowany przez Autora system chmurowy daje ponadto możliwość skalowania rozwiązania i jego integracji z bardziej złożonymi, rozproszonymi środowiskami przemysłowymi, w tym z systemami monitoringu predykcyjnego lub automatyki zakładowej.

7) Uwagi krytyczne i komentarze

Klasyfikując, pojęcie sztucznej inteligencji wydaje się być zwykle stosowane w literaturze w nieco innym kontekście niż ten, jaki czytelnik odbiera poprzez używane przez autora zarówno w tytule pracy, jak i jej treści określenie *artificial intelligence algorithms*. W tym kontekście budzi to pewne wątpliwości co do następujących kwestii:

- 1) Które z przedstawionych przez Autora rozwiązań dotyczą sztucznej inteligencji, a które mogą być raczej zaklasyfikowane jako rozwiązania z zakresu uczenia maszynowego?
- 2) Zagadnienia poruszane przez Autora dotyczą w dużej mierze klasycznych problemów z zakresu systemów wizji komputerowej. Choć zaproponowane przez niego metody, oparte na modelach uczenia maszynowego i sieciach neuronowych, bez wątpienia wpisują się w aktualne trendy i odpowiadają na potrzeby nowoczesnych rozwiązań informatycznych, warto przypomnieć, że przez długie lata podobne problemy były, nierzadko zaskakująco skutecznie, rozwiązywane przy wykorzystaniu klasycznych technik, takich jak segmentacja, binaryzacja, filtrowanie czy operacje morfologiczne. W tym kontekście rodzi się pytanie: co Autor sądzi o skuteczności tych tradycyjnych metod w odniesieniu do swojego problemu? Jakie byłoby ich znaczenie w porównaniu z podejściem opartym na sieciach neuronowych? I wreszcie – dlaczego nie zdecydował się ani na próbę ich zastosowania, ani nawet na przeprowadzenie analizy porównawczej? Pytania te wydają się zasadne także dlatego, że autor wspomina o fakcie ograniczonych zasobów obliczeniowych, z którym często mamy do czynienia w przemyśle, a być może niektóre klasyczne techniki mogłyby ten problem zupełnie ominąć w przeciwieństwie do

niektórych wysoce zasobochołonnych modeli uczenia maszynowego. Proszę o komentarz w tym aspekcie.

- 3) W treści rozprawy recenzent nie znalazł szczegółowej odpowiedzi na pytanie nasuwające się odnośnie do działania systemów rekomendacji, które autor wzmiankuje już w tytule rozprawy. Jak dokładnie autor wyobraża sobie działanie systemów rekomendacyjnych wskazanych w tytule rozprawy?

Inne komentarze nasuwające się po zapoznaniu z recenzowaną rozprawą są następujące:

- 4) Pomimo istotności faktu, jakim było uwzględnienie danych eksperymentalnych przy projektowaniu modelu wiązki laserowej, nie jest do końca jasne, jakie konkretne informacje pochodzące z rzeczywistych pomiarów stanowiły podstawę dla opracowanego modelu. Doktorant wskazał rozkład parametrów modelu (rys. 30 i 31), jednak nie wyjaśnił w sposób wystarczająco zrozumiały, w jaki sposób przedstawione tam dane odnoszą się do wartości empirycznych. Dodatkowym utrudnieniem w interpretacji jest brak skali liczbowej na rysunku 30, co ogranicza możliwość jednoznacznej oceny prezentowanych wartości. Niejasność pojawia się również w odniesieniu do użytego przez Doktoranta określenia „metrological analysis”. Nie wiadomo, jakiego rodzaju analiza metrologiczna została przeprowadzona, jakich konkretnie wielkości dotyczyła, ani które dane pomiarowe zostały nią objęte. W obecnej postaci pojęcie to pozostaje zbyt ogólne i wymaga doprecyzowania. Wątpliwości budzi również interpretacja przedstawionych histogramów (np. rys. 33 i 34), w których przedstawiono rozkłady parametrów modelu. Analizując te wykresy rodzi się pytanie, czy prezentowane parametry mogą w rzeczywistości, jak zasugerowano na wykresach, przyjmować wartości ułamkowe oraz czy taka postać danych znajduje swoje uzasadnienie w fizycznej interpretacji tych wielkości?
- 5) W prezentowanej analizie wymagań obliczeniowych (rycina 49) zabrakło wyjaśnienia sposobu wyznaczania wskaźnika MFLOP (milionów operacji zmiennoprzecinkowych) dla poszczególnych architektur sieci. Nie podano także, dla jakiej funkcji aktywacji uzyskano prezentowane wyniki, co nieco utrudnia ich jednoznaczną interpretację i porównanie.
- 6) Należy podkreślić, że uwzględnienie aspektu wyjaśnialności sztucznej inteligencji (explainable AI) w pracy badawczej Doktoranta zasługuje na uznanie i świadczy o dojrzałym podejściu do projektowania modeli uczenia maszynowego, szczególnie w kontekście ich potencjalnych zastosowań przemysłowych. Autor podjął próbę wskazania, na podstawie jakich cech obrazu sieć neuronowa dokonuje przypisania danej wiązki laserowej do konkretnej klasy, oraz które obszary obrazu miały kluczowy wpływ na podejmowaną decyzję klasyfikacyjną (rys. 51). Dodatkowo, bardzo ciekawym i wartościowym uzupełnieniem byłoby pokazanie, w szczególności w formie graficznej, które konkretne elementy/obszary obrazu miały decydujące znaczenie dla klasyfikacji dokonywanej przez algorytmy typu deep learning, co mogłoby w ocenie recenzenta, istotnie wzmocnić transparentność i zaufanie do działania zaproponowanego rozwiązania. Proszę o odniesienie się do decyzji o ograniczeniu tej analizy wyłącznie do jednej klasy. Czy przeprowadzono testy dla innych klas, a jeśli tak — dlaczego nie zostały one uwzględnione w treści rozprawy? W jaki sposób Autor ocenia ogólność i spójność mechanizmu podejmowania decyzji przez model w przypadku pozostałych klas? Czy planowane jest rozszerzenie tej analizy w przyszłych badaniach?

- 7) W rozprawie Autor wskazuje, że jednym z istotnych osiągnięć jego pracy jest wygenerowanie syntetycznego zbioru danych obrazów wiązek laserowych, przeznaczonych do celów diagnostycznych. Zbiór ten został określony jako unikatowy, a jego wartość dodatkowo uzasadniona brakiem podobnych danych w dostępnej literaturze ani w publicznych repozytoriach. Taki zasób faktycznie może stanowić cenny wkład w rozwój badań w tym obszarze, zwłaszcza w kontekście rozwoju metod uczenia maszynowego, które wymagają dużych ilości danych treningowych. W związku z tym, proszę o odniesienie się do kwestii dostępności opracowanego zbioru. Czy Autor rozważał udostępnienie zbioru środowisku naukowemu, np. w ramach publicznego repozytorium? Upublicznienie takiego zbioru mogłoby istotnie zwiększyć jego wartość oraz umożliwić porównywalność wyników przyszłych prac w tej dziedzinie.

8) Wnioski końcowe

Do istotnych osiągnięć Doktoranta można zaliczyć m.in.:

- 1) Opracowanie metodyki parametryzacji diagnostycznej wiązek laserowych z wykorzystaniem sieci neuronowych oraz algorytmów uczenia maszynowego, bazującej na analizie obrazów wiązki utrwalanych za pomocą matrycy CMOS.
- 2) Stworzenie metodyki modelowania syntetycznych, dużych zbiorów danych odpowiadających rzeczywistym danym pomiarowym wiązek laserowych, uwzględniającej charakterystyczne cechy fizyczne i diagnostyczne obserwowane w danych eksperymentalnych.
- 3) Przygotowanie szeregu parametrów (oraz wskazanie metod/technik/algorytmów/modeli, za pomocą jakich można je uzyskać w sposób wiarygodny) dotyczących diagnostyki wiązki laserowej w systemie przemysłowym stanowiących bardzo szeroki fundament monitorowania do wykorzystania w przemysłowym systemie automatyki predykcyjnego utrzymania ruchu.
- 4) Zaprojektowanie i implementację architektury pomiarowej wraz z protokołem transmisji danych, umożliwiającą przesył danych z systemu pracującego w środowisku IoT do chmury obliczeniowej, co pozwala nie tylko na zautomatyzowanie zdalnego monitorowania i diagnostyki profilu wiązki laserowej, ale i jego elastyczne skalowanie.

W ramach rozprawy Autor przeprowadził szereg eksperymentów symulacyjnych i obliczeniowych, a ich wyniki zaprezentował wraz z uzupełniającą je stosowną dyskusją teoretyczną pozytywnie weryfikując zaproponowane przez siebie podejście oraz wskazując poprzez analizę porównawczą konfiguracje sieci neuronowych i funkcji aktywacji, które osiągnęły najlepsze rezultaty dla wybranych typów zadań związanych z diagnostyką wiązki laserowej (segmentacja, klasyfikacja, analiza trendów, regresja). Zaproponowane przez Doktoranta podejście polegające na wykorzystaniu sieci neuronowych i uczenia maszynowego z wykorzystaniem danych syntetycznych pozwoliło przygotować bazę parametryczną do automatyzacji procesu monitorowania wiązki w okresie pracy systemu laserowego, co może znacząco podnieść efektywność eksploatacyjną wykorzystania takich urządzeń i procesów przemysłowych, w których są one stosowane. Co istotne, wyniki ewaluacji wskazują, że zaproponowana przez Doktoranta metodyka ma potencjał zastosowania także w innych, analogicznych problemach z zakresu diagnostyki

i predykcyjnego utrzymania ruchu. W mojej opinii stanowi to wartościowy i oryginalny wkład w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.

Przytoczone powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają wartości naukowej ocenianej pracy. Uważam, że praca zawiera wartościowy i oryginalny dorobek naukowy Doktoranta. Zakres i poziom uzyskanych wyników badawczych odpowiada ustawowym (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Dz. Ustaw z 2023 r. poz. 742) i zwyczajowym wymaganiom stawianym rozprawom przedkładanym do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Wnioskuje zatem do Wysokiej Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Autora, mgr inż. Daniela Mostowskiego do jej publicznej obrony.

