

prof. dr hab. inż. Rafał Scherer
Katedra Sztucznej Inteligencji
Wydział Informatyki i Sztucznej Inteligencji
Politechnika Częstochowska
al. Armii Krajowej 36
42-200 Częstochowa

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Michała Bukowskiego, pt.: Zastosowanie zaawansowanych metod sztucznej inteligencji do klasyfikacji stanu zużycia narzędzia na podstawie danych obrazowych i sygnałowych pozyskanych podczas obróbki płyty wiórowej.

Niniejszą recenzję opracowano zgodnie z uchwałą Uchwała Nr 13/ITT-2024/2025 Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie z dnia 10 marca 2025 r. Promotorem jest dra hab. inż. Jarosław Kurek, prof. SGGW.

1. Charakterystyka tematu, celu i tezy badawczej rozprawy

Diagnostyka procesów przemysłowych za pomocą sieci neuronowych jest ważna, ponieważ umożliwia wczesne wykrywanie usterek, anomalii oraz nieprawidłowości w działaniu skomplikowanych systemów technologicznych. Współczesne zakłady przemysłowe są wyposażone w wiele czujników i urządzeń pomiarowych, które generują ogromne ilości danych w czasie rzeczywistym. Tradycyjne metody analizy tych danych często okazują się niewystarczające ze względu na ich ograniczoną zdolność do identyfikacji nieliniowych zależności i wzorców ukrytych w danych. Sieci neuronowe, dzięki swojej zdolności do uczenia się złożonych relacji i adaptacji do zmiennych warunków, pozwalają na skuteczniejsze monitorowanie stanu maszyn, prognozowanie awarii i optymalizację procesów. Ich zastosowanie prowadzi do zwiększenia niezawodności i efektywności produkcji, ograniczenia kosztów związanych z przestojami oraz poprawy bezpieczeństwa pracy. Obecnie sieci neuronowe pozwalają na niemal dowolne analizowanie różnorodnych danych, a recenzowana rozprawa, chociaż dotyczy w większości wąskiego zagadnienia przemysłowego, proponuje metody, które mogą być prawie bezpośrednio zastosowane w innych procesach przemysłowych.

2. Zawartość rozprawy

Recenzowana praca mgr Michała Bukowskiego składa się z dziesięciu rozdziałów, lecz jej główną częścią jest cykl sześciu artykułów w czasopismach naukowych. Dokument liczy 179 stron.

Rozdziały 1 i 2 są bardzo krótkim wprowadzeniem do zagadnienia i przedstawieniem stanu wiedzy. Rozdział 3 to lista publikacji wchodzących w skład cyklu.

Rozdział 4 to cel pracy: stworzenie metod do klasyfikacji stanu narzędzia skrawającego na podstawie różnych danych, oraz sześć hipotez badawczych odpowiadających publikacjom z cyklu.

Rozdział 5 to oświadczenia podpisane przez współautorów o wkładzie w wyniki i publikacje.

Rozdział 6 to przedstawienie sylwetki i dorobku doktoranta. Doktorant opublikował aż 15 prac, a jego indeks Hirscha to 6.

Rozdział 7 i 8 to omówienie wyników prezentowanych w cyklu publikacji i wniosków z badań.

Dalej następuje Bibliografia składająca się z 20 pozycji, ale, oczywiście, jest to zestawienie na potrzeby dotychczasowej zawartości rozprawy, a główną zawartością rozprawy są kopie prac wchodzących w skład cyklu.

Praca 1, *Application of Siamese Networks to the Recognition of the Drill Wear State Based on Images of Drilled Holes* wydana została w czasopiśmie Sensors w 2020 roku prezentuje nowatorskie zastosowanie sieci neuronowych syjamskich (*Siamese*) do automatycznej oceny stanu zużycia wiertła w przemyśle drzewnym. Kluczowym problemem jest określenie momentu wymiany wiertła, aby uniknąć produkcji wadliwych mebli (np. otworów z uszkodzonymi krawędziami). W odróżnieniu od tradycyjnych metod, opartych na kosztownych czujnikach (pomiar sił skrawania, drgań), autorzy wykorzystują obrazy wywierconych otworów jako dane wejściowe, co radykalnie obniża koszty systemu. Główne innowacje zaproponowane w pracy to klasyfikacja trójstanowa zużycia narzędzi, celem była również minimalizacja błędów między klasami zielony i czerwony (błąd "czerwony -> zielony" powoduje wady produktu, a "zielony -> czerwony" niepotrzebną wymianę narzędzia). Nowatorskie jest zastosowanie architektury Siamese CNN do oceny zużycia narzędzi, która uczy się funkcji podobieństwa między obrazami (nie bezpośredniej klasyfikacji) oraz wykorzystuje funkcję straty kontrastowej (*contrastive loss*), która celowo rozdziela reprezentacje klas krytycznych. Praca dowodzi, że sieć Siamese z funkcją kontrastową rozwiązuje ważny problem przemysłowy, gwarantując przy tym minimalizację kosztownych błędów klasyfikacji. Stanowi duży postęp w monitorowaniu stanu narzędzi (Tool Condition Monitoring), łącząc wysoką dokładność z ekonomicznym wdrożeniem. Zaletami praktycznymi są niskie koszty (kamera jako sensor) oraz możliwość łatwej adaptacji do nowych warunków poprzez mechanizm transfer learning.

Praca 2, *Decision Confidence Assessment in Multi-Class Classification* wydana w czasopiśmie Sensors w 2021 roku, prezentuje nowe podejście do oceny pewności decyzji w klasyfikacji wieloklasowej, z zastosowaniem w monitorowaniu zużycia wiertła (tool condition monitoring) podczas wiercenia w płycie wiórowej laminowanej. Głównym celem jest redukcja pracy ekspertów poprzez automatyczne identyfikowanie próbek, dla których klasyfikacja jest niepewna; te trafiają do ręcznej weryfikacji, podczas gdy pozostałe są automatycznie klasyfikowane. Wykorzystano 8526 obrazów otworów wierconych przez wiertła o różnym

stopniu zużycia, podzielonych na 3 klasy: nowe wiertło, umiarkowane zużycie oraz znaczne zużycie. Obrazy przetworzono do skali szarości i znormalizowano do rozmiaru 256×256 pikseli. Do estymacji prawdopodobieństw przynależności do klas wykorzystano metodę Light Gradient Boosting Machine. Użyto cztery funkcje mierzące pewność decyzji na podstawie rozkładu prawdopodobieństw: Shannona, współczynnik Giniego, mierząca odległość od wektora jednostkowego oraz odległość euklidesową. Próbkę o niskiej pewności są oznaczane jako nieokreślone i kierowane do eksperta co daje dobry kompromis między dokładnością procesu, a odsetkiem próbek klasyfikowanych automatycznie. Zaproponowane podejście zmniejsza obciążenie ekspertów i redukuje kosztowne błędy klasyfikacji. Chociaż metodę przetestowano w kontekście zużycia wiertła, autorzy podkreślają jej przydatność w innych dziedzinach wymagających weryfikacji eksperckiej (np. diagnostyka medyczna).

Praca 3 *Improved efficient capsule network for Kuzushiji-MNIST benchmark dataset classification* wydana w czasopiśmie Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences w 2023 roku proponuje ulepszenie modelu CapsNet do klasyfikacji znaków japońskiego pisma historycznego (Kuzushiji) w zestawach danych Kuzushiji-MNIST (10 klas) i Kuzushiji-49 (49 klas). Głównym celem było osiągnięcie wysokiej dokładności przy znacznym ograniczeniu liczby parametrów i czasu uczenia, umożliwiając trening na standardowym sprzęcie. Użyto zmodyfikowanej wersji Efficient CapsNet z mechanizmem samouwagi (self-attention) jako metodą routingu, co zastąpiło oryginalny, obliczeniowo kosztowny routing dynamiczny. Zwiększono liczbę warstw konwolucyjnych do 6 oraz rozmiaru kapsuł w warstwie pierwotnej (8D dla K-MNIST, 10D dla K-49). Modyfikacja modelu Efficient CapsNet z routingiem opartym na samouwadze potwierdza potencjał sieci kapsułowych jako wydajniejszej alternatywy dla CNN. Model oferuje kompromis między efektywnością a jakością, co pozwala zastosować takie rozwiązanie w systemach embedded lub przetwarzaniu na brzegu (*edge computing*).

Praca 4 *Multiple input CNN architecture for tool state recognition in the milling process based on time series signals* wydana w czasopiśmie Operations Research and Decisions w 2024 roku, prezentuje wielowarstwową architekturę CNN z 11 równoległymi wejściami do klasyfikacji stanu narzędzi podczas frezowania płyty wiórowej. Kluczowa innowacja polega na połączeniu przetwarzania sygnałów sensorycznych (siły X/Y, emisja akustyczna, dźwięk, drgania, parametry elektryczne), konwersji na skalogramy z wykorzystaniem ciągłej transformaty falkowej (CWT) z filtrem Morse'a, sieci CNN zaprojektowanej do fuzji multimodalnych danych.

Praca 5 *A Novel Approach using Vision Transformers (ViT) for Classification of Holes Drilled in Melamine Faced Chipboard* wydana w czasopiśmie Przegląd Elektrotechniczny w 2024 roku, omawia badania oceniające skuteczność różnych architektur neuronowych, w szczególności Vision Transformers, w klasyfikacji stanu zużycia wiertła na podstawie obrazów otworów wierconych w płycie wiórowej pokrytej melaminą (MFC). Wyniki badań pozwalają monitorować stan narzędzi, co bezpośrednio przekłada się na jakość produktu i redukcję kosztów. Autorzy przeprowadzili kompleksową ewaluację, porównując: klasyczne modele

CNN, modele transferowego uczenia: VGG19, VGG16, zespół modeli, Vision Transformers. Wykorzystano zbiór obrazów otworów wykonanych pięcioma różnymi wiertłami na standardowej płycie MFC przy użyciu obrabiarki CNC. Każdy otwór przypisano do jednej z trzech klas zużycia wiertła. Zastosowano augmentację danych w celu zbalansowania liczebności klas. Wyniki oczywiście potwierdziły przewagę architektury ViT nad tradycyjnymi CNN oraz ich zespołami w tym konkretnym zadaniu klasyfikacji obrazu. Autorzy wykazali, że klasyfikacja stanu wiertła wyłącznie na podstawie obrazu otworu jest możliwa i osiąga konkurencyjną dokładność.

Praca 6, *Custom Loss Functions in XGBoost Algorithm for Enhanced Critical Error Mitigation in Drill-Wear Analysis of Melamine-Faced Chipboard* wydana w czasopiśmie *Sensors* w 2024 roku, proponuje niestandardowe funkcje straty w algorytmie XGBoost, zaprojektowane do minimalizacji błędów krytycznych w analizie zużycia wiertła podczas wiercenia w laminowanej płycie wiórowej (powszechnie stosowanej w meblarstwie). Głównym problemem jest precyzyjne rozróżnienie trzech stanów wiertła: wiertło ostre, stan przejściowy oraz wiertło zużyte, wymagające natychmiastowej wymiany. Zaproponowane niestandardowe funkcje straty: różne warianty Weighted Softmax Loss, które różnicują kary za błędy między klasami (np. wyższa waga dla błędów zielony-czerwony), funkcja z karą dla klas skrajnych (*Edge Penalty*), która dodatkowo penalizuje błędy w klasach "zielony" i "czerwony", funkcja adaptacyjna (*Adaptive Weighted Softmax*), dynamicznie dostosowująca wagi do trudności klasyfikacji klas, wykorzystując mechanizm *focal loss*. Badania miały na celu minimalizację błędów krytycznych (mylenie klas zielony-czerwony), które generują największe straty finansowe (np. użycie zużytego wiertła lub niepotrzebna wymiana sprawnego). Modyfikacje skupiały się wyłącznie na funkcji straty, bez strojenia hiperparametrów lub selekcji cech. Dane pochodziły z 8526 obrazów otworów z 5 wiertel (3780 – zielone, 2800 – żółte, 1946 – czerwone).

3. Ocena rozprawy

W ramach rozprawy doktorskiej Pan mgr Michał Bukowski zaproponował oryginalne rozwiązanie pozwalające na monitorowanie stanu narzędzi. Tematyka pracy jest bardzo aktualna i potrzebna, oryginalny dorobek autora polega na:

1. opracowaniu metod klasyfikacji stopnia zużycia narzędzi z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego na podstawie obrazów i sygnałów z różnych czujników,
2. zastosowaniu nowoczesnych architektur sieci neuronowych do analizy stanów narzędzia wprost z obrazu RGB to znacząco zmniejsza koszty,
3. wykorzystaniu sieci splotowych do przetwarzania danych zamienionych na obrazów skalogramów,
4. zastosowaniu metod transfer learning do usprawnienia działania modeli działających w oparciu o obrazy,

5. stworzeniu nowych metod oceny pewności decyzji,
6. zbadaniu niestandardowych funkcji straty dla algorytmu XGBoost, umożliwiających eliminację problemu nierównowagi klas.

Rozprawa doktorska uwidacznia wysoką ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowej mgr Michała Bukowskiego. Opracował wprowadzenie do tematyki i szczegółowy i metodyczny przegląd literatury na temat metod monitorowania stanu narzędzi i klasyfikacji obrazu. Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaproponowane metody mają duże znaczenie dla nauk technicznych oraz społeczeństwa, zarówno teoretyczne, jak i aplikacyjne.

Niezależnie od mojej dobrej oceny pracy, nasunęły mi się pytania i uwagi:

- Nie zawsze jest podane, dlaczego użyto takich meta parametrów struktur sieci neuronowych. Dobrze byłoby pokazać wyniki badań, które doprowadziły do użycia konkretnej (w założeniu optymalnej) architektury sieci.
- Rozprawa łączy heterogeniczne zagadnienia (od klasyfikacji obrazów po analizę sygnałów czasowych), co utrudnia stworzenie spójnego frameworka wdrożeniowego.
- Badania w pracy 4 przeprowadzono na zbiorze posiadającym tylko 75 próbek (25 na klasę) dla 11 sygnałów, co może generować ryzyko przeuczenia, szczególnie przy ogromnym modelu (269.2M parametrów).
- Żaden artykuł nie udostępnia kodu ani danych, uniemożliwiając reprodukcję wyników.
- W pracy 1 we wzorze (1) powinno być chyba „then”.

4. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska *Zastosowanie zaawansowanych metod sztucznej inteligencji do klasyfikacji stanu zużycia narzędzia na podstawie danych obrazowych i sygnałowych pozyskanych podczas obróbki płyty wiórowej* prezentuje oryginalne rezultaty stanowiące rozwiązanie problemu naukowego oraz wkład w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Pan Michał Bukowski wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i wiedzą w zakresie uczenia maszynowego, wizji komputerowej i przetwarzania sygnałów. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata. Recenzowana praca spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.), w dyscyplinie naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA
KATEDRA SZTUCZNEJ INTELIGENCJI
12-202 Częstochowa, Al. Armii Krajowej 36
tel. 34 325 05 46, 34 325 05 53

2-WIŚI - WSI. 52. 2025

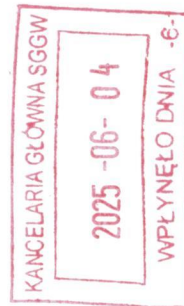
OPLATA POBRANA
TAXE PERÇUE - POLOGNE
Umowa z Poczta Polska S.A. ID 552858/S
z dnia 20.06.2024r.



PRIORYTET

priority

Szanowna Pani
mgr Monika Hertel-Świerad
Instytut Informatyki Technicznej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 159, bud. 34, pok. 3.28A,
02-776 Warszawa



RPU/14905/2025 N
Data: 2025-06-04