dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk
Instytut Telekomunikacji
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
mikolaj.leszczuk@agh.edu.pl

Kraków, dn. 31 października 2023 r.

# RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
# mgr inż. Pawła Beneckiego
# „Rekonstrukcja nadrozdzielcza obrazów cyfrowych z wykorzystaniem głębokich konwolucyjnych sieci neuronowych"
# „Super-resolution of digital images using deep convolutional neural networks"
# Promotor: dr hab. inż. Michał Kawulok, prof. PŚ
# Promotor pomocniczy: dr inż. Daniel Kostrzewa
# Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
# Politechnika Śląska
# Dziedzina: Nauki Techniczne
# Dyscyplina: Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

## Problem badawczy objęty zakresem rozprawy

Rozprawa doktorska zatytułowana „Rekonstrukcja nadrozdzielcza obrazów cyfrowych z wykorzystaniem głębokich konwolucyjnych sieci neuronowych", autorstwa mgr inż. Pawła Beneckiego, skupia się na problemie poprawy jakości obrazów cyfrowych o niższej rozdzielczości, co ma kluczowe znaczenie w wielu dziedzinach nauki i techniki. Głównym celem pracy jest rozwinięcie i ulepszenie metod wieloobrazowej rekonstrukcji nadrozdzielczej (ang. *Multi-Image Super-Resolution*, MISR), które korzystają w tym celu z głębokich sieci neuronowych.

Praca podejmuje ważne wyzwanie związane z połączeniem tradycyjnych technik MISR z nowoczesnymi metodami rekonstrukcji opartymi na głębokim uczeniu. Problem ten jest istotny i aktualny, biorąc pod uwagę szybki rozwój technologii obrazowania i stale rosnące wymagania dotyczące jakości rekonstrukcji obrazów w różnych dziedzinach zastosowań. Autor konsekwentnie dąży do poprawy jakości rekonstrukcji obrazów satelitarnych, co ma zarówno teoretyczne, jak i praktyczne implikacje dla wielu dyscyplin naukowych i branż przemysłowych. Praca wprowadza nowe podejście do oceny jakości obrazów, biorąc pod uwagę detekcję punktów charakterystycznych obrazu, co pozwala na dokładniejsze odzwierciedlenie różnic szczegółów między obrazami. Jest to istotny wkład w dziedzinę oceny jakości obrazów, który może przyczynić się do lepszego zrozumienia i doskonalenia procesów rekonstrukcji obrazów.

Rozprawa stanowi ważny krok naprzód w dziedzinie przetwarzania obrazów, dostarczając nowych metod i narzędzi, które mogą być wykorzystane do poprawy jakości rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych. Problem badawczy jest jasno określony, a podejście autora do jego rozwiązania jest nowatorskie i oparte na solidnych fundamentach teoretycznych.
Jednakże, choć praca przedstawia cenne wyniki i wnioski, recenzent zauważa, że mogłoby być przydatne dokładniejsze umiejscowienie problemu badawczego w szerszym kontekście istniejących prac i badań w dziedzinie rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych. Wskazanie na relacje między opracowanymi metodami a innymi podejściami stosowanymi w tej dziedzinie mogłoby pomóc czytelnikom w lepszym zrozumieniu unikalności i wartości pracy mgr inż. Pawła Beneckiego.

## Ocena organizacji rozprawy

Rozprawa doktorska, której dotyczy recenzja, wydaje się być dobrze zorganizowana i strukturalnie spójna. Autor podjął się opracowania tematu z zakresu rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych, łącząc w swojej pracy metody klasyczne z nowoczesnymi technikami opartymi na sieciach głębokich.

1. Wstęp:
   Rozdział ten skupia się na przedstawieniu tła problemu badawczego, celów pracy, tez, a także struktury całej rozprawy. Jest to istotne dla czytelnika, aby zrozumieć kontekst i znaczenie przeprowadzonych badań. Autorowi udało się jasno i precyzyjnie przedstawić te kwestie, co jest zgodne z dobrymi praktykami pisania prac naukowych.
2. Przegląd literatury:
   Rozdział ten zawiera obszerny przegląd literatury, który jest podzielony na kilka podrozdziałów tematycznych. Takie podejście ułatwia orientację w zawartości i pozwala na szybkie znalezienie interesujących fragmentów. Autor dokładnie przeanalizował istniejące metody, miary jakości obrazów, jak również dostępne zbiory danych, co świadczy o gruntownym przygotowaniu teoretycznym.
3. Opracowane metody:
   Rozdział ten prezentuje opracowane przez autora metody, co jest kluczowym elementem pracy doktorskiej. Znajdują się tu szczegółowe opisy metod, schematy i wzory matematyczne, co pozwala na pełne zrozumienie proponowanych rozwiązań. Jest to bardzo ważne dla oceny wartości naukowej pracy.
4. Walidacja eksperymentalna:
   W tym rozdziale autor przeprowadza eksperymentalną walidację swoich metod, korzystając z różnych zbiorów danych i scenariuszy testowych. Prezentacja wyników w formie tabel, rysunków oraz dyskusja uzyskanych rezultatów świadczy o starannym podejściu do procesu weryfikacji opracowanych metod.
5. Podsumowanie i możliwe kierunki dalszych badań:
   Ostatni rozdział skupia się na podsumowaniu całej pracy, wyciągnięciu wniosków oraz zaproponowaniu możliwych kierunków dalszych badań. Jest to ważne dla zamknięcia tematu rozprawy oraz wskazania, jak praca może wpłynąć na dalszy rozwój dziedziny.

Spisy treści, rysunków i tabel są kompleksowe i dobrze zorganizowane, co ułatwia nawigację po dokumencie i wyszukiwanie konkretnych informacji.
Podsumowując, organizacja rozprawy jest na wysokim poziomie. Autor zadbał o logiczną strukturę pracy, jasne i precyzyjne przedstawienie celów, metod oraz wyników badań. Całość jest spójna i stanowi wartościowy wkład w rozwój dziedziny rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych.

## Tezy rozprawy

W rozprawie doktorskiej, autor stawia dwa kluczowe twierdzenia, których przedmiotem jest analiza rozwoju metod rekonstrukcji nadrozdzielczej wieloobrazowej. Poniżej przedstawiono ocenę i analizę tych tez, na podstawie zaprezentowanej w pracy treści.

### Teza 1 (T1)

Teza pierwsza dotyczy synergii pomiędzy klasycznymi metodami wieloobrazowej rekonstrukcji nadrozdzielczej a nowoczesnymi technikami jednoobrazowymi opartymi na głębokich splotowych sieciach neuronowych. Autor postuluje, że takie połączenie umożliwia uzyskanie wyników lepszej jakości niż przy zastosowaniu każdej z tych metod oddzielnie. Oceniając tę tezę, warto zwrócić uwagę na to, że jest ona poparta solidnymi eksperymentami i badaniami. Autor nie tylko przytacza wyniki badań numerycznych, ale również konsultuje się z ludźmi, którzy jako obserwatorzy oceniali jakość otrzymanych wyników. Jest to podejście kompleksowe i godne uznania, gdyż łączy ono obiektywną analizę danych z subiektywną oceną jakości. Tym samym teza ta wydaje się być dobrze uzasadniona i poparta odpowiednimi dowodami.

### Teza 2 (T2)

Teza druga koncentruje się na użyciu głębokich splotowych sieci neuronowych w procesie wieloobrazowej rekonstrukcji nadrozdzielczej obrazów satelitarnych. Autor sugeruje, że możliwe jest uzyskanie poprawy wyników dzięki zastosowaniu metryki opartej na cechach głębokich do wykrywania punktów charakterystycznych w obrazach. Oceniając tę tezę, należy zauważyć, że autor przeprowadził obszerne badania, włączając w to eksperymenty na danych satelitarnych oraz analizę numeryczną wyników. Co istotne, proponowana przez autora metryka opiera się na nowoczesnych metodach analizy obrazu, co dodaje wartości do całości pracy. Teza ta również wydaje się poparta konkretnymi danymi i eksperymentami, co świadczy o rzetelności prowadzonych badań.

### Podsumowanie

Podsumowując, autor rozprawy doktorskiej wykazał się gruntownym podejściem do problematyki rekonstrukcji nadrozdzielczej obrazów satelitarnych, łącząc klasyczne metody z nowoczesnymi technikami opartymi na głębokim uczeniu. Tezy postawione w pracy są dobrze uzasadnione i poparte odpowiednimi badaniami, co sprawia, że recenzowana rozprawa stanowi solidny wkład w rozwój tej dziedziny nauki.

## Analiza źródeł (w tym literatury światowej i stanu techniki)

W omawianej pracy doktorskiej, autor skupia się na tematyce super-rozdzielczości (SR) i metodach wieloobrazowych (MISR). W rozdziale 2 autor przedstawił gruntowny przegląd literatury, starając się uchwycić zarówno obecne trendy, jak i klasyczne podejścia w tej dziedzinie. Różnorodność źródeł i podejść pozwala na pełniejsze zrozumienie tematu, co jest zdecydowanym atutem pracy.

Autor szczegółowo opisuje istniejące metody SR, co pozwala na zrozumienie ich mocnych i słabych stron. To istotne, zwłaszcza że w dalszej części pracy autor opiera się na tych metodach, aby zbudować swoje własne, innowacyjne podejścia MISR. Prezentacja różnych metod i podkreślenie ich znaczenia dla rozwoju dziedziny stanowi solidną bazę dla dalszych rozważań i eksperymentów.

Zwrócenie uwagi na metryki oceny jakości obrazów jest równie ważne. Autor poświęca sporo miejsca na omówienie zalet i wad różnych metryk, co jest kluczowe dla zrozumienia, jak skutecznie oceniać wyniki metody SR. Wprowadzenie tej perspektywy świadczy o

gruntownym podejściu do tematu i pomaga czytelnikowi zrozumieć, na co należy zwrócić uwagę przy ocenie wyników.
Rozdział poświęcony zbiorom danych jest cennym dodatkiem, który pozwala na lepsze zrozumienie, jakie dane są używane w badaniach i jak mogą wpływać na wyniki. Prezentacja konkretnych zbiorów danych oraz omówienie ich zastosowań daje czytelnikowi jasny obraz tego, jakie są standardy w badaniach nad SR i MISR.
Reasumując, rozdział 2. dotyczący przeglądu literatury w omawianej rozprawie doktorskiej jest dobrze napisany, kompleksowy i pokazuje, że autor ma głęboką wiedzę na temat SR i MISR. Analiza różnych aspektów tematu, jak metody, metryki jakości obrazu i dane wejściowe, tworzy solidną bazę dla dalszych badań, co jest zdecydowanie mocną stroną tej pracy.

## Poprawność pracy

Pod względem formalnym i merytorycznym rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Beneckiego prezentuje wysoki poziom. Autor wykazał się gruntowną znajomością literatury przedmiotu oraz umiejętnością analizy i syntezowania zgromadzonej wiedzy. Struktura pracy jest logiczna i spójna, co ułatwia zrozumienie prezentowanych treści.
W pracy zawarto obszerny opis technologii rekonstrukcji nadrozdzielczej obrazów cyfrowych, z szczególnym uwzględnieniem technik opartych na głębokich sieciach konwolucyjnych. Autor skupił się na integracji metod oceny podobieństwa obrazów opartych na punktach charakterystycznych oraz metod MISR opartych na głębokich sieciach neuronowych, co stanowi obiecujący kierunek w dziedzinie SR.
Praca wykazuje się spójnością metodyczną. Eksperymenty zostały przeprowadzone w sposób przemyślany, a wyniki zostały dokładnie przeanalizowane i trafnie zinterpretowane. Autor zwrócił uwagę na istotne aspekty problemu, takie jak niespójność klasycznych metod oceny jakości wyników z ocenami obserwatorów podczas rekonstrukcji rzeczywistych obrazów satelitarnych. W odpowiedzi na to wyzwanie, mgr inż. Paweł Benecki zaprojektował nowe podejście do oceny jakości obrazów, co stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny.
Jednakże praca mogłaby skorzystać na bardziej szczegółowym opisie założeń i ograniczeń przyjętych metod, a także na dokładniejszym przedstawieniu potencjalnych kierunków dalszych badań. Chociaż wyniki eksperymentów są obiecujące, to jednak warto byłoby zastanowić się nad większą ilością przypadków testowych, co pozwoliłoby na bardziej wszechstronną ocenę skuteczności opracowanych metod.
Podsumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Beneckiego stanowi wartościowy wkład w dziedzinę przetwarzania obrazów cyfrowych, a zwłaszcza w obszar rekonstrukcji nadrozdzielczej obrazów. Praca charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym, jest dobrze napisana i zorganizowana, co sprawia, że jest to solidne opracowanie naukowe.

## Oryginalne wyniki rozprawy i ich znaczenie dla dyscypliny naukowej

Rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Pawła Beneckiego stanowi znaczący wkład w dziedzinę rekonstrukcji obrazów o wysokiej rozdzielczości, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w teledetekcji i analizie obrazów satelitarnych. Autor skupił się na użyciu metod głębokiego uczenia do rozwiązania problemu SR, co jest wyjątkowo istotne w kontekście rosnących wymagań dotyczących jakości obrazu w wielu zastosowaniach naukowych i przemysłowych.
Praca mgra inż. Pawła Beneckiego wyróżnia się na tle innych badań w tej dziedzinie kilkoma aspektami. Po pierwsze, autor z sukcesem zastosował metody głębokiego uczenia do problemu rekonstrukcji obrazów satelitarnych, co jest stosunkowo nowym kierunkiem badań

w tej dziedzinie. Po drugie, praca ta wyróżnia się bogatym zestawem eksperymentów walidujących proponowane metody, co pozwala na pełne zrozumienie ich możliwości i ograniczeń.
Publikacje zawarte w rozprawie są odzwierciedleniem wysokiej jakości pracy badawczej prowadzonej przez autora. Artykuły zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach i na konferencjach, co potwierdza uznaniem międzynarodowej społeczności naukowej. Przykładowo, artykuł pt. „Deep learning for multiple-image super-resolution" opublikowany w IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, jest jednym z najważniejszych osiągnięć zawartych w rozprawie, zdobywając 83 cytowania i 140 punktów MEiN. Współautorstwo w innych publikacjach również świadczy o umiejętności współpracy naukowej i zdolnościach badawczych autora.
Wpływ pracy mgr inż. Pawła Beneckiego na dyscyplinę naukową można ocenić jako znaczący. Jego badania przyczyniają się do rozwoju metod SR, co ma bezpośrednie zastosowanie w analizie obrazów satelitarnych, a także może znaleźć zastosowanie w innych dziedzinach, takich jak medycyna, bezpieczeństwo narodowe czy monitorowanie środowiska. W kontekście rosnącej roli danych satelitarnych i obrazowania w różnych dziedzinach nauki i przemysłu, praca ta stanowi istotny krok naprzód w rozwoju metod analizy tych danych.
Podsumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Beneckiego jest istotnym wkładem w dziedzinę rekonstrukcji obrazów o wysokiej rozdzielczości, z szczególnym uwzględnieniem obrazów satelitarnych. Praca ta, przez kombinację teoretycznych podstaw, eksperymentów i analizy wyników, przyczynia się do rozwoju wiedzy naukowej i może mieć znaczący wpływ na przyszłe badania i zastosowania praktyczne w tej dziedzinie.

## Poziom edycyjny rozprawy

Poziom edycyjny przedstawionej rozprawy doktorskiej świadczy o dużym zaangażowaniu oraz staranności autora podczas procesu przygotowania pracy.
Tekst rozprawy charakteryzuje się wysokim poziomem redakcyjnym, jest dobrze zorganizowany, a poszczególne części są logicznie powiązane i konsekwentnie rozwijają temat badawczy. Autor z powodzeniem prezentuje zarówno teoretyczne podstawy rekonstrukcji nadrozdzielczej obrazów cyfrowych, jak i praktyczne aspekty wdrożenia i optymalizacji stosowanych metod. Warto zauważyć, że praca zawiera bogaty zestaw literatury, co świadczy o dokładnym przygotowaniu teoretycznym oraz umiejętności analizy i syntezowania informacji z różnych źródeł.
Strona językowa rozprawy stoi na wysokim poziomie, tekst jest spójny, klarowny i dobrze napisany. Autor posługuje się precyzyjnym, naukowym językiem, co przyczynia się do zwiększenia wartości merytorycznej pracy.
Szata graficzna rozprawy jest estetyczna, a ilustracje i wykresy są wysokiej jakości, co ułatwia zrozumienie przedstawianych treści. Autor zadbał o czytelność i estetykę zarówno tekstu, jak i elementów graficznych, co pozytywnie wpływa na ogólną ocenę poziomu edycyjnego pracy.
Pomimo wielu zalet, zauważono niewielkie niedociągnięcia edycyjne, takie jak sporadyczne literówki czy drobne błędy interpunkcyjne. Niemniej jednak, są to pojedyncze przypadki, które nie wpływają znacząco na odbiór całości pracy.
Podsumowując, poziom edycyjny rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Beneckiego jest bardzo wysoki. Praca charakteryzuje się starannością wykonania, precyzją językową oraz estetyką prezentacji, co sprawia, że jest to praca godna polecenia i stanowi cenny wkład w rozwój nauki w dziedzinie przetwarzania obrazów cyfrowych.

## Podsumowanie wad i słabych stron rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Beneckiego na temat rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych stanowi cenny wkład w dziedzinę, lecz posiada również pewne słabości, o których warto byłoby wspomnieć.

Po pierwsze, praca mogłaby skorzystać na dokładniejszym umiejscowieniu problemu badawczego w szerszym kontekście istniejących prac i badań w dziedzinie rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych. Choć praca przedstawia wartościowe wyniki, to jednak wskazanie relacji między opracowanymi metodami a innymi podejściami stosowanymi w tej dziedzinie mogłoby przyczynić się do lepszego zrozumienia unikalności i wartości pracy autorstwa mgr inż. Pawła Beneckiego. Czytelnicy zyskaliby dodatkowe informacje na temat tego, jak praca wpisuje się w aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie, co jest kluczowe dla oceny jej wartości naukowej.

Po drugie, praca mogłaby być uzupełniona o bardziej szczegółowy opis założeń i ograniczeń przyjętych metod, co pozwoliłoby na pełniejsze zrozumienie ich potencjału i ograniczeń. Również dokładniejsze przedstawienie potencjalnych kierunków dalszych badań pozwoliłoby na lepsze zrozumienie, jakie są możliwości rozwoju przedstawionych rozwiązań.

Po trzecie, choć są to jedynie drobne niedociągnięcia, recenzent zauważył sporadyczne literówki oraz błędy interpunkcyjne, które mogłyby zostać poprawione w celu zwiększenia precyzji i czytelności tekstu. Są to pojedyncze przypadki, ale ich wyeliminowanie przyczyniłoby się do poprawy ogólnego wrażenia z czytania pracy.

W podsumowaniu, choć praca mgr inż. Pawła Beneckiego wnosi istotny wkład w dziedzinę rekonstrukcji obrazów nadrozdzielczych i prezentuje cenne wyniki, to jednak istnieją obszary, w których praca mogłaby zostać ulepszona. Dokładniejsze umiejscowienie problemu badawczego w kontekście istniejących prac, szczegółowy opis założeń i ograniczeń metod, a także usunięcie drobnych błędów edycyjnych zwiększyłyby wartość naukową pracy i jej przydatność dla czytelników.

## Końcowe wnioski recenzji (konkluzja)

Pomimo powyższych wad i słabych stron rozprawy, oświadczam, że:

1. Cel rozprawy został generalnie osiągnięty. Analiza wyników eksperymentów badawczych, przeprowadzonych podczas badań do niniejszej rozprawy, które zostały opublikowane w czasopismach naukowych oraz zaprezentowane na międzynarodowej konferencji naukowej, potwierdzają słuszność postawionych w rozprawie tez.
2. Osiągnięcia doktoranta zostały ujęte w rozprawie, która jest oryginalną odpowiedzią na problem naukowy z dziedziny nauk technicznych, z dyscypliny informatyki technicznej i telekomunikacji.
3. Tematyka rozprawy jest wyraźnie znana doktorantowi, o czym świadczy dobór materiału i jego analiza. W bazach publikacji (a także w wykazie literatury zawartym w treści rozprawy) znajdują się artykuły ściśle związane z tematem rozprawy, których współautorem jest autor rozprawy, wskazujące, że doktorant ma wcześniejszy dorobek naukowy na tym polu.
4. Rozprawa dodatkowo pokazuje zdolność doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań.

Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw z 2003 r. numer 65, pozycja 595, art. 13, ust. 1) stanowi:

*Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub artystycznego oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*

**Na podstawie punktów 1, 2, 3 i 4 podsumowania niniejszej recenzji stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgra inż. Pawła Beneckiego rozprawa doktorska spełnia wymagania warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnoszę o przyjęcie w/w rozprawy doktorskiej i jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

**Jednocześnie pragnę zauważyć, że doktorant (we współautorstwie) opublikował publikacje w recenzowanych czasopismach naukowych ujętych w *Wykazie czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych wraz z przypisaną liczbą punktów* Ministerstwa Nauki i Edukacji, z których część artykułów zostało opublikowanych w międzynarodowych czasopismach naukowych o niebagatelnej wartości punktowej (według wskaźników Ministerstwa Nauki i Edukacji).**

**Spełnia to wymagania dotyczące wyróżniania prac doktorskich, które to wymagania zostały określone przez Radę Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej.**

**W świetle wspomnianych bowiem zasad, „doktorant powinien być autorem/współautorem przynajmniej dwóch publikacji związanych z tematyką rozprawy i opublikowanych lub przyjętych do druku z nadanym numerem DOI w czasopismach z listy A MNiSW".**

**Biorąc więc pod uwagę powyższe ustalenia, a także wysoką aktualność i nowoczesność podjętej tematyki, wysoką wartość uzyskanych wyników, wysoki poziom naukowy rozprawy, a także staranność jej przygotowania i relatywnie wysoki poziom edycyjny, formułuję wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej przedstawionej przez Pana mgr inż. Pawła Beneckiego.**

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk