

prof. dr hab. inż. Maria Mrówczyńska
Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Nauk Inżynieryjno-Technicznych
Instytut Budownictwa
ul. Z. Szafrana 1
65-516 Zielona Góra

Zielona Góra, 21.08.2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Artura Fischera

pt.: „Analiza i doskonalenie algorytmów regularyzacji słabo-uwarunkowanego modelu matematycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu techniką satelitarną na podstawie danych z pojedynczej epoki pomiarowej”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo przewodnie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport dr hab. inż. Jacka Rapińskiego, prof. UWM numer WG.IGIB.5201.1.2025 z dnia 04.07.2025 r.

2. Charakterystyka osiągnięcia naukowego stanowiącego rozprawę doktorską

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Fischera pt. „Analiza i doskonalenie algorytmów regularyzacji słabo-uwarunkowanego modelu matematycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu techniką satelitarną na podstawie danych z pojedynczej epoki pomiarowej”. Rozprawa została wykonana pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Sławomira Cellmera oraz promotora pomocniczego dr inż. Krzysztofa Nowela. Rozprawa składa się z jednotematycznego cyklu trzech artykułów naukowych, które zostały opublikowane w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Wszystkie artykuły wchodzące w skład cyklu publikacji zostały opublikowane w latach 2023-2025, na cykl składają się następujące prace:

[1] Fischer A., Cellmer S., Nowel K. (2023) *Assessment of the double-parameter iterative Tikhonovregularization for single-epoch measurement model-based precise GNSS positioning*, Measurement 218: 113251, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113251, IF: 5.2;

[2] Fischer A., Cellmer S., Nowel K. (2024) *The Modified Ambiguity Function Approach with regularization for instantaneous precise GNSS positioning*, Journal of Applied Geodesy 19(1): 95–122, doi: 10.1515/jag-2024-0007, IF: 1.2;

[3] Fischer A., Nowel K., Cellmer S. (2025) *The statistical testing of regularized mathematical models in geodetic data processing*, Journal of Geodesy 99:14, doi: 10.1007/s00190-025-01934-w, IF: 3.9.

Łączna liczba punktów za publikacje stanowiące rozprawę doktorską wynosi 440 punktów, sumaryczny Impact Factor według listy JCR wynosi 10,3. Wszystkie artykuły są wynikiem pracy zespołu autorskiego, w którym współautorami (oprócz Doktoranta, który we wszystkich artykułach jest pierwszym autorem) są Promotor oraz Promotor pomocniczy. Do artykułów zostały dołączone oświadczenia współautorów o wkładzie procentowym w ich opracowanie. Doktorant określił swój wkład w publikacje jako 80%. Wszystkie artykuły przeszły procedurę recenzji zgodnie z wymogami poszczególnych czasopism naukowych, a biorąc pod uwagę ich wysoką rangę, wrazam opinię, że jest to obiektywna rekomendacja świadcząca o dużej wartości merytorycznej poszczególnych publikacji. Artykuły są ściśle ze sobą powiązane, widać w nich sukcesywny rozwój Doktoranta i prowadzonych przez Niego badań naukowych oraz stanowią one niezaprzeczalnie spójny cykl jednotematycznych publikacji. Prezentowany cykl publikacji naukowych spełnia więc wymagania art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, którym zapisano, że „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym (..), zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych (...)”. Tematycznie powiązany cykl artykułów prezentuje problem badawczy dotyczący regularyzacji modelu matematycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu techniką satelitarną. Głównym celem prezentowanych badań była ocena regularyzacji w aspekcie jej skuteczności w uzyskaniu wzrostu prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej w natychmiastowym rozwiązaniu nieoznaczoności pomiaru fazowego. Artykuły stanowiące cykl publikacji zostały uzupełnione Rozprawą doktorską (w formie autoreferatu liczącego 67 stron), w której Doktorant zawarł: streszczenie w języku polskim i angielskim; wprowadzenie, w którym przedstawiono podstawy teoretyczne oraz aktualny stan wiedzy związany z tematem badań wraz ze wskazaniem celów rozprawy; część teoretyczną, która w zwarty sposób prezentuje zagadnienie regularyzacji w pozycjonowaniu satelitarnym wraz z walidacją uzyskanych wyników; podsumowanie głównych rezultatów badań i wnioski oraz omówienie pozostałych osiągnięć naukowych. Do autoreferatu dołączono tekst 3 artykułów cyklu w postaci wydawniczej oraz oświadczenia współautorów.

3. Ocena merytoryczna osiągnięcia naukowego stanowiącego rozprawę doktorską

3.1. Opis osiągnięcia naukowego

Rozprawa dotyczy regularyzacji modelu matematycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu techniką satelitarną, a prezentowane w pracy analizy zostały przeprowadzone zarówno w dziedzinie nieoznaczoności pomiaru fazowego jak i współrzędnych. W dziedzinie nieoznaczoności zaproponowano udoskonalenie klasycznej metody regularyzacji polegające na wdrożeniu dwóch różnych parametrów regularyzacji. W dziedzinie współrzędnych zaproponowano rozwiązanie problemu dokładnej definicji obszaru poszukiwań w metodzie MAFA-ILS (Modified Ambiguity Function Approach Integer Least Squares – Zmodyfikowane podejście do metody funkcji nieoznaczoności z wykorzystaniem estymacji całkowitoliczbowej metodą najmniejszych kwadratów).

Zaproponowane podejście wykazało wzrost prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej - zarówno w dziedzinie nieoznaczoności jak i współrzędnych - przy jednoczesnej optymalizacji procedury poszukiwania rozwiązania całkowitoliczbowego. Jednocześnie Doktorant wskazał również na problem kosztów zastosowanego rozwiązania, co przejawiało się podczas walidacji modelu matematycznego.

Doktorant, po zidentyfikowaniu aktualnego stanu wiedzy dotyczącego regularyzacji modelu matematycznego oraz po przeprowadzeniu szerokich analiz teoretycznych sformułował trzy cele wraz z powiązаныmi hipotezami badawczymi. Cele badawcze przedstawiają się następująco:

1. Cel 1: ocena skuteczności regularyzacji modelu matematycznego (składającego się odpowiednio z modelu funkcjonalnego oraz stochastycznego) w uzyskaniu wzrostu prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej;
2. Cel 2: rozwiązanie problemu dokładnej definicji obszaru poszukiwań całkowitoliczbowych nieoznaczoności pomiaru fazowego w dziedzinie współrzędnych;
3. Cel 3: rozwiązanie problemu walidacji modelu matematycznego ze względu na koszt wynikający z zastosowania regularyzacji w zadaniu opracowania jednoepokowego zbioru obserwacji – ten cel Doktorant określił jako kluczowy.

Cele badawcze, postawione przez Doktoranta, świadczą o odpowiednim rozpoznaniu problemu badawczego, charakteryzują się aktualnością w kontekście prowadzonych badań i rozwoju metod numerycznych stosowanych w geodezji oraz stanowią interesujący przyczynek do dalszych prac naukowych. Cele badawcze były podstawą do sformułowania hipotez badawczych, które przedstawiają się następująco:

1. Hipoteza 1: Regularyzacja modelu matematycznego może doprowadzić do wzrostu prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej w dziedzinie nieoznaczoności pomiaru fazowego, a tym samym wpłynąć na wzrost częstotliwości akceptacji rozwiązania precyzyjnej pozycji odbiornika;
2. Hipoteza 2: Regularyzacja warunkowa może udoskonalić definicję obszaru poszukiwań całkowitoliczbowych nieoznaczoności pomiaru fazowego w metodzie MAFA-ILS, zapewniając wzrost prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej w dziedzinie współrzędnych;
3. Hipoteza 3: Walidacja regularyzowanego modelu matematycznego może zostać przeprowadzona w oparciu o najnowszą teorię DIA (Detection-Identification-Adaptation – Detekcja–Identyfikacja–Adaptacja) zapewniając ścisłą podbudowę teoretyczną.

Po przeanalizowaniu recenzowanej rozprawy doktorskiej uważam, że podjęty w rozprawie temat jest oryginalny i aktualny pod względem naukowym. Doktorant zidentyfikował lukę w wiedzy i przeprowadził w związku z tym analizy regularyzacji oraz oceny jej skuteczności w natychmiastowym rozwiązaniu całkowitoliczbowych nieoznaczoności pomiaru fazowego (na podstawie danych z pojedynczej epoki pomiarowej),

a także przedstawił rozwiązanie problemu walidacji regularyzowanego modelu matematycznego. Prezentowane przez Doktoranta wyniki badań wnoszą istotny wkład w rozwój teorii dotyczącej algorytmów regularyzacji, pogłębiają wiedzę w dyscyplinie inżynierii lądowa, geodezja i transport oraz mają jednocześnie znaczący potencjał aplikacyjny w zakresie precyzyjnego pozycjonowania z wykorzystaniem technik satelitarnych. Sposób prezentacji problematyki w rozprawie doktorskiej jest spójny i klarowny, trafnie przybliżając treść artykułów tworzących cykl publikacji; wyjątek stanowi część aplikacyjna, która w mojej ocenie została zaprezentowana niewystarczająco. Prezentowane w rozprawie doktorskiej zagadnienia mają również potencjał związany z ich przyszłym wykorzystaniem w dalszych badaniach i pracach naukowych prowadzonych przez Doktoranta.

Warto podkreślić, że Doktorant zaprezentował także aktywność wykraczającą poza cykl publikacji: realizację czterech projektów badawczych, współpracę międzynarodową (staże naukowe w TU Delft oraz na Uniwersytecie w Bonn) oraz działalność w organizacjach naukowych – jako przedstawiciel młodych naukowców w Komisji 4 „Pozycjonowanie i zastosowania” oraz członek grupy roboczej WG 4.2.4 „Kontrola jakości i monitoring integralności w precyzyjnym pozycjonowaniu” Międzynarodowej Asocjacji Geodezji. Taka aktywność bardzo dobrze rokuje dla dalszego rozwoju naukowego Doktoranta.

3.2. Charakterystyka prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji

W publikacji [1] Doktorant, wraz ze współautorami, zaproponował udoskonalenie klasycznej metody regularyzacji na etapie rozwiązania rzeczywistoliczbowego. Udoskonalenie to polegało na zaprojektowaniu dwóch różnych parametrów regularyzacji, co pozwoliło uwzględnić odmiennosć dwóch grup parametrów. Parametrami identyfikowanymi w wyjściowym modelu matematycznym były: nieoznaczoności pomiaru fazowego oraz przyrosty do przybliżonych współrzędnych pozycji odbiornika użytkownika. W kolejnym kroku została przeprowadzona iteracyjna estymacja parametrów, które minimalizują błąd średniokwadratowy. Konkludując Doktorant przeprowadził ocenę skuteczności zaproponowanego podejścia na podstawie analizy wyników prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej nieoznaczoności pomiaru fazowego. Wyniki wskazały, że następuje wzrost prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej w dziedzinie nieoznaczoności przy jednoczesnym spadku czasu poszukiwania optymalnego rozwiązania całkowitoliczbowego. W związku z tym, następuje wzrost częstotliwości akceptacji rozwiązania precyzyjnej pozycji odbiornika, co wskazuje na potencjał aplikacyjny zaproponowanego podejścia.

Publikacja [2] dotyczy możliwości rozwiązania problemu dokładnej definicji obszaru poszukiwań całkowitoliczbowych nieoznaczoności pomiaru fazowego w zakresie współrzędnych. Doktorant wykorzystał regularyzację warunkową, i tym samym regularyzację nieoznaczoności na etapie rozwiązania rzeczywistoliczbowego. Takie rozwiązanie pozwoliło na zaproponowanie nowego wariantu obszaru poszukiwań w zmodyfikowanym podejściu do metody funkcji nieoznaczoności z wykorzystaniem estymacji całkowitoliczbowej metodą

najmniejszych kwadratów. Walidacja prezentowanego w artykule rozwiązania dotyczyła wyznaczenia wzrostu prawdopodobieństwa poprawnej estymacji całkowitoliczbowej w obszarze współrzędnych. Zastosowane podejście jest nowatorskie i dzięki regularyzowanemu obszarowi poszukiwań pozwala na wzrost prawdopodobieństwa poprawnej estymacji. Prezentowane wyniki mają również wymiar praktyczny, ponieważ następuje redukcja liczby możliwych globalnych rozwiązań, co z kolei zapewnia, że rozwiązanie optymalne o charakterze globalnym zostanie znalezione szybciej.

W publikacji [3] Doktorant domknął wątek badawczy, przedstawiając metodę walidacji modelu matematycznego, która wprost uwzględnia koszt wynikający z regularyzacji. Proponowane podejście oparto na implementacji teorii DIA, wspartej rygorystycznymi podstawami formalnymi. Propozycja wyeliminowała z procesu walidacji regularyzowane estymatory, a pozostawiła koszt wynikający z zastosowania regularyzacji modelu matematycznego. Doktorant zaproponował test GLR (Generalized Likelihood Ratio – Uogólniony iloraz wiarygodności) oraz ocenę skuteczności rozwiązań na podstawie analizy rozkładów prawdopodobieństwa statystyk testu globalnego.

Analizując prezentowane podstawy teoretyczne oraz wyniki badań prezentowane zarówno w rozprawie doktorskiej jak i w artykułach wchodzących w skład jednotematycznego cyklu publikacji pojawiły się pewne zastrzeżenia i wątpliwości:

1. Doktorant pisze (Rozprawa doktorska, str. 16): „W związku z tym, opis jakości przedstawiony wyłącznie na podstawie $\mathbf{Q}_{\hat{x}_k \hat{x}_k}$ byłby zbyt optymistyczny – w istocie niepoprawny. Jednak w przypadku kontrolowania kompromisu można zapewnić, że nawet zbyt optymistyczny opis jakości na podstawie $\mathbf{Q}_{\hat{x}_k \hat{x}_k}$ nie powoduje zauważalnych konsekwencji.”. Sformułowane wnioski są na tyle nieprecyzyjne, że nie można stwierdzić, czy wynik należy uznać za poprawny.
2. Doktorant zaproponował „proces jednoczesnego wyznaczenia dwóch różnych parametrów regularyzacji wykorzystując numeryczną metodę gradientu prostego.”. Metoda gradientu prostego jest jedną z najprostszych metod poszukiwania rozwiązania optymalnego, jednocześnie algorytm ma tendencję do zatrzymywania się w minimach lokalnych i powolną zbieżność do rozwiązania. Czy Doktorant analizował do zastosowania inne gradientowe metody optymalizacji? Czy był analizowany problem występowania minimów lokalnych oraz możliwości wykorzystania metody przyspieszania zbieżności?
3. Doktorant w wielu miejscach rozprawy doktorskiej podkreśla, że eksperymenty były realizowane na danych symulowanych, np. „Na podstawie wyników eksperymentu opartego na obserwacjach symulowanych, udoskonalona metoda klasycznej regularyzacji zapewnia parametry regularyzacji dzięki którym uzyskujemy najniższą średnią wartość $\text{tr}(\mathbf{MSE}_{\hat{x}_k \hat{x}_k})$ w każdej grupie parametrów (Fischer i in. 2023, Rys. 9)” (Rozprawa doktorska, str. 25). Rozprawa nie akcentuje dostatecznie rangi wyników opartych na danych empirycznych, ujętych w publikacjach. Dobrze zaprezentowana w artykułach część związana z implementacją zaproponowanych

rozwiązań numerycznych w praktyce precyzyjnego pozycjonowania z wykorzystaniem technik satelitarnych, nie znalazła odpowiedniego odzwierciedlenia w rozprawie doktorskiej. Szkoda, bowiem praktyczny aspekt jest istotny i może wskazywać na potencjał aplikacyjny zaproponowanych rozwiązań, co Doktorant podkreśla we wnioskach z prowadzonych badań.

4. W rozprawie doktorskiej, str. 31, Doktorant napisał: „Niemniej jednak, prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest niskie. Potwierdziła to koincydencja wyników poprawnej estymacji całkowitoliczbowej z wynikami uzyskanymi na podstawie metody LAMBDA - metoda estymacji całkowitoliczbowej w dziedzinie nieoznaczoności (Fischer i in. 2024, Tab. 2)”. Analizując dane prezentowane w przywołanej tabeli, można się oczywiście zgodzić, że koincydencja potwierdza niskie prawdopodobieństwo tego, że rozwiązanie z metody MAFA-ILS może być niepoprawne, jednakże zauważalny jest duży rozrzut średnich błędów rzeczywistych (obliczonych na podstawie wartości błędów bezwzględnych), których wartości kształtują się od ponad 1 metra do kilku mm. Czym podyktowane są takie rozbieżności?
5. Doktorant w trakcie operacji numerycznych wykorzystywał pseudoodwrotność Moore-Penros’a wskazując, że uzyskana $\tilde{\mathbf{Q}}_{yy}$ nie jest dodatnio określona i w związku z tym macierz wag o postaci $\tilde{\mathbf{Q}}_{yy}^{-1}$ jest niedostępna. Odwrotność jest niedostępna gdy macierz jest osobliwa.
6. W rozprawie na str. 33 znajdujemy zapis „Obciążeniem jest analizowane na podstawie średniej wartości $\text{tr}\left(\mathbf{g}_{\hat{b}/\hat{a}_k} \mathbf{g}_{\hat{b}/\hat{a}_k}\right)$ ”. Proszę o wyjaśnienie na jakiej podstawie obliczana jest średnia? Ślad macierzy jest sumą elementów leżących na głównej przekątnej.
7. Doktorant pisze (Rozprawa doktorska, str. 38): „W celu obliczenia (31) wymagana jest zatem implementacja metody symulacji Monte Carlo. Niemniej jednak, długi czas obliczeń stwarza problem podczas praktycznej oceny siły modelu w czasie rzeczywistym”. Długi czas obliczeń – jaki? Czy przy dzisiejszej technologii obliczeniowej jest to zauważalne wydłużenie czasu niezbędnego do przeprowadzenia obliczeń?
8. W mojej ocenie w autoreferacie zabrakło informacji na temat pozostałych publikacji Doktoranta, w których jest On współautorem, a których w bazie Scopus jest sumarycznie, aktualnie 9. Pokazują one bardzo konsekwentny rozwój naukowy Doktoranta w tematyce pozycjonowania techniką satelitarną.

4. Wnioski

Dysertacja mgr. inż. Artura Fischera stanowi spójny tematycznie cykl publikacji, wydanych w prestiżowych czasopiśmie posiadających zauważalną wartość współczynnika wpływu IF. Podjęta przez Doktoranta tematyka jest aktualna i istotna dla rozwoju wiedzy

związanej z zastosowaniem metod numerycznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Doktorant wykazał się znajomością aktualnego stanu wiedzy związanego z prowadzonymi badaniami naukowymi, udowodnił, że potrafi zaplanować i prowadzić badania, weryfikować stawiane hipotezy badawcze oraz formułować poprawne wnioski.

Wszystkie uwagi oraz kwestie do dyskusji nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy i nie rzutują negatywnie na jej wysoką ocenę. Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska jest bardzo dojrzała, stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego oraz potwierdza, że Doktorant posiada wiedzę i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr. inż. Artura Fischera pt.: *„Analiza i doskonalenie algorytmów regularyzacji słabo-uwarunkowanego modelu matematycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu techniką satelitarną na podstawie danych z pojedynczej epoki pomiarowej”* spełnia wymogi merytoryczne i formalne stawiane rozprawom doktorskim i w związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie przedłożonej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Maria Mrówczyńska