Prof. dr hab. inż. Sławomir Cellmer
Uniwersytet Warmińsko Mazurski w Olsztynie
Wydział Geoinżynierii, Instytut Geodezji, Katedra Geodezji

Olsztyn 5.06.2025.

OPINIA O ROZPRAWIE DOKTORSKIEJ

mgr inż. Artura Fischera
na temat:

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

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawę doktorską stanowi cykl trzech następujących artykułów na temat regularyzacji słabo uwarunkowanego modelu matematycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu satelitarnym na podstawie danych z pojedynczej epoki obserwacyjnej:

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

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,

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.

W każdym artykule doktorant jest pierwszym autorem, pomysłodawcą i głównym wykonawcą realizacji pomysłu, poczynając od wyprowadzenia formuł i zaimplementowania ich w oprogramowaniu realizującym obliczenia poprzez przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentów, po analizę wyników i sformułowanie wniosków. W autoreferacie, który jest jednym z elementów złożonej przez doktoranta dokumentacji, przedstawił on szczegółowy opis przedstawionych w rozprawie zagadnień. Praca nad rozprawą przebiegała w oparciu o trzy cele badawcze. W ramach każdego celu badawczego doktorant sformułował jedną hipotezę.

Sformułowane przez doktoranta hipotezy zostały poddane weryfikacji na podstawie zaproponowanych w pracy nowych rozwiązań w zakresie modyfikacji modelu matematycznego oraz optymalizacji algorytmów procesu obliczeniowego. Testy zaproponowanych przez doktoranta nowych rozwiązań zostały przeprowadzone w ramach starannie zaprojektowanych i przeprowadzonych eksperymentów.

Ocena merytoryczna pracy

Przedmiotem rozprawy jest słabo-uwarunkowany model matematyczny w precyzyjnym pozycjonowaniu satelitarnym. Słabe uwarunkowanie modelu matematycznego jest cechą charakterystyczną techniki pozycjonowania satelitarnego na podstawie obserwacji z pojedynczej epoki pomiarowej. Niekorzystnym efektem zadania opartego na takim modelu jest sytuacja, w której niewielkie zaburzenia w zbiorze obserwacji powodują znaczące zmiany w wynikach, a w szczególności w pozycji punktu. Matematycznym symptomem takiego efektu jest bardzo duża wartość wariancji wyników estymacji. W literaturze na temat tego problemu proponowana jest regularyzacja modelu, mająca na celu poprawę sytuacji w zakresie stabilności rozwiązań. Efektem regularyzacji jest poprawa stabilności rozwiązań, ale odbywa się to zawsze kosztem utraty pożądanej przez dobre estymatory cechy, a mianowicie ich nieobciążoności. Obciążenie estymatora można minimalizować poprzez zastosowanie odpowiednich technik modyfikacji modelu. W pracach stanowiących cykl rozprawy doktorskiej stosowana jest technika oparta na wprowadzeniu do modelu i estymacji tzw. współczynnika regularyzacji, w której minimalizuje się sumę wariancji i obciążenia. W efekcie uzyskuje się wyniki o znacząco lepszej jakości niż przed regularyzacją. Przy poprawnie przeprowadzonej regularyzacji, pomimo obciążenia, którym obarczony jest wynik estymacji, suma tego obciążenia i wariancji jest znacząco mniejsza niż wartość wariancji estymatora otrzymanego z rozwiązania opartego na modelu, który nie był regularyzowany.

W dwóch pierwszych pracach cyklu rozprawy, doktorant zaproponował modyfikacje klasycznych metod regularyzacji, prowadzące do poprawy jakości wyników przy zachowaniu efektywności procesu obliczeniowego. W trzeciej pracy cyklu doktorant zaproponował nowatorski sposób walidacji wyników uzyskanych z estymacji opartej na regularyzowanym modelu.

Modyfikacja klasycznych metod regularyzacji zaproponowana w pierwszym artykule cyklu polegała na wprowadzeniu oddzielnych parametrów regularyzacji dla różnych grup parametrów (nieoznaczoności i współrzędne pozycji). Dzięki temu doktorant uzyskał lepsze

dopasowanie wartości parametrów regularyzacji do zastosowanego kryterium, co w rezultacie doprowadziło do zwiększenia prawdopodobieństwa uzyskania prawidłowych wyników. Potwierdziły to analizy teoretyczne oraz starannie zaplanowany eksperyment, w którym zastosowano dane symulowane i znane wartości parametrów.

Inną modyfikację klasycznego podejścia do regularyzacji doktorant zaproponował w drugim artykule cyklu. Polega ona na regularyzacji tylko jednej grupy parametrów (nieoznaczoności na etapie rozwiązania float). Autor wykazał, że wpłynęło to pozytywnie na wyniki drugiej, nieregularyzowanej grupy parametrów (współrzędne pozycji) oraz optymalizację procesu obliczeniowego.

Nowatorskim elementem w opracowanej przez doktoranta metodzie, przedstawionej w trzecim artykule cyklu, było całkowite wyeliminowanie wpływu obciążenia na proces testowania statystycznego wyników opracowania opartego ne regularyzowanym modelu matematycznym. Podstawowym problemem w walidacji wyników estymacji opartych na regularyzowanym modelu jest konieczność wyeliminowania wpływu obciążenia na statystyki testowe. W trzecim artykule cyklu doktorant zaproponował rozwiązanie tego problemu poprzez przekształcenie modelu do postaci równoważnej w sensie niesionej przez ten model informacji ale bez wyrazów zawierających parametry, które zawierają obciążenie.

W każdym artykule cyklu stanowiącym rozprawę doktorską autor zaproponował nowe rozwiązanie istniejącego problemu, w znaczący sposób zwiększające istniejący stan wiedzy. Atutem pracy są też poprawnie zaprojektowane eksperymenty obliczeniowe. Analiza wyników oraz wnioski przedstawione są w sposób jasny, niebudzący wątpliwości. Rozprawę oceniam pozytywnie. Wnioski z prac przeprowadzonych w ramach rozprawy stanowią potwierdzenie pozytywnej weryfikacji hipotez badawczych. Uważam, że cele rozprawy zostały osiągnięte.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Artura Fischera na temat: *Analiza i doskonalenie algorytmów regularyzacji słabo-uwarunkowanego modelu matematycznego w precyzyjnym pozycjonowaniu techniką satelitarną na podstawie danych z pojedynczej epoki pomiarowej* stanowi znaczące osiągnięcie naukowe, zawiera orginalne rozwiązania przedstawionych w niej problemów naukowych i spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r, Dz.U.2024.1571 (z późn. zmian.)