

dr hab. inż. Adam G. Polak, prof. uczelni
Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej
Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław

Wrocław, dnia 13 maja 2020 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: *„Regularised Differentiation of Measurement Data in Systems for Healthcare-oriented Monitoring of Elderly Persons”*

Autor rozprawy: mgr inż. Jakub Wagner

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Roman Z. Morawski

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję wykonano w odpowiedzi na uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 3 marca 2020 r., zgodnie z Ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r.

1. Rozwiązywany problem naukowy

Tematyka przedstawionej pracy doktorskiej została jasno sformułowana – dotyczy wyznaczania prędkości, z jaką poruszają się osoby starsze przebywające w środowisku swego życia, na podstawie niekrępujących pomiarów ich położenia, w celu automatycznego wykrywania niebezpiecznych upadków. Rozważono pomiary położenia za pomocą kamer głębi oraz radarów impulsowych. Wyznaczenie chwilowych prędkości wymaga numerycznego różniczkowania sygnałów pomiarowych, a uzyskane na tym etapie przebiegi przetwarzane są dalej na cechy służące do klasyfikacji ich fragmentów.

Motywacją badań Doktoranta z jednej strony była olbrzymia potrzeba społeczna związana z podnoszeniem efektywności opieki zdrowotnej nad osobami starszymi i samotnymi, a od strony naukowej konieczność uzyskiwania wiarygodnych przebiegów prędkości przemieszczania się monitorowanych osób na podstawie danych położenia, co wymaga różniczkowania numerycznego. Zadanie różniczkowania charakteryzuje się natomiast istotnym wzmocnieniem błędów losowych tkwiących w danych pomiarowych, co uniemożliwia skuteczne wykrywanie upadków na podstawie obliczanych prędkości. **Rozwiązywaniem problemem naukowym było znalezienie właściwej kombinacji metod regularyzujących (tj. wygładzających) wynik różniczkowania numerycznego oraz strategii optymalnego doboru parametru regularyzacji w kontekście przetwarzania danych z kamer głębi i radarów impulsowych oraz eksperymentalna weryfikacja uzyskanych wyników w kontekście efektywności wykrywania upadków.** Praca koncentruje się na parametrycznych metodach regularyzacji, w których poprawę rozwiązania uzyskuje się zastępując problem oryginalny problemem o zredukowanej liczbie stopni swobody, a zadanie regularyzacji sprowadza się do ich optymalnego doboru.

Tak postawiony problem ma charakter nowatorski, ponieważ, jak dotąd, nie przeprowadzono systematycznych analiz wskazujących na optymalne metody zregulowanego przetwarzania danych z wymienionych czujników w kontekście automatycznego wykrywania upadków. Jest on właściwy dla pracy na stopień doktora w dziedzinie *nauk inżyniersko-technicznych*, w dyscyplinie *elektronika* będącej początkowym obszarem działalności naukowej kandydata, a w dyscyplinie *automatyka, elektronika i elektrotechnika* wg aktualnej klasyfikacji. Wynika to z faktu, iż rozwiązywany problem naukowy i przyjęta metodyka dotyczą elektronicznych czujników i systemów pomiarowych, technik i technologii pomiarowych, algorytmicznego przetwarzania danych oraz automatyzacji procesu podejmowania decyzji.

Celem pracy (str. 40-41) była systematyczna analiza i porównanie zarówno wybranych metod zregulowanego różniczkowania numerycznego jak i strategii automatycznego doboru parametrów regularyzacji pod kątem optymalizacji dokładności tych procedur w zadaniu wyznaczania prędkości poruszania się obiektów. Cel ten wynika bezpośrednio z rozwiązywanego problemu naukowego.

Teza pracy (str. 41) głosi, że właściwy wybór metody stosowanej do numerycznego różniczkowania danych pomiarowych pozyskanych za pomocą kamer głębi i radarów impulsowych, będących częścią systemów służących do niekrępującego monitorowania osób starszych, wraz z właściwym wyborem strategii zastosowanej do optymalizacji tej metody, może zmniejszyć niepewność estymacji naturalnej prędkości chodu oraz niepewność wyników wykrywania upadków, uzyskiwanych na podstawie tych danych. W warstwie literalnej teza ta została sformułowana zbyt słabo („może zmniejszyć...”), brakuje w niej też punktu odniesienia, tym niemniej postawiona teza bardzo dobrze nakreśliła kierunek przeprowadzonych badań.

2. Charakter rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Wagnera, poza stałymi częściami, składa się z 9. numerowanych rozdziałów i bibliografii, zajmujących razem 208 stron. Zawiera ona zarówno część teoretyczną, jak i eksperymentalną. Rozdziały 1-3 prezentują tło badań, rozwiązywany problem oraz stosowane metody numerycznego różniczkowania danych pomiarowych. Rozdział 4, najistotniejszy moim zdaniem z części teoretycznej, to systematyczna i szczegółowa analiza najważniejszych metod parametrycznej regularyzacji numerycznego różniczkowania danych pomiarowych o walorach badań podstawowych, ukazująca mechanizmy tkwiące w poszczególnych podejściach i ich powiązanie z uzyskiwanymi wynikami. Rozdziały 5-8 mają charakter eksperymentalny, obejmując eksperymenty numeryczne (Rozdz. 6) oraz rzeczywiste (Rozdz. 5, 7 i 8). W Rozdziale 9 zamieszczono podsumowanie pracy. Układ dysertacji jest logiczny i dobrze odzwierciedla metodykę przeprowadzonych badań. Dla zachowania logiki struktury lepiej jednak było Rozdz. 5 umieścić po eksperymentach numerycznych, aby rozpoczynał ostatnią część poświęconą eksperymentom rzeczywistym.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Analiza aktualnego stanu wiedzy

Doktorant dokonał dogłębnego rozeznania literaturowego w obszarach powiązanych tematycznie z realizowaną pracą. Zaowocowało to bogatym wykazem bibliograficznym obejmującym 363 pozycje, z których znakomita większość, poza klasycznymi już dziś artykułami, została opublikowana w ostatnich latach. Świadczy to o aktualności wiedzy wykorzystanej przy realizacji badań. Cytowane źródła dotyczą przede

wszystkim metod różniczkowania numerycznego, regularyzacji i jej optymalizacji (aspekty analityczne i algorytmiczne), oraz niekrepującego monitorowania osób starszych (rozwiązania sprzętowe i w warstwie przetwarzania danych). Przeprowadzony przegląd źródeł pozwolił na zidentyfikowanie nowych i obiecujących podejść do monitorowania chodu i automatycznego wykrywania upadku osób starszych (Tab. 1.1), stosowanych metod różniczkowania numerycznego i najważniejszych metod regularyzacji tego zadania (Tab. 4.1), oraz strategii doboru współczynnika regularyzacji (str. 79). Pozyskana wiedza pozwoliła zidentyfikować obszar badawczy oraz sformułować tezę i cele pracy.

Na szczególne podkreślenie zasługuje nie tylko szeroka i aktualna wiedza zaprezentowana przez Kandydata, ale też umiejętność prawidłowego jej wykorzystania, co z pewnością nie było proste ze względu na złożoność zastosowanego aparatu matematycznego i metod numerycznych.

Przyjęta metodyka pracy i uzyskane rozwiązanie problemu

Metodyka pracy jest w pełni prawidłowa. Obejmuje zidentyfikowanie potrzeby społecznej, sformułowanie problemu badawczego, rozeznanie aktualnej wiedzy w obszarze tematycznym, gruntowne przeanalizowanie stosowanych metod, wykorzystanie zdobytej wiedzy do zaproponowania podejścia polegającego na przetestowaniu 71 kombinacji metod regularyzacji różniczkowania i jej optymalizacji (na początku na wygenerowanych danych syntetycznych z użyciem schematu Monte Carlo, a następnie na danych rzeczywistych pozyskanych z dostępnych repozytoriów oraz samodzielnie zarejestrowanych za pomocą kamery głębi i pary zsynchronizowanych radarów impulsowych), konsekwentną realizację planu badań, analizę uzyskanych wyników i zaproponowanie wniosków końcowych.

Niewątpliwie opisana powyżej prawidłowa metodyka badań przyczyniła się do uzyskania wartościowego rozwiązania postawionego problemu: określenia najlepszych (w sensie minimalizacji zakłóceń losowych w estymowanej prędkości chodu) strategii automatycznego doboru parametru regularyzacji dla każdej z rozważanych metod różniczkowania, wskazanie najdokładniejszych (w sensie niepewności estymacji prędkości) metod regularyzacji dla wartości parametrów regularyzacji dobranych wyselekcjonowanymi powyżej strategiami oraz wskazanie takich kombinacji powyższych metod i strategii, które maksymalizowały efektywność (w sensie precyzji i częstości fałszywych alarmów dla dwóch poziomów czułości) automatycznego wykrywania upadków na podstawie danych z kamery głębi i pary radarów impulsowych. Należy jednak podkreślić, że pozytywny wynik badań to jednak zasługa nie tylko przyjętej metodyki, ale przede wszystkim wielkiego zaangażowania, wiedzy i umiejętności Doktoranta.

Oryginalność rozwiązania problemu naukowego

Postawiony problem naukowy – znalezienie optymalnych kombinacji metod regularyzacji różniczkowania numerycznego i strategii doboru parametru regularyzacji pozwalających na zwiększenie efektywności automatycznego wykrywania upadku na podstawie danych pomiarowych z kamer głębi i radarów impulsowych – jest dobrze zidentyfikowanym zadaniem z obszaru dyscypliny naukowej *automatyka, elektronika i elektrotechnika*. Trafność wyboru problematyki wynika przede wszystkim z aktualności i złożoności rozwiązywanego problemu merytorycznego, innowacyjności zaproponowanego podejścia do niezauważalnego monitorowania osób starszych i samotnych oraz istniejącego zapotrzebowania społecznego. Na tym tle widoczna jest

oryginalności rozwiązania zaproponowanego przez Doktoranta, która koncentruje się przede wszystkim w następujących aspektach:

- i) **zaproponowanie własnych metod regularyzacji różniczkowania numerycznego polegających na doborze interwałów czasowych w klasycznych metodach interpolacyjnych oraz aproksymacji danych pomiarowych za pomocą liniowej kombinacji funkcji bazowych;**
- ii) **systematyczna analiza 71 kombinacji najważniejszych metod regularyzacji i strategii optymalnego doboru ich parametrów przeprowadzona w oparciu dobrze zaplanowane eksperymenty numeryczne;**
- iii) **wskazanie najkorzystniejszych (w sensie minimalizacji niepewności estymacji prędkości na podstawie pomiarów chwilowego położenia) kombinacji metod regularyzacji i strategii doboru ich parametrów wynikających z eksperymentów numerycznych;**
- iv) **zaplanowanie rzeczywistych eksperymentów pomiarowych z wykorzystaniem kamery głębi i pary zsynchronizowanych radarów impulsowych oraz opracowanie procedur przetwarzania uzyskiwanych danych;**
- v) **wskazanie kombinacji metod regularyzacji i strategii optymalnego doboru ich parametrów zwiększających efektywność (w sensie precyzji i częstości fałszywych alarmów) wykrywania upadków monitorowanych osób.**

Podsumowując, zaproponowana przez Kandydata podejście do przetwarzania danych z wybranych systemów niekrępującego monitorowania osób starszych w celu wykrywania upadków, oparte o zregularyzowane różniczkowanie numeryczne danych pomiarowych, ma charakter w pełni oryginalny.

Ponadto, oryginalność wkładu w dyscyplinę dokumentuje 6 publikacji z Bibliografii, których Doktorant jest współautorem (w 3. pierwszym autorem): 2 artykuły w czasopiśmie z bazy JCR i 4 w materiałach konferencji międzynarodowych (w bazie *Web of Science* indeksowane są 24 publikacje Autora, w tym 3 z JCR).

Redakcja rozprawy

Dysertacja napisana została w języku angielskim ze znikomą liczbą błędów, głównie gramatycznych (zdarzające się braki rodzajników). Jej treść jest w pełni komunikatywna i odpowiednio precyzyjna. Praca została zredagowana na dobrym poziomie edytorskim. Wielkim walorem dysertacji są rysunki ilustrujące jej treści, a przede wszystkim wykresy obrazujące uzyskane wyniki badań, które znacząco ułatwiają analizę przedstawianych zagadnień i weryfikację formułowanych wniosków. Wartościowy jest też wykaz użytych oznaczeń oraz tabele podsumowujące przegląd literatury (1.1), przeanalizowane metody zregularyzowanego różniczkowania numerycznego (4.1), wyniki przeanalizowanych strategii optymalizacji regularyzacji (6.1), czy wyniki skuteczności wykrywania upadków (8.1 i 8.2), jak również podsumowania Rozdz. 6.3, 7.2 i 8.2, oraz szczególnie Rozdz. 9.

Zdaniem recenzenta, warto było dodatkowo skonfrontować wyniki podsumowane w Rozdz. 8.2 z tymi omówionymi w 6.3 i 7.2, czego nie zrobiono.

4. Uwagi krytyczne, pytania do Kandydata i zagadnienia do dyskusji

Dysertacja doktorska mgra inż. Jakuba Wagnera wymaga kilku dodatkowych komentarzy. Poniżej zamieszczam najważniejsze z nich.

- 1) Niefortunne wydaje się oznaczenie bezbłędnych wartości wielkości mierzonych za pomocą kropki nad symbolem, gdyż jest to jedno z klasycznych oznaczeń pochodnych

(wprowadzone przez Newtona, obok notacji Leibniza i Lagrange'a stosowanych w pracy), co początkowo utrudnia interpretację zapisów.

- 2) Rozdział 1.4.2 omawia zastosowanie kamer głębi do detekcji upadków, brak jednak analogicznego rozdziału poświęconego zastosowaniu radarów impulsowych, co wymaga komentarza.
- 3) Omawiając podstawowe metody numerycznego obliczania pochodnych Autor nie rozróżnia podejść opartych o interpolację wielomianami od aproksymacji (faworyzując używanie pojęcia aproksymacji), choć stoją za nimi różne idee (str. 35, 46, ...).
- 4) W pracy systematycznie przeanalizowano parametryczne metody regularyzacji, nie wspomniano jednak o możliwości nieparametrycznej regularyzacji różniczkowania numerycznego, gdzie ograniczenie „gładkości” nałożone jest bezpośrednio na estymaty pochodnych. Na przykład, wyznaczając „surowe pochodne” $\hat{\mathbf{x}}^{(1)}$ prostą obliczeniowo metodą CD3 i stosując omówioną w Rozdz. 4.2.1 regularyzację Tichonowa, można pożądaną efekt uzyskać jednokrokowym przeliczeniem (por. (4.40) dla $\mathbf{Q}_K = \mathbf{I}$):
$$\hat{\mathbf{x}}^{(1)} = (\mathbf{I} + \alpha \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \hat{\mathbf{x}}^{(1)}$$
. Powstaje zatem pytanie, jak kształtuje się dokładność estymat pochodnych obliczanych w ten czy analogiczny sposób w stosunku do przetestowanych metod parametrycznych.
- 5) W różnych fragmentach pracy (np. Rozdz. 3.2 i inne) nie podano źródeł niektórych z prezentowanych zależności, nie pokazano ich wyprowadzeń lub odpowiednio nie skomentowano, co w mniej oczywistych przypadkach nie pozwala ocenić, czy zostały one wyprowadzone przez Doktoranta, czy też zaczerpnięte z prac innych autorów. Przykładowo: równanie (3.12) sugeruje, że w rozważanym przypadku kwadrat sumy jest równy sumie kwadratów (przy jakim założeniu wynik obliczenia jest prawidłowy?), albo analizując (4.1) nie wyjaśniono, że \tilde{x}_1 i \tilde{x}_3 zostały rozwinięte w szereg Taylora w punkcie \tilde{x}_2 itd.
- 6) W przeprowadzonych analizach dokładności brakuje przydanych wyjaśnień i zachowania systematyczności; oto najważniejsze z zauważonych problemów:
 - Autor posługuje się pojęciem niepewności rozszerzonej, którą wg przyjętych standardów oblicza się wyznaczając współczynnik rozszerzenia (zależny od przyjętego poziomu istotności) przez niepewność łączną (reprezentująca obciążenie i wariancję estymatora), w obliczeniach stosuje jednak zupełnie inną zależność z modułem obciążenia i „trzema sigma” (wzory 4.6, 6.4) – jak to można uzasadnić? Czy rozważano zastosowanie innego podejścia, jak np. błąd średniokwadratowy estymat?
 - Analizując niepewność estymacji pochodnej metodą CD3, która wykorzystuje interpolację 3 punktów wielomianem 2-go stopnia, uzyskano zależność obciążenia od 3. pochodnej funkcji interpelującej (równ. (4.3)) – gdy tymczasem 3. pochodna tego wielomianu jest zerowa. Jakie ma to znaczenie dla wyniku przeprowadzonej analizy?
 - Analizy porównawcze dokładności testowanych metod w Rozdz. 6.2.1 i 6.2.2 przeprowadzono dla wybranej próbki $n = 46$ – skąd wiadomo, że uzyskane wyniki są reprezentatywne? Dlaczego w Rozdz. 6.2.3-6.2.8 zmieniono analizowany wskaźnik na SNRR?

- 7) Eksperymenty numeryczne przeprowadzono na danych syntetycznych generowanych za pomocą wybranej funkcji reprezentującej położenie obiektu w czasie (6.2), o pochodnej (6.3). Jak kształt i zakres zmienności przyjętej funkcji i jej pochodnej jest powiązany z typowym przemieszczaniem się osób? Ponieważ wszystkie dalsze wyniki numeryczne otrzymano na jej podstawie powstaje pytanie, jak ogólne są wyciągnięte wnioski?
- 8) W opisie eksperymentów pomiarowych brak jest niektórych informacji: i) nie wyjaśniono, na jakiej podstawie przyjęto parametry używane na etapie ekstrakcji sylwetki przetwarzając dane z kamery głębi (Rozdz. 5.1.1); ii) nie podano kąta widzenia użytych radarów impulsowych (Rozdz. 5.2); iii) w Rozdz. 7.1 brak jest informacji, z jaką rozdzielczością czasową rejestrowano dane i dlaczego wybrano prędkość poruszania się z przedziału $0,5-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; iv) nie uzasadniono, że sekwencja 50 klatek (ok. 1,7 s) jest wystarczająca do detekcji upadku (Rozdz. 8.1); ile ostatecznie sekwencji użyto do uczenia klasyfikatora? v) jaki wariant walidacji krzyżowej został zastosowany w pracy (str. 176)?; vi) Czy podjęto próbę optymalizacji wartości progowej p_{thr} za pomocą krzywej ROC (str. 177)?
- 9) Czy w ramach przyszłych badań rozważano fuzję najbardziej obiecujących z przeanalizowanych metod np. z określaniem prędkości na podstawie danych akcelerometrycznych (niewielki, bezprzewodowy układ pomiarowy umieszczony np. na pasku)? Jakich korzyści można się spodziewać z zastosowania takiego podejścia?

5. Znaczenie rozprawy dla dziedziny nauk inżynierjno-technicznych

Wyniki badań przeprowadzonych przez mgra inż. Jakuba Wagnera posiadają wartość wybiegającą poza bezpośredni obszar tematyczny pracy, zarówno w aspekcie poznawczym, stosowanym jaki i rozwojowym. W pierwszej kolejności praca ujawnia powiązania między mechanizmami tkwiącymi w przeanalizowanych kombinacjach metod z jakością uzyskiwanych rezultatów. Przeprowadzone porównania pozwalają na lepszy dobór metod nie tylko w zadaniach wymagających numerycznego różniczkowania danych pomiarowych, ale też w bardziej ogólnych przypadkach regularyzacji problemów odwrotnych źle uwarunkowanych numerycznie. Ponadto wskazane w wyniku analiz porównawczych rozwiązania, zwłaszcza te o mniejszej złożoności obliczeniowej, mogą być bezpośrednio zastosowane w konkretnych systemach pomiarowych.

6. Wnioski końcowe

Zawartość dysertacji pokazuje, że praca została wykonana w obszarze dyscypliny *automatyka, elektronika i elektrotechnika*, a jej cel został osiągnięty. Uzyskane wyniki potwierdzają prawdziwość postawionej hipotezy badawczej. Przyjęta metodyka, zakres prac oraz uzyskane wyniki świadczą o pracowitości, wielkim zaangażowaniu, kreatywności i umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych przez Doktoranta.

Biorąc pod uwagę zakres przeprowadzonych badań obejmujący m.in. dogłębne rozeznanie literaturowe, szczegółowe analizy teoretyczne, dobrze zaplanowane i szeroko zakrojone eksperymenty numeryczne, zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego, przeprowadzenie pomiarów w warunkach naturalnych i przetworzenie pozyskanych danych z uwzględnieniem wypracowanych metod, dużą użyteczność wyciągniętych wniosków, udokumentowany dorobek publikacyjny w obszarze tematycznym pracy (m.in. 3 artykuły w czasopismach z JCR o łącznej sumie 480 pkt.

ministerialnych) i – w tym kontekście – nic nieujmujące zasadniczym osiągnięciom uwagi krytyczne, uważam dysertację pt. *„Regularised Differentiation of Measurement Data in Systems for Healthcare-oriented Monitoring of Elderly Persons”* za spełniającą wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20.07.2018 i jednocześnie za wybitnie dobrą, **zasługującą na wyróżnienie.**

Niniejszym stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Jakuba Wagnera do publicznej obrony przedłożonej pracy.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Jakub Wagner', written in a cursive style.