

Politechnika Warszawska

Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMATYCZNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

zawiadamiają o

PUBLICZNEJ OBRONIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Jakuba Wagnera

która odbędzie się w trybie zdalnym w dniu 26 czerwca 2020 r. o godzinie 9.00

Tytuł rozprawy doktorskiej:

“Regularised numerical differentiation of measurement data in systems for healthcare-oriented monitoring of elderly persons”

promotor: prof. dr hab. inż. Roman Morawski Wydział Elektroniki i Technik
 Informatycznych Politechniki Warszawskiej

recenzenci: prof. dr hab. inż. Andrzej Materka Instytut Elektroniki Politechniki
 Łódzkiej

dr hab. inż. Adam Polak, prof. uczelni Wydział Elektroniki Politechniki
Wrocławskiej

Na stronie internetowej wydziału www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje znajdują się streszczenie rozprawy oraz recenzje, jak również dostęp do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Sposób uczestniczenia w publicznej obronie:

(YouTube) <https://youtu.be/vpoEywvdaF4>

Pytania można będzie zadawać z wykorzystaniem "czatu" pod transmisją na żywo z przebiegu obrony.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Jakub Wagner

Regularised differentiation of measurement data in systems for healthcare-oriented monitoring of elderly persons

Zregularyzowane różniczkowanie numeryczne danych pomiarowych w monitoringu osób starszych, stosowanym w systemach opieki zdrowotnej

promotor: prof. dr hab. Roman Z. Morawski

ABSTRACT

The ageing of the global population is a motivation for developing assistive technologies aimed at supporting the independent life of the elderly people. Monitoring systems based on depth sensors and impulse-radar sensors, providing information useful for the healthcare practice, may contribute to improving the quality of life and safety of the elderly people. The research, reported in this thesis, is focused on the development and application of new methods for the regularised numerical differentiation of measurement data acquired by means of such systems. The results of systematic comparison of 71 such methods, based on both synthetic and real-world data, have been provided. These results indicate that the application of the proposed methods enables more reliable detection of the monitored person's falls, and yields estimates of that person's self-selected walking speed less uncertain, if compared to the results achievable by means of the commonly used reference methods.

Keywords: healthcare, numerical differentiation, regularisation, measurement data processing, depth sensors, impulse-radar sensors, biomedical engineering.

STRESZCZENIE

Starzenie się społeczeństw stanowi motywację do rozwoju technologii wspomagających samodzielne życie osób starszych. Systemy monitoringu, wykorzystujące czujniki głębi i impulsowe czujniki radarowe, dostarczające informacje użyteczne z punktu widzenia opieki zdrowotnej, mogą posłużyć do poprawy jakości życia oraz zwiększenia bezpieczeństwa osób starszych. Badania, opisane w niniejszej rozprawie, dotyczą nowych metod zregularyzowanego różniczkowania numerycznego danych pomiarowych pozyskanych przy użyciu takich systemów. Wyniki systematycznego porównania 71 takich metod – dokonanego

z wykorzystaniem danych syntetycznych i rzeczywistych – wskazują, że zastosowanie zaproponowanych metod umożliwia bardziej niezawodną detekcję upadków monitorowanej osoby oraz pozyskanie dokładniejszych estymat szybkości chodu, niż wykorzystanie powszechnie stosowanych metod odniesienia.

Słowa kluczowe: opieka zdrowotna, różniczkowanie numeryczne, regularyzacja, przetwarzanie danych pomiarowych, czujniki głębi, impulsowe czujniki radarowe, inżynieria biomedyczna.

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 inżynieryjno-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 niekrępującego 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 podjęcie 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 czasopismach 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 mgr 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 pożądany efekt uzyskać jednokrokovym 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 wymnażając 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 'J. Wagnier' or similar, written in a cursive style.

Łódź, 22 maja 2020 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka,
Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej

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
Dziedzina: nauki techniczne
Dyscyplina: elektronika

Przedmiotem pracy jest poszukiwanie metod dokładnej estymacji prędkości przemieszczania się oraz metod niezawodnego wykrywania upadków osoby monitorowanej w pomieszczeniach. W rozważanych systemach monitorowania wykorzystano opracowane przez doktoranta algorytmy przetwarzania strumieni danych charakteryzujących obserwowaną scenę 3D. Dane te są pozyskiwane za pomocą czujnika zbliżeniowego – urządzenia typu Kinect [296] oraz radaru impulsowego [297]. Na ich podstawie są obliczane zmieniające się w czasie współrzędne przestrzenne korpusu człowieka. Sekwencje tych współrzędnych są aproksymowane funkcjami różniczkowalnymi, w celu oszacowania chwilowej prędkości ruchu monitorowanej osoby. Uzyskane sekwencje prędkości są podstawą wykrywania upadków. Autor dysertacji w systematyczny sposób analizuje możliwości wyboru odpowiednich metod różniczkowania oraz optymalnego doboru parametrów tych metod w celu zmniejszenia wpływu niepewności pomiaru danych wytwarzanych przez czujniki elektroniczne na niepewność estymatorów prędkości ruchu i liczby upadków monitorowanej osoby.

Hipotezę naukową przedstawiono klarownie na str. 41 rozprawy. Badania zaplanowane i przeprowadzone w celu zweryfikowania tej hipotezy obejmowały szeroki zakres zagadnień z zakresu metrologii elektronicznej, z podstawami teoretycznymi w analizie matematycznej, statystyce i metodach numerycznych. Rozważono aproksymację sekwencji pomiarowych za pomocą wielomianów algebraicznych i trygonometrycznych, funkcji wykładniczych wielomianu, funkcji sklepanych, a także liniowych kombinacji funkcji bazowych nie będących wielomianami. Aproksymację zdefiniowano na skończonym przedziale czasu $[0, T]$. Założono, że dane pomiarowe są dostępne w N dyskretnych chwilach tego przedziału. Metody różniczkowania podzielono na dwie klasy – skalarne i wektorowe – zależnie od ograniczeń na liczbę N oraz na liczbę punktów na osi czasu, w których estymowano pochodną

A. Materka

(rozdz. 3.2). Spośród metod skalarnych wybrano 5 znanych schematów wykorzystujących różnice skończone (BD, FD, CD3, CD5, CD7, tab. 3.1) i dwie metody niewielomianowe (CS3 oraz CE3, str. 48). Metody wektorowe obejmują wykorzystanie funkcji sklepanych VP (str. 51) i aproksymację za pomocą funkcji gaussowskich VE oraz potęg funkcji kosinusoidalnej VC zaproponowaną we współautorskim artykule Doktoranta [310] (str. 52). Oszacowano wartości oczekiwane i wariancje błędów estymacji pochodnych – wynikających z niedokładności przybliżenia sekwencji danych założoną funkcją ciągłą oraz z propagacji błędów pomiaru elementów wektora danych (rozdz. 3.3).

Badano skuteczność regularyzacji otrzymanych rozwiązań, będącej rezultatem nakładania ograniczeń na wartości parametrów funkcji aproksymujących, norm funkcji i ich pochodnych, współczynników rozwinięcia pochodnych funkcji w szereg oraz na wartości samych funkcji i ich pochodnych. Zbadano 26 metod różniczkowania. Zdefiniowano je w rozdziałach 4.4-4.5 i zestawiono je w tabeli 4.1. W algorytmach piętnastu z nich uwzględniono różne formy regularyzacji.

Skuteczność regularyzacji zależy od parametrów algorytmu. Niektóre z tych parametrów są znane *a priori*, większość jest dobierana stosownie do właściwości danych pomiarowych. Podstawą optymalizacji jest w pracy 5 różnych strategii ilościowej oceny rozbieżności między wynikami obliczeń i danymi pomiarowymi, scharakteryzowanych w rozdz. 4.6. Stosowne strategie zaimplementowano w pakiecie opracowanych przez Doktoranta programów komputerowych w środowisku MATLAB.

Wybrane i szczegółowo zdefiniowane algorytmy przetwarzania danych, zaimplementowane w programach komputerowych, zostały zaaplikowane do dwóch zbiorów danych – pozyskanych z pomiarów (rozdz. 5, 7 i 8) oraz syntetycznych – symulowanych numerycznie (rozdz. 6.1). Wygenerowano 1000 stujednoelementowych sekwencji danych syntetycznych dla każdej z 24 wartości współczynnika sygnału do szumu (6.6) w zakresie [20,70]. Sekwencje otrzymane dla dwóch wartości tego współczynnika – odpowiadających małym i dużym zaburzeniom losowym o rozkładzie gaussowskim – wykorzystano do oceny skuteczności metod optymalnego doboru parametrów regularyzacji (rozdz. 6.2). Podstawą oceny jakości metod różniczkowania była poszerzona niepewność zdefiniowana wzorem (6.4) oraz uśredniony w zbiorze 1000 sekwencji stosunek współczynnika sygnału do szumu estymowanej pochodnej do współczynnika sygnału do szumu sekwencji danych, SNRR (6.8). Stwierdzono, że wartości optymalne parametrów na ogół nie odpowiadają minimum poszerzonej niepewności estymatora pochodnej (6.4), ani też dużym wartościom współczynnika SNRR (rys. 6.4). Dla każdej ze strategii optymalnego doboru parametrów zidentyfikowano te algorytmy różniczkowania, dla których obliczona wartość parametru była najbliższa współrzędnej minimum niepewności (tab. 6.1). Badania opisane w rozdziale 6.2 prowadzą do ogólnego wniosku, że różne algorytmy regularyzacji powinny być stosowane w połączeniu z właściwymi dla nich strategiami optymalizacji parametrów.

W rozdziale 6.3 porównano rozpatrywane metody różniczkowania zastosowane do danych symulowanych. Wykazano istotne znaczenie regularyzacji w zadaniu poprawy dokładności

R. Matka

algorytmów różniczkowania. Przedstawiono szereg innych spostrzeżeń dotyczących możliwości zmniejszenia wpływu niepewności danych na niepewność estymat pochodnej i zilustrowano je licznymi wykresami. Rozdział 7 zawiera opis i dyskusję wyników badania wszystkich 26 metod różniczkowania zaaplikowanych do estymacji prędkości przemieszczania się osoby monitorowanej za pomocą urządzenia Kinect i dwóch radarów impulsowych. Są one potwierdzeniem mniejszej niepewności estymatorów wykorzystujących regularyzację oraz ilustracją specyficznych własności różnych schematów różniczkowania w rozpatrywanym zastosowaniu. Między innymi, metoda VP-TV-DP najlepiej szacuje prędkość osoby monitorowanej na podstawie danych z radarów i lepiej tłumi quasiokresowe składowe prędkości związane z chodem występujące w tych danych. Z kolei metoda VE-TR-SURE jest rekomendowana w odniesieniu do danych dostarczanych przez czujniki odległości typu Kinect; najlepiej odwzorowuje ona prędkość wraz z jej quasiokresowymi składowymi.

W rozdziale 8 zastosowano wybrane metody różniczkowania do sekwencji danych pochodzących z czujników Kinect pierwszej i drugiej generacji otrzymanych w rezultacie monitorowania kilku osób symulujących m.in. upadki. Obliczano 4 wybrane cechy (8.1) – (8.4) oszacowanych sekwencji prędkości, jako dane dla klasyfikatora typu SVM w wersji [361] pozwalającej na szacowanie prawdopodobieństwa *a posteriori* przynależności wektora danych wejściowych klasyfikatora do jednej z dwóch ustalonych klas [w czasie zapisu obrazu przez czujnik zbliżeniowy monitorowana osoba upadła (klasa 1), lub alternatywnie nie upadła (klasa 2)]. Po etapie uczenia, klasyfikator został wykorzystany w teście walidacji skrośnej do badania skuteczności opracowanych metod szacowania prędkości przemieszczania się osoby monitorowanej zastosowanych do przetwarzania wszystkich 1475 sekwencji pomiarowych w zadaniu rozpoznawania sekwencji odwzorowujących upadki. Dla różnych wartości progu decyzyjnego odnoszącego się do wyjścia klasyfikatora szacowano dokładność wykrywania upadków obliczając czułość i precyzję klasyfikacji (rozdz. 8.1). Obliczano też względną liczbę fałszywych alarmów w zbiorze danych *Household* nie zawierającym sekwencji odpowiadających upadkom. Otrzymane wyniki tych statystycznych badań, pozwalające na porównanie metod szacowania prędkości, przedstawiono na rys. 8.5 i 8.6 oraz w tab. 8.1 i 8.2. Potwierdzono, że regularyzacja numerycznego różniczkowania prowadzi do zwiększenia precyzji wykrywania upadków, dla ustalonej czułości. Metody CD3-DS-SURE, VC-NB-SURE oraz VP-LW-NCP prowadzą do mniejszej liczby fałszywych alarmów niż metody bez regularyzacji.

Rozprawa jest bardzo spójna metodologicznie, cechuje ją szeroki zakres rozważanych wariantów przetwarzania danych pomiarowych oraz gruntowny – krytyczny i kreatywny – przegląd stanu wiedzy. Tekst dysertacji jest ilustracją kompleksowego i skrupulatnego, rzetelnego podejścia Doktoranta do pracy naukowej.

Zagadnienie naukowe podjęte w rozprawie ściśle się wiąże z udoskonalaniem rozwiązań technicznych wspomagających opiekę nad osobami starszymi (lub osobami o ograniczonej sprawności). Oprócz wartości poznawczej, badania będące przedmiotem projektu doktorskiego mgra Jakuba Wagnera mają potencjalne znaczenie praktyczne.

RMateke

Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny i obejmuje przegląd stanu wiedzy, sformułowanie hipotez badawczych, opracowanie stosownych algorytmów i programów komputerowych, zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów numerycznych, analizę i dyskusję wyników. Treść rozprawy podzielono na zwarte wprowadzenie, wykaz użytych symboli, 9 rozdziałów logicznie odpowiadających kolejnym etapom prowadzenia badań i dowodzenia hipotez oraz wykaz prac źródłowych.

Wprowadzenie do tematyki rozprawy oraz analiza stanu wiedzy są przeprowadzone na podstawie literatury, głównie najnowszych publikacji anglojęzycznych w renomowanych czasopismach naukowych z ostatnich kilku lat, a także kilku dostępnych w Internecie opisów rozwiązań komercyjnych. Odniesienia do prac archiwalnych ograniczono do niezbędnych, kluczowych lub przełomowych dla danego zagadnienia, np. w rozprawie odwołano się do artykułu Landwebera z 1951 roku. Całkowita liczba cytowanych źródeł jest bardzo duża – równa 363. Doktorant ze swobodą korzysta z informacji w nich zawartych. Przegląd literatury jest krytyczny i wnikliwy, zarówno w zakresie podstaw teoretycznych metod numerycznego przetwarzania sekwencji danych, jak i analizy rezultatów takiego przetwarzania. Dobór źródeł oraz przeprowadzona przez mgra Wagnera dyskusja ich zawartości świadczą o tym, że posiada on wiedzę niezbędną do prowadzenia badań naukowych mieszczących się w zakresie dyscypliny elektronika i że potrafi twórczo wykorzystać tę wiedzę w praktyce.

Podstawą rozwiązywania problemu jest założony ogólny model pomiaru przedstawiony na rys. 2.1. Znane oraz rozwinięte przez Doktoranta algorytmy estymacji prędkości przemieszczania się monitorowanej osoby zbadano wszechstronnie w wielu wariantach. Słuszność hipotez potwierdzono eksperymentalnie, posługując się zaplanowanym w sposób przemyślany doświadczeniem i analizą wyników komputerowego przetwarzania obszernego zestawu trzech zbiorów rzeczywistych danych pomiarowych oraz zbioru danych utworzonego metodą symulacji komputerowej. Scharakteryzowana powyżej metodyka realizacji badań przeprowadzonych przez mgra Wagnera jest oparta na uzasadnionych założeniach. Doktorant rozwiązał postawione zagadnienie. Kompleksowe, wyczerpujące podejście do opracowania i walidacji proponowanych metod przetwarzania danych jest wyróżniającą się cechą badań opisanych w rozprawie.

Oryginalne osiągnięcia naukowe mgra Wagnera opisane w recenzowanej rozprawie to opracowane przez Niego nowe warianty estymacji pochodnej funkcji na podstawie jej zakłóconych próbek, adaptacja algorytmów optymalnego doboru parametrów regularyzacji metod numerycznego różniczkowania sekwencji danych, systematyczne i szerokie ujęcie zagadnienia matematycznego modelowania procedur przetwarzania sekwencji danych dla potrzeb nieinwazyjnego monitorowania ruchu człowieka w pomieszczeniu, zaplanowanie i przeprowadzenie nieprzeciętnie dużej liczby wielowariantowych eksperymentów numerycznych i opracowanie pakietu stosownych programów w środowisku MATLAB, udostępnionych publicznie. Wartość i znaczenie prac Doktoranta zostały docenione przez innych badaczy międzynarodowej społeczności. Ich częściowe wyniki zostały opublikowane m.in. w oryginalnych artykułach w uznanych periodykach naukowych [*Biomedical Signal*

R. Matek

Processing and Control i Measurement] oraz w materiałach kilkunastu renomowanych konferencji.

Rozprawa została zredagowana bardzo starannie, napisana zwięźle i przejrzysto w języku angielskim. Jej struktura odpowiada oczekiwaniom odnoszącym się do dzieł naukowych. Wykresy, rysunki, tabele i wzory są czytelne. Przedstawione wnioski i argumenty są przekonujące. Dostrzegłem nieliczne fragmenty tekstu wymagające ewentualnej korekty, na przykład:

suppressing frequencies below → suppressing signals of frequency lower than (str. 100),
solid line → black line (str. 109),
dotted line → blue line (str. 109),
yield estimates → yield inaccurate estimates (str. 150).

Uzupełnienie podpisu rys. 6.49 wartością czasu trwania obliczeń (np. w sekundach) dla metody odniesienia BD dałoby czytelnikowi możliwość pełniejszych porównań. Brakuje też uzasadnienia wyboru funkcji (6.2) jako podstawy generowania danych syntetycznych.

Magister Jakub Wagner przedstawił oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego w dziedzinie nauk technicznych. Kandydat posiada wiedzę teoretyczną i praktyczną potrzebną do prowadzenia badań naukowych w dyscyplinie elektronika (odpowiadającej dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych i dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika według klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 20 września 2018 roku). Stosując metody badawcze właściwe dla tej dyscypliny udowodnił, że techniki monitorowania ruchu osób w pomieszczeniach za pomocą czujników radarowych i zbliżeniowych można znacząco udoskonalić za pomocą regularyzowanych algorytmów estymacji prędkości ruchu na podstawie próbkowanych zakłóconych sygnałów wytwarzanych przez te czujniki. Stwierdzam w związku z tym, że Doktorant spełnił wymagania Ustawy z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym... z późniejszymi zmianami (Dz. U., 27 września 2017 r., poz. 1789).

Dysertacja doktorska Jakuba Wagnera wyróżnia się szerokim zakresem merytorycznej dyskusji, wnikliwością analizy stanu wiedzy na temat podjętego zagadnienia naukowego i kompleksowym podejściem do jego rozwiązania. Jest zredagowana i napisana wzorcowo. Wysoko oceniam wkład intelektualny jej autora w rozwinięcie i weryfikację koncepcji wykorzystania regularyzowanych metod różniczkowania numerycznego do udoskonalenia metod monitorowania ruchu przy wykorzystaniu czujników elektronicznych oraz w planowanie i realizację eksperymentów demonstrujących własności badanych rozwiązań. Otrzymane rezultaty mogą się przyczynić do rozwiązania ważnych problemów społecznych. Jego dysertację doktorską uważam za wybitnie dobrą, zasługującą na wyróżnienie.

Rudolf Metka