

prof. dr hab. inż. Andrzej Materka
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

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 minimom 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. Mantele

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 skróśnej 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 (rozd. 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.

K. Matyka

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 zwięzłe 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*

RMateka

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.

Krzysztof Matuska