



Dr hab. inż. Marcin Korzeń
Katedra Metod Sztucznej Inteligencji i Matematyki Stosowanej
Wydział Informatyki, ZUT
ul. Żołnierska 49, 71-210 Szczecin
mkorzen@wi.zut.edu.pl

Szczecin, 3.08.2016 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Kutysa pod tytułem:

**Algorytm adaptacyjny estymacji wektora stanu z
niemierzonymi współrzędnymi dla obiektów o strukturze
szeregowej.**

Podstawa wykonania recenzji:
uchwała Rady Wydziału Informatyki ZUT w Szczecinie z dnia 26.14.2016 r.

1 Wprowadzenie

Praca w zasadniczej części dotyczy estymacji wektora stanu obiektów dynamicznych opisanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Samo zagadnienie estymacji jest zadaniem bardzo ważnym z praktycznego punktu widzenia i ma ono szereg zastosowań w różnych dziedzinach nauki i techniki, zwłaszcza w takich przypadkach, gdy pomiar stanu obiektu nie może być wykonany bezpośrednio lub jest obciążony dużym błędem. W różnych wariantach zadanie estymacji/filtracji stanu obiektu ma znaczenie w takich dziedzinach jak: regulacja automatyczna (jako istotny fragment toru pomiarowego), filtracja sygnałów, pomiary wielkości dynamicznych, czy śledzenia obiektów. Pracę można zakwalifikować na pograniczu dwóch dyscyplin naukowych informatyki i automatyki oraz zdecydowanie należy umieścić ją w obrębie nauk technicznych. Dotyczy ona takich obszarów: jak analiza numeryczna, modelowanie i symulacja, teoria sterowania oraz filtracja sygnałów.

Główny przykład w wybrany przez Autora pracy dotyczy modelowania zanieczyszczeń w rzece. Jest to zarówno ważny obiekt techniczny, jak i wystarczająco złożony model jak na potrzeby pracy doktorskiej. Predykcja poziomów zanieczyszczeń jest bezspornie zagadnieniem ważnym, dysponując nią oraz mając odpowiednie urządzenia hydrotechniczne można kolejnym kroku wykorzystać pomiary i predykcje do sterowania. Wybór takiego obiektu do testowania własnych rozwiązań uważam jak najbardziej za właściwy.

1.1 Cel badawczy oraz teza

Głównym celem pracy postawionym przez Autora było opracowanie adaptacyjnego algorytmu zmiany współczynnika wzmocnienia w filtrze Kalmana. Poprawa takiego algorytmu jak filtr Kalmana jest zadaniem ambitnym i należy mieć świadomość co najmniej pięćdziesięcioletniej historii stosowania z sukcesami i ciągłego ulepszania tego algorytmu. Autor stawia tezę, że proponowanie przez niego rozwiązanie będzie miało cechy korzystniejsze od standardowego algorytmu (który w kroku estymacji wykorzystuje rozwiązywanie równania filtru - wyznaczenie estymaty stanu oraz równania Riccatiego do wyznaczania macierzy kowariancji błędu estymacji).

Przez cechy korzystniejsze Autor rozumie poprawę przynajmniej jednego z dwóch parametrów algorytmu filtracji jakimi są: czas kroku estymacji oraz jakość odtwarzania zmiennych stanu. Jakość estymacji w eksperymentach w przedstawionych eksperymentach wyznaczyć jest łatwo ponieważ Autor ma pełną wiedzę na temat modelu i w kontrolowany sposób dodaje szumy do modelu. Przyjęto empiryczny sposób uzasadnienia tezy wykonując szereg eksperymentów dla wybranego modelu rzeki, z wykorzystaniem autorskiego algorytmu adaptacyjnego oraz algorytmu referencyjnego. W pracy zawężone jest pole zastosowań proponowanego algorytmu do obiektów o strukturze szeregowej

2 Omówienie struktury pracy

Praca napisana na 137 stronach maszynopisu, składa się z siedmiu rozdziałów w tym: „Wprowadzenie” oraz „Wnioski końcowe i podsumowanie”. Rozdział 2. (Metody numeryczne w zagadnieniach modelowania matematycznego) oraz początki rozdziałów 3. i 4. („Modele matematyczne obiektów o strukturze szeregowej” oraz „Estymacja stanu obiektu filtrem Kalmana”) mają charakter ogólny i wprowadzający w tematykę rozprawy. Pozostałe rozdziały stanowią wkład własny Autora rozprawy, i zawierają w znacznej mierze raporty z eksperymentów numerycznych. Rozdziały 5. i 6. („Projekt adaptacyjnego algorytmu estymacji stanu obiektu szeregowego” oraz „Rozszerzony adaptacyjny algorytm estymacji stanu”) zawierają opis głównych wyników Autora i stanowią w połączeniu z rozdziałem 4. zasadniczą część pracy. Prace uzupełnia spis pozycji bibliograficznych zawierający 72 pozycje.

Tytuł pracy jest zgodny w całości z zawartością pracy. Struktura pracy, mimo pewnych mankamentów jest przemyślana, w dużej części widoczny jest istotny wkład autora. W dalszej części przedstawiona zostanie szczegółowa charakterystyka rozdziałów wraz z głównymi uwagami merytorycznymi.

Rozdział 1. Rozdział wprowadza w tematykę pracy. W tej części określony został cel badawczy oraz postawiono główną tezę pracy. Dokonano krótkiego przeglądu aktualnego stanu wiedzy oraz przybliżono główny model wybrany do celów badawczych.

Rozdział 2. Rozdział ten opisuje wybrane aspekty analizy numerycznej wykorzystywane w toku pracy. Opisano pokrótce błędy występujące w obliczeniach numerycznych, oraz metody rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych jak metodę Eulera czy metodę Rungego-

Kutty drugiego rzędu. W rozdziale tym Autor przedstawia szereg definicji i pojęć związanych z modelowaniem numerycznym.

Rozdział 3. Tytuł rozdziału 3. (Modele matematyczne obiektów o strukturze szeregowej) jest zdecydowanie mylący. W zasadniczej części rozdział ten zawiera opis jednego modelu: rzeki zanieczyszczonej. W dwóch początkowych sekcjach (3.1 i 3.2) Autor przedstawia opis głównych parametrów fizyko-chemicznych opisujących stan rzeki, Kolejna sekcja (3.3) zawiera opis modelu rzeki zanieczyszczonej z dwoma zmiennymi: RT (rozpuszczony tlen ozn. x_2) oraz BZT (biologiczne zapotrzebowanie na tlen x_1). Oba parametry są funkcjami przede wszystkim czasu t , ale także zależą od miejsca pomiaru (z). Sam opis modelu przedstawiono zrozumiale. W kolejnych sekcjach Autor rozważa trzy schematy rozwiązania modelu:

1. z ustalone – odpowiada to układowi równań różniczkowych zwyczajnych;
2. z jest zmienną – odpowiada układowi równań różniczkowych cząstkowych;
3. rozwiązanie równań cząstkowych wzdłuż charakterystyk, odpowiada to sprowadzeniu rozwiązania równania cząstkowego do wielu równań różniczkowych zwyczajnych.

Przedstawione są eksperymenty numeryczne dla poszczególnych typów równań i rozwiązań. Rozdział ten przybliży postać badanego obiektu, dobrze wprowadza w tematykę pracy oraz umożliwia w kolejnej sekcji sformułowanie zagadnienia estymacji stanu obiektu na podstawie sygnałów pomiarowych. W rozdziale tym brakuje ogólnego odniesienia się do układów o strukturze szeregowej oraz brak jest definicji obiektu o takiej strukturze. Ponadto w toku całej pracy nie podano motywacji dla wyboru obiektów o takiej strukturze oraz związków akurat tej wybranej struktury z samym procesem estymacji stanu.

Rozdział 4. Rozdział ten zawiera wprowadzenie teoretyczne do filtracji sygnałów. Początkowa część przybliży pojęcia z związane z procesami stochastycznymi, opisany kolejno model Gaussa–Markowa, estymacja stanu obiektu opisanego za pomocą równań stanu w dodaniem czynników losowych. W dalszej części rozdział ten zawiera badania symulacyjne estymacji stanu obiektu filtrem Kalmana pokazano wpływ doboru wzmocnienia filtru oraz wpływ kroku dyskretyzacji na jakość odtwarzania.

Rozdział 5. W rozdziale tym zawarto opis autorskiego adaptacyjnego algorytmu estymacji stanu obiektu o strukturze szeregowej. Jest to centralny rozdział punktu widzenia całej pracy i zawiera oryginalny wkład Autora. Początkowa część rozdziału zawiera autorskie wprowadzenie do algorytmiki oraz szereg definicji związanych z algorytmiką. Ta część jest nieco oderwana od głównego wątku samej pracy. W dalszych sekcja przedstawiona jest jednak część właściwa – opis głównego algorytmu do filtracji, oraz szereg eksperymentów pokazujących jakość filtracji. Przedstawiony jest wariant filtracji stanu (estymacja dwóch współrzędnych RT i BZT) na podstawie pomiaru jednego tylko parametru: RT .

Rozdział 6. Rozdział ten prezentuje ulepszony wariant algorytmu estymacji z rozszerzonym oknem czasowym. W dalszej części przedstawiono eksperymenty porównawcze badające zachowanie obu algorytmów, w różnych konfiguracjach jak: inicjacja współczynników wzmocnienia filtra Kalmana wartościami zerowymi, estymata przy zerowych warunkach początkowych, itp. są to trudniejsze numerycznie przypadki i widać, że algorytm z szerszym oknem obserwacji po pewnym czasie zaczyna lepiej odtwarzać sygnały.

Uwagi do bibliografii Bibliografia Zawiera 72 pozycje, z czego 21 to pozycje anglojęzyczne, natomiast pozostałe pozycje to prace napisane w języku polskim. Około 30 pozycji to podręczniki lub monografie pozostałą część stanowią artykuły specjalistyczne oraz źródła internetowe. 18 prac dotyczy szeroko rozumianej gospodarki wodnej, 37 prac dotyczy filtracji sygnałów, teorii sterowania lub numerycznych aspektów rozwiązywania równań różniczkowych, ponadto 9 pozycji to prace czysto informatyczne głównie dotyczące algorytmiki. Osiem pozycji stanowią prace Autora rozprawy – są to prace ściśle powiązane z tematyką rozprawy.

Niektóre pozycje bibliograficzne zawierają błędy lub są niekompletne przykładowo: pozycje: 12, 23, 14, 50, 53 – trudno rozróżnić czy są to artykuły, skrypty czy książki; brakuje nazwy czasopisma, wydawcy miejsca wydania. W pozycji 28 brakuje adresu www. Brak jednolitego zapisu książek, skryptów czy artykułów (np. kursywą tytuł książki, czy font prosty tytuł artykułu, a kursywą tytuł czasopism).

Sam przegląd literatury jest miejscami wykonany niezbyt dokładnie, a cytowania w tekście odnoszą się często do prac przypadkowych. Czasami w tekście pojawiają się cytowania do prac późniejszych luźno związanych z prezentowaną tematyką, natomiast brak jest odniesienia do rzeczywistych prac źródłowych. Jest tak np. na stronie 68 przy opisie filtra Kalmana, są odniesienia do dwóch prac późniejszych (pozycje 32 i 60). Taki sposób cytowania jakiegokolwiek pozycji poruszającej dane zagadnienie jest mylący dla czytelnika. Może on sugerować, że dopiero w 2005 roku pojawiło się założenie o szumie normalnym w kontekście filtracji Kalmana, co jest oczywiście błędne. Podobnie przy stwierdzeniu na stronie 66: że rozkład normalny jest jednoznacznie wyznaczony przez dwa parametry: średnią i wariancję, jest odnośnik do pracy nr 60 z 2007 roku. W przypadku podawania faktów powszechnie znanych cytowanie nie jest wymagane, wstawiając przypis należy podać pracę źródłową. Stwierdzenie to pojawia się jako twierdzenie w jednej ze wczesnych prac samego Kalmana z 1960 roku, które są łatwo dostępne. Generalna uwaga odnośnie bibliografii jest taka, brak jest odwołań do najnowszych prac z zakresu filtracji sygnałów. Znacznie lepiej przedstawiona bibliografia dotycząca modelowania oraz zagadnień hydrologicznych.

3 Charakterystyka uzyskanych wyników oraz główne uwagi do rozprawy

Mocne strony rozprawy:

1. Zgodnie z celem pracy zaimplementowano autorski algorytm adaptacyjny odtwarzania stanu obiektu. Algorytm przedstawiono w dwóch wariantach: w pierwszym zmiana wzmocnienia bazuje na pomiarach i estymacie wyznaczanych tylko w bieżącym

kroku, oraz drugi ze zmianą wzmocnienia bazującą na kilku wcześniejszych obserwacjach. Algorytm został zweryfikowany empirycznie w wielu różnych wariantach. Zgodnie z oczekiwaniami algorytm z większym oknem obserwacji lepiej odtwarza sygnały zwłaszcza w przypadku skokowych zmian odtwarzanego sygnału. Eksperymenty te w pewnym stopniu potwierdzają główną tezę postawioną w pracy.

2. Widać duży nakład pracy w przygotowaniu eksperymentów, opanowanie zarówno technik symulacji, rozwiązywania równań różniczkowych, jak i samych technik filtracji. Wymagało to od Autora sporo umiejętności w tym zakresie. Widać również, że Autor sprawnie porusza się w tematyce modelowania przepływów rzecznych i poznał dość dobrze sam badany obiekt.
3. W pracy przebadano wiele wariantów algorytmów oraz wiele wariantów modeli. W tym przebadano ważne przypadki jak np. odtwarzanie pełnego wektora zmiennych stanu na podstawie nie pełnych obserwacji, jest to częsta praktycznie oraz dobrze umotywowana w tym przypadku sytuacja (gdy na pomiar parametru BZT trzeba czekać kilka dni, a pomiar parametru RT odbywać się może znacznie szybciej). Widać, że również w takiej sytuacji proponowany algorytm daje porawne wyniki.

Główne uwagi, pytania i zastrzeżenia:

1. Autor wprowadza znaczną liczbę definicji w tym elementarnych jak „metoda numeryczna”, „algorytm”, nie definiuje natomiast zasadniczych pojęć dla rozważanej rozprawy jak np.: obiekt o strukturze szeregowej. Nikt nie wymaga od tego rodzaju pracy wykładu na takim poziomie elementarności. Mimo, że polemizowałbym z podaną definicją „metody numerycznej” to nie mam wątpliwości, że sama praca jak i opisywane algorytmy dotyczą metod numerycznych. Jednak bez podania definicji układu o strukturze szeregowej trudno stwierdzić czy wybrany przez Autora obiekt rzeczywiście jest przykładem obiektu badanego w rozprawie typu.
2. Rozdział 3. powinien zawierać, zgodnie z tytułem, opis matematycznych modeli obiektów o strukturze szeregowej. Zawiera on natomiast jedynie szczegółowy opis przykładowego obiektu (rzeki wraz z dopływami). Zdecydowanie brakuje mi w tym rozdziale (i w całej pracy) definicji obiektu o strukturze szeregowej, oraz uwypuklenia tych cech modeli matematycznych, które są wspólne dla wszystkich obiektów o strukturze szeregowej.
3. Nie jest jasne jak Autor rozprawy rozróżnia zagadnienie początkowe oraz zagadnienie brzegowe. Przykładowo jak wygląda zagadnienie brzegowe dla równania różniczkowego zwyczajnego (np. dla wahadła opisanego na stronie 17)? Czy powszechnie stosowaną w pracy metodę Rungego-Kutty można bezpośrednio zastosować do rozwiązania równań z warunkami brzegowymi?
4. Optymalność filtru Kalmana związana jest ściśle z gaussowska naturą szumu. Dobrze byłoby zidentyfikować jawnie naturę zakłóceń w tym modelu, tak by dać czytelnikowi ogłęd, że normalność szumu jest w rozważanym przykładzie założeniem akceptowalnym. Można sobie wyobrazić, że intensywny opad czy nagłe wezbranie wód (opad

odległy) są formami zakłócenia i raczej nie posiadają rozkładu normalnego. Ponadto charakter opadu ma ścisły związek sporą roku, co podnosi kwestie stacjonarności szumu w tym przypadku. Ponadto samo miejsce pomiaru i ogólniej sposób pobierania próbki generuje błąd o charakterze losowym. Brakuje mi trochę w pracy dokładniejszej dyskusji. Jest jedynie krótka wzmianka na początku rozdziału 3. oraz w punkcie 4.3. W zasadzie z wymienionych zakłóceń, niedokładność przyrządów może być bez zastrzeżeń modelowana szumem gaussowskim. Rodzi się tu pytanie do Doktoranta: Czy większy zysk będzie z ulepszania filtru Kalmana czy z odejścia od założenia normalności na rzecz innych rodzajów filtrów.

5. Trudno jednoznacznie zorientować się czy w pracy dopływ traktowany jest jako wymuszenie (kolejne wejście, którym można sterować, sugeruje to rysunek 3.6) czy jest wprowadzany do modelu jako warunek początkowy (sugerując równania 4.16, 4.17), czy jest traktowany jako zakłócenie (dopływy nie występują jawnie w równaniach 3.1-3.6).
6. Brak jest w pracy odniesień do ogólniejszych technik filtracji jak np. filtracja bayesowska. Są jedynie dwa cytowania (pozycje 12, 23.) i wzmianka na stronie 10 o filtrach cząsteczkowych. Te techniki filtracji są współcześnie bardzo szeroko wykorzystywane w algorytmach śledzenia (ang. tracking) obiektów.
7. W pracy zawężono rodzaj struktury obiektu, w związku z tym nasuwają się pytania do Autora rozprawy: proszę wskazać, które elementy proponowanego algorytmu adaptacyjnego uwzględniają szeregową strukturę obiektów? oraz czy zmiana struktury obiektu pogorszy własności proponowanego algorytmu?
8. Kolejna moja uwaga dotyczy prezentacji jakości odtwarzania. Autor prezentuje w zasadzie jedynie przebiegi stanu obiektu oraz estymaty, na większości wykresów brakuje toru pomiarowego, przedstawiono je jedynie na wykresach w sekcji 4.3. Jakość estymacji zwykle ocenia się w stosunku do jakości pomiaru czy poziomu szumów pomiarowych, bo rzeczywisty stan obiektu zwykle znany jest jedynie w eksperymentach w pełni kontrolowanych. Brakuje mi też podania miar ilościowych jakości estymacji oraz porównania czasów obliczeń.
9. Ponieważ mamy do czynienia z układem ciągłym, który jest obserwowany w dyskretnych chwilach czasu, istnieje kwestia doboru kroku dyskretyzacji brakuje mi szerszej dyskusji dotyczącej kwestii wyboru kroku dyskretyzacji i powiązanej z tym oceny dokładności symulacji. Chociaż eksperymenty pokazane na stronach 84-86 pokazują, że wpływ kroku dyskretyzacji na jakość rozwiązania był badany.

4 Uwagi edytorskie i redakcyjne

Mniejsze uwagi do treści i zapisów matematycznych:

1. str 19: „... jeżeli rząd interpolacji $R_n(x)$...”, powinno być: „błąd”; Uwaga do zdania poniżej: „... dla każdego wielomianu interpolacyjnego można wyprowadzić wzór róż-

niczkowania numerycznego”, i analitycznego chyba też, który zresztą będzie dokładny nie bardzo widać gdzie tu korzyść?

2. str. 21: Przy opisie metody Eulera i dalej Rungego–Kutty brak jest jasnego postawienia problemu, rozwiązywanie równań różniczkowych można rozważać w wielu różnych wariantach, nie do każdego typu metoda Eulera się nadaje.
3. str. 24, wzór 2.9: pomyłone jest oznaczenie s i m w takiej postaci dolny wzór jest niezrozumiały k_s w żaden sposób nie zależy od m .
4. str. 41, i w dalszej części: niestandardowe oznaczenie $col[x1, x2]$ czy to oznacza transpozycję?
5. brak jest konsekwencji i jednolitych zasad przy składaniu wyrażeń matematycznych np.: na str. 99 K_f wyprostowane, natomiast pochylone we tekście na str 98, podobnie $P(t)$ we wzorach 4.12, 4.13 i wielu innych miejscach. Różna wielkość fontu we wzorach oraz ponownie w niektórych miejscach wklejone bitmapy (por. wzór 3.26). Podobnie w rozdziale 4: X, Y i X, Y pisane są różnie we wzorach i w tekście.
6. wzór 3.6a: niestandardowe oznaczenie pochodnych cząstkowych, powinno być: $\frac{\partial x(z, t)}{\partial t}$, zamiast użytego $\frac{dx(z, t)}{dt}$
7. wzory 4.21, 4.22, warunkowanie oznacza się standardowo pionową kreską $x(t_k | t_{k-1})$ a nie $x(t_k / t_{k-1})$, we wzorach wygląda ono jak symbol dzielenia.
8. str. 50: warunek 3.8, nie jest jasne co to jest i oraz czym jest $x_i(0, t)$ oraz $x_{i-1}(1, t)$ oraz czemu nazywa się to warunkiem brzegowym
9. str. 57: $\exists_i$ użyte we wzorach 3.9 i 3.10 nie zostało zdefiniowane; tu chyba jest błąd, na kolejnej stronie w podobny sposób oznaczono zakłócenie.
10. str. 58: równanie 3.13 oraz warunek początkowy: czym jest $i0$? zamiast $x_0(z_{i0})$ poprawniej chyba byłoby napisać x_{i0} .
11. str. 66: W definicjach podanych przez Autora jest zapętlenie definicji — pierwszy akapit: „Proces stochastyczny .. jest funkcją losową”, trzeci akapit: „Funkcję przypadkową ... nazywać będziemy procesem stochastycznym”??? Proces stochastyczny definiuje się standardowo jako rodzinę zmiennych losowych (proces ciągły) lub ciąg zmiennych losowych (proces dyskretny w czasie), dodając pewne warunki.
12. str. 95-99: Nie widać jawnego wyrażenia dla zmiennej dK_F , jedynie wzmianka, że jest ona proporcjonalna do $\epsilon(t)$.

Praca zawiera pewną liczbę błędów edytorskich, ortograficznych oraz typograficznych, których Autor rozprawy prawdopodobnie by uniknął, gdyby raz czy dwa razy przejrzał ją przed wydrukiem, niektóre zamieszczam poniżej:

1. str. 7: "... aby nie destabilizować rozwiązania całościowe ..."
2. str. 8: "... dokonano doboru metod... oraz przeprowadzenie ..."

3. str. 17: „błąd modelu są ...”
4. str. 26: „... za źródeł punktowych ...”, powinno być: „ze”
5. Brak polskich znaków w opisach i osi rysunków
6. Niektóre wykresy zapisane są formie bitmap, a następnie wklejane do tekstu co powoduje widoczną utratę dokładności (przykładowo rys. 5.1 5.11, 5.15, 5.16), część wykresów jest wstawiona prawidłowo w postaci zwektoryzowanej, nie zachowano nawet jednolitego układu prezentacji w obrębie grup podobnych wykresów (por. rys. 5.14 i 5.15, czy diagramy: rys. 5.1 i 5.4). W zasadzie format bitmapy powinien być zarezerwowany jedynie dla zdjęć, jak rys. 3.3.
7. str. 68: „Dziedzina funkcji jest”, powinno być: „Dziedzina”.
8. str. 122: „gdy wzmocnienie filtra odpowiedzialny za ... został ustalony”
9. W wielu miejscach brakuje przecinków.

5 Konkluzja

Mimo stosunkowo dużej liczby uwag szczegółowych praca jest napisana w sposób przemyślany, część eksperymentalna oraz oryginalny wkład Autora nie budzą moich zastrzeżeń. Praca zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w tym przypadku estymacji stanu obiektu dynamicznego. Część eksperymentalna jest rozbudowana, a Autor pokazał, że potrafi postawić sobie i rozwiązać istotne zagadnienie naukowe. Podsumowując stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania Ustawy „o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 13.03.2003 r., z późniejszymi zmianami, w zakresie wymagań stawianych rozprawom doktorskich. Wobec powyższego wnioskuję o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Marcin Bonar