

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, 27.01.2017 r.

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

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

Podstawa wykonania recenzji: Pismo Dziekana Wydziału Informatyki ZUT w Szczecinie z
dnia 27.12.2016 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 obiekt badań 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 rozwiązanie 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 zmieniających się 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 131 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 66 pozycje.

Tytuł pracy jest zgodny w całości z zawartością pracy. Struktura pracy, mimo pewnych mankamentów jest przemyślana, w dużej części pracy 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 przybliża 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 przybliża 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 66 pozycji, z czego 18 to pozycje anglojęzyczne, natomiast pozostałe pozycje to prace napisane w języku polskim. Około 30 pozycji to podręczniki lub monografie pozostała część stanowią artykuły specjalistyczne oraz źródła internetowe. 14 prac dotyczy szeroko rozumianej gospodarki wodnej, około 20 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.

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 stronach 62-64 przy opisie filtra Kalmana, są odniesienia do dwóch prac późniejszych. Taki sposób cytowania jakiegokolwiek pozycji poruszającej dane zagadnienie jest mylący dla czytelnika.

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 estymacje 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 poprawne wyniki.

Główne uwagi, pytania i zastrzeżenia:

1. Autor niepotrzebnie 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 szczegółowy opis przykładowego obiektu (rzeki wraz z dopływami). Brakuje mi w tym rozdziale dokładniejszej definicji co autor rozumie przez obiekt o strukturze szeregowej, oraz uwypuklenia tych cech modeli matematycznych, które są wspólne dla wszystkich obiektów o strukturze szeregowej. Jeżeli przez szeregowość połączymy takie w którym jedynie wyjścia poprzednich bloków wchodzi na wejścia kolejnych, to dopływy jak na rysunku 3.6 trochę komplikują taką strukturę. Jedną uwagę na ten temat uwagę Autor dodał na stronie 46 wskazując na diagonalność macierzy prędkości jako cechę układów o strukturze szeregowej.
3. Optymalność filtru Kalmana związana jest ściśle z gaussowską naturą szumu. Dobrze byłoby zidentyfikować jawnie naturę zakłóceń w tym modelu, tak by dać czytelnikowi ogłód, 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.
4. 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).

5. Brak jest w pracy odniesień do ogólniejszych technik filtracji jak np. filtracja bayesowska. Są jedynie dwa cytowania (pozycje [20], [30]) i wzmianka na stronie 10 o filtrach cząsteczkowych. Te techniki filtracji są współcześnie bardzo szeroko wykorzystywane w algorytmach śledzenia (ang. tracking) obiektów.
6. 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?
7. Kolejna moja uwaga dotyczy prezentacji jakości odtwarzania. Autor prezentuje w zasadzie jedynie przebiegi stanu obiektu oraz estymaty, na części 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.
8. 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 w sekcji 4.3 pokazują, że wpływ kroku dyskretyzacji na jakość rozwiązania był badany.
9. Ostatnia uwaga ogólna dotyczy sekcji 5.1. „Paradygmaty algorytmów”. Jest w niej opisanych szereg autorskich i ogólnych uwag na temat algorytmiki i informatyki, część opisu budzi pewne kontrowersje. Jednak jest to sekcja słabo (lub wcale) powiązana w zasadniczą teścia pracy.

4 Uwagi edytorskie i redakcyjne

Mniejsze uwagi do treści i zapisów matematycznych:

1. str 17: Uwaga do zdania: „... dla każdego wielomianu interpolacyjnego można wyprowadzić wzór różniczkowania numerycznego”, i analitycznego chyba też, który zresztą będzie dokładny nie bardzo widać gdzie tu korzyść? Ponadto użyteczność wzoru 2.5 jest bardzo ograniczona, gdyż zwykle nie dysponujemy jawnie postacią $f^{(k)}(x)$, zwykle błąd tego rodzaju określa się w terminach jakości aproksymacji funkcji f wielomianem oraz pewnych założeń na temat regularności funkcji f .
2. str. 18-19: 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, czy mamy tu do czynienia z zagadnieniem początkowym czy brzegowym, jaki jest rząd równania?
3. str. 21, 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, z .

4. str. 38, i w dalszej części: niestandardowe oznaczenie $col[x1, x2]$ czy to oznacza transpozycję?
5. str. 53: $\exists_i$ użyte we wzorach 3.9 i 3.10 nie zostało zdefiniowane; tu chyba jest błąd, na kolejnej stronie w podobny sposób oznaczono zakłócenie.
6. str. 61: W definicjach podanych przez Autora występuje 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.
7. str. 89-92: 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 lub trzy 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. Brak polskich znaków w opisach i osi rysunków (np. 5.x)
4. str. 62: „Dziedzina tej funkcji jest zbiór ...”
5. 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 jednak 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.

5 Uwagi ogólne do wersji poprawionej pracy

Mając na uwadze, że oceniana praca jest wersją poprawianą oraz fakt, że autor znał uwagi recenzentów, chciałbym podkreślić, że część moich wcześniejszych uwag oraz drobnych usterek nie została skorygowana. Dotyczy to w szczególności uwag edytorskich czy prezentowanych definicji (przykładowo moje zastrzeżenia do definicji procesu stochastycznego). Obniża to nieznacznie moją ostateczną ocenę rozprawy. Na plus należy dodać, że autor usunął niektóre zbędne fragmenty tekstu (w zasadzie mógłby też usunąć sekcję 5.1 ponieważ otwiera tu pole do szerokiej dyskusji, nie związanej z zasadniczą treścią rozprawy), poprawił oznaczenia w tekście, poprawił prezentację w części eksperymentalnej. W pewien sposób Autor starał się również uwypuklić cechy elementów o strukturze szeregowej.

6 Konkluzja

Mimo pewnej 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 tytule naukowym 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.

