

Prof. dr hab. inż. Tadeusz BURCZYŃSKI, czł. rzecz.. PAN

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ul. A. Pawińskiego 5B

02-106 Warszawa

e-mail: tburczynski@ippt.pan.pl

Warszawa, 17.10.2025

**Recenzja
rozprawy doktorskiej**

mgr Yixin Tan

**Control and Optimum Design of Distributed Parameter Systems.
Gradient Flow and Applications to Elasticity Systems**

1. Uwagi ogólne

Niniejsza recenzja została wykonana na zlecenie dr hab. inż. Jana Owsiańskiego, Zastępcę Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Badań Systemowych PAN z dn. 9.07.2025r.

Rozprawa doktorska mgr Yixin Tan jest poświęcona zagadnieniom sterowania optymalnego, optymalizacji kształtu i topologii w zagadnieniach sprężystości.

Doktorantka skoncentrowała się na stworzeniu jednolitego podejścia łączącego analizę matematyczną z metodami obliczeniowymi. Rozprawa obejmuje zagadnienia sprężystości liniowej i nieliniowej, zagadnienie kontaktu oraz optymalnego projektowania konstrukcji.

Podjęcie tej tematyki badawczej należy uznać za trafne z uwagi na wciąż aktualne znaczenie zagadnień optymalizacji kształtu i topologii w kontekście spójnego matematycznego opisu w kategoriach optymalnego sterowania.

Praca powstała w Instytucie Badań Systemowych PAN, a jej promotorem jest prof. dr hab. inż. Jan Sokołowski. Ko-promotorem jest dr Shengfeng Zhu, School of Mathematical Sciences, East China Normal University, China.

Biorąc pod uwagę cel i zakres rozprawy, można ją zakwalifikować do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

2. Zakres rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku angielskim i zawiera 206 stron. Składa się ze streszczeń w j. angielskim i j. polskim, pięciu rozdziałów, podsumowania, listingów dwóch programów komputerowych, spisu literatury oraz podziękowań Doktorantki.

W rozdziale 1. przedstawiono motywację podjęcia tematyki badań oraz przyjęte oznaczenia stosowane w rozprawie.

Rozdział 2. dotyczy optymalnego sterowania brzegowego w sprężystości liniowej, gdzie siły powierzchniowe traktowane są jako sterowania. Poprzez sformułowanie problemu przy użyciu równania stanu, równania sprzężonego oraz warunków optymalności, a także dzięki wykorzystaniu własności *turnpike* dla zadania sterowania, problem dynamiczny został zredukowany do problemu statycznego, co pozwoliło w istotny sposób obniżyć koszt obliczeniowy.

W rozdziale 3. analizowane są problemy kontaktowe. Zaproponowano dwie strategie: regularyzację metodą pola fazowego dla gładkiego modelowania interfejsów oraz pochodne topologiczne dla osobliwych zaburzeń obszaru geometrycznego. Obie metody połączono w elastyczne podejście do optymalizacji z uwzględnieniem kontaktu. Przeanalizowano również sformułowania metody gradientowej dla kontaktu statycznego, w których zastosowanie energii sprężystej jako funkcjonału kształtu zapewnia spójność postępowania pomimo niegładkiego modelu kontaktu.

W rozdziale 4. Doktorantka zajmuje się przepływem gradientowym dla optymalizacji kształtu i topologii. Podejście to pozwala na potraktowanie procesu optymalizacji jako układu dynamicznego napędzanego pochodnymi kształtu, w którym pola prędkości wyznaczają ewolucję brzegu. Podejście to wprowadza regularyzację krzywizny oraz adaptacyjny mechanizm odrzucania kroków, co gwarantuje monotoniczny spadek funkcjonału kosztu oraz stabilność numeryczną. Pozwoliło to na zastosowanie do minimalizacji podatności, rekonstrukcji kształtu i problemów odwrotnych, a uzyskane wyniki wykazały wyraźne zalety w zakresie stabilności, zbieżności i interpretowalności w porównaniu z klasycznymi metodami poziomowymi.

Rozdział 5. poświęcony jest optymalizacji dla zagadnień z zakresu sprężystości nieliniowej. Wprowadzono schemat nieciągłej metody Galerkina do ewolucji poziomicy, umożliwiając odporne symulacje w złożonych warunkach mechanicznych oraz wspierając optymalizację topologii w warunkach nieliniowych.

Następnie Doktorantka przedstawiła listing oprogramowania trójwymiarowego zagadnienia kontaktu z tarciem oraz oprogramowania 2D służącego do optymalizacji kształtu.

Bibliografia rozprawy, zawierająca 67 pozycji literaturowych, obejmuje szeroki wachlarz prac naukowych związanych tematycznie z rozprawą doktorską.

3. Ocena merytoryczna

Rozprawa doktorska poświęcona jest ważnej i aktualnej problematyce badawczej mającej istotne znaczenie naukowe oraz inżynierskie.

Oceniana rozprawa przedstawia kompleksowe badanie zagadnień sterowania optymalnego oraz optymalizacji kształtu i topologii układów sprężystych, łącząc spójne podejście teoretyczne z efektywnymi metodami numerycznymi.

Praca obejmuje szeroki zakres zagadnień, w tym sprężystość liniową i nieliniową, zagadnienia kontaktowe oraz projektowanie konstrukcyjne oparte na sterowaniu, dążąc do stworzenia zunifikowanego podejścia łączącego analizę matematyczną z obliczeniami.

Badanie rozpoczyna się od sformułowania problemu optymalnego sterowania brzegowego w sprężystości liniowej, gdzie siła-naprężenia jest traktowane jako zmienna sterująca. Problem ten przekształca się w układ równań stanu, równań sprzężonych oraz warunków optymalności poprzez minimalizację funkcjonału kosztu obejmującego śledzenie przemieszczenia i energię sterowania.

Problem dynamicznego sterowania przybliżono jego statycznym odpowiednikiem wykorzystując własności *turnpike*, która wskazuje, że trajektoria optymalna dąży do rozwiązania stacjonarnego w dłuższym czasie, co znacznie zmniejsza koszty obliczeniowe.

W kontekście optymalizacji kształtu i topologii, w rozprawie wykorzystuje się analizę pochodnej kształtu w połączeniu z metodami pola prędkości do kierowania ewolucją struktury. Ujęcie w postaci przepływu gradientowego przekształca proces optymalizacji w układ czasowo-zależnych równań różniczkowych cząstkowych, co zwiększa stabilność numeryczną i ułatwia analizę zbieżności. Metoda ta okazała się bardzo skuteczna w optymalizacji podatności, rekonstrukcji kształtu oraz w problemach odwrotnych, przewyższając klasyczną metodę zbioru poziomicowego pod względem interpretowalności, rygoru teoretycznego i kontroli algorytmicznej.

W przypadku problemów sprężystości nieliniowej zastosowano nieciągłą metodę Galerkina do rozwiązywania równań ewolucji zbioru poziomicowego

Zastosowanie nieciągłej metody Galerkina umożliwia precyzyjną i odporną symulację procesu optymalizacji, co pozwala na skuteczne rozwiązywanie problemów w wymagających

warunkach mechanicznych. Eksperymenty numeryczne potwierdzają praktyczną przydatność zaproponowanej metody.

Zagadnienie kontaktu rozwiązano stosując dwa podejścia. W pierwszym podejściu wykorzystano regularyzację pola fazowego do ciągłego modelowania interfejsu kontaktowego. Umożliwiło to analizę wrażliwości i płynną ewolucję struktury. W drugim podejściu wykorzystano pochodne topologiczne do oceny wpływu zaburzeń wewnętrznych w obszarach oddalonych od granicy kontaktu, w połączeniu z podejściem pola fazowego do optymalizacji. Oba podejścia tworzą elastyczny i skuteczny zestaw narzędzi do optymalizacji kształtu i topologii w warunkach kontaktu.

Problem optymalizacji kształtu analizowany jest również przy użyciu sformułowania przepływu gradientowego w kontekście statycznego problemu kontaktowego, gdzie wykorzystuje się energię sprężystą oraz funkcjonały Kohna—Vogeliusa.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w rozprawie należy zaliczyć:

- możliwość badania zarówno liniowych jak i nieliniowych systemów sprężystych,
- zastosowanie regularyzacji zapewniającej istnienie rozwiązań optymalnych w zadaniach optymalizacji kształtu i topologii,
- metody obliczeniowe typu przepływu gradientu kształtu są nowym zagadnieniem rozważanym w dziedzinie optymalizacji kształtu, ponieważ dla tych metod można uzyskać zbieżność w opisie ciągłym.
- wyniki obliczeń dla przykładów 2D i 3D skazują na szerokie możliwości zastosowań opracowanej metodologii,
- własne oprogramowanie komputerowe służące do analizy zagadnienia kontaktu oraz optymalizacji kształtu.

Podsumowując, rozprawa przedstawia spójne podejście do sterowania i optymalizacji układów sprężystych, łączące wysoki poziom teoretyczny z efektywnymi metodami numerycznymi i potwierdzające swoją skuteczność w symulacjach komputerowych.

Zamieszczone w rozprawie wyniki badań świadczą o bardzo dobrej znajomości problematyki badawczej, dużej pomysłowości i profesjonalności Doktorantki.

Struktura rozprawy jest logiczna i dobrze przemyślana.

Uwagi dyskusyjne

- (i) Jak skomplikowane i duże zadanie należałoby rozwiązać nie wykorzystując własności *turnpike* i rozwiązywać numerycznie zadanie jako zadanie dynamiczne?
- (ii) Czy przedstawiona metodologia optymalizacji kształtu i topologii gwarantuje znalezienie optimum globalnego? Jeśli nie, to jakie możliwości widzi Doktorantka w poszukiwaniu rozwiązania globalnego?
- (iii) Jakie możliwości widzi Doktorantka w zastosowaniu wybranych metod AI do wspomagania sformułowanych w rozprawie zadań optymalizacji kształtu i topologii?

Ważnym elementem rozprawy, świadczącym o dużym rozeznaniu Doktorantki w problematyce rozprawy, są jasno przedstawione perspektywy i zamierzenia dalszych badań.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr Yixin Tan jest udaną próbą zintegrowanego spojrzenia na sterowanie i optymalizację układów sprężystych. Rozprawa wnosi ważny wkład teoretyczny do analiz wrażliwości kształtu, przepływu gradientowego i mechanizmów sterowania oraz proponuje efektywne schematy numeryczne. Wyniki te stanowią podstawę dla przyszłej optymalizacji dynamicznej, ze sprzężeniem wielu zjawisk fizycznych oraz dalszej eksploracji zjawisk *turnpike* w układach sprężystych.

Zamieszczone w rozprawie wyniki badań świadczą o dużej wiedzy i doświadczeniu Doktorantki.

Biorąc pod uwagę przedstawioną opinię stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr Yixin Tan w pełni odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim.

Doktorantka jest dobrze przygotowana do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Dlatego uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez obecnie obowiązującą ustawę i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Tadeusz Burczyński