

dr hab. inż. Bartosz Miller, prof. PRz

Rzeszów, 24 maja 2022 r.

Politechnika Rzeszowska

Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

Katedra Mechaniki Konstrukcji

al. Powstańców Warszawy 12

35-959 Rzeszów

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Anny Perduły
„Adaptivity in multipatch version of isogeometric analysis
with applications to nonlinear elasticity problems”

1. Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo prof. dra hab. inż. Andrzeja Szaraty, Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, pismo jest datowane na 23 marca 2022 r.

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr inż. Anny Perduły, o tytule **„Adaptivity in multipatch version of isogeometric analysis with applications to nonlinear elasticity problems”** (pol.: Schematy adaptacyjne w wielopłatowej wersji analizy izogeometrycznej z zastosowaniem w problemach nieliniowej sprężystości), wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Ewy Pabisek, prof. PK, promotorem pomocniczym był dr inż. Roman Putanowicz. Rozprawa liczy (bez streszczeń) 186 stron, jest podzielona na 8 rozdziałów oraz bibliografię. Praca jest uzupełniona streszczeniami w językach polskim i angielskim, wraz ze streszczeniami liczy 194 stron. Bibliografia zawiera wykaz 130 pozycji literaturowych. W zasadniczej części rozprawy zamieszczono 138 rysunków, 11 tabel, 240 numerowanych wzorów, 7 schematycznych algorytmów oraz 5 kodów programów.

D Z I E K U J A M I	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia.	27.05.2022
L. dz.	40.510.7.2.2022
podpis. <i>Namyp</i>	

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

2.1. Tematyka rozprawy

Tematyka pracy jest aktualna, rozwojowa i mająca istotne znaczenie dla rozwoju dyscypliny naukowej **Inżynieria lądowa i transport**. Autorka, w ramach recenzowanej pracy, opracowała zaawansowane środowisko do symulacji numerycznych w zakresie liniowej i nieliniowej sprężystości.

Wybór tematyki pracy należy ocenić bardzo wysoko. Przygotowane przez Autorkę środowisko do symulacji numerycznych wykorzystuje koncepcję analizy izogeometrycznej, pozwalającej na wypełnienie luki pomiędzy analizą numeryczną i modelowaniem geometrycznym. Prace związane ze zbliżeniem/połączeniem metod modelowania geometrycznego i numerycznego rozpoczęły się w latach siedemdziesiątych XX w., podstawy wykorzystywanej w recenzowanej pracy analizy izogeometrycznej zostały sformułowane przez T. J. R. Hughesa w roku 2005 (T. J. R. Hughes, J. A. Cottrell, and Y. Bazilevs. *Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005) a pierwszy podręcznik został wydany cztery lata później (J. A. Cottrell, T. J. R. Hughes, and Y. Bazilevs. *Isogeometric Analysis: Toward Integration of CAD and FEA*. Wiley, 2009). Analiza izogeometryczna jest obecnie rozwijana w wielu ośrodkach naukowych i zdobywa coraz większe uznanie.

Przedstawione we wstępie cele pracy są przemyślane a ich realizacja może doprowadzić do wniosków istotnych z punktu widzenia wykorzystania zbudowanego przez Doktorantkę pakietu oprogramowania do symulacji numerycznych. Cele pracy obejmują:

- Zbadanie sformułowań matematycznych opisujących analizę izogeometryczną oraz pokrewne metody obliczeniowe pod kątem możliwości transferu opisu matematycznego na pojęcia projektowe, które stanowią bazę dla stworzenia elastycznego środowiska obliczeniowego.
- Rozpatrzenie konsekwencji jakie niesie za sobą wsparcie dziedziny modelowania konstrukcji, które uwzględnia zarządzanie nieliniowościami geometrycznymi i fizycznymi, w projekcie silnika obliczeniowego.
- Analiza implikacji wynikających z zapewnienia w projekcie silnika obliczeniowego wsparcia dla wielopłatowych modeli geometrycznych. Zaprojektowanie elastycznego algorytmu zszywania płatów w oparciu o metodę Nitsche oraz wprowadzenie możliwości wyboru metody łączenia płatów.

- Projekt silnika obliczeniowego uwzględniający zastosowanie różnych przestrzeni aproksymacji oraz możliwości zagęszczania siatki, które mogą być wykorzystywane w zagadnieniach liniowej i nieliniowej sprężystości.
- Implementacja kompletnego i gotowego do pracy pakietu obliczeniowego oraz weryfikacja zbioru przykładów testowych. Przykłady testowe powinny być wybrane z zakresu zagadnień związanych z mechaniką konstrukcji oraz poddziedzinami inżynierii lądowej. Przykłady powinny uwzględniać modelowanie jedno- i wielopolewe, zarówno w zakresie liniowym jak i nieliniowym, a opis geometrii powinien eksponować zalety oferowane przez analizę izogeometryczną.
- Weryfikacja określonej grupy narzędzi inżynierskich i identyfikowanie ograniczeń wpływających na proces implementacji pakietu numerycznego.

2.2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa jest napisana w języku angielskim i liczy (bez streszczeń) 186 stron, jest podzielona na 8 rozdziałów oraz bibliografię. Praca jest uzupełniona streszczeniami w językach polskim i angielskim, wraz ze streszczeniami liczy 194 stron.

Rozdział 1 jest zatytułowany „Introduction” i liczy 5 stron. W rozdziale tym Autorka przedstawia motywację uzasadniającą wybór tematyki pracy, opisuje cele pracy, sygnalizuje podstawowe założenia. Na uwagę zasługuje zwrócenie uwagi nie tyle na przygotowanie zaawansowanego pakietu do symulacji numerycznych ale na wykorzystanie schematów adaptacyjnych, rozumianych „nie tylko jako dostosowanie gęstości stopni swobody w celu poprawy otrzymanego rozwiązania, ale w szerszym kontekście tj. swobody w dostosowaniu metody numerycznej do rozwiązywanego problemu w ramach jednego pakietu oprogramowania naukowego”.

Rozdział 2 jest zatytułowany „Isogeometric Analysis” i liczy 15 stron. Zasadniczym elementem tego rozdziału jest rys historyczny rozwoju analizy izogeometrycznej (ang.: IsoGemoetric Analysis, IGA) oraz jej główny cel: połączenie modelowania geometrycznego oraz metody elementów skończonych (ang.: Finite Element Analyis, FEM), to jest zastosowanie jako funkcji bazowych do aproksymacji nieznanego pola tych samych funkcji aproksymacyjnych, które zostały zastosowane do opisu geometrii. Prowadzi to do wykorzystywanej w rozprawie koncepcji tzw. elementu izoparametrycznego. Rozdział omawia ponadto analizowane w dalszych częściach pracy pojęcia takie jak geometrie jedno- i wielopłatowe, schematy zagęszczania siatki oraz zaawansowane przestrzenie aproksymacji.

Rozdział 3 jest zatytułowany „Development of IGA software package” i liczy 6 stron. Rozdział ten zawiera ideowy opis dostępnego obecnie oprogramowania związanego z analizą izogeometryczną, przedstawia także zasadnicze założenia i idee dotyczące pakietu oprogramowania AHIGA (ang.: Adaptive Hybrid IsoGeometric Analysis) zbudowanego w ramach recenzowanej pracy.

W ramach tego rozdziału Autorka przedstawia także założenia przyjęte podczas budowy systemu AHIGA (m.in. wybór systemu operacyjnego, języka programowania, bibliotek zarządzania kodem źródłowym i projektami, tworzenie dokumentacji i testowanie, system kontroli wersji). Wraz z zawartą w tym samym rozdziale analizą ryzyka i możliwości pojawienia się problemów technicznych (ang. bottlenecks) przyjęte założenia dowodzą, że Autorka jest doskonale przygotowana do tak złożonego zadania jak samodzielne tworzenie zaawansowanego pakietu obliczeniowego.

Rozdział 4 jest zatytułowany „Multifield analysis on multipatch geometries” i liczy 35 stron. W rozdziale tym Autorka koncentruje się na problemach związanych z analizą geometrii wielopłatowych. Opisuje kluczowe z punktu widzenia analizowanego zadania zagadnienia takie jak przestrzenie aproksymacji, całkowanie po elementach, agregacja macierzy, uwzględnianie warunków brzegowych (przy czym ze względu na specyfikę IGA temu zagadnieniu poświęca szczególną uwagę). Główne zagadnienie opisywane w tym rozdziale, geometrie wielopłatowe, jest przeanalizowane na poziomach geometrycznym, sformułowania i na poziomie algebraicznym. W rozdziale tym omówione zostały możliwości łączenia płatów z wykorzystaniem metody Nitsche, kluczowego elementu przygotowanego oprogramowania.

Rozdział ten zawiera także benchmarkowy test numeryczny weryfikujący poprawność implementacji dla geometrii jednopłatowych (rozdział 4.1.3) a także przykład rozwiązania zagadnienia liniowej sprężystości z analizą wielopłatową (rozdział 4.2.4) i wielopolową (rozdział 4.3.1).

Rozdział 5 jest zatytułowany „Adaptive schemes” i liczy 25 stron. Nie jest to najdłuższy rozdział pracy, ze względu na jego zawartość i jej związek z tytułem pracy należy go jednak uznać, wraz z rozdziałem 4, za najważniejszy rozdział pracy. W rozdziale 5 omówione zostały schematy adaptacyjne zastosowane w oprogramowaniu AHIGA. Termin adaptacja w recenzowanej pracy używany jest nie tylko jako odpowiednie zagęszczanie siatki, ale również dobór najlepszej metody aproksymacji pola poszukiwanej wielkości. Omówiono metodę GIFT pozwalającą na zastosowanie niezależnych aproksymacji geometrii i pola poszukiwanej wielkości, przedstawiono możliwości zastosowania innych niż NURBS funkcji bazowych do aproksymacji pola poszukiwanej wielkości (w numerycznym przykładzie było to pole przemieszczeń, rozdział 5.1.3) oraz automatyczną

poprawę siatki (przykład w rozdziale 5.2.3). Rozdział zamyka omówienie możliwości zastosowania w pakiecie AHIGA innych metod obliczeniowych, takich jak Discontinuous Galerkin Finite Difference Method czy Finite Cell Method (przykłady w rozdziałach 5.3.1 i 5.3.2). Możliwość zastosowania tych metod otwiera drogę do zastosowania pakietu AHIGA także w zagadnieniach analizy współpracy płyn-ciało stałe.

Rozdział 6 jest zatytułowany „**Nonlinear analysis**” i liczy 16 stron. Rozdział rozpoczyna się krótkim przeglądem literatury obejmujący zastosowania sformułowań matematycznych związanych z IGA i umożliwiających wprowadzenie do analizy materiałów hipersprężystych. Następnie omawiane są konsekwencje zastosowania teorii skończonych odkształceń w modelowaniu geometrii wielopłatowych. W dalszej części rozdziału omówiono implementację silnika do obliczeń nieliniowych oraz zaprezentowano weryfikację przyjętych założeń na przykładzie numerycznym (rozdział 6.4).

Rozdział 7 jest zatytułowany „**Selected applications of AHIGA computational package in linear and nonlinear elasticity problems**” i liczy 42 strony. W rozdziale tym przedstawiono szereg przykładów zastosowania zaprojektowanego w pracy pakietu AHIGA do rozwiązywania różnych problemów numerycznych, zarówno liniowych jak i nieliniowych. Przedstawione przykłady obejmują, w zakresie przykładów analizy liniowej, analizę 3D laminatu kompozytowego trójwarstwowego (rozdział 7.1.1), płyty warstwowej z rdzeniem z materiału z gradacją (rozdział 7.1.2) oraz płyty z rdzeniem falistym (rozdział 7.1.3). Przykłady analizy nieliniowej to analiza tarczy z otworami poddanej rozciąganiu (rozdział 7.2.1) oraz analiza obszaru trójwymiarowego z zastosowaniem adaptacyjnego zagęszczania siatki (rozdział 7.2.2). Podejście mieszane jest wykorzystane w przykładzie analizy membrany Cooka (rozdział 7.3.1), elementu ściskanego pracującego w PSN (rozdział 7.3.2) oraz ściskanego sześcianu (rozdział 7.3.3).

Zaprezentowane przykłady numeryczne przedstawiają kluczowe zalety pakietu AHIGA: zastosowanie metody Nitsche do wymuszenia ciągłości na granicach warstw, metoda GIFT pozwalająca na zastosowanie bazy wielomianów Chebysheva do aproksymacji pola przemieszczeń, możliwość zastosowania innych niż NURBS funkcji bazowych, możliwość adaptacyjnego zagęszczania siatki oraz możliwość prowadzenia analiz nieliniowych w przestrzeniach 2D oraz 3D,

Rozdział 8 jest zatytułowany „**Conclusions**” i liczy 3 strony. Rozdział przedstawia krótkie podsumowanie pracy, podkreślenie jej oryginalnych elementów a także zarysowanie kierunków przyszłych badań.

Po rozdziale ósmym w pracy załączono spis rysunków, spis tabel, spis schematycznych algorytmów oraz spis kodów programów a także obszerną bibliografię obejmującą 130 pozycji i streszczenia w językach angielskim i polskim.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Recenzowana praca doktorska pani mgr inż. Anny Perduty, zatytułowana „**Adaptivity in multipatch version of isogeometric analysis with applications to nonlinear elasticity problems**”, opisuje budowę pakietu do zaawansowanych obliczeń numerycznych. Autorski system o nazwie AHIGA bazuje na założeniach analizy izogeometrycznej, pozwalającej – w dużym skrócie – na połączenie modelowania geometrycznego z obliczeniami numerycznymi przez przyjęcie tych samych funkcji bazowych do aproksymacji geometrii i pól szukanych wielkości.

Całość recenzowanej pracy jest przemyślana, czytelnie skomponowana, załączone rozważania teoretyczne i dobrze dobrane przykłady testowe (benchmarkowe) tworzą kompletną całość pozbawioną zdaniem recenzenta istotnych luk czy braków.

Lektura rozprawy doktorskiej pani Anny Perduty pozwala stwierdzić, że Autorka prawidłowo przygotowała się do budowy pakietu AHIGA, przegląd stanu wiedzy w zakresie analizy izogeometrycznej jest aktualny i wystarczający. Budowa złożonego systemu numerycznego została przez Autorkę dogłębnie przemyślana, struktura systemu jest logiczna i spójna a kluczowe decyzje zostały wyjaśnione i uzasadnione w recenzowanej rozprawie. Metody symulacyjne i obliczeniowe zastosowane przez Autorkę są zdaniem recenzenta dobrane i zaimplementowane prawidłowo. Przedstawione w pracy przykłady numeryczne pozwalają na weryfikację zasadniczych elementów pakietu AHIGA.

Doktorantka wykazała się odpowiednim przygotowaniem teoretycznym oraz znajomością nowoczesnych technik programowania. Kluczowe decyzje dotyczące architektury budowanego systemu oraz możliwości jego dalszego rozwoju są dobrze umotywowane i dają nadzieję na dalszy rozwój i wykorzystanie w pracach naukowych prowadzonych przez Autorkę w przyszłości.

Doktorantka udowodniła, że jest dobrze przygotowana do samodzielnego prowadzenia badań naukowych, wątpliwości recenzenta nie budzi przygotowanie teoretyczne, znajomość aktualnego stanu wiedzy ani wiedza czy umiejętności techniczne. Doktorantka wykazała, że na każdym z tych pól, bardzo istotnych dla dalszego rozwoju naukowego, dysponuje odpowiednią wiedzą i umiejętnościami.

Za autorski wkład Doktorantki należy uznać przedstawione w rozdziale 5. rozprawy podejście adaptacyjne zastosowane w pakiecie AHIGA a dotyczące zarówno metod poprawy siatki jak i doboru odpowiedniej dla rozważanego zadania metody obliczeniowej, a szerzej całość rozprawy związanej z budową autorskiego pakietu do zaawansowanych obliczeń numerycznych bazujących na założeniach IGA.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Zawartość rozprawy doktorskiej jest zgodna z tytułem pracy, cele pracy sformułowane w rozdziale pierwszym zostały zrealizowane.

Praca jest przygotowana starannie, z dbałością o szczegóły (w tym o stronę techniczną pracy).

Recenzent nie czuje się na siłach aby wskazywać błędy czy usterki w zakresie zastosowanego w pracy języka angielskiego, ogólne wrażenie po lekturze jest jednak bardzo dobre, język pracy jest czytelny i nie sprawia dodatkowych problemów przy analizie – złożonych niekiedy – wywodów Doktorantki.

Zaletą pracy jest podsumowanie każdej części pracy krótkim rozdziałem końcowym, podkreślającym najważniejsze elementy danego fragmentu pracy.

Drobne wątpliwości budzą następujące elementy związane ze stroną techniczną pracy:

- brak bibliografii jako odrębnej pozycji w spisie treści,
- rozdziały zaczynają się tekstem niebędącym elementem żadnego podpunktu, wg wiedzy recenzenta należy takich sytuacji unikać; Doktorantka jest w swoich wyborach konsekwentna i w tym kontekście takie wyodrębnienie wstępnych informacji się broni, wszak każdą regułę można łamać jeżeli robi się to konsekwentnie,
- kilka pozycji w spisie literatury (34,42,81) jest opisanych niezgodnie ze standardem przyjętym w pozostałych przypadkach (np. podawane jest pełne imię autora zamiast inicjału),
- linki zwrotne w spisie literatury (do stron, na których dana pozycja jest cytowana) są dla recenzenta zaskakujące, dopiero weryfikacja w wersji PDF wyjaśnia ich znaczenie,
- w przypadku stron internetowych zamieszczonych w spisie literatury wskazane byłoby podawanie daty ostatniego dostępu,
- w streszczeniu polskim recenzent odnalazł drobne literówki (np. „nieśliśliwym”).

Wymienione usterki są na tyle drobne, że nie mają wpływu na ogólną bardzo pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy.

Kilka sformułowanych poniżej pytań dyskusyjnych także nie jest związanych z zauważonymi wadami pracy, ich celem jest rozpoczęcie dyskusji związanej z wnioskami z pracy i planami przyszłych prac badawczych Doktorantki:

- Jako jedną z zalet proponowanego autorskiego oprogramowania wskazano możliwość zastosowania różnych aproksymacji geometrii i pola poszukiwanej wielkości, przy czym jako jedną z głównych cech IGA podano możliwość zastosowania tej samej aproksymacji

zarówno geometrii jak i pola poszukiwanej wielkości. Proszę o wyjaśnienie tej pozornej sprzeczności.

- Co z modelami materiałowymi, definicjami elementów, metodami obliczeniowymi? Czy AHIGA zezwala na zastosowanie wyłącznie definicji materiałów, elementów, metod obliczeniowych dostępnych w przygotowanych przez Autorkę bibliotekach czy też zezwala na tworzenie własnych?
- Zaskakujący jest brak w cytowanej literaturze publikacji, których Dyplomantka byłaby autorką lub współautorką. Czy rzeczywiście nie było żadnych publikacji w zakresie opisywanym w recenzowanej rozprawie?

5. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Anny Perduły rozwiązuje oryginalne zadanie naukowe dotyczące budowy pakietu do obliczeń numerycznych i wykorzystania w nim wielu autorskich rozwiązań. Zdaniem recenzenta temat rozprawy jest istotny i prowadzi do wniosków ważnych z naukowego punktu widzenia.

Autorka wykonała przegląd literatury związanej z analizowanym problemem badawczym, zbudowała własny system obliczeniowy i wykonała serię weryfikacyjnych symulacji numerycznych. Przeprowadzane badania i analizy potwierdzają ogólną wiedzę Autorki oraz dobre przygotowanie do prowadzenia badań naukowych w zakresie dyscypliny inżynieria lądowa i transport. Przedstawione w pkt. 4 recenzji uwagi szczegółowe i dyskusyjne nie obniżają wartości rozprawy.

Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi odnośnie prac doktorskich zawarte w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2017, poz. 1789 z późniejszymi zmianami). Wnioskuje o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie pani mgr inż. Anny Perduły do publicznej obrony.

