Prof. dr hab. inż. Witold Cecot
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Lądowej
Katedra Technologii Informatycznych w Inżynierii
e-mail: plcecot@cyf-kr.edu.pl
tel. 12-628-2167

Kraków, 27.07.2024

Opinia o rozprawie doktorskiej mgr. Michała Jureczka zatytułowanej
Numerical Analysis and Simulations of Mechanical Contact Problems
Promotor: dr hab. Anna Ochal

Niniejszą recenzję opracowałem na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Uniwersytetu Jagiellońskiego z dnia 21 września 2023 r., egzemplarza rozprawy doktorskiej otrzymanej w maju 2024 r. oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742).

1 Przedmiot rozprawy

Tematem rozprawy jest zastosowanie metody elementów skończonych (MES) do modelowanie zjawiska kontaktu. Jest to ważne z praktycznego punktu widzenia zadanie mechaniki i pomimo istniejących wielu możliwości jego modelowania za pomocą programów komercyjnych, wciąż liczne aspekty teoretyczne oraz algorytmiczne wymagają udoskonalenia. Doktorant rozważał zadania statyki i dynamiki przy założeniu małych odkształceń ciał sprężystych i lepko-sprężystych z uwzględnieniem wpływu zmiany temperatury, ścierania powierzchni (*wear*) będących w kontakcie i kontynualnego zniszczenia materiału (*damage*). Szczególny nacisk położono na matematyczne dowody tempa zbieżności aproksymacji rozwiązań. Doktorant przedstawił oryginalne dowody zbieżności stosowanych typów aproksymacji oraz numeryczną weryfikację tempa zbieżności dla wybranych przykładów zarówno dwu jak i trój wymiarowych, korzystając z samodzielnie przygotowanego oprogramowania napisanego w języku Python.

2 Ocena pracy

Rozprawa doktorska została przedstawiona jako zbiór pięciu powiązanych tematycznie artykułów, opublikowanych w latach 2020 - 2023 w dobrych czasopismach naukowych, mających na liście ministerialnej od 100 do 140 punktów. W jednej z tych publikacji Doktorant jest pierwszym współautorem.

W artykule

[I] D. Han, W. Han, M. Jureczka, A. Ochal, *Numerical analysis of a contact problem with wear,* Comp. and Math. with Appl., 2020,

w którego powstaniu Doktorant miał ok. 25 % udział, została omówiona dyskretyzacja zadania kontaktu ciała sprężystego z poruszającą się sztywną płaszczyzną, uwzględniając tarcie i ścieranie dodatkowej cienkiej warstwy nieodkształcalnego materiału na powierzchni sztywnego podłoża. W szczególności, pokazano własne oszacowanie a priori tempa zbieżność aproksymacji i numeryczne potwierdzenie teoretycznych przewidywań.

W kolejnej pracy

[II] W. Han, M. Jureczka, A. Ochal, *Numerical studies of a hemivariational inequality for a viscous contact problem with damage,* Comp. and Math. with Appl., 2020,

z ok. 45 % udziałem Doktoranta, Autorzy przedstawili numeryczne studium zagadnienia kontaktu ciała sprężysto-lepkiego ze sztywnym płaskim podłożem. Zadanie było sformułowane za pomocą nierówności hemiwariacyjnej. Do całkowania po czasie zastosowano schemat jawny. Podobnie jak w poprzednim artykule, w tym również pokazano własne oszacowanie, typu a priori, tempa zbieżność aproksymacji i numeryczne potwierdzenie teoretycznych przewidywań dla trzech wybranych przykładów.

W artykule

[III] M. Jureczka, A. Ochal, *A nonsmooth optimization approach for hemivariational inequalities with applications to contact mechanics,* Appl. Math. and Opt., 2021,

w którego powstaniu Doktorant miał ok. 80 % udział, zadanie kontaktu zostało sformułowane jako minimalizacja funkcjonału. W obliczeniach zastosowano dyskretyzację MES z liniowymi funkcjami kształtu oraz metodę kierunków sprzężonych Powella nie wymagającą obliczania pochodnych funkcji celu. Przeprowadzono dowody zbieżności zastosowanego schematu numerycznego oraz potwierdzono na wybranych przykładach poprawność przewidzianego teoretycznie tempa zbieżności.

W pracy

[IV] A. Ochal, M. Jureczka, P. Bartman *A survey of numerical methods for hemivariational inequalities with applications to contact mechanics,* Comm. in Nonl. SCs. and Num. Sim., 2022,

z ok. 65 % udziałem Doktoranta, Autorzy przedstawili porównanie trzech metod minimalizacji funkcji do której to minimalizacji sprowadza się numeryczna analiza rozważanego przez Doktoranta zjawiska kontaktu. Metodami minimalizacji, które wzięto pod uwagę były: metoda bezpośrednia optymalizacji, rozszerzona metoda Lagrangea i strategia zbiorów pierwotno-dualnych. Dla przykładowych zadań dla których wykonano porównania druga metoda okazała się najszybsza, a pierwsza najprostsza w implementacji.

W artykule

[V] P. Bartman, K. Bartosz, M. Jureczka, P. Szafraniec, *Numerical analysis of a non-clamped dynamic thermo viscoelastic contact problem,* Nonl. Anal. Real World Appl., 2023,

w którego powstaniu Doktorant miał ok. 25 % udział, została przedstawiona numeryczna analiza sprzężonego, niestacjonarnego zadania termo-lepko-sprężytości. Ponownie teoretycznie przewidziane tempo zbieżności zostało potwierdzone na wybranych przykładowych zadaniach. Analizowane przykłady objęły tym razem również obszar o skomplikowanym geometrycznie kształcie.

Podsumowując, tematyka pracy jest wciąż aktualna pomimo że mechanika kontaktu oraz analiza numeryczna są rozwijane przez badaczy od wielu lat. W ogólności jest to zadanie nieliniowe, m.in. ze względu na nieznaną a priori powierzchnię kontaktu. W rozprawie mgr. M. Jureczka rozważane jest sytuacja, w której ta powierzchnia jest ustalona. Nasuwają się poniższe pytania.

1. Jak przyjęcie ogólnego założenia o nieznanej z góry strefie kontaktu wpłynęłoby na oszacowania tempa zbieżności aproksymacji rozwiązań zadania kontaktu?

2. Doktorant stosuje elementy skończone z funkcjami kształtu pierwszego stopnia. Jak na zbieżność wpłynąłby wyższy stopień aproksymacji? Wyższy stopień aproksymacji byłby szczególnie przydatny, gdy strefa kontaktu jest powierzchnią a nie płaszczyzną. Czy inne schematy całkowania po czasie, np. popularna dla zadań dynamiki metoda Newmarka poprawiłyby tempo zbieżności?

3. Jakie testy potwierdzają poprawność działania programu? Jeżeli nie ma rozwiązania analitycznego można porównać własne rezultaty z wynikami programu komercyjnego (np. Abaqus).

4. Na str. 20 Doktorant stwierdza, że rozwiązywane zadanie nie ma rozwiązania dla sformułowania klasycznego (mocnego?), a jedynie dla słabego. Czy rozwiązanie w tym przypadku jest na tyle nieregularne, że istnieje tylko dla sformułowania słabego?

5. Na str. 25 ze sformułowania mocnego wyprowadzono słabe. Przy przejściu z postaci (4.7) do (4.8) należy skorzystać z założenia, że funkcje testowe (przemieszczenia wirtualne v) zerują się na podportej części brzegu Γ_D. Nie stosuje się w tym momencie z warunku (4.3), w którym prawa strona nie musi być równa zero i który to warunek powinny spełniać funkcje próbne (*trial*), wśród których poszukujemy rozwiązania. Jak wyglądałoby przejście w drugą stronę, ze sformułowania słabego do mocnego?

6. Jak Doktorant rozumie penetrację warstwy odkształcalnej, nazwanej *soft*, przez sztywne podłoże (str. 29)?

3 Uwagi szczegółowe i redakcyjne

- Doktorant wielokrotnie używa pojęcia *soft body*. Jest to zapewne sformułowanie zaczerpnięte z grafiki komputerowej. Ponieważ przedmiotem pracy są zadania mechaniki lepiej używać sformułowania *solid* albo *deformable body*,

- Zamiast *small mesh* proponuję sformułowanie *coarse mesh* (przeciwieństwem jest *fine mesh* - gęsta siatka),

- Na str. 12 znajduje się wzmianka o metodologii DPG (*Dicontinuous Petrov Galerkin*) w kontekście nieciągłości albo osobliwości rozwiązania. W DPG stosuje się nieciągłe funkcje testowe (*trial*) w celu zapewnienia bezwarunkowej stabilności aproksymacji (spełnienia warunku *inf-sup* na poziomie dyskretnym), niezależnie od ciągłości rozwiązania.

- Na str. 16 znajduje się komentarz o obliczeniach w pojedynczej i podwójnej precyzji. W obliczeniach z zakresu mechaniki nie zetknąłem się ze stosowaniem pojedynczej precyzji ze względu na szybką utratę dokładności przy obliczeniach nawet z umiarkowanie dużą liczbą stopni swobody. Przy gorszym uwarunkowaniu bywa stoswana nawet poczwórna procyzja.

- Na str. 17 przyjęto założenie o zerowych warunkach Dirichleta. W ogólności nie muszą być one zerowe. Wystarczy, że są wyrażone za pomocą znanej funkcji.

- We wzorze (5.2) występuje norma w przestrzeni X. Nie znalazłem wyjaśnienia symbolu X.

4 Podsumowanie

W moim przekonaniu przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim są dowody zbieżności wybranych schematów aproksymacji zadań kontaktu przy uwzględnieniu różnorodnych czynników, m.in. tarcia, ścierania materiału, wpływu zmian temperatury, uwzględnieniu dynamiki (członów inercyjnych). Doktorant wykazał się w swoich badaniach dużą wiedzą z zakresu matematyki, informatyki oraz mechaniki i pokazał, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe.

Podniesione przeze mnie uwagi mają często charakter dyskusyjny i nie wpływają istotnie na moją w pełni pozytywną ocenę pracy. Wnoszę o przyjęcie opiniowanej rozprawy mgr. Michała Jureczka jako pracy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.