

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dai Zhao pod tytułem
„Parallelized space-time finite element method for reducing the effects of impact loads”

1. Podstawa prawna oceny

- a) ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.), zwana dalej Ustawą,
- b) pismo z dnia 16 grudnia 2024 r. Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego,
- c) egzemplarz rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dai Zhao.

2. Omówienie pracy

Opiniowana praca doktorska liczy 136 numerowanych stron. Dysertacja składa się z ośmiu rozdziałów numerowanych, listy symboli i skrótów, listy tabel, listy rysunków i zestawienia bibliografii (108 pozycji). Treść rozprawy poprzedza streszczenie i wykaz słów kluczowych. Praca jest napisana w języku angielskim. Dysertacja dotyczy problemu naukowego, jakim jest sformułowanie metody elementów skończonych w dziedzinie przestrzenno-czasowej (ang. space-time finite element method, STFEM) w odniesieniu do rozwiązywania problemów opisanych równaniami różniczkowymi hiperbolicznymi, z uwzględnieniem zjawisk propagacji fal oraz dynamiki konstrukcji. Praca ma charakter teoretyczno-numeryczny.

3. Obowiązujące przepisy prawa na dzień wszczęcia ocenianego postępowania doktorskiego, w tym obowiązujące kryteria oceny

Podstawę prawną oceny stanowią:

- art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy.

4. Omówienie treści rozdziałów i uwagi

Abstrakt, 1/2 strony, zawiera wprowadzenie do tematyki poruszanej w pracy doktorskiej. Doktorant wskazuje cel pracy jakim jest zaprojektowanie i implementacja STFEM pozwalająca na zrównoleglenie obliczeń.

Rozdział 1, ok 5,5 strony, zawiera w początkowej części uzasadnienie poszukiwania metod obliczeniowych dostosowanych do pracy na komputerach wyposażonych w klasyczne procesory (CPU) i procesory graficzne (GPU). W tym zakresie jako istotną Doktorant wymienia metodę różnic skończonych, w której pod pewnymi warunkami można zbudować

diagonalną macierz mas. Autor zwraca uwagę jednak, że metoda różnic skończonych ma swoje mankamenty i dalsze rozważania prowadzi w odniesieniu do metod z rodziny Newmarka, dla których można wykazać bezwarunkową stabilność. Tutaj zrównoleglenie obliczeń jest trudniejsze ze względu na pasmową strukturę macierzy mas. Na tym tle Doktorant sformułował tezę pracy „*The space-time finite element approach, utilizing simplex-shaped elements, allows highly efficient, massively parallelized linear and nonlinear dynamic computations that surpass the efficiency of traditional computational parallelization techniques.*” Związany z tezą cel pracy to sformułowanie i implementacja zaawansowanego algorytmu do szybkich i „*massively parallel*” obliczeń.

Uwagi

1. Szkoda, że Doktorant nie wyjaśnia co rozumie pod pojęciem *massively parallel*. Czy chodzi tu o zrównoleglenie obliczeń w obrębie pojedynczego procesora czy na poziomie klastra obliczeniowego?
2. Jak zdefiniowane są „complex differential equations” wspomniane na początku punktu 1.3?

Rozdział 2, 8 stron, zawiera przegląd literatury dotyczącej obliczeń numerycznych w dynamice konstrukcji, z uwzględnieniem zagadnienia zrównoleglania obliczeń i stosowania CPU i GPU. Rozdział jest bardzo ciekawy i wartościowy - recenzent nie zgłasza do niego uwag.

Rozdział 3, 11 stron, zawiera opis teoretyczny podejścia bazującego na elementach czasoprzestrzennych w odniesieniu do ośrodka ciągłego, jak można domniemywać, w opisie Lagrange’a. Zdaniem recenzenta jest to jeden z istotniejszych (wraz z rozdziałem 4) rozdział dysertacji. Po równaniu (3.3) Doktorant pisze, że stosowane podejście jest podobne do klasycznej metody elementów skończonych (MES) w podejściu Newmarka. Szkoda, że Autor nie poświęcił więcej uwagi formalizmowi omawianego własnego podejścia. Lektura rozdziału prowadzi do następujących uwag dyskusyjnych.

Uwagi

1. Algorytm Newmarka występuje w dwóch wariantach: alfa (zwanym też HHT) oraz beta. Który wariant rozważany jest w doktoracie?
2. Jak definiowana jest informacja, o której pisze Doktorant na początku rozdziału 3.1 w odniesieniu do: macierzy mas i ogólnie do zagadnienia „structural dynamics”? To samo pytanie dotyczy rysunku 3.6
3. W tekście pod rysunkiem 3.3 zdefiniowany jest operator różniczkujący D . Czy różniczkowanie funkcji kształtu dotyczy także czasu? W równaniach (3.4) funkcje kształtu są zależne od położenia i właśnie od czasu. Jak wygląda jawna postać tego operatora we współrzędnych czasoprzestrzennych?
4. W tym samym tekście Autor wprowadza lepkość. Zdaniem recenzenta równanie (3.1) jednak nie pozwala na bezpośrednie wprowadzenie efektów reologicznych.
5. Jak wygląda macierz \mathbf{R} w równaniu (3.8)?
6. Czy do równania (3.9) można wprowadzić obciążenia masowe zapisane w równaniu (3.1) jako iloczyn $\rho \mathbf{f}$?
7. Jaki jest związek między macierzami \mathbf{K}_i oraz \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} opisany u góry strony 23?
8. Zasada numeracji węzłów i elementów opisany na stronie 26 jest dobrze znana. Czy proponowany w rozprawie algorytm wymaga takiego właśnie sposobu numeracji?

Zdaniem recenzenta jest taką numerację można przeprowadzić dla siatek strukturalnych (regularnych). Autor na rys. 6.15 pokazuje jednak siatkę nieregularną – czy w tym przypadku udało się zastosować omawianą regułę numeracji?

9. Na stronie 28 Autor wspomina o wyrazach nieliniowych. Jakie jest źródło wspomnianej nieliniowości?

Rozdział 4, 41 stron, Autor wyprowadza funkcje kształtu klasy C^0 typu simplex do analizy układów jedno- i dwuwymiarowych. Jest to bardzo ciekawy i jeden z ważniejszych rozdziałów rozprawy. Doktorant omówił dwa przykłady: małe odkształcenia pręta pod obciążeniem osiowym oraz stan płaskiego naprężenia. W obu przypadkach wyprowadzono macierze sztywności i bezwładności. Dodatkowo, w zagadnieniu dwuwymiarowym Autor wyprowadził macierz sztywności do opisu dużych przemieszczeń.

Uwagi

1. Lekturę rozdziału utrudniają pewne konflikty oznaczeń np. we wzorze (4.24) Autor używa oznaczenia **B**, a tekście poniżej **B**, zobacz też równanie (4.39).
2. Jak dobrano wartość kroku całkowania w przykładzie 4.1.4?
3. Jak wygląda porównanie czasu obliczeń między rozwiązaniami w przykładzie 4.1.4?
4. Co jest źródłem oscylacji wartości przemieszczeń na rys. 4.10 skoro w drugim przypadku siła *P* była stała?
5. Ostatnie zdanie na stronie 42 jest niejasne. Co Autor ma na myśli pod pojęciem "robustness"?
6. Wzór (4.104) ma inną postać niż wzór (32) w fundamentalnej dla nieliniowej analizy MES pracy Bathe K.J., Ramm E., Wilson E.L. [1975], Finite element formulations for large deformation dynamic analysis. Int. J. Numer. Meth. Engrg. 9, 353-386. Z czego wynika różnica?
7. Opis sformułowania nieliniowego na str. 70 rozprawy jest niepełny. Czy Autor zastosował inne podejście niż w cytowanej w punkcie 6 pozycji literatury?
8. Jak oszacować „computational costs” o których pisze Doktorant pod koniec przedostatniego akapitu na stronie 70?

Rozdział 5, ok 9 stron, Doktorant przedstawia autorski opis metody zrównoleglenia obliczeń. Do rozważań przyjął kształt prostokątny, dyskretyzacja składa się z 16 elementów czasoprzestrzennych. W omawianym przykładzie Doktorant zastosował regularny rozkład węzłów.

Uwagi

1. Skąd wynika liczba 16 wątków wspomniana na początku rozdziału 5.1? Czy w ten sposób Autor osiąga charakter obliczeń opisane wcześniej w pracy jako „massively parallel”?
2. Jaki jest związek macierzy **A_i**, **B_i**, **C_i** i **D_i** z macierzami wyprowadzanymi w rozdziale 4?
3. Czy rysunek 5.7 wskazuje efektywność zaproponowanego podejścia? Jak należy rozumieć wzrost wartości na osi pionowej w powiązaniu z liczbą „parallel packages”?

Rozdział 6, 32 strony, w rozdziale tym Autor przedstawia wyniki rozwiązań dwóch przykładów, mające ilustrować możliwości zastosowania elementów czasoprzestrzennych. W rozdziale 6.1 powtórzono rozważania z pracy [107], której Doktorant był współautorem. W zadaniu rozwiązywany jest pręt prosty, w którym przemieszcza się strefa

wzmocnionego/osłabionego materiału. Doktorant przedstawił rozwiązanie pół-analityczne oraz odpowiadające wyniki numeryczne uzyskane jednak za pomocą klasycznej metody elementów skończonych, a nie elementów czasoprzestrzennych.

Uwagi

1. Jaki jest autorski wkład Doktoranta do treści pracy [107] przytoczonej w rozprawie?
2. Dlaczego Autor nie zastosował elementów czasoprzestrzennych, będących przecież celem pracy?
3. Jak dobrano wartość kroku całkowania do rozwiązania równania (6.17)?
4. Jaki jest sens wielkości W_i , gdzie $i = 1,2,3$? Czy opisują one zagregowaną macierz sztywności całego pręta? Jak wygląda macierz mas rozważanego układu?
5. Jaką metodę numeryczną zastosowano do uzyskania rozwiązań na rysunkach 6.5 i 6.6?

W rozdziale 6.2 Doktorant rozwiązuje numerycznie zagadnienie płaskiego stanu naprężenia w zakresie nieliniowym. Zadanie dotyczy ściskania tarczy z trzema otworami z materiału lekoplastycznego wg modelu Nortona-Hoffa. Autor wykazał potwierdził tezę rozprawy. Wyniki przedstawione na rysunkach 6.17 i 6.18 ewidentnie wskazują wysoką wydajność opracowanego algorytmu zrównoleglania obliczeń.

Uwagi

1. Zdaniem recenzenta równania (6.38)-(6.44) powinny znaleźć się w rozdziale 4, gdzie omawiano sformułowanie nieliniowe.
2. Pod rys. 6.12 Doktorant pisze, że rozważać będzie materiał nieściśliwy. Jednak w danych do zadania na stronie 105 współczynnik Poissona ma wartość 0,33. Czy rozważano zatem w symulacjach także materiał nieściśliwy?
3. Wyniki na rysunku 6.15 wskazują znaczące deformacje siatki elementów skończonych. Czy obliczenia były prowadzone w zakresie dużych przemieszczeń z uwzględnieniem kontaktu?
4. Czy w równaniu (6.41) zgadzają się jednostki?
5. O ile rysunki 6.17 i 6.18 potwierdzają wydajność metody zaproponowanej przez Doktoranta to jednak same porównanie czasu obliczeń nie pozwala na głębsze porównanie dokładności rozwiązań. Jak wygląda porównanie pól przemieszczeń, odkształceń i naprężeń?

Rozdział 7 i 8, razem 5,5 strony, w rozdziale tym Doktorant przedstawia streszczenie treści prac, komentuje otrzymane wyniki i przedstawia potencjalne kierunki dalszych badań.

Uwagi

1. Zdaniem recenzenta równania uwaga na stronie 113 o konieczności uwzględniania nieliniowości geometrycznej w zadaniach, w których dochodzi do dużych przemieszczeń jest trywialna.
2. Podsumowując rozdział 6 (strona 114) Doktorant pisze „*In Chapter 6, we apply the space-time finite element method to two distinct examples...*”. Jednak na stronie 88 Autor pisze odnośnie pierwszego przykładu “*Although the model is initially constructed using a traditional FEM framework, it is worth noting that the resulting matrix formulation can be seamlessly transformed into a space-time approach.*” Które podejście zostało użyte do rozwiązania problem opisanego w rozdziale 6.1.3?

Recenzent pragnie zauważyć, że tematyka poruszona w przedstawionej do recenzji rozprawie ma potencjał badawczy. Szkoda, że Doktorant nie dołożył większych starań w redakcję treści pracy. Z punktu widzenia recenzenta reprezentującego dyscyplinę inżynieria lądowa, geodezja i transport znacznie ciekawsze byłoby rozwinięcie treści rozdziału 5, zamiast szczegółowego przytaczania rozważań dotyczących teorii np. drgań pręta prostego i płaskiego stanu naprężenia. Niemniej jednak recenzent uważa, że cel pracy został osiągnięty. Zamieszczone powyżej uwagi dyskusyjne wynikające z lektury pracy nie umniejszają wartości osiągniętych w dysertacji rezultatów. Recenzent uważa, że osiągnięte w rozprawie wyniki dotyczące przykładu w płaskim stanie naprężenia są podstawą do napisania artykułu naukowego, a wniesione liczne uwagi krytyczne mogą pomóc w redakcji treści publikacji.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska:

- a) stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- b) prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja,
- c) potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez kandydata.

Wnioskuje do Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora, zgodnie z Ustawą.