



dr hab. inż. Marcin Szuster, prof. uczelni
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki
Al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów
mszuster@prz.edu.pl

Rzeszów, 10.08.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Maciąga pt.: „**Optimal Control of Multibody Systems Using an Efficient, Parallelizable Adjoint Method**”, opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika nr RNDIM/521/31/2023 z dnia 28.06.2023 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Paweł Malczyk, prof. uczelni, promotorem pomocniczym dr inż. Łukasz Woliński.

1. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Rozprawa doktorska zawiera się na 145 stronach maszynopisu i składa się z 8 rozdziałów uzupełnionych o streszczenie w języku angielskim, streszczenie w języku polskim, spis treści, spis najważniejszych oznaczeń, spis najczęściej używanych akronimów, trzy załączniki, spis rysunków, spis tabel. Rozprawę kończy wykaz publikacji Doktoranta z podziałem na artykuły naukowe, rozdziały w materiałach konferencyjnych i recenzowane streszczenia w materiałach konferencyjnych oraz wykaz literatury (127 pozycji). Układ rozprawy jest typowy dla prac doktorskich, podział treści na część związaną z przeglądem aktualnego stanu wiedzy oraz część badawczą wyraźny.

We wprowadzeniu (s.1-s.4) Autor zawarł motywację podjęcia tematyki badawczej wskazując na szerokie spektrum zastosowań optymalnych metod sterowania układów dynamicznych przykładowo w przemyśle kosmicznym, motoryzacyjnym czy szeroko rozumianej robotyce. Jednym z zagadnień związanych z implementacją wspomnianych metod jest wyznaczanie pochodnych funkcji względem zestawu niezależnych parametrów, realizowane z zastosowaniem różnych grup algorytmów omówionych przez Autora, ze wskazaniem ich najistotniejszych zalet i wad, z uwzględnieniem kosztu obliczeniowego poszczególnych metod. Biorąc pod uwagę powyższe kryterium, Autor spośród wymienionych wybrał metodę adjoint bazującą na modelu dynamiki układu wielocłonowego (w tym przypadku otrzymanym z zastosowaniem formalizmu Hamiltona),



w przypadku której wzrost liczby zmiennych decyzyjnych nie wpływa na wydajność obliczeniową algorytmu. Ponadto Autor wskazał na możliwość usprawnienia wspomnianej metody przez opracowanie algorytmu równoległego rozwiązania zadania prostego dynamiki i problemu adjoint w oparciu o schemat Dziel i Zdobywaj (DiZ). W dalszej części rozdziału Autor omówił strukturę rozprawy z krótkim streszczeniem zawartości poszczególnych rozdziałów.

W rozdziale drugim (s.5-s.18) Autor przedstawił przegląd literatury związanej z tematyką rozprawy, ogólnie omawiając wybrane metody sterowania optymalnego i zawężając spektrum algorytmów będących przedmiotem dalszych badań. Następnie sformułował problem sterowania optymalnego oraz omówił metody badania wrażliwości oparte na modelu matematycznym obiektu, takie jak metoda różniczkowania bezpośredniego czy metoda adjoint. Rozdział kończy sformułowanie tezy oraz celów rozprawy.

W kolejnym rozdziale, trzecim (s.19-s.43), Doktorant skupił się na przedstawieniu różnych metody opisu dynamiki wielocłonowych układów brył sztywnych, w których zastosowano równania Hamiltona. Opisane metody umożliwiają rozwiązania zadania prostego dynamiki. Pozostała część rozdziału została poświęcona na przedstawienie algorytmu DiZ do rozwiązywania równań ruchu w formie hamiltonowskiej.

Następnie w rozdziale czwartym (s.45-s.63) Autor rozprawy zawarł omówienie metody adjoint z równaniami ruchu wyrażonymi z zastosowaniem formalizmu Hamiltona oraz propozycję przedstawionej wcześniej metody adjoint zaimplementowanej w schemacie DiZ, umożliwiającej realizację obliczeń w sposób równoległy.

W rozdziale piątym (s.64-s.88) przedstawiono wyniki badań symulacyjnych kilku zadań rozwiązanych z zastosowaniem zaproponowanych metod, obejmujących dobór optymalnych wartości wybranych parametrów mechanizmu pięcioboku przegubowego, wahadła przestrzennego, czy symulacji sterowania optymalnego obiektem typu odwrócone podwójne wahadło na wózku czy odwrócone wahadło o dwóch stopniach swobody zamocowane do ramion robota równoległego.

Następnie w rozdziale szóstym (s.89-s.101) przedstawiono wyniki badań symulacyjnych implementacji zaproponowanego algorytmu HADCA w zadaniu sterowania optymalnego układem wielocłonowym w formie otwartego łańcucha kinematycznego. W rozdziale szczególny nacisk położono na przedstawienie możliwości wielowątkowej realizacji algorytmu z zastosowaniem systemów wieloprocesorowych oraz ukazanie pozytywnych aspektów takiego przetwarzania w postaci skrócenia czasu obliczeń.

W kolejnym rozdziale, siódmym (s.102-s.116) przedstawiono wyniki badań weryfikacyjnych ruchu układu wielocłonowego w formie robota równoległego sterowanego z zastosowaniem algorytmu złożonego z części generującej sygnały sterujące off-line w oparciu o metodę adjoint oraz regulatora PD. Analizując przedstawione wyniki badań można zaobserwować wyższą jakość realizacji ruchu nadążnego wybranego punktu mechanizmu sterowanego z zastosowaniem zaproponowanego algorytmu w porównaniu z zastosowaniem tylko regulatora PD, jednakże fakt wygenerowania sterowania off-line dla modelu układu, który może nie uwzględniać wszystkich zjawisk zachodzących w układzie rzeczywistym oraz występujących zakłóceń powoduje, że redukcja wartości błędów nadążania nie jest spektakularna.



Zasadniczą część pracy podsumowuje rozdział ósmy (s.117-s.120), gdzie podkreślono osiągnięcie wszystkich zakładanych celów oraz przedstawiono możliwe kierunki dalszych badań.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim, poprawnym technicznym językiem z zastosowaniem terminologii związanej z tematyką pracy. **Należy podkreślić bardzo staranne opracowanie rozprawy pod względem redakcyjnym** oraz uzupełnienie jej treści o elementy ułatwiające lekturę w formie spisów najważniejszych oznaczeń, najczęściej używanych akronimów, rysunków oraz tabel. Lektura rozprawy jest przyjemna, a poziom językowy w mojej ocenie nie odbiega od poziomu publikacji autorów pochodzących z krajów anglojęzycznych.

3. Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata

Cel pracy został obszernie omówiony w podrozdziale 2.5 (s.14-s.18), po nakreśleniu aktualnego stanu wiedzy z obszaru zainteresowania Autora oraz sformułowaniu tezy rozprawy. Przeprowadzony przegląd literatury wykazał brak wydajnych obliczeniowo, skalowalnych algorytmów stosowanych do systematycznego i dokładnego wyznaczania pochodnych względem zestawu zmiennych decyzyjnych. Celem Autora rozprawy było wypełnienie tej niszy poprzez propozycję wydajnego algorytmu łączącego schemat DiZ z metodą adjoint i opisem dynamiki układu wieloczołowego z zastosowaniem równań Hamiltona, umożliwiającego rozwiązanie zadania sterowania optymalnego układami wieloczołowymi, czy zadania doboru optymalnych parametrów np. konstrukcyjnych układu. W związku ze złożonością poruszanych zagadnień cel rozprawy został podzielony na pięć pomniejszych celów obejmujących: połączenie metody adjoint z modelem układu wieloczołowego wyrażonym w formie równań Hamiltona sformułowanych w mieszanych współrzędnych złączowych (I) i współrzędnych absolutnych (II), opracowanie algorytmu równoległego rozwiązującego zadanie proste dynamiki i problem sprzężony (adjoint) w oparciu o schemat DiZ (III), badania symulacyjne (IV) oraz weryfikacyjne (V) zaproponowanych algorytmów. Cel pracy Kandydata uważam za dobrze sformułowany, a problem zaplanowany do rozwiązania za mający znaczną wartość naukową.

4. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

W mojej ocenie metody badawcze zastosowane przez Doktoranta są adekwatne do tematyki rozprawy i umożliwiają prawidłowe sformułowanie oraz rozwiązanie postawionego w pracy problemu naukowego. Obejmują one badanie literatury zrealizowane w formie krótkiego, aczkolwiek treściwego i opartego na aktualnym stanie wiedzy z zakresu powiązanego z tematyką rozprawy, przeglądu literatury zawartego w podrozdziałach 1.1 oraz 2.2. Stosując wiedzę pozyskaną z literatury Autor rozprawy w rozdziałach 3 i 4 przeprowadził syntezę algorytmu równoległego rozwiązującego zadanie proste dynamiki obiektu i problem sprzężony (adjoint) w oparciu o schemat Dziela i Zdobywaj,



stanowiącego usprawnienie metody adjoint w szczególności w zakresie możliwości jej realizacji w systemach obliczeniowych w sposób równoległy. Weryfikację poprawności uzyskanych rozwiązań przeprowadzono stosując eksperyment numeryczny w formie badań symulacyjnych algorytmów w środowisku obliczeniowym oraz weryfikację wybranych aspektów działania algorytmów stosując układy rzeczywiste. Opis oraz wyniki badań symulacyjnych zawarto w rozdziale 5 i 6, wyniki badań eksperymentalnych w rozdziale 7.

5. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Wyniki badań symulacyjnych zaproponowanych algorytmów zawarto w rozdziałach 5 i 6, przy czym w rozdziale 5 przedstawiono wyniki implementacji algorytmów w zadaniach optymalizacji wybranych paramentów mechanizmów czy sterowania ruchem obiektów mechatronicznych, natomiast w rozdziale 6 skupiono się na omówieniu wyników badań związanych ze skalowalnością zaproponowanych algorytmów w zależności od rozmiaru problemu i zasobów systemu komputerowego realizującego obliczenia. Rozdziały te opracowano bardzo obszernie, omawiając założenia dotyczące poszczególnych symulacji numerycznych zrealizowanych w oprogramowaniu Matlab, prezentując wyniki w formie wykresów czy też tabelarycznie w formie wartości określonych wskaźników, a następnie przeprowadzając dyskusję otrzymanych rezultatów. Na wysoką ocenę zasługuje graficzne opracowanie wspomnianych rozdziałów, włączając w to wykresy oraz rysunki schematycznie przedstawiające zastosowane obiekty. Rozdziały zawierające omówienie wyników badań symulacyjnych kończy zwięzłe podsumowanie przeprowadzonych badań oraz wnioski dotyczące uzyskanych efektów, prezentując typową strukturę rozdziałów poświęconych omówieniu wyników badań zawartych w rozprawach doktorskich czy monografiach. Na podkreślenie zasługuje fakt doboru rozwiązywanych problemów z zakresu optymalnego doboru wybranych parametrów mechanizmu oraz sterowania optymalnego wybranymi typami mechanizmów (podwójne odwrócone wahadło na wózku, odwrócone wahadło o liczbie n członów na wózku, pojedyncze odwrócone wahadło o 2 stopniach swobody). Jednakże przy tak dużej liczbie obiektów sterowania w tekście rozdziału zabrakło przedstawienia ich matematycznych modeli użytych w badaniach symulacyjnych z informacją o wartościach wszystkich parametrów, w rozprawie natomiast nie wydzielono oddzielnego podrozdziału zawierającego omówienie obiektów sterowania.

W rozdziale 7 przedstawiono i omówiono wyniki badań eksperymentalnych zaproponowanych metod w zadaniu sterowania optymalnego ruchem wybranego punktu robota równoległego w wersji bez ograniczeń oraz z ograniczeniami przedziałów zmienności sygnałów sterujących. Rozdział 7 zawiera wprowadzenie, przedstawienie koncepcji układu sterowania, omówienie strony sprzętowej zastosowanych rozwiązań, porównanie odpowiedzi z modelu i obiektu rzeczywistego przy tym samym przebiegu sygnału wymuszającego, omówienie otrzymanych wyników badań oraz podsumowanie. Otrzymane wyniki przedstawiono w formie przebiegów poszczególnych zmiennych na wykresach, na podkreślenie zasługuje bardzo staranne opracowanie graficzne wyników ułatwiające ich interpretację. Jednakże jak w rozdziale 7 brakuje pełnego przedstawienia modelu dynamiki układu z podaniem wartości parametrów.



Forma prezentacji otrzymanych wyników badań nie budzi wątpliwości, opracowanie graficzne stoi na wysokim poziomie ułatwiając interpretację poszczególnych wykresów. Pewien niedosyt budzi brak zbieżności badań symulacyjnych i eksperymentu w kontekście zastosowania tego samego obiektu i trajektorii zadanej wybranego punktu mechanizmu (można byłoby dodać badania symulacyjne dla przypadku przedstawionego w badaniach eksperymentalnych i na podstawie otrzymanych wyników wnioskować o dokładności zastosowanego modelu obiektu sterowania).

6. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Zaproponowane w rozprawie metody poszerzają stan wiedzy w zakresie zagadnień związanych ze sterowaniem optymalnym oraz opisem dynamiki układów wielocłonowych umożliwiając implementacje w takich obszarach jak szeroko pojęte sterowanie układami mechatronicznymi, projektowanie maszyn czy robotyka. Zrealizowane badania, których wyniki przedstawiono w rozdziałach 5-7, przedstawiają przykłady zastosowania opracowanych algorytmów w zadaniach doboru optymalnych wartości wybranych parametrów konstrukcji np. mechanizmu, czy w połączeniu z dodatkowymi elementami algorytmu sterowania (np. regulator PD) w zadaniu sterowania on-line obiektami dynamicznymi. Jednakże ograniczeniem możliwości implementacji wspomnianych metod w sterowaniu on-line obiektami dynamicznymi może być sposób generowania sygnału sterującego „w przód”, co w połączeniu z niepewnościami modelowania odpowiedzi obiektu oraz występującymi zakłóceniami powoduje pogorszenie jakości sterowania. W tym zakresie w literaturze możemy znaleźć rozwiązania oferujące lepszą jakość sterowania, w tym metody sterowania optymalnego, jednakże stosowane w układach o stosunkowo małej liczbie stopni swobody, typowych dla robotyki.

Inny aspekt praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań wynika z dobrej skalowalności obliczeń związanych z realizacją zaproponowanych algorytmów. W rozwoju technik mikroprocesorowych, znacznie uogólniając problem, da się obecnie zauważyć odejście od rozwoju wysokowydajnych układów jednowątkowych, gdzie ciągłe zwiększanie wydajności napotkało istotne bariery technologiczne, na rzecz rozwoju rozwiązań wielowątkowych, gdzie wydajność jednostki obliczeniowej wynika z sumy wydajności obliczeń realizowanych w poszczególnych wątkach. Jednakże w podejściu takim szczególnie istotna jest odpowiednie przygotowanie oprogramowania, które będzie w stanie skorzystać z pełnej wydajności systemu wieloprocesorowego (wielowątkowego). W tym kontekście wyniki prac Doktoranta wydają się mieć szczególne zastosowanie, gdyż jak wynika z badań omówionych w rozdziale 6 zaproponowane algorytmy umożliwiają znaczne przyspieszenie procedury wyznaczania gradientu funkcji, odznaczając się dobrą skalowalnością obliczeń na wielu procesorach.



7. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Tekst rozprawy został napisany starannie, a jej część edytorska stoi na wysokim poziomie i zasługuje na bardzo dobrą ocenę. Jednakże w trakcie czytania pracy wykryłem pewne drobne błędy redakcyjne, których korekta może być wstępem do poszerzenia zakresu rozprawy i publikacji jej w formie wartościowej monografii.

Zauważone błędy edycyjne:

1. str. vii, linia ostatnia – brak kropki na końcu zdania (akapitu),
2. str. 17 linia 20 „threads.Apart” – brak spacji, analogicznie str. 118 linia 20 „experiments.They”,
3. wielokrotna definicja symbolu N_b - liczba członów: w liście symboli, str.3 linia 2 oraz str.19 linia 13 (zakończenie 1. akapitu),
4. wielokrotna definicja akronimu HDCA: lista symboli, str. 3 linia 27, str. 19 linia 16,
5. wielokrotna definicja akronimu NLP: lista symboli (Non-Linear Programming), str. 6 linia 31 (nonlinear programming), str. 9 linia 1,
6. brak definicji macierzy H_q^T na str. 21,
7. wielokrotna definicja symbolu liczby stopni swobody przegubu N^{dof} , str. 27 linia 5, str. 28 linia 9, w drugim przypadku zmieniono konwencję zapisu z indeksem dolnym, zamiast górnego, natomiast w pozostałych miejscach pracy, zwłaszcza w równaniach, stosowany jest indeks górny. Ponadto w linii 8 symbol jest zapisany w notacji $N^{(dof_i)}$, z indeksem i przy skrótowcu dof ,
8. siła uogólniona f z linii 19 str. 38 została wprowadzona w podrozdziale 3.2.2, nie w 3.2.1,
9. różny zapis macierzy Φ z indeksem dolnym q i górnym T w równaniach (3.4b) i (3.5),
10. brak przecinka po pierwszym równaniu układu równań (3.9) str. 23, po równaniu (3.47b) str. 38, (4.37a) str. 57, (4.37b) str. 57,
11. czy w równ. (3.10) na str. 23 w pierwszym iloczynie po znaku równości nie powinien występować wektor przyspieszenia q'' ?
12. brak kropki po zależnościach (3.21) str. 28, (3.23) str. 29, (3.38) str. 35, (3.39) str. 35, (4.37c) str. 57, (4.38) str. 57, (4.39) str. 58,
13. po zależności (3.40) str. 35 powinien znajdować się przecinek, nie kropka,
14. po ostatniej zależności układu równań (3.42) str. 36 powinna znajdować się kropka, nie przecinek,
15. nawiasy przy akronimie (DCA) str. 32 linia 7, wydają się być zbędne,
16. brak kropki na końcu zdania, str. 34 linia 6, „... body Let us...”,
17. na stronie 39 w środkowej części sąsiednie akapity zostały oddzielone kilkoma pustymi liniami i ciągiem trzech kropek, czy jest to celowy zabieg, czy też pominięcie jakiegoś istotnego fragmentu rozdziału?
18. wewnątrz zależności (3.52) str. 40 przed drugim znakiem równości nie powinien znaleźć się przecinek,
19. czy w podsumowaniu na str. 42 linia 13 chodzi o podrozdział 3.3 czy 3.4?



20. akronim EOM na str. 42 linia 18, jest zapisany czcionką w czarnym kolorze, inaczej niż pozostałe akronimy, analogicznie na str. 49, druga linia od dołu strony, podobnie na str. 52 linia 8 oraz na str. 68, linia 5, podobna sytuacja występuje z akronimem MBS na str. 43 linia 6, na stronie 52 linia 11, oraz na stronie 104 linia 11, analogicznie akronim RHS na str. 126 linia 9,
21. brak kropki po skrótce eq na str. 47 linia 6,
22. jedno równanie na str. 51 ma nadane dwa numery (4.21a) i (4.21b). Czy takie wprowadzenie numeracji było celowe?
23. na końcu równań (4.22a) i (4.22b) brakuje odpowiednio przecinka i kropki,
24. cytowania [36,31] w 4 linii na 65 stronie mogłyby być uszeregowane zgodnie z kolejnością przyjętą w spisie literatury,
25. skrót „Eqs.” w 16 linii na 66 str. zaczyna się z dużej litery, a powinien zapewne być z małej,
26. jednostki w rozdziale 5 są zapisywane w różnej konwencji: w nawiasach okrągłych (np. str. 67 linia 5,9), bez nawiasów np. str.69 linia 2, str. 71 linia 5, lub występują wartości całkowicie bez jednostek np. str. 69 linia 2, str. 73 linia 2,3, str. 75 linia 7, str. 77 linia 4, można byłoby tę kwestię uporządkować,
27. dla porządku wszystkie wartości podane w tabeli 5.1 na str. 65 powinny mieć podane jednostki,
28. czy nie dałoby się zmienić orientacji rys. 5.7 tak, aby wektor przyspieszenia ziemskiego g miał kierunek równoległy do krawędzi strony (jak np. na rys. 5.11), co miałyby odniesienie do jego orientacji ortogonalnej do powierzchni ziemi?
29. jednostkę współczynnika sprężystości przy skręcaniu przyjęło się podawać jako [Nm/rad], str. 72 linia 5 od dołu strony,
30. na wykresie pokazanym na rys. 5.9 po prawej stronie przedstawiono przebiegi wartości prędkości kątowych (jednostka [rad/s]), jednakże z legendy do wykresu wynika, że to przebiegi kątów obrotu α_1 i α_2 . Należałoby poprawić legendę do wykresu,
31. na str. 72 w zależności (5.2) użyto symbolu r^{init} , którego znaczenia nie wyjaśniono, natomiast pod równaniem wyjaśniono znaczenie symbolu $r^{(0)}$, jako wektora wskazującego położenie środka masy wahadła. Zapewne chodzi o ten sam wektor, należałoby ujednoclić oznaczenia,
32. dla zachowania konsekwencji można w tab. 5.4 (str. 81) masowe momenty bezwładności względem osi z brył 1-4 oznaczyć jako J_{zi} , podobnie jak długości l_i czy masy m_i wyżej (dodać indeks i),
33. akronim LHS na str. 91 linia 2 nie zdefiniowany wcześniej,
34. na stronach 98-101 szczegółowej analizie poddano przypadki wyznaczenia czasów realizacji poszczególnych etapów algorytmu w przypadku liczby członów $N_b=\{32,128\}$ oraz liczby wątków $p=\{1,32\}$, natomiast we wcześniejszej ogólnej analizie porównawczej nie przedstawiono wyników otrzymanych dla przypadku liczby $p=32$ wątków (rys. 6.6 i 6.7). Może do szczegółowej analizy należałoby wybrać wyniki przedstawione wcześniej?
35. długości l członów w układzie wielocłonowym zastosowanym w badaniach weryfikacyjnych, pokazanym w rozdziale 7 na rys. 7.2 podano w calach, konsekwentnie wyskalowano osie układu współrzędnych wykresów toru ruchu punktu P na wyk. 7.4, 7.9, 7.13, 7.14, 7.19, podczas gdy w rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla tego samego mechanizmu, podając długość członów w [m] oraz w tej jednostce skalując osie wykresów na rys. 5.26, 5.27, 5.30, 5.31.



Można byłoby przyjąć tę samą jednostkę na poszczególnych wykresach prezentujących wyniki symulacji i badań weryfikacyjnych ruchu tego samego obiektu, starając się stosować jednostki układu SI. Analogicznie na str. 104 linia 12 można byłoby długości członów mechanizmu zdefiniować jak w tabeli 5.4,

36. na rys. 7.5 na wykresie po lewej stronie przedstawiono kąty obrotu φ_1 i φ_4 wybranych członów mechanizmu otrzymane w wyniku symulacji ruchu układu oraz badań weryfikacyjnych, wyrażone w stopniach [deg], natomiast po prawej stronie prędkości kątowe obrotu wału silnika 1 wyrażone w [rad/s]. Aby zwiększyć łatwość odbioru wykresów można byłoby wykres przebiegów kątów obrotu wyskalować w [rad]. Ponadto z legendy do rysunku wynika, że chodzi o kątowe parametry ruchu tych samych brył (brak chociażby indeksów przy symbolach), natomiast z tekstu na str. 105 linia 14-16 dowiadujemy się, że po lewej stronie zaprezentowano kąty obrotu członów 1 i 4, a po prawej prędkości kątowe silnika członu 1,

37. w rozdziale 7 na str. 102 linia 9, 10, str. 103 linia 5, str. 106 linia 11 podano, że w algorytmie sterowania zastosowano regulator PD, natomiast na str. 106 linia 14 podano wartości współczynników wzmocnienia członu proporcjonalnego $k_p=22.7$ oraz całkującego $k_i=0.43$, co sugeruje zastosowanie regulatora PI. Należałoby ujednoclić tekst albo podać wartość właściwego współczynnika wzmocnienia,

38. str. 114 linia 9, „eq. 7.1. Therefore, The...” wyraz The z dużej litery w środku zdania,

39. zbędny przecinek str. 119 linia 3: „...bodies, (the analog...”,

40. przebiegi zmiennych kątowych w rozdziale 7 przedstawiono w stopniach [deg], a nie w [rad] jak w pozostałych rozdziałach pracy. W celu ułatwienia interpretacji przebiegów można byłoby ujednoclić jednostki,

41. Autor rozprawy niejednokrotnie rozpoczyna lub kończy podrozdział rysunkiem lub tabelą (podrozdziały: 3.2.2, 3.3.1, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.4.1, 5.4.2, 5.5, 5.5.1, 5.5.2, 7.2, 7.3, 7.5, 7.6), co jest raczej rzadko spotykane w pracach naukowych. W podrozdziałach dotyczących prezentacji wyników badań może to wynikać z dużego nasycenia treści wykresami, jednakże należy takich sytuacji unikać.

Uwagi do dyskusji:

1. Narzucenie ograniczeń na amplitudy sygnału sterowania poprzez wprowadzenie w funkcji kosztu kary za wartości sygnału sterującego spoza zdefiniowanego przedziału nie gwarantuje, że takie przekroczenie założonych ograniczeń nie wystąpi w zastosowanym układzie sterowania z powodu przyjęcia w sygnale sterującym dodatkowego sygnału sterującego generowanego przez regulator PD (uwaga do rozdziału 7). Czy może wystąpić sytuacja, w której w wyniku wystąpienia zakłócenia oraz dynamicznej zmiany zadanych parametrów ruchu całkowity sygnał sterujący będący sumą sterowania u_{PD} i $u_{feedfwd}$ osiągnie wartość przekraczającą założony limit? Czy ograniczono wartość całkowitego sygnału sterującego w inny sposób niż tylko wprowadzając dodatkowy człon w funkcji kosztu algorytmu?

2. Jaką metodą przeprowadzono identyfikację modelu dynamiki robota równoległego zastosowanego w badaniach weryfikacyjnych algorytmu sterowania? Z przebiegów kątów obrotu członów 1 i 4 robota równoległego przedstawionych na rys. 7.5 wynika, że w szczególności w przypadku członu 4



przebiegi z symulacji i z badań weryfikacyjnych znacznie się od siebie różnią (nie przedstawiono na wykresie 7.5 przebiegów prędkości kątowych członu 4). Z czego może wynikać ta różnica (uproszczenia modelu, zakłócenia występujące w trakcie ruchu mechanizmu)?

3. Czy zaproponowane algorytmy można byłoby zastosować do sterowania ruchem układów nieholonomicznych, np. mobilnych robotów kołowych w środowisku ze statycznymi przeszkodami? Jaki wpływ na jakość odwzorowania zadanego toru ruchu wybranego punktu robota mógłby mieć fakt generowania sterowania u_{feedfwd} „w przód” w dłuższym okresie realizacji ruchu?

4. Czy możliwe byłoby zastosowanie zaproponowanej metody ze sterowaniem generowanym „w przód” przyjmując koncepcję generowania sygnału sterującego w krótkich okresach (przedziałach) np. $t=0.5$ [s] z aktualizacją danych wejściowych na podstawie pomiarów z obiektu na początku każdego okresu? W ten sposób nawet w przypadku zastosowania modelu nie uwzględniającego wszystkich zjawisk zachodzących w obiekcie rzeczywistym oraz pojawiających się zakłóceń, można byłoby uzyskać poprawę jakości realizacji ruchu (np. minimalizacja problemu narastającego w czasie błędu odwzorowania zadanego toru ruchu punktu ze względu na przyjęcie koncepcji sterowania off-line głównego elementu układu sterowania). Czy złożoność obliczeniowa metody umożliwiłaby generowanie przebiegów sygnałów sterujących u_{feedfwd} dla wspomnianych odpowiednio krótkich okresów np. $t=0.5$ [s] w czasie jednego kroku dyskretnego realizacji algorytmu (np. krok dyskretyzacji w przedziale $t_d=0.01...0.1$ [s])? Jeżeli tak, jakie konsekwencje mogłoby mieć takie podejście w kontekście zastosowania otrzymanych sygnałów do sterowania układów rzeczywistych (czy otrzymane przebiegi byłby funkcjami klasy C2)?

8. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna w aspektach związanych z usprawnieniem metody adjoint przez opracowanie algorytmu równoległego rozwiązującego zadanie proste dynamiki i problem sprzężony (adjoint) w oparciu o schemat DiZ, przy czym zaproponowane rozwiązania są ukierunkowane na możliwość równoległego, wielowątkowego przetwarzania z zastosowaniem systemów wieloprocesorowych czy mikroprocesorów wielordzeniowych, co umożliwi istotne skrócenie czasu obliczeń.

9. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wskazuje na to zawarcie w rozprawie szeroko zakrojonego przeglądu literatury ze szczególnym uwzględnieniem pozycji z ostatnich kilku lat rozwoju dyscypliny, precyzyjne sformułowanie tezy i celu pracy, biegłe posługiwanie się złożonym aparatem matematycznym, umiejętność zaplanowania oraz realizacji badań symulacyjnych oraz weryfikacji zaproponowanych rozwiązań z zastosowaniem stanowisk



badawczych, jak również umiejętność krytycznego formułowania wniosków z przeprowadzonych prac.

10. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę treści rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Maciąga pt.: „**Optimal Control of Multibody Systems Using an Efficient, Parallelizable Adjoint Method**” stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. 2022 poz. 574 z późniejszymi zmianami). Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Ponadto rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie tematyki wpisującej się w obszar badań dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

Wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej wskazując na wysoki poziom merytoryczny badań związany z zastosowaniem złożonego aparatu matematycznego oraz poszerzenie aktualnego stanu wiedzy w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna w aspektach związanych z usprawnieniem metody adjoint przez opracowanie algorytmu równoległego rozwiązującego zadanie proste dynamiki i problem sprzężony (adjoint) w oparciu o schemat DiZ, przy czym zaproponowane rozwiązania są ukierunkowane na możliwość równoległego, wielowątkowego przetwarzania z zastosowaniem systemów wieloprocesorowych czy mikroprocesorów wielordzeniowych, co umożliwi istotne skrócenie czasu obliczeń. Należy również podkreślić fakt publikacji wybranych elementów przedstawionych w rozprawie w czasopismach o wysokim wskaźniku IF (np. Multibody System Dynamics IF2022: 3.4, International Journal for Numerical Methods in Engineering IF2020: 3.477), co potwierdza istotność przeprowadzonych badań oraz aktualność realizowanej tematyki.

Marcin Szuster

