

Warszawa, 28 grudnia 2021 r.

dr hab. inż. Paweł Malczyk
profesor uczelni

Zakład Teorii Maszyn i Robotów
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt. *Zastosowanie teorii gier różniczkowych w optymalnym sterowaniu adaptacyjnym ruchem mobilnego robota kołowego*, wykonanej przez mgra inż. Pawła Penara. Promotorzy: prof. dr hab. inż. Zenon Hendzel, dr hab. inż. Marcin Szuster, prof. PRz (prom. pomocniczy).

Podstawa wykonania recenzji: pismo RM-530-15-05/16/2021 Sekretarza Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, dra hab. inż. Pawła Wosia, prof. PRz z dnia 30 września 2021 r. Opinię przygotowałem na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej wydanej przez Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

1. Uwagi wstępne

Recenzowana praca jest napisana w języku polskim i liczy 128 stron. Jest podzielona na 6 rozdziałów głównych: 1. Wprowadzenie; 2. Przegląd aktualnego stanu wiedzy; 3. Obiekty badań; 4. Synteza adaptacyjnego sterowania optymalnego z zastosowaniem gry różniczkowej o sumie zerowej; 5. Badania weryfikacyjne; 6. Podsumowanie i kierunki dalszych badań. Ponadto praca zawiera spis piśmiennictwa (82 pozycje) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Dysertacja jest tematycznie związana z automatyką i robotyką, a jej osiągnięcia można usytuować w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Istnienie niepewności w modelach dynamiki układów, a także wpływ potencjalnie nieznanych zakłóceń powoduje, że projektowanie układów sterowania dla takich systemów jest szczególnie trudne i wymaga zastosowania technik sterowania odpornego. W efekcie metody klasy H_∞ syntetyzują rodzinę stabilizujących regulatorów, spełniających określone kryteria jakości, poprzez rozwiązanie szeregu problemów optymalizacji. Jak pokazuje piśmiennictwo, problem H_∞ może być sformułowany jako dwuosobowa gra różniczkowa o sumie zerowej, która z punktu widzenia zadań optymalizacji stanowi zagadnienie typu min-max. Taką ścieżką podąża także Doktorant w przedłożonej rozprawie. Minimalizacja wskaźnika jakości w przypadku występowania najbardziej niekorzystnych warunków zakłóceń wymaga wtedy znalezienia punktów równowagi Nasha, które są związane z rozwiązaniami równań Hamiltona–Jacobiego–Isaaca (HJI), będącymi analogami układów równań Hamiltona–Jacobiego–Bellmana (HJB) dla sterowania optymalnego nieliniowymi układami dynamicznymi. Koncepcja adaptacyjnego programowania dynamicznego (ADP), stosowana

przez Doktoranta w rozprawie, pozwala, w sposób iteracyjny, rozwiązać problem sterowania optymalnego w obecności najbardziej niekorzystnych zakłóceń. Zastosowany w pracy schemat typu aktor–krytyk umożliwia uzyskanie aproksymowanych rozwiązań równań HJI syntetyzowanych poprzez dobór i strojenie sieci neuronowych (SN). Konsekwencją takiego schematu postępowania jest znaczna minimalizacja kosztów numerycznych obliczeń, otwierająca nowe perspektywy sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi w reżimie czasu rzeczywistego.

Praca dotyczy ważnego i aktualnego obszaru sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi, w szczególności mobilnymi robotami kołowymi (MRK), w przypadku występowania w modelach niepewności strukturalnych i parametrycznych obiektu sterowania oraz w obecności zmiennych zakłóceń oddziałujących na układ. Techniki z rodziny ADP stanowią zestaw obiecujących algorytmów umożliwiających projektowanie odpornych regulatorów i były już stosowane w różnorodnych aplikacjach. Niniejsza praca wpisuje się w ten ważny i bogaty trend współczesnej inżynierii sterowania dostarczając nowych rezultatów badań wynikających z implementacji algorytmów i ich wykonania na rzeczywistym robocie mobilnym. Z tych względów **tematykę pracy uważam za aktualną i ważną, o istotnym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym.**

W swojej rozprawie, Doktorant, dokonuje przeglądu dokonań światowych dotyczących metod klasy ADP. Jakkolwiek w rozprawie pomniejszą uwagę poświęca się rozwojowi teoretycznych podstaw metod sterowania optymalnego w warunkach niepewności i zakłóceń, to jednak Autor wskazuje na niedostatki wynikające z braku praktycznych wyników weryfikujących podejścia klasy ADP dla robotów mobilnych. Opis proponowanych metod postępowania Doktorant zawarł w kolejnych rozdziałach recenzowanej rozprawy.

3. Szczegółowa charakterystyka rozprawy

① Rozprawę rozpoczyna *Wprowadzenie*, w którym Doktorant nakreśla tło obszaru, w którym lokuje się tematyka jego badań, dotycząca praktycznej syntezy adaptacyjnego sterowania optymalnego z zastosowaniem gry różniczkowej dla MRK. Jednocześnie uzasadnia potrzebę rozwoju i praktycznych implementacji algorytmów sterowania tej klasy dla aplikacji w robotyce mobilnej. W podrozdziale 1.3 Autor stawia podstawowy cel pracy, którym jest *wykazanie przydatności teorii gier różniczkowych, technik uczenia ze wzmocnieniem, szczególnie rodziny technik znanych jako neuronowe programowanie dynamiczne, w optymalnym sterowaniu układami mechatronicznymi, na przykładzie mobilnego robota kołowego*. Doktorant formułuje także tezę pracy, że *zastosowanie teorii gier różniczkowych umożliwia wyznaczenie i implementację w czasie rzeczywistym sterowania optymalnego ruchem mobilnego robota kołowego w obecności najbardziej niekorzystnego zakłócenia*. Cały rozdział zamykają komentarze dotyczące metodyki badań, autorskiego wkładu w rozwój dyscypliny, a także omówienie zawartości poszczególnych rozdziałów.

② W rozdziale drugim Doktorant dokonał przeglądu stanu wiedzy w zakresie technik sterowania optymalnego obiektami nieliniowymi w warunkach niepewności oraz zakłóceń. Omówione zostały najpierw równania stanu dla tej klasy układów razem z komentarzami dotyczącymi elementów stabilności w sensie Lapunowa (przy okazji, czy potrzebny w rozprawie elementarny przykład na str. 14?). Następnie zaprezentowano podstawy metod modelowania sieci neuronowych jako uniwersalnych aproksymatorów stosowanych w rozprawie. Kolejno zaprezentowano algorytmy sterowania optymalnego wyprowadzone z zasady optymalności Bellmana w wersji klasycznej prowadzącej do standardowych równań Riccatiego oraz w strukturze aktor–krytyk, którą realizuje się za pomocą SN. Poprzez

omówienie teorii struktur dyssypatywnych oraz sterowania odpornego H_∞ . Autor pokazuje w końcu zastosowanie technik ADP w strukturze aktor–krytyk w rozwiązaniu gry różniczkowej o sumie zerowej, która będzie stanowić bazę do symulacyjnych i implementacyjnych rozważań zademonstrowanych w dalszej części pracy. Trochę mylące jest zamieszczanie w tym rozdziale szczegółowych definicji i twierdzeń. Niektóre elementy tego rozdziału zapewne lepiej pasowałyby do innych części rozprawy. To, czego ewentualnie brakuje w tym rozdziale to odautorskie komentarze i wnioski, które punktowałyby niedostatki, wskazywałyby ciągle nierozwiązane problemy lub wymagające doskonalenia metody analizy/syntezy układów sterowania, które dały podstawę do sformułowania celów i tezy pracy. Częściowo pojawiły się one już w podrozdziale 1.2 i 1.5. Niemniej, w mojej ocenie, przegląd stanu wiedzy jest systematyczny i rzetelny, dobrze dopasowany do tematyki doktoratu. Świadczy o bardzo dobrej znajomości rzeczy i wiedzy w zakresie najważniejszych dokonań w obszarze podjętych przez Autora badań.

③ Rozdział trzeci zawiera omówienie modelu kinematyki i dynamiki dwukołowego robota mobilnego. Najpierw Autor prezentuje równania dynamiki pojedynczego modułu napędowego (silnik, przekładnia i koło) i klasyfikuje wygenerowany model jako liniowy układ dynamiczny. Następnie definiuje równania kinematyki dla MRK, których rozwiązania, w kolejnych częściach pracy, posłużą do realizacji zadanego toru ruchu w zadaniach stabilizacji i nadążania. W tym rozdziale wyprowadzono także równania ruchu dla MRK w formalizmie Lagrange'a i Maggiiego. Ostatni podrozdział ilustruje metodę identyfikacji parametrycznej MRK bazującą na minimalizacji błędu odwzorowania danych pomiarowych względem rezultatów symulacji. Całość materiału jest celnie komentowana i ilustrowana szeregiem wyników zamieszczonych w tabelach i na wykresach. W konsekwencji Autor z sukcesem zidentyfikował parametry modelu dynamiki MRK używanego później do syntetyzowania optymalnego sterowania.

④ Rozdział czwarty dotyczy syntezy adaptacyjnego sterowania optymalnego MRK z zastosowaniem teorii gier różniczkowych o sumie zerowej w środowisku symulacyjnym. W początkowym podrozdziale 4.1 Autor zwięźle szkicuje plan badań (rys. 4.1) zrealizowany w tej części pracy i w rozdziale piątym. Początkowo Doktorant przedstawia wyniki dwuosobowej gry różniczkowej o sumie zerowej w sterowaniu optymalnym pojedynczego modułu napędowego MRK. Następnie, przedstawia rezultaty sterowania optymalnego całym MRK w zadaniu nadążania dla różnych charakterystyk toru ruchu punktu charakterystycznego robota (ruch po prostej, ruch wzdłuż pętli). Rozdział zamykają rezultaty badań symulacyjnych związanych ze scenariuszem *jeźdź do celu*, w którym nadrzędna warstwa sterowania jest realizowana poprzez sterowanie kinematyką, zaś w niższej warstwie aplikuje się strukturę aktor–krytyk z adaptacją wag sieci neuronowej krytyka poprzez zastosowanie rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów (oznaczonej w pracy jako RLS). Autor bogato ilustruje przeprowadzone badania symulacyjne wykresami. Demonstrują one m.in. przebiegi zmiennych stanu obiektu, amplitudy sygnałów sterujących i zakłóceń, wartości wzmocnień γ^* weryfikujące warunek H_∞ oraz profile funkcjonu jakości wzdłuż trajektorii ruchu robota. Testy numeryczne jednoznacznie potwierdzają przydatność aplikowanych metod adaptacyjnego programowania dynamicznego w problemach sterowania nadążnego i stabilizacji MRK. Rezultaty osiągnięte przez Doktoranta w tym rozdziale należy docenić i uznać za ważne z punktu widzenia ich oczywistej aplikacyjności.

⑤ Rozdział piąty zawiera rezultaty badań eksperymentalnych sterowania suboptymalnego MRK w zmiennych warunkach pracy. Doktorant opisuje warstwę sprzętową używaną do wygenerowania sterowania. Szczegółowo przedstawia i komentuje uzyskane wyniki dla

optymalnego sterowania adaptacyjnego modulem napędowym oraz w przypadku zadania nadążania i stabilizacji MRK. Ciekawe są także badania dotyczące sterowania MRK wynikające ze zmiany charakteru podłoża, po którym porusza się obiekt. Otrzymane rezultaty pozytywnie weryfikują możliwości zastosowania zaawansowanych algorytmów sterowania dla potrzeb robotyki mobilnej. Przedstawione w pracy wyniki przejazdów robota dość dobrze korespondują do rezultatów otrzymanych drogą modelowania i symulacji, co należy uznać za ważne i oryginalne osiągnięcia wynikające z pracy.

⑥ Ostatni, krótki rozdział, przedstawia podsumowanie wyników pracy i osiągnięć Doktoranta. Jest to również miejsce, w którym Autor dokonuje krytycznej dyskusji trudności, które napotkał w trakcie realizacji badań. Ciekawe są też perspektywiczne kierunki badań rozszerzające metody syntezy (sub)optimalnych regulatorów badanych w niniejszej rozprawie o sterowania optymalne wyzwalane zdarzeniami.

4. Uwagi o charakterze krytycznym lub dyskusyjnym

4.1. Uwagi merytoryczne

(3.A; rozdział 3, uwaga A). To, co miejscami utrudnia śledzenie wyrażen matematycznych prezentowanych w tym rozdziale (i generalnie w pracy), to brak ujednocnionej notacji związanej z macierzami i wektorami. Z jednej strony macierze są oznaczane czcionką pogrubioną (patrz np. wzór (3.17) i macierz transformacji jednorodnej \mathbf{T}_1). Z drugiej strony macierz Jacobiego w (3.27), (3.28) oznaczono jako J , aby później wprowadzić ją w (3.61), w równaniach ruchu, w postaci $\mathbf{J}(\mathbf{q})$. Jednocześnie wektory są raz oznaczane jako obiekty matematyczne posiadające, w naturalny sposób, długość oraz kierunek wraz ze zwrotem (np. $\vec{\rho}_{K_1}$ w (3.19)), a w innych miejscach (np. wektor kolumnowy \mathbf{q} w (3.27)) prezentuje się algebraiczną reprezentacją wektora będącego obiektem pewnej przestrzeni.

(3.B). Wzór (3.21) pokazujący prędkość punktu styku koła z podłożem powstaje poprzez różniczkowanie zależności (3.19), w której iloczyn $\mathbf{T}_{10}\vec{\rho}_{K_1}$ jest funkcją kąta obrotu koła α oraz kąta obrotu β robota względem osi z układu globalnego. Wydaje się, że w (3.21) brakuje pochodnej $\mathbf{T}_{10}\dot{\vec{\rho}}_{K_1}$, która kompletowałaby warunek toczenia koła po płaszczyźnie. Potencjalnie, ta sama pomyłka może być widoczna również w (3.24).

(3.C). Ze zdania na str. 41 *W celu rozwiązania zadania odwrotnego kinematyki należy założyć dwie współrzędne, co oznacza że modelowany układ ma dwa stopnie swobody* nie wynika, że jest to układ o 2DOF. Należałoby raczej rozważyć jak wygląda relacja liczby ograniczeń równościowych, nieholonomicznych nakładanych na ruch robota w kontekście liczby prędkości uogólnionych użytych do opisu układu bądź dokonać analizy macierzy Jacobiego układu.

(3.D). Czy wygenerowane modele dynamiki MRK były weryfikowane np. w kontekście rezultatów otrzymanych za pomocą niezależnych pakietów do obliczeń dynamiki układów wielocłonowych (bądź innych metod)?

(3.E). W podrozdziale 3.2.3 Doktorant prezentuje lagranżowski formalizm generowania równań ruchu dla MRK, który nazywa równaniami Lagrange'a II rodzaju. Zestaw (3.61) to równania Lagrange'a I rodzaju* lub równania z mnożnikami Lagrange'a**. Przy okazji, jaki zestaw równań należałoby dołączyć do (3.61), aby mieć możliwość rozwiązania tychże względem przyspieszeń uogólnionych $\ddot{\mathbf{q}}$ oraz mnożników Lagrange'a λ ?

* W. Rubinowicz, W. Królikowski. *Mechanika Teoretyczna*, PWN, 2021

** W. Blajer. *Metody dynamiki układów wielocłonowych*, Politechnika Radomska, 1998.

(3.F). Doktorant we wzorach (3.83)–(3.95) dokonuje jawnej eliminacji mnożników Lagrange’a λ występujących w wygenerowanym zestawie równań różniczkowo–algebraicznych i transformuje je do układu nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych (3.95) poprzez wybór zestawu dwóch prędkości niezależnych. Krytycznym dla powodzenia tej metody podziału prędkości krokiem jest dobre uwarunkowanie macierzy J_1 występującej we wzorze (3.84), (3.85). Czy możliwe są konfiguracje MRK, które doprowadziłyby do złego uwarunkowania bądź osobliwości macierzy J_1 ?

(3.G). Równania Maggiego pozwalają na bezpośrednie wygenerowanie równań ruchu MRK względem zestawu dwóch niezależnych współrzędnych uogólnionych (kąty obrotu kół). Jakkolwiek formalizm Maggiego doprowadza w konsekwencji do tych samych równań ruchu MRK, które zostały już wygenerowane z opisu lagranżowskiego, to jednak ten drugi wprost podaje wartości mnożników Lagrange’a λ , które fizycznie można interpretować jako wartości sił reakcji na kierunkach skrepowania ruchu układu. Taka informacja umożliwia wprowadzenie dodatkowych możliwości modelowania zjawisk, np. związanych z siłami tarcia zależnymi od amplitudy sił reakcji.

(3.H). Autor prezentuje procedurę identyfikacji parametrów MRK Pioneer-2DX w podrozdziale 3.3. Proszę o komentarz dot. źródła wartości dolnej granicy $a_{ub} \leq a$ poszukiwanych kombinacji parametrów fizycznych podanych pod wzorem (3.104). Wydaje się też, że nałożenie górnej granicy ograniczeń kostkowych a_{ub} pomogłoby w zbieżności metody obszarów zaufania. Wzór (3.113) pokazuje wynik identyfikacji. Jak rozumiem, są to wielkości, które powinny być opatrzone jednostkami, zgodnie z (3.97)?

(4.A). W równaniu (4.9) wprowadza się wielkość $\Delta F(\dot{\alpha})$ jako człon zakłóceń parametrycznych i strukturalnych związanych z siłami tarcia oraz niemodelowanymi zjawiskami. Czy Autor wprowadza ograniczenia na wielkość tego wyrażenia? Jak z kolei wielkość tych niepewności może wpływać na jakość sterowania obiektem?

(4.B). Tabele 4.3 oraz 4.4 demonstrują wartości wskaźników jakości sterowania dla badań symulacyjnych ruchu robota odpowiednio po torze w postaci prostej, jak i po trajektorii w kształcie pętli. Wartości pozycyjnych ϵ_i oraz prędkościowych $\dot{\epsilon}_i$ błędów nadażania są porównywalne dla obu wspomnianych przypadków. Tymczasem w wartościach absolutnych błędów (d_x , d_y) można zaobserwować nawet dziesięciokrotne odstępstwa. Skąd, zdaniem Doktoranta, wynikają te rozbieżności (które wciąż są rzędu centymetrów)?

(4.C). Czy w iteracyjnym algorytmie sterowania (por. 2.5.2) stosowanym w tym rozdziale wymaga się określenia początkowych, stabilizujących i dopuszczalnych strategii sterowania obiektem u ? Czy znane są Autorowi ograniczenia na dobór takowych z punktu widzenia stabilności, zbieżności i optymalności rozwiązań?

(4.D). Jak wygląda proces doboru początkowych wag \hat{W} i G krytyka dla stosowanej sieci neuronowej? Jak dobór przybliżeń w rekurencyjnej metodzie najmniejszych kwadratów (RLS) wpływa na zbieżność, i w konsekwencji, jakość sterowania obiektem. W tym kontekście interesujący byłby też komentarz Autora dotyczący sposobu doboru funkcji bazowych w SN.

(5.A). Autor już w celach i tezie pracy wzmiankuje o możliwości implementacji analizowanych algorytmów w czasie rzeczywistym. Ta kwestia, moim zdaniem, nie jest

w pracy dostatecznie uwypuklona. Nie jest do końca jasne, które elementy algorytmu sterowania MRK są obliczane off-line, a które są egzekwowane bezpośrednio na komputerze pokładowym robota dla dwuosobowej gry różniczkowej o sumie zerowej. W tym kontekście, nie bardzo wiadomo, jak wygląda złożoność obliczeniowa i pamięciowa algorytmu i jej wpływ na działanie aplikacji czasu rzeczywistego. Gdzie występuje największy narzut obliczeniowy związany z syntezą regulatora? Jak wygląda czas związany z wygenerowaniem sterowania w porównaniu do założonego czasu próbkowania dla MRK? Proszę Doktoranta o komentarze w tej kwestii.

(5.B). Dyskusję dotyczącą punktu (5.A) znacznie ułatwiłby pseudokod, którego brakowało recenzentowi w rozprawie, a który pokazywałby detalicznie poszczególne kroki algorytmu zarówno od strony krytyka, jak i aktora/aktorów. Jednocześnie można byłoby zaznaczyć w nim zmienne, które należy zainicjować w procesie iteracyjnym zarówno w scenariuszach, w których dokonuje się adaptacji wag, jak i w przypadku zadań nadążania w zmiennych warunkach pracy.

(5.C). Aplikacje czasu rzeczywistego wymagają deterministycznego czasu egzekucji procedur, których rezultatem może być np. wygenerowanie sygnałów sterujących. Algorytmy stosowane przez Doktoranta w rozprawie mają charakter iteracyjny. W przypadku bardziej skomplikowanych niż MRK układów, o wielu stopniach swobody, dostępny komputer wbudowany może nie dysponować dostateczną mocą obliczeniową i, w związku z reżimem czasu rzeczywistego, może zachodzić potrzeba sztucznego ograniczenia liczby iteracji do stałej wartości bez spełnienia warunków stopu. Wobec tego uzyskane wielkości w algorytmie (np. te związane z SN) byłyby tylko zgrubnymi przybliżeniami. Jak zdaniem Doktoranta mogłoby to się odbić na jakości sterowania obiektem. Proszę też Doktoranta o opinię, czy badane algorytmy mogą znaleźć zastosowanie w przypadkach sterowania układami, które posiadają więcej stopni swobody niż przykład rozważany w pracy.

(5.D). Proponowane metody sterowania bazują ściśle na modelu dynamiki robota (*model-based control*), który, jak sądzę, powinien dość wiernie odwzorowywać rzeczywisty obiekt. W ostatnim czasie, w piśmiennictwie światowym, bardzo istotnie są eksplorowane metody sterowania układami dynamicznymi typu *data-driven* (*data-based*), w których model systemu nie jest dany z góry. Proszę Doktoranta o komentarz w kwestii możliwości rozszerzenia algorytmów prezentowanych w pracy na te przypadki.

(5.E). Jakkolwiek badane w rozprawie algorytmy pozwalają na redukcję wrażliwości systemu sterowania na potencjalne zakłócenia strukturalne i parametryczne, to wydaje się, że mogą posiadać także i pewne niedostatki. W rzeczywistych warunkach istnieją ograniczenia fizyczne (saturacje) związane np. z możliwościami rozwijania momentów napędowych przez silniki bądź inne warunki (np. geometryczne związane z przeszkodami) nakładane na zmienne stanu, szczególnie ważne w robotyce mobilnej. Proszę Autora o komentarz dotyczący możliwości wprowadzenia ograniczeń nierównościowych w badane metody syntezy regulatorów.

(5.F). Autor stosuje filtrację górnozaporową dla sygnałów rejestrowanych przez kartę dSpace w trakcie weryfikacji. Jak bardzo zaprojektowany system optymalnego sterowania adaptacyjnego MRK jest podatny na szumy pomiarowe? Z praktycznego punktu widzenia, czy znane są Autorowi wartości relacji sygnału do szumu (*signal-to-noise ratio*), które

pozwalają jeszcze na relatywnie dobrą jakość sterowania obiektem? Proszę Doktoranta o komentarz w tej kwestii.

(5.G). W wielu fragmentach rozdziału piątego Doktorant zwraca uwagę na uchyby statyczne, które istnieją w przebiegach czasowych zmiennych stanu zarejestrowanych w trakcie badań eksperymentalnych, a które nie są obserwowane w rezultatach symulacji (rys. 5.8 i 5.9). Przyczynę takiego stanu rzeczy Autor upatruje w występowaniu niemodelowanych zjawisk. Czy identyfikacja modelu dynamiki MRK zaprezentowana w rozdziale 3 była przeprowadzona w tych samych warunkach (tj. na tym samym podłożu), w których przeprowadzano część testów weryfikacyjnych zaprezentowanych w rozdziale piątym?

Zaprezentowane w tej części recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne mają charakter polemiczny i powinny być przedmiotem dyskusji podczas publicznej obrony. Nie umniejszają one jednak wartości naukowej rozprawy.

4.2. Inne uwagi: edytorskie i o mniejszym znaczeniu merytorycznym

Rozprawa doktorska jest zredagowana dobrze, praktycznie bez większych błędów. Struktura pracy jest spójna, poprawna i przemyślana. Praca zawiera dobrej jakości rysunki i wykresy, które dodają jej wartości. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych niedociągnięć językowych (pisownia, gramatyka i styl) i redakcyjnych, które jednak nie wpływają na czytelność tekstu, ani na jego całkowitą ocenę. Poniżej przedstawiono dostrzeżone w pracy usterki.

1. W tekście rozprawy można znaleźć znaczną liczbę pomyłek związanych z pisownią wyrazów. Wydaje się, że dobrym pomysłem byłoby przepuszczenie tekstu przez narzędzie do sprawdzania pisowni języka polskiego. Poniżej podaję parę niedostatków.

- a. Jest: *użytecznego zastosowanie* (str. 6). Powinno być: *użytecznego zastosowania*.
- b. Jest: *odpowiadają symulacją* (str. 9). Powinno być: *odpowiadają symulacjom*.
- c. Jest: *dysypatywność* (str. 11). Powinno być: *dyssypatywność* (tak, jak w dalszych częściach pracy).
- d. W niektórych miejscach pracy (np. str. 13) używa się *stabilności w sensie Lapunova* i na tej samej stronie odnajdziemy również *Stabilność Lapunowa*, jako tytuł podrozdziału 2.2.1.
- e. Jest: *Metoda Levenberga-Marguarta* (str. 21). Powinno być: *Metoda Levenberga-Marquardta*.
- f. Jest: *K_{LQG} oraz L_{LQG} to wzmocnia* (str. 33). Powinno być: *K_{LQG} oraz L_{LQG} to wzmocnienia*.
- g. Jest: *Energię kinematyczną* (str. 50). Powinno być: *Energię kinetyczną*.
- h. Jest: *Blok enkoderów inkrementalnych* (str. 93). Powinno być: *Blok enkoderów inkrementalnych*.
- i. Jest: *anlogiczny* (str. 117). Powinno być: *analogiczny*.
- j. Jest: *Pionier-2DX* (w całej pracy). Powinno być: *Pionier-2DX*.
- k. Jest: *rozwiązano zdanie* (str. 121). Powinno być: *rozwiązano zadanie*.

2. W tekście rozprawy można znaleźć znaczną liczbę tzw. liter–sierot. W niektórych miejscach tekstu występują usterki natury interpunkcyjnej (szczególnie w zdaniach podrzędnie złożonych i zdaniach z wtrąceniami).
3. Skład tekstu i rysunków/tabel w rozprawie nie zawsze jest do końca poprawny. W kilku miejscach dokumentu (np. str. 5, 63, 71, 78, 84, 106, 112, 113, 117) można zaobserwować niewypełnione przestrzenie, po których na ogół następuje rysunek lub tabela.
4. Podpisy umieszcza się nad tabelami, tymczasem w wielu miejscach pracy zostały umieszczone pod nimi (patrz np. tab. 3.3, 3.4, 4.1, ... itd.).
5. W wielu miejscach rozprawy występuje niekonsekwencja polegająca na braku spójności w oznaczaniu wektorów. Dla przykładu w relacji równościowej (2.72) błędy ϵ_1 oraz ϵ_H powinny być raczej zapisane za pomocą pogrubionej czcionki, jako obiekty będące wektorami kolumnowymi.
6. W rozprawie występują także błędy stylistyczne. Niektóre z nich wyszczególniono poniżej.
 - a. str. 11: *Teoria sterowania wypracowała definicje pojęć związanych ze sterowaniem [...].*
 - b. str. 69: *Takie zadanie jest równoznaczne ze sprowadzeniem błędu nadążania do zera, co powoduj, że w punkcie 4.2.1 zrealizowano zadanie stabilizacji kąta obrotu wału silnika a otrzymane przebiegi pokazano na rys. 4.4. [...].*
 - c. str. 95: *Karta sygnałowa dSpace 1103 jest dedykowana.* To wyrażenie zostało użyte w złym kontekście, jako, że “dedykować” to poświęcić komuś utwór literacki, muzyczny, umieszczając w nim dedykację.
 - d. str. 103: *ocena funkcja wartości.*
 - e. str. 121: Niezbyt dobrym stylem jest napisany krytyczny fragment rozdziału 6 obejmujący zdanie: “Otrzymano potwierdzenie [...] w obecności najbardziej niekorzystnych zakłóceń.”, w którym Autor potwierdza prawdziwość postawionej tezy.
7. Podpis pod rysunkiem 3.2 wskazuje na istnienie w nim rysunku (a) i (b). Tymczasem nie można odnaleźć tych oznaczeń na rys. 3.2.
8. Wzór (3.23) zawiera macierz transformacji T_{02} . We wzorze pochodnym (3.24) odnajdziemy macierz T_{20} .
9. Wydaje się, że w (3.40) powinny być widoczne sigmoidalne funkcje unipolarne i brakuje znaku “–” w potęgach funkcji wykładniczych. Podobnie w (3.48). Notabene, w (4.23) uwzględniono już znak “–”.
10. We wzorach (3.65)–(3.73) Autor wyznacza energię kinetyczną poszczególnych członów robota. Szkoda, że numeracja członów zainicjowana na rysunku 3.2 nie pokrywa się z indeksacją symboli w energii kinetycznej.
11. Na rys. 4.10 Autor prezentuje wartości elementów macierzy G , zaś oś rysunku a) oznaczono jako $P[-]$.

5. Ogólna ocena rozprawy

W mojej opinii recenzowana rozprawa mgra inż. Pawła Penara pt. *Zastosowanie teorii gier różniczkowych w optymalnym sterowaniu adaptacyjnym ruchem mobilnego robota kołowego* stanowi wartościowy wkład dla rozwoju zaawansowanych technik sterowania robotami mobilnymi. W warstwie programistycznej i sprzęgu oprogramowania ze sprzętem Autor wykazał się sprawnością implementacyjną, która umożliwiła zastosowanie koncepcji adaptacyjnego sterowania optymalnego do kontroli ruchu mobilnego robota kołowego. W stosunku do piśmiennictwa światowego praca, choć bazująca na znanych technikach, wnosi szereg praktycznych wyników i oryginalnych spostrzeżeń dotyczących egzekucji algorytmów w rzeczywistych scenariuszach ruchu robota mobilnego.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy chciałbym zaliczyć:

- Opracowanie i zaimplementowanie rozbudowanego algorytmu optymalnego sterowania adaptacyjnego bazującego na dwuosobowej grze różniczkowej w zadaniu nadążania i stabilizacji ruchu mobilnego robota kołowego w środowisku symulacyjnym, który pozwolił na uzyskanie nowych, dotąd niedostępnych, wyników i ocen jakości sterowania nieliniowym obiektem.
- Analiza i synteza optymalnych adaptacyjnych praw sterowania i ich weryfikacja praktyczna w implementacjach na rzeczywistym mobilnym robocie kołowym Pioneer-2DX, również w przypadku zmian struktury powierzchni, po której porusza się robot.
- Aplikacyjne rozwiązanie, dające możliwość tworzenia zaawansowanych algorytmów sterowania robotami mobilnymi, które biorą pod uwagę różnorodne zakłócenia/niepewności występujące w ruchu rzeczywistych robotów.
- Umiejętne zastosowanie różnych metod badawczych uwzględniających podejście teoretyczne/analizyczne, metody modelowania i symulacji układów mechatronicznych oraz metody eksperymentalne.

Recenzowana rozprawa doktorska wskazuje na znaczny wkład pracy Autora i dowodzi możliwości praktycznego rozwiązania ważnego problemu naukowego. Pan mgr inż. Paweł Penar opublikował dotychczas wyniki swoich badań w trzech dostrzeżonych przez recenzenta publikacjach (w tym ostatnia – za 100 pkt wg listy czasopism naukowych MNiSW).

1. Hendzel Z., Penar P. (2017) Zero-Sum Differential Game in Wheeled Mobile Robot Control, Book Series: Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer International Publishing.
2. Hendzel Z., Penar P. (2020) Optimal Control of a Wheeled Robot. In: Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds) Automation 2019. AUTOMATION 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 920. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13273-6_44.
3. Hendzel Z., Penar P. (2021) Experimental verification of H_∞ control with examples of the movement of a wheeled robot. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol 69(6), <https://doi.org/10.24425/bpasts.2021.139390>.

6. Wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej pt. *Zastosowanie teorii gier różniczkowych w optymalnym sterowaniu adaptacyjnym ruchem mobilnego robota kołowego* mogę stwierdzić, że jej Autor, mgr inż. Paweł Penar, poprawnie sformułował i rozwiązał ważne zagadnienie techniczne, a przedstawiona praca ma wymaganą wartość naukową i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Przygotowując rozprawę Doktorant wykazał się wiedzą z zakresu mechaniki analitycznej, metod modelowania i identyfikacji układów z więzami nieholonomicznymi oraz znajomością zaawansowanych technik sterowania złożonymi układami mechatronicznymi. Autor wniósł oryginalny wkład do automatyki i robotyki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i wykazał, że opanował warsztat naukowy niezbędny do prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Udokumentowany w rozprawie doktorskiej wkład Autora w praktyczne aspekty zastosowań zaawansowanych technik sterowania robotów mobilnych należy uznać za istotny.

Wnioskuje o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Penara i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Dodatkowo, ze względu na wysoki poziom merytoryczny rozprawy, podejmującej praktyczne aspekty zastosowań teorii gier różniczkowych w optymalnym sterowaniu adaptacyjnym ruchem mobilnego robota kołowego oraz nowe rezultaty badań, które nie były do tej pory dostępne w piśmiennictwie, stawiam wniosek o wyróżnienie pracy.

PMalczyk

Paweł Malczyk