

dr hab. inż. Adam Kulawik prof. PCz  
Katedra Informatyki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Politechnika Częstochowska

Częstochowa 15.09.2022

## Recenzja

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja NALEPY

pt. „*Algorytmy wyznaczania parametrów kinematycznych połączonych przegubowo brył sztywnych na podstawie niepełnej informacji pomiarowej*”

#### 1. Uwagi ogólne

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy wyznaczania parametrów kinematycznych układów brył sztywnych połączonych przegubowo przy założeniu, że jest pomiar parametrów jest silnie ograniczony.

Monitorowanie parametrów kinematycznych układów jest współcześnie silnie rozwijanym obszarem zarówno przemysłu jak i nauki. Radykalne, w ostatnich latach, zwiększenie ilości sensorów związane z wdrażaniem przemysłu 4.0, internetu rzeczy, cyfryzacji produktów, czy nawet produktów codziennego użytku takich jak telefony komórkowe, smartwatche, smartbandy pozwala na pojawianie się nowych gałęzi usług. Technologia akwizycji ruchu coraz silniej jest wykorzystywana w życiu współczesnego człowieka. Rosnące wymagania stawiane przed innowacyjnymi produktami czy usługami skutecznie wspomagają rozwój tego obszaru badawczego nie tylko od strony inżynierii biomedycznej (wspomagana rehabilitacja, treningi) ale także w obszarach rozrywki czy sportu. Na polu współczesnego rynku często podstawą jest innowacja polegająca na niespotykanym wykorzystaniu danego urządzenia. Ze względu na mnogość urządzeń posiadających pojedyncze układy pomiarowe wymagany jest rozwój nauki nie w kierunku budowy skomplikowanych układów ale w obszarze wykorzystania informacji z ograniczonej liczby sensorów. Recenzowana praca dobrze się wpisuje w powyższe pola rozwoju nauki. Każdy pomiar realizowany jest z zastosowaniem ograniczonej liczby sensorów i badacz zawsze posiada niepełną informację pomiarową. Recenzowana praca dotyczy jednak szczególnego przypadku ograniczania liczby sensorów do wartości minimalnej. Opracowanie nowych algorytmów oraz zrozumienie możliwości ekstrahowania cech ze złożonego informacyjne pojedynczego sygnału pomiarowego jest ciekawym i wartym rozwoju obszarem badawczym.

Znaczenie naukowe pracy, a szczególnie rozwiązań proponowanych przez Autora rozprawy jest oczywiste. Wiąże się to także z faktem, że prace dotyczące wyznaczania

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia ..22.09.2022  
RDJHC/167/511/2022  
nr ..... zat. 2eq

parametrów kinematycznych układów ciał na podstawie silnie ograniczonej informacji pomiarowej pozwalają na innowacyjne wykorzystanie już istniejących rozwiązań sprzętowych. Prowadzi to w konsekwencji do poprawy jakościowej dostępnych usług związanych z monitorowaniem parametrów ruchu. Autor pracy wykorzystał do tego celu model matematyczny i program komputerowy wspomagany badaniami eksperymentalnymi.

Pracę wykonano w Katedrze Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach pod kierunkiem dwóch promotorów: dr. hab. inż. Aleksandra Gwiazdy, prof. PŚ oraz prof. dr. hab. inż. Konrada Wojciechowskiego.

Autor pracy (Doktorant) postawił sobie następujący cel: Otworzenie trajektorii ruchu człowieka na podstawie danych z możliwie minimalnej liczby sensorów IMU (Inertial Measurement Unit). We wnioskach natomiast cel został określony jako estymowanie parametrów kinematycznych określonych połączonych przegubowo brył na podstawie informacji pozyskanej z pozostałych sensorów IMU. W pracy Recenzent nie znalazł, z wyjątkiem przeglądu literatury, bezpośredniego nawiązania do odtwarzania trajektorii ruchu człowieka. Natomiast zostały użyte dwa układy pomocnicze (stanowiska badań eksperymentalnych) do weryfikacji szacowania skuteczności modeli matematycznych. Zakres pracy został poprawnie określony z zachowaniem typowych cech dobrej pracy doktorskiej takich jak przegląd obecnego stanu wiedzy, wybór układów do przeprowadzenia analizy badawczej, przeprowadzenie badań i ich analiza. Oprócz tradycyjnych podejść do tematyki doktorant przedstawił także próbę zastosowania sztucznych sieci neuronowych do rozwiązania postawionego problemu. Pracę kończą podsumowanie oraz wnioski.

Doktorant postawił w pracy tezę, że na podstawie informacji pomiarowej pozyskanej z wybranych sensorów IMU umieszczonych na połączonych przegubowo bryłach można estymować parametry kinematyczne pozostałych brył systemu i jednocześnie podnosić dokładność parametrów kinematycznych pozyskiwanych z sensorów IMU. Teza doktoratu, zgodnie z wymaganiami, jest zatem odpowiedzią na problem badawczy postawiony w temacie pracy. Niestety nie odzwierciedla to w pełni celu zdefiniowanego przez doktoranta.

Cel i zakres pracy oraz zastosowane metody badawcze wskazują, że można zakwalifikować przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską do dyscypliny inżynieria mechaniczna z pewnymi elementami informatyki technicznej i telekomunikacji.

## **2. Zakres pracy**

Praca składa się z dwóch głównych części – części teoretycznej w skład której można zaliczyć *Wstęp* oraz *Przegląd literatury* oraz części związanej z badaniami własnymi doktoranta – podzielonymi na 5 rozdziałów. Pracę stanowią: 117 stron maszynopisu, spis literatury (93 pozycje) oraz streszczenia w językach polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym pracy (*Wstęp*) zostały obszernie zaprezentowane informacje potrzebne do zrozumienia genezy pracy. Został postawiony cel pracy oraz sformułowana teza.

W rozdziale drugim przedstawiono analizę literatury z obszaru tematyki pracy. Przegląd literatury dotyczył w szczególności określania właściwego modelu matematycznego badanego obiektu, doboru aparatury pomiarowej oraz wyznaczenia algorytmu do przetwarzania danych pomiarowych na podstawie modelu matematycznego. W ramach pierwszej części przeglądu literatury opisane została koncepcja systemu brył sztywnych w układach biomechanicznych. Część dotycząca doboru układów pomiarowych skupiła się na metodach pomiarowych układów biomechanicznych. W omawianym rozdziale dokonano także analizy potencjalnych algorytmów procesu estymacji parametrów kinematycznych brył, dla których nie ma danych pomiarowych. Rozdział ten stanowi w znacznej mierze punkt odniesienia dla pracy wykonanej przez autora.

Rozdział trzeci to analiza pierwszego układu mechanicznego – trójczłonowego wahadła. Wykonano estymację wielkości mierzonych z sensorów IMU z zastosowaniem filtru Kalmana. W rozdziale tym dokonano opisu sensorów IMU oraz dokonano analizy danych z tych sensorów. Przeprowadzono porównanie danych otrzymanych z stanowiska badawczego z IMU oraz systemu pomiarowego wizyjnego VICON dla wszystkich członów wahadła. Doktorant zaprezentował równania estymacji parametrów kinematycznych układu brył sztywnych wykorzystujące filtr Kalmana oraz opisał wyniki z tego modelu. Dane z pomiarów z czujników IMU zestawiono z wartościami estymowanymi z modelu matematycznego określając jego dość niski poziom niedokładności z zastosowaniem algorytmu DTW.

Rozdział czwarty dotyczy odtwarzania ruchów członów robota przemysłowego. Do tej analizy także wykorzystano sensory IMU – rejestrowano prędkość kątową oraz przyspieszenie liniowe. Zestawiono dane z czujników oraz dane od źródła napędu osi. Dane musiały ulec przetworzeniu z powodu różnic w częstotliwościach rejestrowanych sygnałów. Następnie dokonano analizy zastosowania zmodyfikowanego algorytmu ICA do minimalizacji liczby sensorów IMU. Wykonano separację sygnałów z sumy parametrów zarejestrowanych przez jeden układ pomiarowy. Dodatkowo określono wpływ modyfikacji funkcji gradientu entropii na wyniki separacji znacząco poprawiając dokładność separacji.

Rozdział piąty to próba rozwiązania postawionego zadania z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej. Rozdział ten zawiera dużo niedomówień, z których niektóre zostały zapisane w uwagach poniżej. Zawiera także niepotrzebny opis przydziału pamięci dla tensorów w TF nie wnoszący merytorycznie nic do pracy.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie uzyskanych wyników natomiast rozdział siódmy wnioski końcowe.

### 3. Ocena merytoryczna pracy

Opiniowana rozprawa jest udaną próbą prezentacji algorytmów do wyznaczania parametrów kinematycznych połączonych układów brył sztywnych przy silnie ograniczonej informacji pomiarowej.

Zakres pracy mocno nawiązuje do współcześnie szybko rozwijających się obszarów działalności człowieka, w którym istotną rolę ma przetwarzanie złożonych informacyjnie sygnałów zawierających dane dotyczące zachowania się układów brył. Prezentowane dane zawierają zarówno elementy pozwalające na porównanie możliwych rozwiązań problemu jak i mają pewne aspekty w obszarze wdrożeń przemysłowych. Ze względu na współczesne wymogi dotyczące akwizycji ruchu dotyczące minimalizacji kosztów, problemów instalacyjnych oraz maksymalnej „niezauważalności” urządzeń pomiarowych prezentowane rozwiązania, zapewne wymagające poprawy przed ewentualnymi wdrożeniami, stanowią wartościowy obszar badawczy.

Niewątpliwie Doktorant potwierdził tezę doktoratu, co do możliwości estymowania parametrów kinematycznych w układach brył obszarów bez układów pomiarowych na podstawie danych z połączonych z nimi brył wyposażonych w sensory IMU. Wskazanie metody podnoszenia dokładności pozyskiwanych z sensorów IMU parametrów jest także niewątpliwą zaletą pracy.

Moim zdaniem najważniejszymi osiągnięciami Doktoranta są:

- Porównanie skuteczności działania trzech podejść (filtr Kalmana, zmodyfikowany algorytm ICA oraz bazującego na sztucznej sieci neuronowej) do wyznaczania parametrów kinematycznych złożonych układów brył sztywnych
- Oszacowanie skuteczności modeli matematycznych z wykorzystaniem dwóch układów pomocniczych (trójczłonowe wahadło matematyczne oraz robot przemysłowy)
- Porównanie skuteczności zastosowania modyfikacji algorytmu ICA dla pomiarów z wybranego układu rzeczywistego

### 4. Uwagi

Struktura rozprawy jest przemyślana i logiczna. Cała praca jest dość czytelna z małymi wyjątkami dotyczącymi grafów prezentujących rozwiązanie z zastosowaniem elementów sztucznej inteligencji. Dobór źródeł literaturowych prawidłowy i aktualny w obszarach uznanych za istotne przez doktoranta. Analiza literatury posiada jednak pewne braki z zakresu odtwarzania ruchu obiektów na podstawie pomiarów. Trzy tematyczne obszary przeglądu literatury przedstawione przez mgr inż. Bartłomieja Nalepę dobrze opisują wymagane elementy i w odpowiednim zakresie. Należy jednak podkreślić, że prezentacje graficzne, zarówno te wspomagające materiał merytoryczny, jak również prezentacje wyników badań należałoby w części poprawić lub uzupełnić. Nieścisłości bądź niedomówienia natury merytorycznej lub edycyjnej wymienione poniżej poddaję pod rozważenie Autorowi rozprawy w celu poprawy pracy lub odpowiedzi na recenzję.

#### 4.1 Uwagi dotyczące pracy

- Uwaga dotycząca celu pracy: który cel jest właściwy dla pracy – ten zdefiniowany na stronie 7 dotyczący ruchu człowieka, czy ten zdefiniowany we wnioskach. W rozdziale dotyczącym celu pracy brak bezpośredniego nawiązania autora wiążącego układy pomocnicze z modelem kinematycznym człowieka. Układy pomocnicze użyto, cytuję ”w celu oszacowania skuteczności modeli matematycznych”. Przyjmując wprost słowa napisane przez doktoranta można dojść do wniosku, że cel dotyczący trajektorii ruchu człowieka nie został zrealizowany – co jest sprzeczne z wnioskami doktoranta.
- Na stronie 8 pracy autor wspomina o tezach rozprawy, a na stronie 9 definiuje jedną tezę dotyczącą określonego problemu badawczego (dodatkowo wymieniony jako samodzielny podpunkt a).
- Co oznacza „podniesienie dokładności wyznaczenia parametrów kinematycznych brył z sensorami IMU względem tych pochodzących z odczytu IMU” ? – uwaga dotyczy zarówno wymienionych zadań badawczych w podrozdziale 1.4 na stronie 8 jak i w tezie pracy na stronie 9
- Doktorant w wielu miejscach nadużywa stwierdzeń zamkniętych i kategorycznych. Przykładowo na stronie 9 twierdzi, że wymienione przez niego problemy badawcze przekraczają zakres jednej rozprawy. Problemy badawcze nazwane są też tezami rozprawy, co jest dość dużym nadużyciem, tym bardziej, że autor następnie ogranicza się tylko do jednego z nich.
- Pierwszym zdaniem przeglądu literatury jest stwierdzenie, że jest brak artykułów dotyczących odtwarzania ruchu obiektów na podstawie niepełnej informacji pomiarowej. Jest to według mnie spore nadużycie. Każdy pomiar obiektu w ruchu jest niepełny, a stwierdzenie dotyczy ogromu prac związanych z badaniami np. z inżynierii mechanicznej, inżynierii biomedycznej czy face lub motion capture.
- W podsumowaniu przeglądu literatury pada stwierdzenie, że wątek analizy rozmieszczenia sensorów na ciele pod kątem dokładności wyników nie był w literaturze poruszany z czym się nie zgodzę.
- Doktorant prezentuje dane kategorii nierozdzielne na wykresach kołowych kategorii rozdzielnych (rys. 1.2 sumuje się do 180%)
- Autor pracy używa tensorów pisanych z wielkiej litery. Tensor jako uogólnienie pojęcia wektora nie występuje w języku polskim pisany z wielkiej litery.
- W pracy nie wszystkie symbole z prezentowanych wzorów czy rysunków (np. Rys 2.1, Rys. 2.2, 2.3, 2.4,2.5, 2.8) zostały opisane. Praca mogłaby zawierać spis symboli i ich jednostki.
- Na stronie 29 zostało wykorzystane pojęcie „przegub zawiasowy” – proszę o komentarz
- Część najistotniejszych wyników jest zaczerpnięte z dwóch prac wieloautorskich. Jaki jest wkład autorski doktoranta w tych badaniach w kontekście samodzielności rozwiązania problemu badawczego?
- W części rysunków prezentujących wyniki można stwierdzi błędy w ich czytelności - brak legend, nachodzące się linie, brak konsekwencji w opisie osi odciętych.

- Jaki jest sens prezentacji stosowania algorytmu DTW dla pokrywających się linii (rysunki 4.15 – 4.16)?
- Analiza wyników przeprowadzona jest tylko w formie ilościowej a nie jakościowej. Porównanie wartości błędów metod powinno być wykonane także jakościowo. Dotyczy to zwłaszcza wniosków końcowych.
- Rozdział dotyczący zastosowania sieci neuronowych zawiera wiele niedomówień i nadmiernych uproszczeń:
  - Tytuł rozdziału nie został poprawnie skonstruowany
  - Jest mocno zauważalny brak określenia sposobu budowania zbiorów uczącego, testowego oraz walidacyjnego.
  - Sieć neuronowa budowana jest jako alternatywa modelu matematyczny. Określenie właściwej struktury sieci oraz struktury danych zbiorów powinno być podstawowym elementem pracy.
  - W doktoracie brak analizy architektury sztucznej sieci neuronowej – brak argumentacji dotyczącej wyboru tylko jednej warstwy ukrytej oraz liczebność neuronów w warstwie ukrytej. Dlaczego została ona dobrana na poziomie 50, 500 i 5000 neuronów ?
  - Na rysunkach prezentujących wyniki (strona 93) nie widać aby zastosowanie większej liczby neuronów skutkowało zwiększeniem dokładności – model nie zbiega się wraz ze zwiększeniem ilości połączeń.
  - Brak danych dotyczących liczby epok oraz błędów procesu uczenia nie pozwala na wyciąganie wniosków dotyczących działania tej sieci. Nie można wskazać, że sieć się przeuczyła i tylko powtarza wzorce.
  - Sposób opisu operacji realizowanych przez oprogramowanie z wykorzystaniem TensorFlow (graf 5.10) mocno utrudnia przeprowadzenie analizy poprawności proponowanych rozwiązań. Symbole oraz skróty zaprezentowane na grafach powinny być opisane a graf powinien być pomocny przy rozbudowanym opisie słownym algorytmu. Praca powinna być uzupełniona o taki element.. Wnioski dotyczące błędów estymacji wartości przyspieszenia nie są poparte analizą. Autor nie przeanalizował jakości otrzymanych wyników w kontekście różnych rozwiązań architektury sieci neuronowych, różnych algorytmów uczenia lub reprezentacji danych wejściowych lub wyjściowych.
  - Poza błędami w obszarze merytorycznym zauważalne są także błędy w nazewnictwie. Autor nadużywa pojęcia głębokiego uczenia w stosunku do proponowanego rozwiązania.
  - Na podstawie wyników (5.20) można zauważyć, że w zakresie modelu można by wiele poprawić. Analizując opis można stwierdzić, że autor pracy nie wykonał pogłębionej analizy porównawczej możliwych modeli opartych na elementach sztucznej inteligencji co mogłoby skutkować znacznym polepszeniem dokładności modelu.

Podsumowując, w pracy sprawdzono trzy podejścia na poprawnym poziomie otrzymując ciekawe wyniki, natomiast opis części związanej z sztucznymi sieciami neuronowymi nie można zaliczyć do udanych – powinien być uzupełniony .

- W podsumowaniu autor pisze o zmianie układu badawczego. Jak wyglądała analiza wskazująca konieczność zmiany układu badawczego?

## 5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Nalepy stanowi wartościowy wkład naukowy dotyczący wyznaczania parametrów kinematycznych połączonych przegubowo brył sztywnych przy ograniczonej informacji pomiarowej. Ma ona znaczenie z punktu widzenia poznawczego jak również utylitarne. Doktorant musiał przy tym wykazać się wiedzą z zakresu inżynierii materiałowej, sztucznej inteligencji, metod numerycznych oraz opanować wybrane języki programowania. Mgr inż. Bartłomiej Nalepa zaprezentował w rozprawie ogólną wiedzę teoretyczną z zakresu dyscypliny wiodącej na odpowiednim poziomie. Przedmiotem rozprawy jest zapewne oryginalne rozwiązanie problemu. Jednak problem ten nie został wpisany w dysertację jako cel pracy, co powinno być wyjaśnione przez doktoranta. Uzupełnienia lub odpowiedniego komentarza wymaga także część rozdziałów zgodnie z przedstawionymi powyżej uwagami. Ze względu na zapisy ustawowe dotyczące umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, wykorzystanie w istotnej części pracy wyników z wieloautorskich prac, których współautorem był także doktorant, powinno zostać opatrzone komentarzem dotyczącym jego udziału.

Uważam, że przedstawiona do opinii rozprawa doktorska, mimo przedstawionych uwag, spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Adam Kulawik