

Bieruń, 8.12.2023 r.

**prof. dr hab. n. med. Krzysztof Ficek**  
Katedra Fizjoterapii w Dysfunkcjach Narządu  
Ruchu i Medycyny Sportowej  
Wydział Fizjoterapii  
Akademia Wychowania Fizycznego  
im. Jerzego Kukuczki w Katowicach

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr. inż. Michała Pielki**

**pt. „Nowatorska metoda optymalizacji transmisji danych dla ubieralnych systemów akwizycji ruchu”**

#### **Podstawa prawna sporządzenia recenzji**

Podstawą wydania opinii jest pismo Dyrektora Instytutu Inżynierii Biomedycznej Wydziału Nauk Ścisłych i Technicznych Pana dr. hab. Sebastiana Stacha, prof. UŚ z dnia 22 września 2023 r. (ENST/BEOI.411.3.2023) w sprawie powierzenia mi funkcji recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Michała Pielki. Postępowanie doktorskie prowadzone jest wg ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r., poz. 478).

#### **Znaczenie poznawcze badań**

Wraz z rozwojem medycyny i wykorzystywanych w niej systemów akwizycji danych zauważa się konieczność racjonalnego zarządzania pozyskanymi informacjami. Nieustanne udoskonalanie systemów poprzez implementowanie coraz bardziej skomplikowanych algorytmów i pozyskiwanie jeszcze większej ilości danych może okazać się bezcelowe, a uzyskane dane trudne do analizy. Proces optymalizacji wykorzystywanych systemów powinien obejmować kompleksowo wszystkie istotne zagadnienia związane z akwizycją danych. Nie można przy tym pomijać aspektów technicznych, ponieważ to od nich zależy

jakość informacji, które pozyskiwane są z prowadzonych badań. Zdaniem Doktoranta, w procesie optymalizacji ubieralnych systemów do akwizycji ruchu, obejmującym problemy techniczne, należy skupić się na obniżeniu poboru energii oraz zmniejszeniu obciążenia sieci teletransmisyjnej. Zauważone przez Autora problemy techniczne stały się podstawą do sformułowania celu rozprawy, którego realizacja wymagała opracowania i wytworzenia autorskiej bazy sprzętowej, w której następnie zaimplementowano i zweryfikowano algorytm sterujący.

### **Formalna ocena pracy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana Michała Pielki jest zgodna z klasycznym wzorem obejmującym: 1) wstęp, sformułowany jako cel, struktura oraz tezy rozprawy (rozdział 1); 2) przegląd literatury naukowej i stanu techniki, stanowiący teoretyczną podbudowę rozprawy (rozdziały 2-4) oraz 3) część badawczą wraz z omówieniem wyników i wnioskami (rozdziały 5-8). Praca łącznie liczy 150 stron, przy czym jej zasadnicza część zredagowana została na 111 stronach. Dodatkowo w pracy znalazły się: dodatek A, bibliografia, spis rysunków, spis tabel, definicje i słownik skrótów oraz słownik symboli. Zaproponowany przez Autora układ pracy jest przejrzysty i czytelny. Rysunki zamieszczone w rozprawie zostały ponumerowane w obrębie poszczególnych rozdziałów. Natomiast wzory oraz tabele ponumerowano w sposób ciągły w obrębie całej pracy.

### **Ocena poszczególnych rozdziałów pracy**

#### Cel, struktura oraz tezy rozprawy

Pierwszy rozdział pracy zawiera krótkie wprowadzenie do problematyki podjętej przez Autora w rozprawie doktorskiej. Dynamiczny rozwój systemów wykorzystywanych w medycynie do diagnostyki, monitorowania pacjentów oraz wspomagania procesu rehabilitacji wymusza konieczność przetwarzania coraz większych ilości informacji. Związane jest to z potrzebą optymalizacji stosowanych rozwiązań m. in. w zakresie sposobu transmisji danych oraz zasilania bateryjnego systemu. Stawiane wymagania stały się podstawą do zdefiniowania celu rozprawy jakim jest opracowanie algorytmu teletransmisyjnego, który pozwala zarówno ograniczyć zapotrzebowanie energetyczne sensora radiowego oraz zoptymalizować jego parametry teletransmisyjne. Realizacja celu wymagała od Doktoranta

opracowania i wytworzenia autorskiej bazy sprzętowej, w której następnie zaimplementowano i zweryfikowano algorytm sterujący.

W pierwszym rozdziale omówiono także strukturę pracy poprzez krótki opis treści prezentowanych w kolejnych rozdziałach. W podrozdziale *Tezy rozprawy* Autor przedstawił jedną tezę główną oraz dwie tezy szczegółowe. Sformułowane tezy uszczegóławiają tytuł pracy oraz są z nim spójne. Doktorant podkreśla znaczenie potwierdzenia słuszności postawionych tez oraz wskazuje na praktyczne zastosowanie uzyskanych w badaniach wyników w dziedzinie inżynierii biomedycznej.

### Technologie sprzętowe w interfejsach analizy ruchu

Rozdział podzielony został na 4 podrozdziały, zawierające przegląd dostępnych rozwiązań z zakresu interfejsów analizy ruchu:

1. Stan wiedzy z zakresu interfejsów analizy ruchu i ich zastosowań w inżynierii biomedycznej.
2. Sensory inteligentne.
3. Architektura zredukowana.
4. Sensory MEMS.

W rozdziale omówiono technologie i architekturę sprzętową, którą wykorzystano w przeprowadzonych badaniach. Opisane zostały również najistotniejsze komponenty elektroniczne pod kątem prowadzonych badań nad systemem Motion Capture (MoCap) z zaimplementowanym adaptacyjnym algorytmem sterowania transmisją radiową. Doktorant w przystępny sposób omówił walory poszczególnych rozwiązań, wskazując również na ich słabe strony. Autor zwraca uwagę na praktyczne zastosowanie omawianych rozwiązań. Rozdział opatrzony jest wieloma rysunkami przedstawiającymi schematy budowy poszczególnych komponentów oraz wzorami opisującymi istotne zależności.

### Zastosowane technologie i protokoły komunikacyjne

W rozdziale opisano wybrane standardy transmisji radiowej, zaimplementowane w wytypowanych do celów badawczych układach: ESP8266 i ESP32. Rozdział zawiera, podobnie jak poprzedni, rysunki obrazujące schematy budowy i struktury, niezbędne wzory oraz tabele. W podrozdziale *Algorytmy kontroli transmisji radiowej i próbkowania* Doktorant zwraca uwagę na konieczność ograniczenia transmisji radiowej, co przekłada się także na ograniczenie poboru energii. Jest to szczególnie ważne w przypadku systemów medycznych, bazujących na bezprzewodowej transmisji danych m. in. ze względu na wzajemne zakłócanie się powodujące spadek wydajności i niezawodności transmisji. Przykładowe metody

optymalizacji transmisji radiowej oraz ich rezultaty dla sieci WBAN i inteligentnych sensorów noszonych zostały przedstawione przez Autora w czytelny sposób w tabeli nr 3.

#### Metody wyznaczania i reprezentacji rotacji w przestrzeni

Autor w dwóch podrozdziałach zaprezentował zagadnienia związane z rotacją oraz metodami jej wyznaczania w przestrzeni na podstawie wyników pomiarów prędkości kątowych, przyspieszenia i indukcji pola magnetycznego. W pracy wskazano, że w prowadzonych badaniach większe znaczenie ma dobór optymalnej metody kontroli transmisji danych, niż metody wyznaczania orientacji w aspekcie rozwiązań wbudowanych, zasilanych bateryjnie. Z tego powodu w części badawczej do kontroli transmisji danych zastosowano filtr komplementarny zaprojektowany przez S. O. H. Madgwicka, którego głównym założeniem jest zmniejszenie obciążenia obliczeniowego i ilości parametrów konfiguracyjnych poprzez wprowadzenie pojedynczego współczynnika konfiguracyjnego działanie filtra. Innowacją jest także optymalizacja pod kątem zastosowania w systemach z niską częstotliwością próbkowania sensorów, a także kompensacja zniekształceń magnetycznych i dryftu żyroskopu.

Podsumowując tę część pracy stwierdzam, że przedstawione teoretyczne omówienie problemu badawczego jest wnikliwe. Piśmiennictwo, na które powołuje się Doktorant jest aktualne i prawidłowo dobrane. Autor oceniając prezentowane systemy i algorytmy uzasadnił wybór zaproponowanego nowatorskiego algorytmu adaptacyjnej transmisji danych. Podkreślił, że w przypadku systemów medycznych, monitorujących stan zdrowia pacjenta, kluczowe jest ograniczenie poboru energii możliwe do uzyskania poprzez optymalizację metody transmisji danych.

W kolejnych rozdziałach zaprezentowano wyniki zrealizowanych prac badawczych, które skupione były na weryfikacji parametrów opracowanej bazy sprzętowej systemu rehabilitacyjnego do monitorowania ruchów ciała oraz badaniach efektywności energetycznej i obciążenia sieci sensorowej zaimplementowanego nowatorskiego algorytmu adaptacyjnego w systemach do akwizycji ruchu ciała.

#### System rehabilitacyjny do monitorowania ruchów tułowia

W pierwszej kolejności przedstawiona została przez Doktoranta praktyczna implementacja systemu rehabilitacyjnego do monitorowania ruchów tułowia, wykorzystująca

pojedynczy inteligentny sensor inercyjny IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*) zrealizowany z zastosowaniem architektury zredukowanej. Weryfikacja metrologicznych i teletransmisyjnych parametrów opracowanej architektury pomiarowej z wykorzystaniem optoelektronicznego systemu referencyjnego MoCap - Innovision (Innovision Systems, Inc.) MAX100, z sześcioma kamerami została przeprowadzona w środowisku gry komputerowej, która polegała na odchyleniach tułowia na boki w taki sposób, aby awatar gracza (pluszowy miś), poruszający się ze stałą prędkością wzdłuż osi  $X_E$ , mógł właściwie pokonać pojawiającą się przeszkodę. W przypadku kolizji awatara z przeszkodą, na skutek nieprawidłowego kąta rotacji, gra zatrzymuje się. Przeszkody ustawione są w trzech wariantach: obrócone w lewo, poziomo oraz obrócone w prawo. Gracz omijając przeszkody kontroluje rotację awatara realizowaną wokół osi strzałkowej  $X_E$ . Wynikiem pomiarów i obliczeń zmian położenia, prowadzonych przez sensor inteligentny umieszczony na plecach gracza, były dane w postaci kwaternionu  $q$ . Celem zapewnienia płynności ruchu modelu w środowisku rozszerzonym każdy kwaternion wysyłany jest w osobnej ramce transmisyjnej przy transmisji danych z częstotliwością około 66 Hz. Markery optyczne umieszczono na sensorze inteligentnym, co umożliwiło monitorowanie jego zachowania w systemie referencyjnym podczas realizacji wychyleń tułowia. Pomiarów zrealizowano w cyklach, zgodnie z trzema schematami wyświetlania przeszkód w równych interwałach czasowych. W celu porównania obu systemów, dane z systemu optoelektronicznego przeliczono na kwaternion  $q_{opto}$ , reprezentujący rotację sensora inteligentnego.

Zarejestrowane dane za pomocą sensora inteligentnego wykazały wysoką zgodność z systemem referencyjnym MoCap. Największe różnice, wynoszące średnio 0,002, wystąpiły podczas pokonywania przeszkody obróconej o 30 stopni, czyli przy maksymalnym wychyleniu ciała w prawo i lewo. Zgodność pomiędzy pomiarami oceniona została przez Autora za pomocą analizy Blanda-Altmana, która wykazała, że tylko 3% pomiarów wykroczyła poza przedział zgodności. W podsumowaniu rozdziału Doktorant wskazał, że użyte w konstrukcji sensora inteligentnego komponenty ESP8266 oraz MPU6050 są jednymi z najtańszych oraz powszechnie dostępnych. Autor podkreślił również, że niewielkie rozmiary elektroniki sensora umożliwiają jego wykorzystanie jako rozwiązania nasobnego, nieograniczającego ruchów osoby ćwiczącej. Jako praktyczne zastosowanie opracowanego systemu wskazano rehabilitację ruchową, szczególnie u osób z dysfunkcjami układu nerwowego. Natomiast po wykonaniu analizy otrzymanych danych możliwe jest oszacowanie ogólnej sprawności i reakcji osoby badanej na wirtualne przeszkody.

### System do akwizycji ruchu ciała z adaptacyjnym algorytmem kontroli transmisji radiowej

W rozdziale opisano przebadany nowatorski adaptacyjny algorytm kontroli transmisji danych, pozwalający na monitorowanie częstotliwości wysyłania danych ze zintegrowanego sensora, agregację danych w ramach zbiorczych oraz wykorzystanie mechanizmu Modem Sleep. Autor określił kilka kluczowych wymagań stawianych projektowanemu algorytmowi, których realizacja związana była ściśle z udowodnieniem tez rozprawy doktorskiej, prowadząc do redukcji zużycia energii wydatkowanej na proces transmisji danych oraz zmniejszenia obciążenia sieci poprzez zmniejszenie ilości przesyłanych danych. Zaprezentowany w tym rozdziale interfejs o zintegrowanej strukturze stanowi rozwinięcie interfejsu opisanego w poprzednim rozdziale, ponadto pracuje w standardzie WiFi i paśmie 2,4 GHz. Redukcja poboru energii oraz wymiarów pojedynczego sensora inteligentnego została osiągnięta poprzez wykorzystanie mikrokontrolera zaimplementowanego w module radiowym do przetwarzania danych. Dzięki temu sensor może służyć do pracy w systemach czasu rzeczywistego, przeznaczonych dla dzieci np. do rehabilitacji lub diagnostyki. Uzyskane wymiary sensora inteligentnego 26x16 mm czynią go obecnie jednym z najmniejszych modułów MoCap z interfejsem WiFi. Zastosowany adaptacyjny algorytm umożliwia bezstratną transmisję danych i ograniczenie energii wydatkowanej na interfejs radiowy, a także próbkowanie zmienności trajektorii z wysoką częstotliwością w zależności od aktywności ruchowej sensora, która reguluje częstotliwość wysyłania ramek oraz ich rozmiar. Zaprezentowany przez Doktoranta algorytm nie powoduje utraty jakości monitorowania ruchu i nie ogranicza płynności odtwarzania obrazu w czasie rzeczywistym. W badanym systemie wykorzystano moduł ESP07 oraz zintegrowany sensor LSM9DS1, które są tanie i powszechnie dostępne, co zagwarantowało uproszczenie konstrukcji modułu. Znaczne skrócenie czasu transmisji danych pomiędzy zintegrowanym sensorem a mikrokontrolerem uzyskano stosując magistralę SPI. Funkcjonowanie mechanizmu Modem Sleep oraz zmniejszenie częstotliwości wysyłania ramek pozwala na oszczędność energii nawet do 64%, przy zachowaniu dużej precyzji pomiarowej co jest szczególnie istotne w zastosowaniu systemu zarówno w diagnostyce oraz procesie rehabilitacji. Monitorowanie dynamicznych ruchów wymusza dostosowanie częstotliwości odświeżania położenia do wymagań użytkownika, zapewniając płynność odwzorowania w czasie rzeczywistym, kosztem zwiększenia poboru energii.

### System do akwizycji ruchu dłoni z adaptacyjnym algorytmem kontroli transmisji radiowej

Uwagę recenzenta zwróciło użycie niewłaściwej nomenklatury w tytule rozdziału, odnoszącej się do dłoni. W języku potocznym ręka, obejmująca nadgarstek, śródrezcze i palce

błędnie nazywana jest dłonią, natomiast termin ręka używany jest do określania całej kończyny górnej. Tym bardziej, że sensory umieszczone są na grzbietowej powierzchni ręki. Dłoń to jedynie wewnętrzna część ręki. Dla czytelności recenzji w dalszej jej części stosowana będzie nomenklatura przyjęta przez Doktoranta. Uwaga nomenklaturowa dotyczy również słowa gest, który jest ruchem dowolnym świadomym lub nieświadomym, mającym określone znaczenie. Na użytek dokonywanych badań lepszym określeniem byłoby zastąpieniem go ruchem zamiarowym.

Ostatni system, opisany przez Doktoranta, ma zastosowanie w akwizycji ruchu dłoni i wymaga wykorzystania wielu miniaturowych, zintegrowanych sensorów, które podłączone są do jednego wspólnego modułu radiowego WiFi, monitorując położenie paliczków i dłoni. Autor wskazał możliwe zastosowanie systemu w celach diagnostycznych i rehabilitacyjnych do monitorowania zarówno kontrolowanych ruchów dłoni oraz drżenia, mogącego być objawem choroby Parkinsona lub innych chorób neurodegeneracyjnych. W pracy zapewniono o możliwości standardowego manipulowania dłonią z zamontowanym systemem do akwizycji ruchu, nazwanym „sensorową rękawicą”, zarówno w celach diagnostycznych oraz rehabilitacyjnych. System umożliwia zapis i analizę ruchów patologicznych oraz tych specyficznych, zleconych przez specjalistę podczas testów diagnostycznych, wykonywanych m. in. u muzyków, dla których charakterystyczna jest podwyższona sprawność dłoni. Opisane szczegółowo sterowanie transmisją danych pozwala na zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego modułu radiowego oraz istotnie zmniejsza obciążenie sieci WiFi bez pogorszenia jakości odwzorowania monitorowanego sygnału, co ma zasadnicze znaczenie w ocenie rozwoju choroby czy postępu prowadzonej rehabilitacji. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem tego systemu wykazały, że redukcja poboru prądu przez układ może osiągnąć nawet prawie 20%, a największe oszczędności uzyskuje się gdy dane z sensorów wysyłane są z częstotliwością równą 5 Hz. Przed przystąpieniem do weryfikacji jakości odwzorowania sygnałów pomiarowych z wykorzystaniem zaproponowanego algorytmu wyznaczono wartości progowe, które są danymi wejściowymi do algorytmu i mają wpływ na częstotliwość transmisji danych, a tym samym efektywne zarządzanie energią wydatkowaną w tym celu. Przeprowadzone analizy statystyczne potwierdziły dobrą jakość odwzorowania monitorowanego sygnału z zastosowaniem adaptacyjnego algorytmu bazującego na średnich wartościach w porównaniu do danych kompletnych. Nowatorski algorytm przetwarzania i transmisji danych umożliwia wydłużenie czasu pracy na akumulatorze oraz zmniejszenie

obciążenia sieci, dopasowując się do zróżnicowanej dynamiki, uwzględniającej fazę spoczynku i fazę ruchu.

### Wnioski

W ostatnim rozdziale Doktorant, na podstawie uzyskanych w części badawczej rezultatów, potwierdza postawioną tezę główną oraz dwie tezy szczegółowe. Wymienia także cykl autorskich prac, na podstawie których zredagowana została w postaci monograficznej część badawcza rozprawy. Poza podsumowaniem przeprowadzonych badań w postaci zaprezentowanych wniosków Autor wskazał również praktyczne zastosowanie adaptacyjnego algorytmu. Aplikacyjny charakter wynalazku polega na poprawie sprawności funkcjonowania poszczególnych odcinków narządu ruchu. Konieczne wydaje się określenie wyjściowego poziomu sprawności badanych osób. Doktorant wykazał się umiejętnością szerokiego spojrzenia na analizowane zagadnienia zwracając uwagę nie tylko na bazę sprzętową oraz jej parametry, ale także na rozmiary elektroniki, które mają wpływ na ruchy osoby ćwiczącej. Takie podejście powinno być charakterystyczne dla wszystkich naukowców, zwłaszcza tych zajmujących się zagadnieniami z zakresu inżynierii biomedycznej, która jest kluczową dziedziną w perspektywie postępu medycyny. Autor w ostatnim akapicie wskazuje na możliwość rozwoju zaprezentowanej tematyki rozprawy doktorskiej podkreślając uniwersalność stworzonego algorytmu.

Podsumowując recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Michała Pielki stwierdzam, że praca spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 17889 ze zm.) oraz w art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1669 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Biomedycznej Wydziału Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach o dopuszczenie mgr. inż. Michała Pielki do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz o wyróżnienie pracy doktorskiej.