

prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej

Poznań, 15 październik 2021 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA i ELEKTROTECHNIKA,
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Tytuł rozprawy: **Analiza biosygnarów dla sterowania decyzyjnego protezą
dłoni**

Autor rozprawy: **mgr inż. Michał Błędowski**

1. Obszar problemowy rozprawy

Rozprawa jest poświęcona zagadnieniom sterowania bioprotezą dłoni ręki ludzkiej, przeznaczoną do kompensowania utraty jej funkcji w wyniku amputacji na poziomie przedramienia. Chodzi w niej o zbadanie możliwości oparcia warstwy decyzyjnej algorytmu sterowania konfiguracją palców sztucznej ręki na rozpoznaniu sygnałów generowanych przez mięśnie przedramienia. Z punktu widzenia automatyki jest to problem sterowania złożonym obiektem w otwartym układzie sterowania.

Decyzja oznaczająca rozkaz nadania określonej konfiguracji palców protezy jest podejmowana na podstawie analizy biosygnarów generowanych przez układ mięśni przedramienia. Autor, korzystając z opracowanych wcześniej taksonomii, wytypował 11 konfiguracji (klas) reprezentujących typowe chwytów występujące w praktyce życia codziennego.

Istotną charakterystyką zaproponowanego rozwiązania problemu jest założenie o nieinwazyjnej metodzie akwizycji biosygnatów. W praktyce klinicznej i w badaniach podstawowych najczęściej są stosowane dwie nieinwazyjne metody rejestracji aktywności mięśni: elektromiograficzna (EMG) oraz mechanomiograficzna (MMG). Metody te osiągnęły obecnie stosunkowo wysoki poziom dojrzałości technicznej. Uwaga ta odnosi się do elektrod powierzchniowych pasywnych i aktywnych, miniaturowych mikrofonów kontaktowych, wieloosiowych akcelerometrów, wzmacniaczy instrumentalnych, filtrów cyfrowych, wielokanałowych niskoszumowych rejestratorów biosygnatów oraz wielosensorowych opasek pomiarowych.

Założenie nieinwazyjnej akwizycji sygnałów istotnie podnosi poziom trudności zagadnienia badawczego z uwagi na istotne osłabienie poziomu mierzonych sygnałów użytecznych w stosunku do szumów pomiarowych, a także ze względu na trudności w precyzyjnym lokalizowaniu elektrod/mikrofonów pomiarowych względem układu mięśniowego, którego budowa i rozkład są indywidualnymi cechami pacjenta. Literatura naukowa raportuje znacznie lepsze w stosunku do metod bezinwazyjnych (*transcutaneous*) rezultaty określania stanu układu mięśniowego, wyrażającego intencję określonego ruchu, a nawet umożliwiającego jego parametryzację, przy zastosowaniu elektrod wszczepianych podskórnice i lokalizowanych nad brzuściami wybranych mięśni. Tego typu rozwiązania można stosować w badaniach klinicznych, natomiast w praktyce życia codziennego osoby zaopatrzonej w tego rodzaju układ takie rozwiązanie powoduje szereg kłopotów (problemy z codzienną toaletą, prawdopodobne stany zapalne i zakażenia, problemy złączeniem systemu elektrod wkłuwanych z protezą).

Autor rozprawy przeprowadził badania wyłącznie na zarejestrowanych powierzchniowo sygnałach EMG. Decyzje o wyborze wariantu ruchu palców (klasy ruchu) są podejmowane na podstawie wartości wektora wybranych, prostych cech, obliczanych na bieżąco, na podstawie krótkich przedziałów czasowych rejestrowanego sygnału EMG (wielokrotności przedziału o długości 100ms). Wybór

takiego horyzontu obserwacji jest podyktowany wynikami badań nad optymalnym czasem opóźnienia realizacji ruchu protezy w stosunku do momentu wygenerowania intencji ruchu, przy którym użytkownik protezy nie odczuwa dyskomfortu, wynoszącym 100-125 ms (takie opóźnienie oceniane jest jako naturalne).

Intencja ruchu (ujawnienie wyboru klasy – konfiguracji palców i dłoni) jest rozpoznawana na podstawie przyporządkowania, obliczonego wektora cech do określonego klastra w przestrzeni cech, w wyniku określonej procedury klasyfikującej.

Badanie efektywności wyżej określonej procedury klasyfikacyjnej stanowi zasadniczy trzon rozprawy. Teza rozprawy została sformułowana w następujący sposób:

„ W procesie klasyfikacji biosygnalów zastosowanie podejścia rozpoznawania wieloetapowego pozwala na przyspieszenie rozpoczęcia procesu klasyfikacji oraz zwiększenie efektywności robotycznej protezy poprzez przyspieszenie jej reakcji. Poziom dokładności zmienia się w zależności od tego jak szybko rozpoczynany jest proces rozpoznawania. ”.

Powyższa teza wymaga doprecyzowania z uwagi na użycie terminu „rozpoznanie wieloetapowe” oraz „efektywność robotyczna”. Pierwszy termin jest nieco niezręczny, gdyż zaproponowany w rozprawie schemat decyzyjny wypadaloby raczej określić jako *rozpoznanie stopniowe*, a *efektywność robotyczna* jest terminem zbyt szerokim, gdyż tymczasem chodzi jedynie o skrócenie czasu reakcji komponentu decyzyjnego systemu sterowania, bez odniesienia do charakterystyk opisujących układ wykonawczy (część robotyczną). Mimo, że teza odnosi się do konkretnego kontekstu, to jednak ma ona charakter ogólniejszy – dotyczy zagadnienia szerszego – tzw. dynamicznej klasyfikacji w czasie rzeczywistym, w warunkach dynamicznego napływu danych stanowiących jej podstawę.

Przy tak sformułowanej tezie jej weryfikacja może nastąpić w wyniku eksperymentu obliczeniowego przeprowadzonego na zbiorze wiarygodnych danych testowych (zapisów sygnałów EMG dokonanych eksperymentalnie w ściśle

określonych warunkach). Wnioski z badań silnie zależą od jakości i reprezentatywności użytych danych.

2. Ocena merytoryczna rozprawy.

Autor pracował na materiale (8-kanalowych zapisach sygnałów EMG) zawartym w bazie danych, której był współtwórcą. Z tekstu rozprawy można wywnioskować, że zgromadzone tam zapisy powstały w wyniku 200 powtórzeń każdego określonego (kontrolowanego) ruchu mięśni przedramienia ręki, przy unieruchomionym przedramieniu i przy stałej konfiguracji elektrod na przedramieniu osoby badanej.

W jakim czasie dokonano rejestracji serii pomiarów? Czy była to ciągle ta sama osoba? Jeżeli tak, to materiał nie uwzględnia wpływu na sygnały cech osobniczych takich jak typ skóry (sucha/tłusta/potliwa, itp.), grubość tkanki tłuszczowej, stopień wytrenowania mięśni. W protokole eksperymentu brakuje także istotnych informacji szczegółowych rzutujących na jakość danych (temperatury otoczenia, długości pauz pomiędzy kolejnymi powtórzeniami ruchu danego typu - co rzutuje na proces rekrutacji mięśni i efekt zmęczenia oraz poziomu wytrenowania mięści). Informacje te są istotne dla oceny stopnia reprezentatywności danych, w oparciu o które weryfikowano tezę rozprawy. Najistotniejszym mankamentem metody zbierania danych jest jednak to, że zapisy sygnałów pochodzą z kończyny nieamputowanej. Tym samym oparte na ich analizie wnioski mogą być nietrafne w zależności od wysokości przeprowadzonej amputacji.

Autor rozprawy przedstawił standardowe definicje prostych cech temporalnych, uzasadniając ich wybór ostrymi uwarunkowania czasowymi w procesie ich ekstrakcji. Zastanawia mnie jednak umieszczenie jako oddzielnych współrzędnych wektora cech takich charakterystyk jak chwilowa wariancja i odchylenie standardowe, które są wzajemnie zależne, podobnie jak RMS i chwilowa energia sygnału. Zastanawia mnie jak Autor rozumie cechę określaną przez siebie jako krótko czasowa transformata Fouriera? Przecież jest to cały spektrogram, dodatkowo

parametryzowany przez czas dokonanej rejestracji fragmentu sygnału, a więc nie jest to pojedyncza cecha liczbowa jak wcześniej wytypowane cechy temporalne. Na marginesie, budzi zdziwienie nie odniesienie się do nasuwających się w tym miejscu transformacji falkowych, a także brak odniesień w bibliografii do wyników badań nad wykorzystaniem falek do ekstrakcji cech, prowadzonych w ośrodku krajowym, zakończonych doktoratem w 2011 r.

Uwagi na temat selekcji cech zawarte w rozdziale 3 są zdaniem recenzenta zbyt powierzchowne i w małym stopniu odnoszą się do selekcji przeprowadzonej w rozdziale 4.

Autor zbadał na tym samym zbiorze danych trzy podejścia do klasyfikacji danych: klasyfikator k-NN, maszynę wektorów nośnych (SVM) oraz naiwny klasyfikator bayesowski.

Najistotniejsze dla wykazania tezy jest zdefiniowanie procesu klasyfikacji wieloetapowej (punkt 3.2). Istota tego podejścia sprowadza się do powtarzania sekwencji: ekstrakcja, selekcja, klasyfikacja w odniesieniu do napływających na bieżąco próbek sygnałów, przy podziale ich na serie odpowiadające odcinkom o długości 100 ms. Każdy kolejny etap oznacza wykonanie łącznej klasyfikacji na danych kumulowanych stopniowo w kolejnych odcinkach, z dokładnością do grup klas. W rezultacie generowane jest binarne drzewo decyzyjne, którego liśćmi są definitywne, pojedyncze klasy, odpowiadające decyzjom o określonej konfiguracji. Tak zorganizowane przetwarzanie danych służyć ma przyspieszeniu decyzji. Istotną informacją jest to, że w zaproponowanej procedurze wieloetapowej na każdym etapie pominięto selekcję cech argumentując, że niepotrzebnie wydłużałaby obliczenia. Jest to argument słuszny, gdyż wymiarowość użytego w procedurze klasyfikacji wektora cech jest stosunkowo niska.

Najistotniejszą częścią rozprawy jest rozdział 4 poświęcony eksperymentalnej weryfikacji tezy. Przedstawiono w nim użyte systemy elektrod oraz sposób ich rozmieszczenia na przedramieniu celem rejestracji biosygnali stanowiących materiał badawczy. Brakuje w tym miejscu odniesienia się do charakterystyki

anatomicznej i fizjologicznej badanej osoby (badanych osób?). Podkreślić należy, że rejestracje przeprowadzono na sprawnej ręce. Kontrolowano wizualnie prawidłowość konfiguracji palców i dłoni i w ten sposób decydowano o umieszczeniu odpowiadających im, zarejestrowanych w trakcie ruchu, sygnałów w ich bazie. Zbadanie efektywności koncepcji klasyfikacji wieloetapowej, określonego wyboru cech oraz klasyfikatora na tych samych danych jest metodologicznie poprawne, aczkolwiek nie wyczerpuje sytuacji, które należy uwzględnić w rozwiązaniu docelowym.

Istotnymi wynikami są wzajemne porównania efektywności trzech zbadanych podejść klasyfikacyjnych, z których wynika, że najlepsze wyniki uzyskano stosując klasyfikator k-NN. Również cenne jest określenie wartości parametru k, zapewniającej najwyższą dokładność rozpoznawania. Wskazano także cechy o największym potencjale dyscernabilnym pośród wstępnie wybranych cech.

Przedstawiono szczegółowo wyniki opracowania binarnego drzewa decyzji dwiema metodami: metodą przeglądu zupełnego oraz metodą odwołującą się do statystyk odległości pomiędzy klasami. Jako próg trafności przyjęto wysoką wartość 90%.

Wyniki eksperymentu obliczeniowego, przeprowadzonego na rzeczywistych danych elektromiograficznych, potwierdzają tezę rozprawy.

Oczywiście, w dalszych badaniach, należałoby zweryfikować te wyniki na kończynie amputowanej, a także uwzględnić pozostałe czynniki zmienne, które występują w warunkach praktycznej eksploatacji protezy.

3. Uwagi szczegółowe.

- Str. 32 w.7d = brakuje kluczowego słowa „niezależne”.
- Nie opisano wspomnianych w rozprawie kryteriów i wymagań jakościowych, jakimi kierowano się przy kwalifikowaniu rejestrowanych zapisów sygnałów do bazy (str.49).

- Podkreślić należy wzajemne podobieństwo klas C2 i C3, C5, C6 oraz C9, C10 utrudniające ich rozpoznanie. Co zdecydowało o ich wprowadzeniu do programu badań?
- Zdaniem recenzenta w rozprawie brakuje szczegółowego opisu metodologii kilkakrotnie wspomnianego 5-krotnego testu krzyżowego.
- Na str. 71 w.1g-3g należy usunąć błąd gramatyczny.
- Na str. 82, zdanie odnoszące się do trzeciej iteracji jest zupełnie niejasne.

4. Konkluzja:

Rozprawa ma charakter eksperymentu obliczeniowego nad zbiorem danych empirycznych, opartego o w zasadzie spójne podstawy teoretyczne. Wyniki eksperymentu potwierdzają sformułowaną tezę o możliwości zapoczątkowania klasyfikacji intencji ruchu z dokładnością do grupy klas już na podstawie niepełnego zbioru danych. Jest to koncepcja o interesujących konsekwencjach implementacyjnych. Realizacja programu badań i uczestniczenie Autora w pracach przygotowawczych do eksperymentu potwierdzają (acz z pewnymi uwagami krytycznymi sformułowanymi w recenzji) jego kompetencje naukowe i techniczne. Rozprawa stanowi cenny przyczynek do rozwoju układów sterowania nadrzędnego bioprotez kończyn górnych, gdyż zamyka pewne wątpliwe ścieżki poszukiwań i wykazuje przydatność bardzo prostych cech sygnałowych w procesie rozpoznawania. Wobec powyższego uważam, że opiniowana dysertacja Pana mgr inż. Michała Błędowskiego spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez *Ustawę o stopniach i tytule naukowym*, gdyż przedstawia oryginalną koncepcję rozwiązania istotnego problemu technicznego i jej zaawansowaną (choć wstępną) realizację. Uzyskane wyniki świadczą o dobrym przygotowaniu kandydata do pracy naukowej. Wnioskuje zatem o dopuszczenie p. mgr inż. Michała Błędowskiego do publicznej obrony.


(prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński)