

Sterowanie manipulatorem nasobnym w oparciu o sygnały EMG

Control method of the wearable manipulator based on EMG signals

JAROSŁAW JANKOWSKI
KLAUDIUSZ ZIEMEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.90>

Integracja człowieka z egzoszkieletem – tak, aby poprawnie odzwierciedlał on zamiary użytkownika w zakresie ruchu kończyny górnej – wymaga zastosowania odpowiedniej metody sterowania, zawierającej algorytm wykrywania intencji. W artykule przedstawiono założenia dotyczące budowy egzoszkieletu kończyny górnej, a także proponowaną procedurę badawczą oraz wstępnie opracowane metody sterowania manipulatora wspomagającego, bazujące na analizie charakterystyki sygnału elektromiograficznego (EMG) oraz zastosowaniu sieci neuronowych.

SŁOWA KLUCZOWE: egzoszkielec, metoda sterowania, EMG

Human integration with the exoskeleton, so that it correctly reflects the intentions of the user, requires the use of an appropriate control method containing an intent detection algorithm. The article presents the assumptions concerning the construction of the upper limb exoskeleton, the preliminary research procedure and the pre-developed methods of controlling the assistance manipulator based on the analysis of the electromyographic signal (EMG) characteristics and the use of neural networks.

KEYWORDS: exoskeleton, control method, EMG

We współczesnym świecie bardzo ciężka praca fizyczna została niemal całkowicie wyeliminowana dzięki mechanizacji i automatyzacji wielu dziedzin życia. Istnieją jednak sytuacje, gdy człowiek jest niezastąpiony, jednak siła jego mięśni okazuje się niewystarczająca do realizacji powierzonych mu zadań. Dotyczy to sytuacji awaryjnych, np. wypadków czy katastrof, gdy od ratowników wymaga się użycia sporej siły (potrzebnej np. do przenoszenia rannych), a także takich przypadków, jak pielęgnacja chorych. Szczególną grupę stanowią osoby z niepełnosprawnością, o ograniczonej sile mięśni. W ich przypadku praca zawodowa, a nawet proste czynności życia codziennego są znacznie utrudnione.

We wszystkich tych sytuacjach do wspomaganie człowieka można wykorzystać egzoszkielec, czyli system mechatroniczny mocowany na zewnątrz ciała człowieka, który ma na celu wzmocnienie siły jego mięśni [1]. Wspomagane urządzenia przeznaczone do kończyn górnych dzielą się na protezy i ortezy. Proteza jest sztucznym zamiennikiem brakującej części ciała, natomiast orteza to urządzenie ortopedyczne wykorzystywane do wspierania

i korygowania ruchów kończyn w celu poprawy ich funkcjonalności [2]. Ortezy dzielą się na dwa główne rodzaje:

- urządzenia konstruowane z myślą o wspieraniu efektów użytkownika,
- urządzenia, których poszczególne ruchome złącza są dopasowane do kolejnych stawów kończyny [3].

Pierwszy typ ortez obejmuje rozwiązania wolnostojące, których zasadą działania jest przyłożenie siły do narządu wykonawczego tak, aby wspierać lub utrudniać jego ruch [4]. Ortezy drugiego typu, nazywane wspomaganymi egzoszkieleciami, są urządzeniami nakładanymi na ciało użytkownika. Stawy robota oraz ich połączenia są dobrze dopasowane do stawów i kończyn użytkownika, a osie obrotu stawów robota powinny być ustawione zgodnie z anatomicznymi możliwościami kończyny górnej.

Zrobotyzowane egzoszkielecety są przedmiotem badań w takich dziedzinach, jak: rehabilitacja [5], wzmocnienie siły mięśni człowieka oraz interakcja czuciowa w teleoperacji oraz środowiskach wirtualnych [6]. Zagadnienia rehabilitacji i asysty zrobotyzowanych urządzeń stają się coraz ważniejsze z uwagi na potencjał tej technologii we wspieraniu słabszych fizycznie osób starszych.

Bardzo ważnym elementem egzoszkieletu jest sterowanie jego napędami. Wymagania dotyczące systemów sterowania zrobotyzowanymi egzoszkieleciami różnią się istotnie od wymagań stawianych rozwiązaniom stosowanym w klasycznych robotach przemysłowych. Wynika to z faktu, że człowiek jest nie tylko źródłem poleceń, lecz także częścią systemu, w którym urządzenie realizuje te polecenia. Wyjątkowość sytuacji polega również na ciągłej wymianie informacji pomiędzy użytkownikiem a egzoszkieletem. Tym samym podstawową zasadą konstrukcji systemu sterowania jest zachowanie się elementów zrobotyzowanych zgodnie z intencją ruchową użytkownika. Założenie to ma szczególne znaczenie w przypadku osób słabszych fizycznie. Należy pamiętać, że w każdym systemie egzoszkieletu wspomaganego występują dwa współpracujące ośrodki kontroli: sterowniki robota oraz mózg użytkownika. Wykrywanie intencji ruchu człowieka nadal jest dalekie od doskonałości i stanowi ważny wątek badań podstawowych w rozwoju egzoszkieleców. W zależności od rodzaju informacji systemy tego typu mogą być na wejściu podzielone na dwie kategorie:

- systemy oparte na sygnałach niebiologicznych
- systemy oparte na sygnałach biologicznych.

W rozwiązaniach bazujących na sygnałach niebiologicznych wykorzystuje się joysticki [7], które zazwyczaj sterują egzoszkieletem w sposób precyzyjny, jednak niezbyt

* Dr inż. Jarosław Jankowski (jajan@ciop.pl), mgr Klaudiusz Ziemeck (klazie@ciop.pl) – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

intuicyjny, a także czujniki siły i obrotu, które wychwytyują intencję ruchową użytkownika i wzmacniają ją pracą siłowników. W drugiej kategorii systemów najczęściej wykorzystuje się zaś sygnały elektromiograficzne (EMG) [8, 9]. Podejmuje się również próby interpretacji aktywności kory ruchowej mózgu, jednak ten obszar wymaga dalszych prac rozwojowych. Sygnał zebrany z odpowiednio naklejonych elektrod może zostać zinterpretowany i wykorzystany do sterowania egzoszkieletem. W tym przypadku problemem jest zapewnienie odpowiedniej precyzji ruchów.

Niezależnie od przyjętych rozwiązań detekcja intencji ruchowej jest bardzo skomplikowanym zagadnieniem technicznym, którego rozwiązanie stanowi jedno z największych wyzwań dla dalszego rozwoju egzoszkieleatów wspomaganych.

Możliwość pozyskania i przetworzenia sygnałów EMG (na wybranych mięśniach kończyny górnej) zarejestrowanych w czasie rzeczywistym i w sposób zapewniający osiągnięcie dokładności maksymalnie zbliżonej do tej, jaką można uzyskać za pomocą manualnych urządzeń sterowniczych w sterowaniu egzoszkieletem kończyny górnej, jest głównym zagadnieniem badawczym w ramach projektu realizowanego w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym.

Celem tego projektu jest opracowanie modelu egzoszkieleatu sterowanego specjalnym systemem w oparciu o sygnały informujące o aktywności mięśniowej oraz manualne urządzenia sterownicze.

Metodyka badań i stosowane narzędzia

Opracowywane wspomagające urządzenie nasobne, sterowane dwiema różnymi metodami, zostanie przetestowane i porównane przez pięć osób (mężczyzn), z zastrzeżeniem otrzymania pozytywnej opinii komisji etyki i bioetyki na temat proponowanych testów.

Testy zostaną przeprowadzone z udziałem trzech osób w wieku do 35 lat oraz dwóch osób powyżej 60. roku życia. Przed przystąpieniem do testów osoby te przejdą trening oraz zostanie im przekazana informacja o sposobie użytkowania urządzenia.

Zadania postawione użytkownikom urządzenia będą polegały na precyzyjnym prowadzeniu końcowego efektora w określone miejsce, wskazane i wyświetlone na ekranie z projekcją tylną. Ruch ręki będzie się odbywał z manipulatorem obciążonym odważnikiem o masie 1 kg, 2 kg lub 3 kg oraz bez obciążenia, przez ok. 30 min (z krótkimi przerwami). Dodatkowo ochotnicy będą proszeni o zmniejszenie odległości od ekranu, co pozwoli na pełne wykorzystanie możliwości egzoszkieleatu.

W trakcie badań zostaną zebrane obiektywne informacje dotyczące:

- dokładności prowadzenia efektora,
- popełnionych błędów
- czasu wykonania zadania.

Subiektywna ocena egzoszkieleatu będzie się odnosić do jego użyteczności, komfortu obsługi oraz przydatności. Przed przystąpieniem do badań oraz po ich zakończeniu uczestnicy testów dokonają subiektywnej oceny zmęczenia i nastroju przy użyciu skali Grandjeana.

Natomiast do bezpośredniej oceny opracowanych rozwiązań posłużą następujące ankiety:

- kwestionariusz modelu akceptacji technologii [10],
- skala użyteczności systemu [11],
- autorska ankieta z pytaniami, odnosząca się do subiektywnej oceny komfortu obsługi i użyteczności testowanego rozwiązania.

Założenia dotyczące budowy i użytkowania

Zadaniem egzoszkieleatu będzie wspomaganie użytkownika w zakresie generowanej siły. Podstawową grupą odbiorców będą osoby z deficytem w tym zakresie (osoby starsze, osoby z niepełnosprawnością ruchową). Metodę sterowania opartą na sygnałach EMG będą mogły z powodzeniem wykorzystywać (w zakresie wspomaganie ruchów w stawie łokciowym i – w ograniczonym stopniu – w stawie ramiennym) również osoby w pełni sprawne – zwłaszcza przy zadaniach wymagających zwiększonej siły, co pozwoli zmniejszyć zmęczenie np. podczas długotrwałych i monotonicznych prac montażowych lub magazynowych.

Budowany egzoszkieleat będzie zasilany akumulatorowo, z możliwością wymiany akumulatora bez przerywania pracy. Planuje się zastosować akumulatory o napięciu 24 V. Opracowywany model egzoszkieleatu prawej ręki będzie wspierał jej ruch w płaszczyźnie strzałkowej stawu łokciowego (zginanie i prostowanie przedramienia) oraz ruch w stawie ramiennym (zginanie i prostowanie ramienia). Konstrukcja egzoszkieleatu nie będzie blokowała pozostałych ruchów przedramienia. Egzoszkieleat zostanie wyposażony w dwa serwosilniki wraz z odpowiednimi przekładniami, aby moment wyjściowy pracy stałej był na poziomie ok. 35 Nm w przypadku wspomaganie ramienia oraz co najmniej 10 Nm w przypadku wspomaganie przedramienia (aby udźwig na efektorze wynosił co najmniej 30 N). Egzoszkieleat będzie zawieszony na stelażu noszonym na plecach z pasem biodrowym i zostanie wykonany z materiałów kompozytowych oraz aluminium. Prototypowanie zostanie przeprowadzone z zastosowaniem techniki druku 3D. Zakłada się, że konstrukcja manipulatora zostanie przymocowana do kończyny górnej za pomocą specjalnych opasek umożliwiających łatwe zdjęcie urządzenia. Ponadto manipulator będzie zakończony specjalnym uchwytem dla ręki.

Opracowywane rozwiązanie sprzętowe jest niezbędne do tworzenia i testowania metod sterowania, które w końcowej fazie projektu zostaną porównane na podstawie planowanych testów użytkowych. Specjalny uchwyt dla ręki zostanie również doposażony w joystick. Konstrukcja manipulatora będzie ograniczała minimalne i maksymalne wychylenia jego członów. Zakłada się wspomaganie ruchu w stawie łokciowym w obrębie 120° położenia kąтового przedramienia, licząc od pełnego wyprostu, oraz wspomaganie w stawie ramiennym w płaszczyźnie strzałkowej w obrębie co najmniej 60° położenia kąтового ramienia, licząc od pełnego wyprostu. Dodatkowo zostanie zastosowane urządzenie wyłączenia awaryjnego.

Metoda sterowania manipulatorem wspomagającym, wykorzystująca sygnał EMG

W proponowanej metodzie, która na kolejnym etapie będzie testowana z wykorzystaniem pełnego modelu egzoszkieleatu, są trzy elementy wejściowe: poziom amplitudy sygnału EMG, informacje dotyczące intencji użytkownika, tj. kierunku ruchu poszczególnych członów rozważanej kończyny górnej, oraz informacje o stopniu wspomaganie przez manipulator (o poziomie tego wspomaganie będzie decydował użytkownik).

Na podstawie informacji o kierunku ruchu poszczególnych członów wspomaganie uaktywnia się przez przyłożenie momentu w określonych „stawach” manipulatora,

proporcjonalnie do poziomu aktywności mięśniowej (rozważanego mięśnia zależnego od kierunku) oraz do informacji o stopniu wspomaganie przez manipulator (ta informacja jest zależna od użytkownika). Stosowane napędy elektryczne będą sterowane z wykorzystaniem profilu Profile Torque Mode, zgodnego ze standardem CANopen DS402.

W ramach przedstawionej metody sterowania najważniejsze i zarazem najtrudniejsze jest pozyskanie informacji o intencji użytkownika. Z tego względu opracowano i badano dwa algorytmy pozyskania tej informacji, bazując wyłącznie na sygnałach z mięśni: dwugłowego ramienia oraz trójgłowego ramienia. Te mięśnie wybrano na podstawie przeprowadzonego eksperymentu – jako najbardziej zaangażowane w trakcie wykonywania założonego ruchu, przy którym ma wystąpić wspomaganie.

W celu rozpoznania intencji ruchowej w stawie łokciowym należy porównać ze sobą dwa sygnały aktywności bicepsa i tricepsa. W utworzonym algorytmie różnica wartości bezwzględnych tych sygnałów jest miarą kierunku i siły pracy przedramienia. Cechą charakterystyczną sygnałów EMG jest skok pochodnej przy rozpoczęciu pracy mięśnia, który w tym algorytmie wykorzystuje się jako sygnał informujący o działaniu mięśni. Następnie sprawdza się, czy nie nastąpił skok w pochodnych obu sygnałów, co oznaczałoby napięcie izometryczne.

Gdy już wiadomo, że tylko jeden z sygnałów wykazał aktywność, wyznacza się różnicę wartości bezwzględnych obu sygnałów. Taka informacja wystarcza, aby rozróżnić kierunek intencji oraz oszacować zamierzoną siłę i w konsekwencji wykorzystać ją do redukcji napięcia mięśniowego poprzez zadziałanie odpowiednim momentem sił w wyznaczonym kierunku.

Alternatywnym rozwiązaniem problemu identyfikacji intencji ruchowej człowieka jest utworzenie sieci neuronowej rozpoznającej charakterystyki sygnału EMG i wyznaczającej parametr, którego znak odpowiada kierunkowi zamierzonego działania, a wartość bezwzględna przekłada się na zamierzoną siłę – podobnie jak w pierwszej metodzie. W tym celu utworzono oprogramowanie do generowania sieci neuronowych o różnych parametrach (liczbie warstw sieci, liczbie neuronów w poszczególnych warstwach). Dodatkowo wprowadzono możliwość wykorzystania różnych funkcji aktywacyjnych dla danej sieci neuronowej.

Do nauczania sieci służy algorytm propagacji wstecznej, który wymaga dużej ilości wstępnych danych.

Ze względu na trudność oszacowania pożądanej wartości do porównania i oceny opracowywanej metody, wykorzystującej sygnał elektromiograficzny, zostanie wykonany układ sterujący dwoma serwośnikami, bazujący wyłącznie na informacjach pochodzących z potencjometrycznego dwuosowego joysticka. Wychylenie joysticka w osiach X i Y spowoduje zmianę pozycji efektora względem stawu ramiennego – odpowiednio oddalenie/przybliżenie oraz podniesienie/opuszczenie, przy czym prędkość zmian będzie proporcjonalna do stopnia wychylenia joysticka.

Podsumowanie

Egzoszkieleł musi poprawnie odzwierciedlać intencje użytkownika oraz zapewniać mu komfort fizyczny i psychiczny, dlatego tak ważna jest integracja egzoszkieletu z człowiekiem. Do tego niezbędne jest opracowanie odpowiedniej metody sterowania.

W artykule przedstawiono założenia dotyczące budowy egzoszkieletu kończyny górnej oraz wstępną procedurę badawczą, mającą na celu ocenę i porównanie dwóch metod sterowania. Omówiono wstępnie opracowane metody sterowania manipulatorem wspomagającym, bazujące na analizie charakterystyki sygnału elektromiograficznego (EMG) oraz na zastosowaniu sieci neuronowych. Na dalszych etapach zostanie opracowany model egzoszkieletu, a ponadto zostaną przeprowadzone prace nad udoskonalaniem metod sterowania oraz algorytmów wykrywania intencji ruchowej ramienia i przedramienia przyszłego użytkownika wspomagającego manipulatora nasobnego.

Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017–2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

LITERATURA

1. Yang C.J., Zhang J.F., Chen Y., Dong Y.M., Zhang Y. "A review of exoskeleton-type systems and their key technologies," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 222, 8 (2008): s.1599–1612.
2. <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/orthosis> (dostęp 20.03.2018 r.).
3. Stienen A.H.A., McPherson J.G., Schouten A.C., Dewald J.P.A. 2011. "The ACT-4D: a novel rehabilitation robot for the quantification of upper limb motor impairments following brain injury". *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975460.
4. Krebs H.I. et al. "Rehabilitation robotics: performance-based progressive robot-assisted therapy." *Autonomous Robots*. 15.1 (2003): s. 7–20.
5. Mao Ying, Sunil Kumar Agrawal. "Design of a cable-driven arm exoskeleton (CAREX) for neural rehabilitation". *IEEE Transactions on Robotics*. 28.4 (2012): s. 922–931.
6. Frisoli A., Rocchi F., Marcheschi S., Dettori A., Salsedo F., Bergamasco M. "A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments". *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2005: s. 195–201.
7. Russo D., Ambrosini E., Arrigoni S., Braghin F., Pedrocchi A. "Design and modeling of a joystick control scheme for an upper limb powered exoskeleton". *Proceedings of 14th Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing*, 2016.
8. Mikulski M.A. "Electromyogram control algorithms for the upper limb single-DOF powered exoskeleton". *Proceedings of 4th International Conference on Human System Interactions*, 2011: s. 117–122.
9. Lu Z., Tong K., Shin H., Sheng L., Zhou P. "Advanced myoelectric control for robotic hand-assisted training: outcome from a stroke patient". *Frontiers in Neurology*. 8 (2017): s. 1–5.
10. Venkesh V., Davis F.D. "A Theoretical extension of the technology acceptance model: four longitudinal field studies". *Management Science*. 46, 2 (2000): s. 186–204.
11. Brooke J. "Usability evaluation in industry". London: Taylor and Francis, 1996.