

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО РОЗПІЗНАВАННЯ НАМІРУ РУХУ ТА УПРАВЛІННЯ МІОЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРОТЕЗАМИ РУК

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто сучасні підходи до керування роботизованими протезами верхніх кінцівок на основі сигналів електроміографії). Розглянуто дві основні парадигми розпізнавання наміру руху — дискретну та безперервну — та їхні переваги і обмеження. Проаналізовано методи класифікації та оцінки рухів, включаючи традиційні алгоритми розпізнавання шаблонів та сучасні методи глибокого навчання. Особливу увагу приділено стратегіям керування протезами: односпрямованому, зі зворотним сенсорним зв'язком і спільному контролю. Представлено останні досягнення у використанні електротактильного та пропріоцептивного зворотного зв'язку для підвищення точності та природності управління протезами.

Ключові слова: ЕМГ, протез, рух, зворотний зв'язок, контроль.

Abstract

The paper reviews modern approaches to controlling robotic upper limb prostheses based on electromyography signals. Two main paradigms of movement intention recognition — discrete and continuous — and their advantages and limitations are considered. Methods for classifying and evaluating movements are analyzed, including traditional pattern recognition algorithms and modern deep learning methods. Special attention is paid to prosthetic control strategies: unidirectional, with sensory feedback, and joint control. Recent advances in the use of electrotactile and proprioceptive feedback to improve the accuracy and naturalness of prosthetic control are presented.

Keywords: EMG, prosthesis, movement, feedback, control.

Вступ

Розвиток технологій роботизованих протезів верхніх кінцівок дозволяє значно підвищити якість життя людей з ампутацією. Основою сучасних систем керування є сигнали ЕМГ, що відображають активність м'язів користувача та його намір руху. Дослідження останніх років демонструють два підходи до розпізнавання наміру: дискретний, який передбачає виконання окремих рухів з поверненням руки у початкову позицію, та безперервний, що дозволяє об'єднувати кілька рухів у природний потік дій. Методи класифікації дискретних рухів забезпечують високу точність при відтворенні заздалегідь визначених жестів, проте обмежені у відображенні нових або складних комбінацій рухів. Безперервні алгоритми, зокрема на основі глибокого навчання, дозволяють оцінювати рухи у реальному часі та декодувати одночасні багатосуглобові дії. Сучасні протези інтегрують сенсорний зворотний зв'язок, що покращує точність захоплення та знижує втому користувача, а також системи спільного контролю, які комбінують автономні алгоритми і наміри користувача.

Результати дослідження

Тип руху та намір

Дослідження керування протезами рук на основі ЕМГ виділяють два основні підходи: дискретний і безперервний. Дискретні дії передбачають виконання окремого руху з поверненням руки у початкове положення між повтореннями, що дозволяє легко сегментувати сигнали та навчати моделі розпізнавання наміру. Результати дослідження [1] показали, що пропорційне та одночасне прогнозування багатосуглобових рухів із ЕМГ дозволяє більш точно відтворювати рухи руки для керування протезом. Автори роботи [2] застосували синергію м'язів для одночасного та стабільного керування протезом кисті з чотирма ступенями свободи, забезпечуючи природні рухи користувача.

Безперервне виконання рухів дозволяє об'єднувати декілька дій без повернення до початкового положення, що створює більш природні умови для повсякденних завдань. Дослідження [3] та [4]

підкреслюють, що безперервне моделювання рухів за допомогою алгоритмів машинного навчання та глибинних нейронних мереж покращує розпізнавання наміру у складних та динамічних умовах, включаючи шум та варіативність сигналу ЕМГ.

Класифікація та оцінка руху

Класифікація дискретних дій часто реалізується за допомогою методів розпізнавання шаблонів або моделей регресії, що дозволяють відображати сигнали ЕМГ на рухи протеза. Автори роботи [1] використали регресійні моделі для прогнозування кутів суглобів, що дозволяє декодувати одночасні рухи декількох суглобів. Результати [2] показали, що лінійна інтерполяція між м'язовими синергіями забезпечує стабільне керування кількома ступенями свободи.

Оцінка безперервного руху включає аналіз всього процесу руху в реальному часі, враховуючи переходи між діями. Такі підходи дозволяють передбачати рухи кисті і пальців без попередньо визначених шаблонів. Методи глибинного навчання, як зазначено в роботі [4], забезпечують більш точне прогнозування та можливість одночасного контролю кількох ступенів свободи, але потребують великих обсягів даних та адаптації до індивідуальних особливостей користувача.

Стратегії керування протезами

Односпрямоване керування відображає амплітуду або характеристики ЕМГ без додаткового зворотного зв'язку. Воно просте та широко застосовується в комерційних протезах, проте обмежене відсутністю пропріоцептивної інформації [1, 2].

Керування зі зворотним зв'язком додає сенсорну інформацію про стан протеза. Результати [5] показали, що тактильний і вібротактильний зворотний зв'язок значно підвищує точність захоплення та знижує когнітивне навантаження. Дослідження [6] та [7] продемонстрували ефективність електротактильної стимуляції для відновлення чутливості пальців і поліпшення контролю захоплення. Дослідження [8] додатково показало, що електротактильний зворотний зв'язок може зменшувати м'язову втому під час маніпуляцій. Автори дослідження [9] поєднали класифікацію ЕМГ з пропріоцептивним зворотним зв'язком для інтуїтивного керування роботизованою рукою.

Спільний контроль об'єднує автономне керування та інтелект користувача, дозволяючи протезу реагувати на команди в реальному часі. Результати [10] та [11] демонструють, що інтеграція оцінки руху через ЕМГ та адаптивного алгоритму керування дозволяє протезам виконувати складні завдання захоплення. Автори [12] підкреслюють важливість гібридних сенсорних систем для безінвазивного керування протезами з високою точністю та адаптивністю.

Висновки

Сучасні системи керування протезами рук на основі ЕМГ демонструють значний прогрес у забезпеченні природності та точності рухів. Дискретні та безперервні підходи мають свої переваги та обмеження: дискретні рухи забезпечують високу точність у лабораторних умовах, а безперервні — кращу адаптацію до реальних сценаріїв. Використання зворотного сенсорного зв'язку та спільного контролю підвищує інтуїтивність та ефективність управління протезами. Подальші дослідження мають зосередитися на адаптації алгоритмів до індивідуальних особливостей користувача, оптимізації сенсорних систем та інтеграції методів глибинного навчання для підвищення автономності і природності керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang Q., Pi T., Liu R., Xiong C. Simultaneous and proportional estimation of multijoint kinematics from EMG signals for myocontrol of robotic hands. *IEEE/ASME Trans. Mech.* 2020;25:1953–1960.
2. Lukyanenko P., Dewald H.A., Lambrecht J., Kirsch R.F., Tyler D.J., Williams M.R. Stable, simultaneous and proportional 4 DoF prosthetic hand control via synergy inspired linear interpolation: A case series. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2021;18:50.
3. Zi You L., Xin Gang Z., Bi Z., Qi Chuan D., Dao Hui Z., Jian Da H. Review of sEMG based motion intent recognition methods in non ideal conditions. *Acta Autom. Sin.* 2021;47:955–969.

4. Xiong D., Zhang D., Zhao X., Zhao Y. Deep learning for EMG based human machine interaction: A review. IEEE/CAA J. Autom. Sin. 2021;8:512–533.
5. Sensinger J.W., Dosen S. A review of sensory feedback in upper limb prostheses from the perspective of human motor control. Front. Neurosci. 2020;14:345.
6. Kim K. A review of haptic feedback through peripheral nerve stimulation for upper extremity prosthetics. Curr. Opin. Biomed. Eng. 2022;21:100368.
7. Xu H., Chai G., Zhang N., Gu G. Restoring finger specific tactile sensations with a sensory soft neuroprosthetic hand through electrotactile stimulation. Soft Sci. 2022;2:19.
8. Li K., Zhou Y., Zhou D., Zeng J., Fang Y., Yang J., Liu H. Electrotactile Feedback Based Muscle Fatigue Alleviation for Hand Manipulation. Int. J. Humanoid Robot. 2021;18:2050024.
9. Cha H., An S., Choi S., Yang S., Park S., Park S. Study on Intention Recognition and Sensory Feedback: Control of Robotic Prosthetic Hand Through EMG Classification and Proprioceptive Feedback Using Rule based Haptic Device. IEEE Trans. Haptics. 2022;15:560–571.
10. Dwivedi A., Shieff D., Turner A., Gorjup G., Kwon Y., Liarokapis M. A shared control framework for robotic tele manipulation combining electromyography based motion estimation and compliance control. Proc. 2021 IEEE ICRA; 2021; pp. 9467–9473.
11. Wang Y., Tian Y., She H., Jiang Y., Yokoi H., Liu Y. Design of an effective prosthetic hand system for adaptive grasping with the control of myoelectric pattern recognition approach. Micromachines. 2022;13:219.
12. Zhou H., Alici G. Non invasive human machine interface (HMI) systems with hybrid on body sensors for controlling upper limb prosthesis: A review. IEEE Sens. J. 2022;22:10292–10307.

Пастушенко Антон Олександрович — аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Науковий керівник: **Коваль Леонід Григорович** — к. т. н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: koval.l@vntu.edu.ua.

Anton Oleksandrovych Pastushenko — postgraduate student of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Leonid Grigorovich Koval** — Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: koval.l@vntu.edu.ua.