

## АДАПТИВНА МОДЕЛЬ РУХУ КІНЦІВКИ ДЛЯ НЕЙРОРЕАБІЛІТАЦІЇ

Кулак Е.М., Мірошник А.М., Кулак Г.К.

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Пошук підходів, які забезпечують максимально наближене до природного відтворення рухів руки під час взаємодії з визначеною точкою у просторі, становить один із ключових напрямів розвитку сучасних роботизованих систем. Актуальність таких досліджень обумовлена зростанням потреби у технологіях, здатних ефективно доповнювати та підтримувати діяльність людини в медичній, соціальній і виробничій сферах.

Зокрема, зазначені рішення мають значний потенціал у галузі моторної реабілітації, включаючи створення навчальних і допоміжних протезів для осіб із частковою або повною втратою контролю над рухами кінцівок, зокрема внаслідок нейродегенеративних патологій.

Класичний контроль над рухами кінцівок базується на поданні кінцівки як сукупності взаємопов'язаних ланок, організованих у ієрархічну структуру типу «предок–нащадок» (наприклад, плече – передпліччя), де передача руху відбувається від кінцевого елемента до базового [1]. Такий підхід зворотної кінематики набув широкого застосування в робототехніці, зокрема для реалізації просторових переміщень маніпулятора без необхідності індивідуального керування кожним його сегментом. Водночас суттєвим недоліком цього методу є обмежена природність сформованих траєкторій у порівнянні з рухами людини.

Альтернативою є теорія перцептивного контролю, яка інтерпретує поведінку біологічних систем як результат функціонування замкнених контурів регуляції з негативним зворотним зв'язком [2, 3]. У межах цього підходу стабілізація контрольованої величини досягається шляхом компенсації відхилень через взаємодію з навколишнім середовищем. На відміну від технічних систем, де значення параметрів задаються зовнішнім оператором, у живих організмах еталонні (референтні) значення формуються внутрішньо. Найпростішими проявами таких механізмів є рефлекторні реакції та процеси гомеостазу [4].

**Метою доповіді** є адаптивна модель руху кінцівки для реабілітації при нейродегенеративних патологіях. Вона необхідна для створення пристрою, який багаторазово рухатиме малорухливу руку пацієнта, торкаючись якихось точок у просторі, змушуючи пацієнта формувати нові нейронні зв'язки у його мозку.

Для моделювання руху людської руки необхідно враховувати її кінематичні характеристики, зокрема швидкість і траєкторію. Експериментальні дослідження свідчать, що швидкість руху має нелінійний характер [5]: тангенціальна швидкість під час досягнення цілі наближається до нормального розподілу — спочатку зростає, досягає максимуму, після чого зменшується, що відповідає природному уповільненню для підвищення точності. Урахування цих особливостей дозволяє підвищити біоміметичність рухів роботизованих систем.

У роботі запропоновано відмовитися від класичних підходів, зокрема оберненої кінематики та безперервного обчислення кутів у суглобах, і застосувати принципи теорії перцептивного керування. Даний підхід базується на використанні контурів із негативним зворотним зв'язком, що забезпечують підтримання контрольованої змінної на заданому рівні за рахунок взаємодії із зовнішнім середовищем.

На відміну від інженерних систем, у біологічних організмах еталонні значення формуються внутрішньо, що відображає природні механізми регуляції, зокрема рефлексії.

Для реалізації природного руху маніпулятора запропоновано використовувати вимірювання відстані до цільового об'єкта, зокрема за допомогою сенсора, розміщеного на кінцевому ефекторі. Такий підхід є доцільним для реабілітаційних застосувань, де робот забезпечує повторювані рухи кінцівки пацієнта, сприяючи формуванню нових нейронних зв'язків. У цьому випадку ключовим є відтворення траєкторії кінцевої точки (пальця), тоді як необхідні кути в суглобах формуються природним чином.

Запропонована модель керування має ієрархічну структуру. На верхньому рівні функціонує таймер, що задає дискретні інтервали часу для вимірювання та корекції руху. Нижчий рівень реалізує вимірювання відстані до цілі та передає відповідні дані до обчислювального модуля, який визначає швидкість і прискорення.

Отримані параметри використовуються для керування приводами маніпулятора.

Розроблено алгоритм обчислення швидкісних характеристик, який може бути реалізований програмно або у вигляді ітераційного керуючого автомата.

### Список літератури

1. D'Souza. Learning inverse kinematics / D'Souza, Aaron, Sethu Vijayakumar, and Stefan Schaal // Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180). Vol. 1. IEEE, 2001, pp. 298-303.
2. Mansell, W. 2022. An Integrative Control Theory Perspective on Consciousness. *Psychological Review*. <https://doi.org/10.1037/rev0000384>.
3. Floegel, Mareike; Kasper, Johannes; Perrier, Pascal; Kell, Christian A. (30 March 2023). «How the conception of control influences our understanding of actions». *Nature Reviews Neuroscience*. 24 (5): 313–329. DOI:10.1038/s41583-023-00691-z. PMID 36997716. S2CID 257857085.
4. Marken Richard. Behavioral illusions: The Snark is a Boojum / Richard Marken, Richard Kennaway, Tauseef Gulrez // *Theory & Psychology* 2022, Vol. 32(3) pp. 491–514. DOI:10.1177/09593543211070271.
5. Atkeson Christopher G. Kinematic Features of Unrestrained Vertical Arm Movements / Christopher G. Atkeson and John M. Hollerbach, Artificial Intelligence Laboratory and Department of Psychology, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts // *The Journal of Neuroscience* Vol. 5, No. 9, September 1985, pp. 2318-2330.