

DOI: 10.18372/2310-5461.69.20954
УДК 004.942(45)

О. Б. Іванець, докт. техн. наук, доц.
Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-0897-4219>
e-mail: olchik2104@ukr.net;

Д. О. Навроцький, канд. техн. наук, доц.
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0000-0003-3160-3480>;
e-mail: navrotskyi@kai.edu.ua;

С. В. Левченко,
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0009-0007-9440-2340>
e-mail: sergijl413@gmail.com
e-mail: navrotskyi@kai.edu.ua;

М. В. Архирей,
Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
orcid.org/0000-0002-2200-8404
e-mail: marina_arkhyrei@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАВДАНЬ УПРАВЛІННЯ БІОНІЧНИМ ПРОТЕЗОМ

Вступ

Якість життя осіб, що втратили кінцівки рук та ніг напряму залежить від здатності дослідників використати нові можливості, що відкривають засоби машинного навчання для обробки даних як з давачів різних типів так і обробці потоків даних в режимі реального часу. В порівнянні з механічними протезами біонічні протези відрізняються насамперед розширеними можливостями своїх функцій, але це також породжує проблему керування протезом, оскільки часто необхідно розробляти різні сценарії поведінки окремих пальців, коли окремі його складові повинні працювати з різною швидкістю, забезпечуючи біонічному протезу функції, подібні до функцій людської руки. Важливою умовою розробки адекватної системи керування кінцівками протеза є розробка алгоритмів керування з використанням зворотного зв'язку для аналізу швидкості та траєкторії руху, які були б універсальними для різних протезів і, відповідно, для різної кількості використаних у них сервоприводів. Для вирішення цих завдань у роботі був розроблено реальний прототип плати для керування рухами біонічних пальців для проведення візуальних

експериментальних досліджень з метою відпрацювання сценаріїв руху пальців біонічного протеза.

Постановка проблеми в загальному вигляді

Використання механічних протезів звужує можливості їх використання при експлуатації. Тому аналіз принципів роботи та можливостей біонічних протезів з наявністю функцій комп'ютерного зору та нейромереж розширює можливості використання приладів такого типу в майбутньому. Але такий підхід потребує додаткових експериментальних досліджень з такими протезами для аналізу їх роботи з метою підвищення їх функціональності.

Поєднання можливостей біонічного протезу з можливостями ідентифікації та розпізнавання образів або предметів на основі штучної нейронної мережі дозволяє більш детально імітувати поведінку людської руки з її можливостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як свідчать останні дослідження використання штучного інтелекту для завдань розпізнавання образів та комп'ютерного зору стрімко збільшується з кожним роком. Так, дослідження авторів

[1] визначило, що використання машинного навчання, обробки зображення з використанням штучного інтелекту з кожним роком збільшується в середньому більше ніж 14 470 публікацій на рік (рис.1). В свою чергу, використанню машинного навчання для оцінювання фізіологічних параметрів людини все більше уваги приділяється дослідниками в спорті та медицині [2], зокрема при фізичних навантаженнях [3], для завдань оцінювання ментального здоров'я [4], догляду за пацієнтом [5], завдань обробки біомедичних даних [6], з огляду на особливості їх вимірювання [7], інших галузей медицини та біомедичної інженерії.

Окремою групою досліджень використання штучного інтелекту для завдань медицини є впровадження можливостей нейромереж при керуванні біонічними протезами [8], та побудова нейропротезів зокрема [9]. Також багато досліджень присвячено розробці як архітектур керування [10], так і аналізу універсальних епізодів з використанням штучного інтелекту, які можна було б використовувати для керування біонічними протезами [11]. Так, автори [12] роблять висновки, що впровадження таких систем керування в реальному житті вимагає подальших досліджень та вирішення багатьох інших питань щодо їх впровадження [12].

Мета статті

Метою дослідження є розробка автоматизованої системи, що використовує комп'ютерний зір з використанням нейромереж для завдань управління біонічними протезами. Використання мож-

ливостей комп'ютерного зору розширює можливості використання біонічних протезів з метою аналізу можливих сценаріїв руху пальцями задля адекватного копіювання дій людської руки біонічним протезом. Аналіз принципів дій та функціональних можливостей руху пальців кінцівок біонічного протезу був проведений з використанням реального прототипу модуля керування рухами біонічного протезу, що дозволив провести експериментальні дослідження для відпрацювання різних сценаріїв руху та положення кінцівок пальців в різний момент часу для їх повторення функціональним протезом. З цією метою розроблений код програми на мові Python для ідентифікації рухів людської руки з екрану монітору та подальшого використання для відпрацювання сценаріїв руху пальців реальної людської руки.

Виклад основного матеріалу дослідження

На сьогодні існує нагальна необхідність заміни механічних протезів біонічними аналогами, здатними не тільки імітувати поведінку людської руки але і виконувати більш складні функції. Це пов'язано з необхідністю надання пацієнтам більшої самостійності та можливості виконання більшої кількості функцій, що властиві пальцям верхніх кінцівок. Але імітація рухів людської руки ставить перед дослідниками ряд завдань для одночасного руху різними кінцівками з різною швидкістю та траєкторією. Саме виконання цих завдань і впливає на якість роботи штучного біонічного протезу та тими можливостями які він може виконувати.

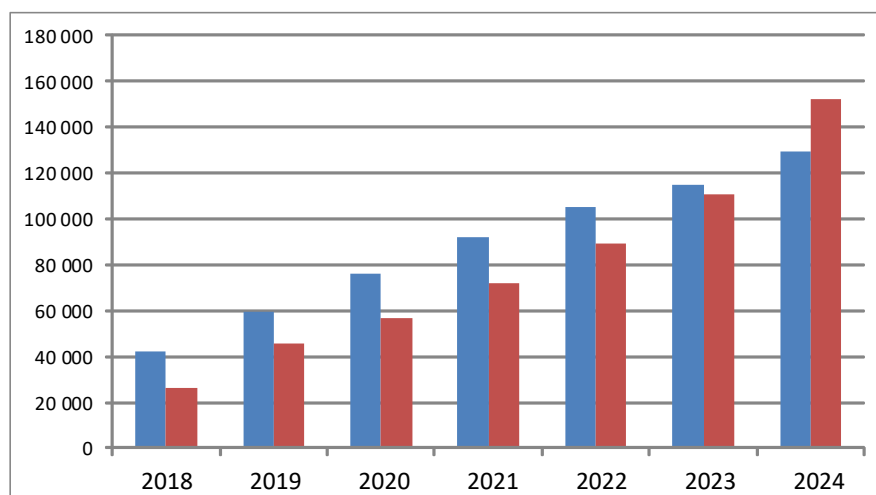


Рис. 1. Динаміка змін кількості публікацій присвячених штучним нейронним мережам (сині стовпчики) та машинній обробці (червоний стовпчик), опублікованих в наукометричній базі Scopus за останні 7 років (данні отриманні з джерела [1])

В запропонованій роботі була розроблена програма на мові Python, яка за рахунок використання бібліотек платформи MediaPipe [8], які в свою чергу використовують машинне навчання

для ідентифікації та аналізу відеооб'єкту (в даному проекті реальної кисті людської руки), дозволяє визначити положення руки за ключовими точками, проаналізувати права це рука чи ліва та

ідентифікувати положення пальців для їхнього повторення біонічним протезом. Після визначення, який саме жест та якою рукою здійснений у режимі реального часу, ця інформація по інтерфейсу передачі даних UART передає команди мікроконтролеру, що, в свою чергу запрограмований мовою C++, який у вигляді команд передає інформацію сервоприводам біонічного протезу. Коли йдеться про верхні кінцівки кисті, необхідно враховувати різні проекції вказівного, середнього, безіменного, мізинця та великого пальців, оскільки траєкторія його руху здійснюється вздовж осі x , тоді як інші пальці мають траєкторії руху вздовж осі y . Ця особливість руху окремо по осі x та y здійснюється за наступними етапами.

Перший етап роботи даної автоматизованої системи полягає у наступному. Камера, що підключена до комп'ютера знімає зображення із зовнішнього середовища, в свою чергк бібліотека комп'ютерного зору OpenCV вмикає відео потік даних, що дозволяє бібліотеці MediaPipe провести ідентифікацію складових людської руки, яку вона «бачить» на екрані. Така ідентифікація відбувається за допомогою основних зон кисті руки, що маркуються червоними крапками. Кожна крапка, в свою чергу має окремі координати. Причому, важливим етапом є ідентифікація правої або лівої руки, від чого буде залежит логічна умова порівняння координат точок. Так, для даної системи по осі x здійснюється порівняння вершин пальця (за виключенням великого пальця) з його нижньою точкою за логічною умовою (1).

$$lm[i].y < lm[i-2].y, \quad (1)$$

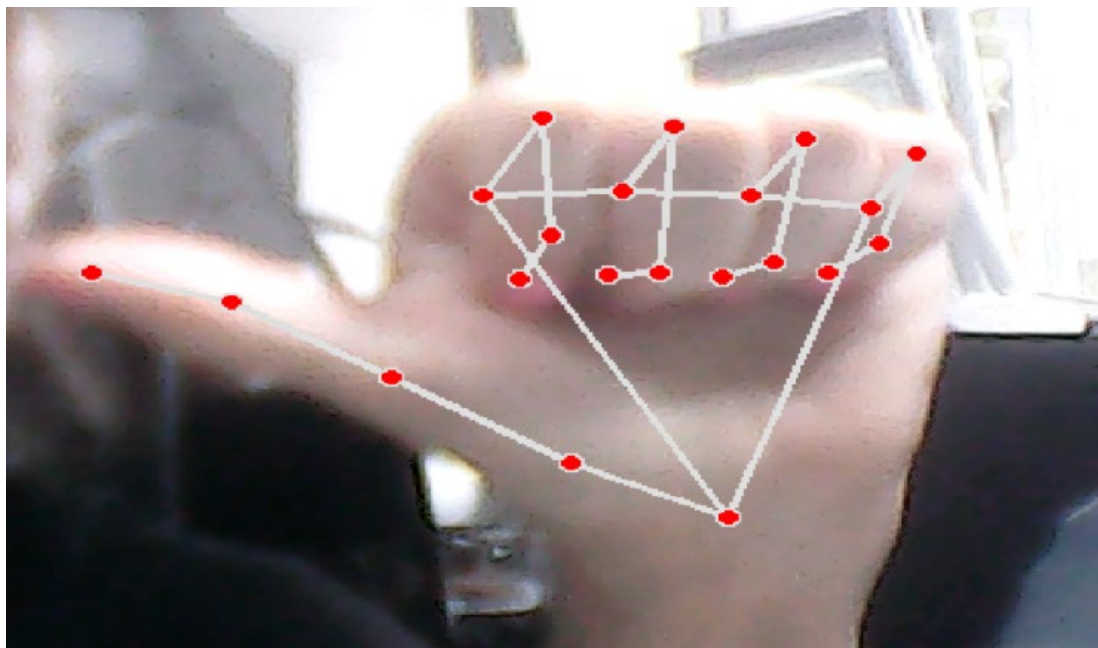


Рис. 3. Демонстрація виконання етапів ідентифікації положень флангів пальці реальної руки

де lm – масив даних, що містить набір точок, що складаються з координат (x, y) ; i – індекс за допомогою якого цикл проходить по елементам масиву, а саме координатам вершин окремих пальців ([4, 8, 12, 16, 20] – представлені наступним чином в бібліотеці MediaPipe), як позначено жовтим еліпсом на рис. 2.

```
finger_tips = [4, 8, 12, 16, 20]
finger_names = ['thumb', 'Index', 'Middle', 'Ring']
def get_finger_states(label, lm):
    usage
    states = []
    if label == "Right":
```

Рис. 2. Масив елементів значення що присвоюється почергово i індексу

Таким чином для правої руки великого пальця адекватна наступна логіка: палець правої руки зжятий в кулак, якщо:

$$lm[4].x < lm[3].x, \quad (2)$$

де $lm[4]$ – елемент масиву з координатами вершини великого пальця, $lm[3]$ – відповідає координатам наступної нижчої точки (фаланги пальця).

Аналогічно здійснюється ідентифікація для інших положень пальців рук.

За описаною логікою можна зробити висновок, що у всіх пальців окрім великого виконується умова (1) (тобто вершини знаходяться нижче точок, що відповідають фалангам пальців), тобто у фізичному світі вони зігнуті, а для великого пальця умова (2) відповідає стану розігнутому, якщо це права рука. При аналізі положень флангів пальці лівої роки етапи виконуються із змінною координатних точок, як подано на рис. 3.

Визначення координат флангів пальців, що представлені у вигляді червоних точок з'єднаних між собою червоною лінією, здійснюється за рахунок розробленої програми, частковий код якої поданий на рис. 2.

Загальний алгоритм роботи автоматизованої системи полягає в наступному: ідентифікація пальців рук на екрані монітору, визначення правої або лівої руки, маркування пальців руки маркерними точкам, визначення координати поло-

ження точок, ідентифікація жесту руки, передача інформації до модулю керування сервоприводами біонічного процесу, копіювання жесту людської руки.

Наступним етапом роботи є передача отриманих даних через UART порт до мікроконтролера, який в свою чергу через SPI інтерфейс та відповідний вихід мікросхеми 74HC595 подає сигнал драйверу, що запускає відповідний сервопривод (рис. 4).



Рис.4. Структурна схема розробленої автоматизованої системи

Для розширення портів функціональної плати, що використовує мікроконтролер ATmega328P з тактовою частотою 16МГц, вісім'ю аналоговими входами та чотирнадцятьою цифровими входами/виходами, використаний вісім бітний зсувний регістр 74HC595(рис.4), що дозволяє отримувати данні, що надходять послідовно по одному біту, через послідовний вхід та синхронізувати їх з тактовим імпульсом, що подається на тактовий вхід зсувного регістру та в момент часу коли всі вісім біт завантажені сигнал з тактового входу (storage register clock) переносить їх на вихідні

піни, що, в свою чергу надає можливість утримувати їх на цих пінах до наступного оновлення. Тобто використання мікросхеми 74HC595 дозволяє запам'ятовувати данні, що отримані по послідовному інтерфейсу та в такий спосіб звільнити «зайняті» виводи мікроконтролера (рис.5). Данні надходять до двох драйверів двигунів DRV8833 як наведено на рисунку 4, які в свою чергу передають команди сервоприводам біонічного протезу, які безпосередньо змінюють положення пальців верхніх кінцівок.

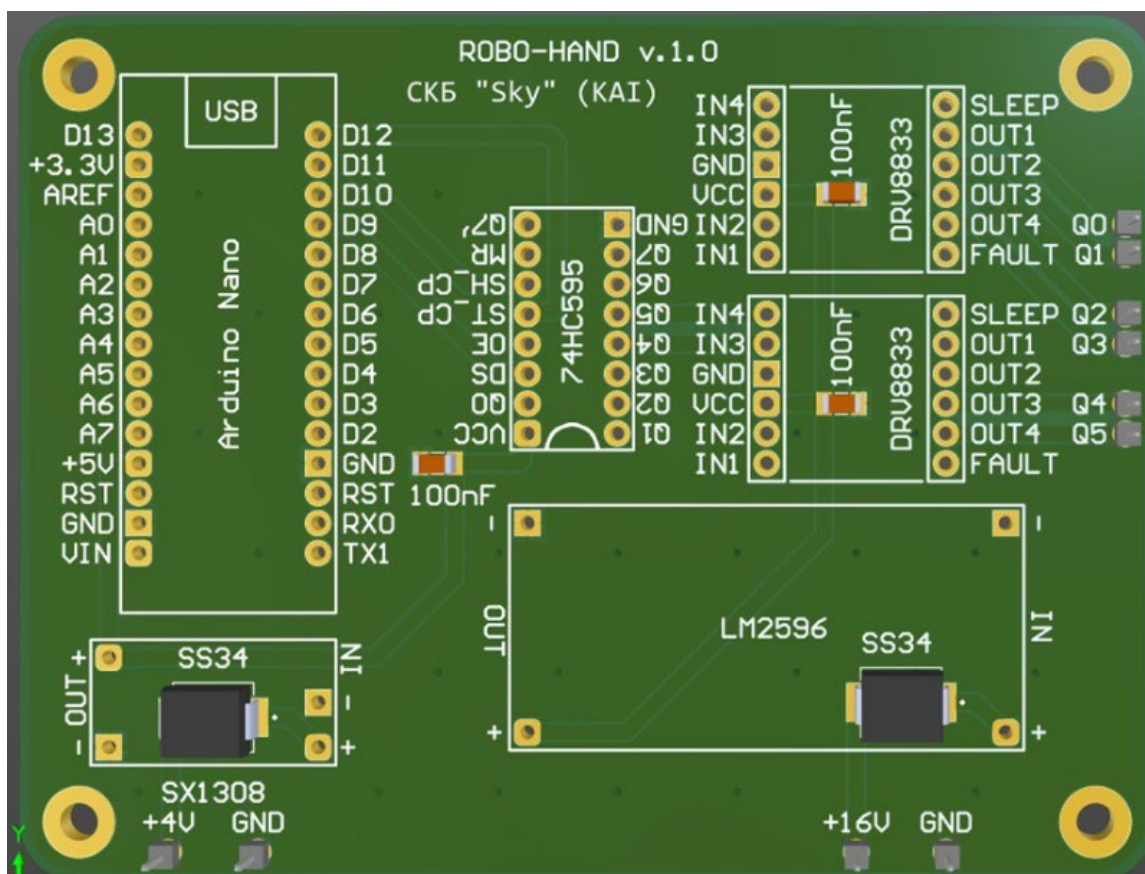


Рис. 5. PCB плата в Altium

В даній роботі був використаний біонічний протез, що керується трьома сервоприводами, два з яких керують пальцями, що відповідають вказівному та середньому пальцям і безіменному та мізинцю, третій сервопривод виконує рухи великого пальця. І якщо алгоритм ідентифікації та відтворення рухів перших груп пальців схожий між собою, для останнього сервоприводу він має інший алгоритм роботи, що пов'язано з відмінністю його рухів у просторі. Якщо перші чотири пальці рухаються вздовж вісі y , то рухи великого пальця здійснюються вздовж осі x , що було враховано при формуванні програмного коду, як вже було зазначено.

Структурна схема, що подана на рис. 4 була реалізована в реальному прототипі друкованої плати (рис. 5).

В конструкторському бюро «Sky» (рис. 6) для біонічного протезу верхніх кінцівок було здійснено проектування PCB плати в Altium Desinger, що дозволило визначити контур плати, провести розміщення компонентів, визначити правила щодо обмеження ширини доріжок, зазорів, перехідних отворів, здійснити трасування для прокладання доріжок та здійснити верифікацію. Комплексний підхід при розробці плати в Altium Desinger дозволив не тільки спроектувати плату з визначеними компонентами, їх розміщенням та розведенням доріжок, а і здійснити перевірку на

наявність помилок проектування та візуалізацію 3D моделі. Розроблена PCB плата була перевірена на наявність помилок проектування та виготовлена з використанням генерації Gerber-файлів. Друкована плата була реалізована в якості прототипу для відпрацювання сценаріїв керування біонічним протезом. З цією метою вона було змонтована з біонічним протезом, як наведено на рисунку 6, що надало змогу провести апробацію її роботу з біонічним протезом верхніх кінцівок в реальному житті (рис. 6).

Завдання, що були вирішені в даній роботі полягає у швидкій ідентифікації зображення людської руки на екрані, виявлення окремих пальців цієї руки з формалізацією руху кожного з пальців та виконання даних рухів за допомогою біонічного протезу.

На сьогодні задачі такого типу виконуються з використанням можливостей глибокого машинного навчання, в роботі для вирішення задачі ідентифікації та формалізації руху окремих пальців були використані можливості бібліотек MediaPipe, що дозволяє з достатньою точністю здійснювати процес ідентифікації рухів людської руки за рахунок зчитування даних з відеокамери та обробку отриманих даних з використанням бібліотек програмних функцій OpenCV в режимі реального часу.

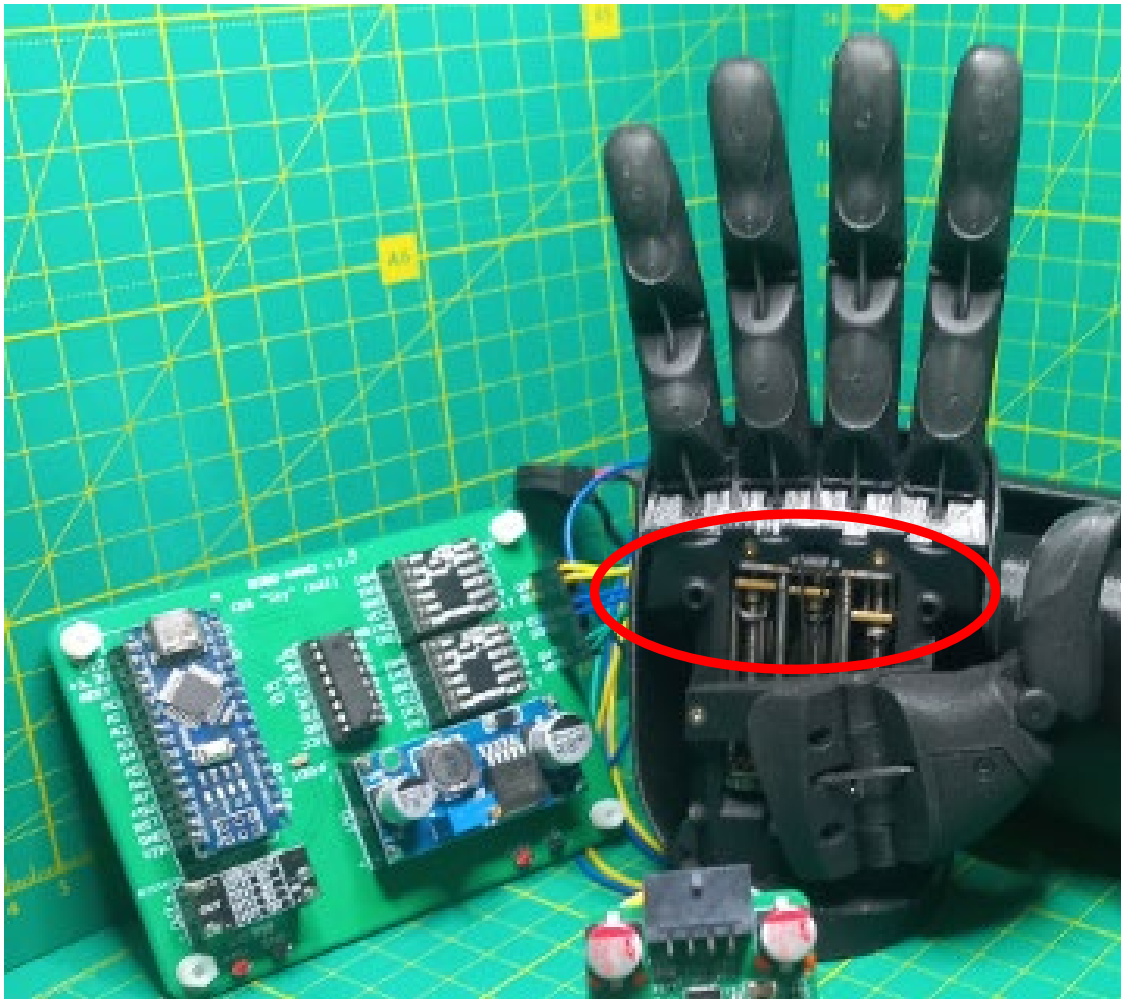


Рис. 5. Підключення розробленої друкованої плати до біонічного протезу руки

Висновки

Проведено аналіз особливостей керування сервоприводами біонічного протеза верхніх кінцівок. Визначено, що важливою умовою розробки адекватної системи керування кінцівками протеза є розробка алгоритмів керування з використанням зворотного зв'язку для аналізу швидкості та траєкторії руху, які були б універсальними для різних протезів і, відповідно, для різної кількості використовуваних у них сервоприводів. Розроблено прототип плати для керування сервоприводами біонічного протеза з метою регулювання роботи сервоприводів у різних положеннях пальців біонічної кисті. Архітектура керування цього прототипу має універсальний характер і може бути використана для біонічних протезів інших типів. У цьому дослідженні використовувався біонічний протез з трьома сервоприводами, що керують вказівним та середнім пальцями, безіменним та мізинцем, та окремим сервоприводом для великого пальця. Враховуючи різні конструкції біонічних протезів, важливим завданням є розробка архітектури сервокерування, яка

дозволяє, виходячи з заданого (бажаного) крутного моменту, отримувати різні стани пальців біонічного протеза. У запропонованій роботі розроблено автоматизовану систему керування сервоприводами біонічного протеза для зміни положення пальців руки з метою визначення налаштувань окремих серводвигунів для отримання бажаних положень пальців біонічного протеза з різною швидкістю.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bielov S., Zaliskyi M. Review of neural network models for 2d object detection. Science-based technologies. 2025. Vol. 68, No. 4. P. 443–452. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.20280>.
- [2] Cheng K, Li Z, He Y, Guo Q, Lu Y, Gu S, Wu H. Potential Use of Artificial Intelligence in Infectious Disease: Take ChatGPT as an Example. Ann Biomed Eng. 2023, Jun; 51(6). PP. 1130–1135. <https://doi.org/10.1007/s10439-023-03203-3>
- [3] Khanal, S. R., Paulino, D., Sampaio, J., Barroso, J., Reis, A., & Filipe, V. (2022). A Review on Computer Vision Technology for Physical Exercise Monitoring. Algorithms, 15(12), 444. <https://doi.org/10.3390/a15120444>.

- [4] Boucher, E. M., Harake, N. R., Ward, H. E., Stoeckl, S. E., Vargas, J., Minkel, J., Zilca, R. (2021). Artificially intelligent chatbots in digital mental health interventions: a review. *Expert Review of Medical Devices*, 18(sup1), 37–49. <https://doi.org/10.1080/17434440.2021.2013200>
- [5] Масюк І. В., Богомолів І. Ф. Синергія біомедицини та штучного інтелекту: роль чат-ботів у трансформації медичної діагностики та догляду за пацієнтами. *Biomedical Engineering and Technology Issue* 13(1) 2024. <https://doi.org/10.20535/2617-8974.2024.13.300747>.
- [6] Іванець, О., Хращевський, Р., & Свєженець, В. (2025). Особливості використання ChatGPT для завдань обробки біомедичних даних. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 302–309. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-37>
- [7] Eremenko V. S. Burichenko M. Yu., Ivanets O. B. (2020). Method of processing the results of measurements of medical indicators. *Science-intensive technologies*. 47, № 3. P. 392–398. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.47.14937>.
- [8] Ortiz-Catalan M. Engineering and surgical advancements enable more cognitively integrated bionic arms. *Sci Robot*. 2021. № 6(58): eabk3123. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abk3123>.
- [9] S. Bhoyar, R. Motghare, S. Daronde. A Review on Advancing Prosthetics with Artificial Intelligence: Enhancing Control, Sensory Feedback, and Adaptability. 2025 8th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). 2025, pp. 1737–1744, <https://doi.org/10.1109/ICOEI65986.2025.11013772>.
- [10] D. K. Luu et al. Artificial Intelligence Enables Real-Time and Intuitive Control of Prostheses via Nerve Interface. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 69, no. 10, pp. 3051–3063. <https://doi.org/10.1109/TBME.2022.3160618>.
- [11] K. Bhakta, J. Camargo, L. Donovan, K. Herrin and A. Young, "Machine Learning Model Comparisons of User Independent & Dependent Intent Recognition Systems for Powered Prostheses," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5393–5400, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3365201>.
- [12] <https://mediapipe.org/>.

Іванець О. Б., Навроцький Д. О., Левченко С. В., Архирей М. В.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАВДАНЬ УПРАВЛІННЯ БІОНІЧНИМ ПРОТЕЗОМ

Застосування цифрових рішень для задач керування біонічним протезом, за рахунок використання можливостей глибокого машинного навчання, дозволяють вирішити задачі ідентифікації та формалізації руху окремих пальців та адекватно здійснювати процес ідентифікації рухів людської руки за рахунок зчитування даних з відеокамери та обробку отриманих даних з використанням бібліотек програмних функцій OpenCV в режимі реального часу. Такий підхід дозволяє відтворити біонічним протезом руху пальців реальної людської руки з одночасним використанням бібліотек платформ MediaPipe, та OpenCV. Ідентифікація положень пальців людської руки здійснюється за розробленою програмою, алгоритм якої складається з етапів розпізнавання лівих та правих пальців та їх розміщення в двохмірному просторі. Вихідна функція даної програми запускає роботу сервоприводів біонічного протезу. Що в свою чергу потребує реалізації такого підходу у реальних апаратних засобах, що і було представлено в зазначеній роботі. Керування біонічним протезом здійснюється за рахунок передачі вихідних даних через UART порт до мікроконтролера ATmega328, який в свою чергу через SPI інтерфейс здійснює керування сервоприводами юіонічного протезу. Проведено проектування реальної друкованої плати, що дозволила за рахунок розроблених програм здійснити імітацію рухів людської руки для відпрацювання сценаріїв її рухів для налаштування та валідації роботи сервоприводів біонічних протезів. Розроблена структурна схема запропонованої системи керування біонічним протезом верхніх кінцівок. Проведене проектування зазначеною системи та розроблена плата PCB, що дозволила провести експериментальні дослідження для відпрацювання адекватності її роботи та валідації рухів пальців біонічного протезу з реальним живим об'єктом в режимі реального часу.

Ключові слова: цифрові технології, біонічний протез, кінцівки рук, ідентифікація рухів, сервопривод, мікроконтролер, машинне навчання.

Ivanets O., Navrotskyi D., Levchenko S., Arkhyrei M.

FEATURES OF USING DIGITAL SOLUTIONS FOR BIONIC PROSTHESIS CONTROL TASKS

The use of digital solutions for bionic prosthesis control tasks, through the use of deep machine learning capabilities, allows us to solve the problems of identifying and formalizing the movement of individual fingers and adequately carry out the process of identifying human hand movements by reading data from a video camera and processing the received data using OpenCV software function libraries in real time. This approach allows us to reproduce the move-

ments of the fingers of a real human hand with the bionic prosthesis while simultaneously using the MediaPipe and OpenCV platform libraries. Identification of the positions of the fingers of the human hand is carried out according to the developed program, the algorithm of which consists of the stages of recognizing the left and right fingers and their placement in two-dimensional space. The output function of this program starts the operation of the servo drives of the bionic prosthesis. Which, in turn, requires the implementation of such an approach in real hardware, which was presented in the specified work. The bionic prosthesis is controlled by transmitting output data via the UART port to the ATmega328 microcontroller, which in turn controls the servo drives of the bionic prosthesis via the SPI interface. A real printed circuit board has been designed, which allowed, using the developed programs, to simulate the movements of a human hand to work out scenarios of its movements for setting up and validating the operation of the servo drives of bionic prostheses. A structural diagram of the proposed control system for a bionic upper limb prosthesis has been developed. The specified system has been designed and a PCB board has been developed, which allowed experimental studies to work out the adequacy of its operation and validate the movements of the fingers of the bionic prosthesis with a real living object in real time.

Keywords: digital technologies, bionic prosthesis, limbs, movement identification, servo drive, microcontroller, machine learning.

Дата першого надходження: 27.02.2026 р.

Дата прийняття до друку: 10.03.2026 р.

Дата публікації: 27.04.2026 р.