

УДК 004.5

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ В СРЕДЕ ROS2 С ПОМОЩЬЮ ЖЕСТОВ

В.А. Бабанина<sup>1</sup>, А.И. Петрова<sup>1</sup>, Т.И. Возненко<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт интеллектуальных кибернетических систем,

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

\*e-mail: [TIVoznenko@mephi.ru](mailto:TIVoznenko@mephi.ru)

Поступила в редакцию: 21.04.2024

После доработки: 25.04.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

В статье представлена реализация системы управления мобильным роботом в среде ROS2 с помощью статических жестов руки, распознаваемых с помощью сигналов электромиограммы (ЭМГ). Ключевым компонентом данной системы является алгоритм преобразования сырого сигнала ЭМГ в дискретные управляющие команды. В рамках данной реализации рассмотрен принцип формирования команд управления движением мобильного робота для его перемещения в пространстве. При проектировании системы команд были учтены различные особенности жестов, такие как сложность их выполнения и распознавания, а также степень физической усталости оператора при выполнении жеста на протяжении длительного периода времени. Распознавание жестов на основе данных с двух ЭМГ-датчиков реализовано с помощью нейронной сети. Проведена интеграция разработанной системы управления с программным интерфейсом мобильного робота в среде ROS2. Представленная система показала высокую степень надежности в рамках тестирования, а также отмечено удобство ее использования испытуемыми.

*Ключевые слова:* человеко-машинный интерфейс, электромиография, ROS2, мобильный робот, канал управления.

**DOI:** 10.26583/vestnik.2024.317

**SMQP**

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых методов взаимодействия человека и машины актуальна во всех сферах человеческой деятельности: от повседневного использования в «умном доме» до различных областей здравоохранения [1–3]. Одной из таких областей является использование человеко-машинных интерфейсов с применением электромиографии (ЭМГ). ЭМГ представляет собой метод измерения и анализа электрической активности мышц, который может быть использован для управления различными устройствами при помощи жестов [4]. В данной работе рассматривается разработка интерфейса жестового управления роботом на основе ЭМГ с помощью статических жестов руки [5].

Для разработки надежной, эффективной и удобной пользователю системы управления жестами необходимо решить множество актуальных проблем, таких как обеспечение простоты и интуитивности выполнения управляющих команд, высокой скорости и точности распознавания команд в условиях наличия различных шу-

мов и других факторов, влияющих на сигнал [6, 7].

Платформа ROS2 – универсальное решение для развертывания и тестирования прикладного ПО для реальных роботов и их моделей. Интеграция интерфейсов человеко-машинного взаимодействия с узлами ROS2 позволит значительно упростить процесс тестирования интерфейса (а также тренировки пользователей) и обеспечить переносимость решения на различные модели роботов.

В рамках данной статьи рассматривается разработка интерфейса управления колесным роботом и его интеграция с платформой ROS2 для взаимодействия с моделями роботов. Одной из ключевых задач, реализованных в рамках данной работы, является проектирование системы жестовых управляющих команд с учетом интуитивности и удобства использования жестов, а также качества распознавания команд при условии возможного наличия ряда шумов в процессе эксплуатации.

### СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ

Задачей интерфейса является обеспечение удобного взаимодействия между пользователем и роботом. Интерфейс принимает на входе измеренный с помощью датчиков ЭМГ-сигнал, а на выходе выдается распознанная команда управления. Этот процесс включает в себя несколько важных этапов:

- сбор и обработка сигналов ЭМГ (размещение датчиков, обработка полученных сигналов для фильтрации шума, усиление и выделение характеристик, которые будут использоваться для определения команд управления);
- распознавание и интерпретация полученных данных (преобразование их в конкретные команды для управления роботом);
- интеграция разработанного интерфейса с системой управления роботом, т.е. передача распознанной команды роботу и ее выполнение.

В рамках данной работы в качестве аппаратного обеспечения используются ЭМГ-датчики

Grove EMG Detector (2 шт.), подключенные через микроконтроллер Arduino UNO, с помощью которого собранный с датчиков сигнал передается для дальнейшей обработки на ПК с фиксированной частотой дискретизации 500 Гц (рис. 1,а).

Интеграция с роботом реализована в виде управления программной моделью робота, функционирующей в среде ROS2. Взаимодействие с моделями в данной среде осуществляется через сообщения и топики. Традиционным форматом сообщений управления движением робота является `ros_msgs/Twist`, для повышения универсальности предложенного решения мы также будем использовать данный формат. В рамках интеграции осуществляется преобразование управляющих команд разрабатываемого интерфейса в сообщения `ros_msgs/Twist` и их публикацию в специализированный топик (рис. 1,б). Разработанный пакет `ros_sockets_twist` осуществляет передачу сообщений в ROS2 с помощью протокола WebSocket.



Рис. 1. Схемы взаимодействия: а) аппаратных модулей; б) управляющего ПО и ПО робота

### НАБОР ЖЕСТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ДЛЯ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМАНД

Одним из ключевых моментов при создании интерфейса управления является определение набора жестов, которые будут соответствовать управляющим командам для робота. Требования, предъявляемые к жестам в наборе для обеспечения точности и надежности передачи команд: каждый жест должен быть четко определен и легко различим, пользователю должно

быть легко интерпретировать их в конкретное движение мобильного робота. Необходимо учитывать широкий спектр вариаций жестов, их соотношение с мышцами предплечья и типами используемых датчиков. Поскольку в данной работе используются два поверхностных датчика, выбраны две мышцы поверхностного слоя (рис. 2), которые отвечают за самые распространенные движения кисти и пальцев руки. Также необходимо учитывать длительность жестов: в данной работе используется факт появ-

ления жеста управления, после которого идет переход в расслабленную ладонь (нейтральный жест, который не приводит к изменению состояния робота). Таким образом, для запуска робота лучше один раз сжать кулак и расслабить его, чем держать руку напряженной на протяжении всего времени управления.

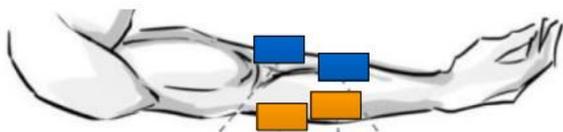


Рис. 2. Размещение электродов двух ЭМГ-датчиков

Наконец, жесты набора должны позволять выполнять все необходимые команды управления роботом. В рамках данной работы рассматриваются основные команды управления дви-

жением колесного робота, ориентированные на перемещение: «Вперед», «Назад», «Налево», «Направо», «Стоп». Для обеспечения удобства управления были также введены команды начала работы системы управления – «Старт», а также команда «Предыдущее состояние» – инструкция роботу не менять текущее состояние.

Исходя из составленного набора управляющих команд было подобрано 5 жестов (рис. 3), которые могут отвечать за 7 различных команд управления мобильным колесным роботом. На рис. 4 представлен граф состояний при выполнении различных команд, на графе узлами являются состояния робота, а выходящие из них ребра представляют собой команды, которые приводят в другие состояния.

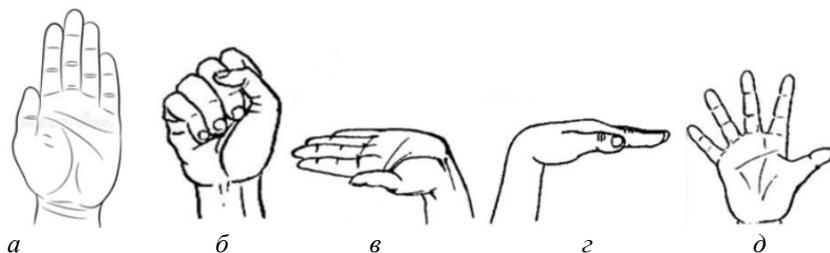


Рис. 3. Набор управляющих жестов: а) расслабленная ладонь; б) сжатый кулак; в) кисть влево; г) кисть вправо; д) широко раскрытая ладонь

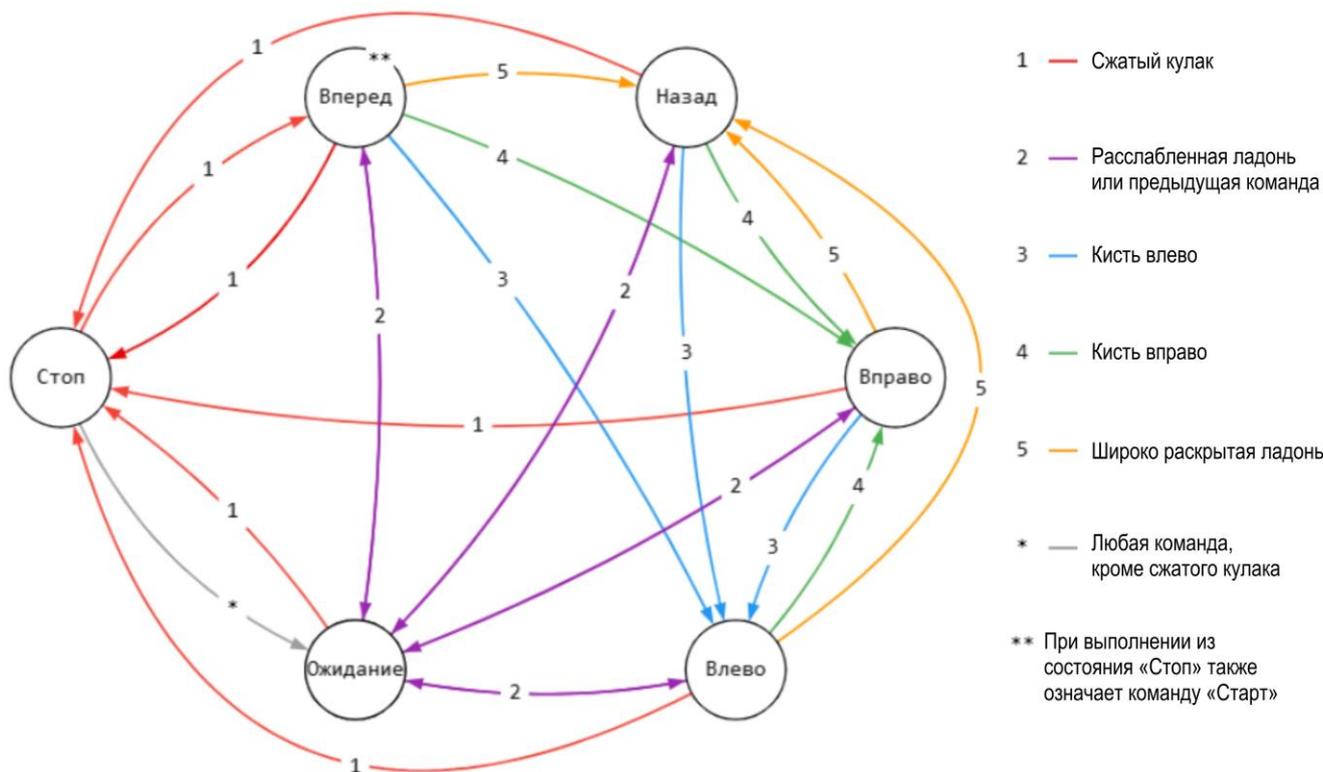


Рис. 4. Граф, описывающий управляющие команды при распознавании того или иного жеста с учетом предыдущего состояния

### АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМГ-ПАТТЕРНОВ УПРАВЛЯЮЩИХ ЖЕСТОВ

В данной работе для распознавания и классификации управляющих команд используется модель машинного обучения. В качестве модели был выбран многослойный перцептрон. Поступающие в систему ЭМГ-данные невозможны для распознавания паттернов в «сыром» виде, поэтому ЭМГ-сигнал также нуждается в предобработке. В рамках предобработки в данной работе осуществляется фильтрация сигнала (удаление нежелательных частот: полосовой фильтр, пропускающий частоты от 10 до 100 Гц; устранение электрических помех: обнуление частот 50 и 100 Гц), а также стандартизация и извлечение характеристик.

В рамках выбора входных характеристик для нейросети было рассмотрено множество вари-

антов, при выборе важно учитывать как различимость данных по одному каналу, так и их различимость между каналами. В конечном итоге по данным критериям были выбраны: среднее абсолютное значение (MAV), среднеквадратическое отклонение (STD) и разница абсолютного среднего значения (DAMV) [8]. Значения MAV, STD и DAMV вычислялись отдельно для двух датчиков, размещение которых указано на рис. 2.

Выходными данными для модели распознавания команд является вектор, содержащий пять значений, каждым из которых является вероятностное определение каждого управляющего жеста на заданном наборе входных данных.

Используемая структура нейронной сети представлена на рис. 5.

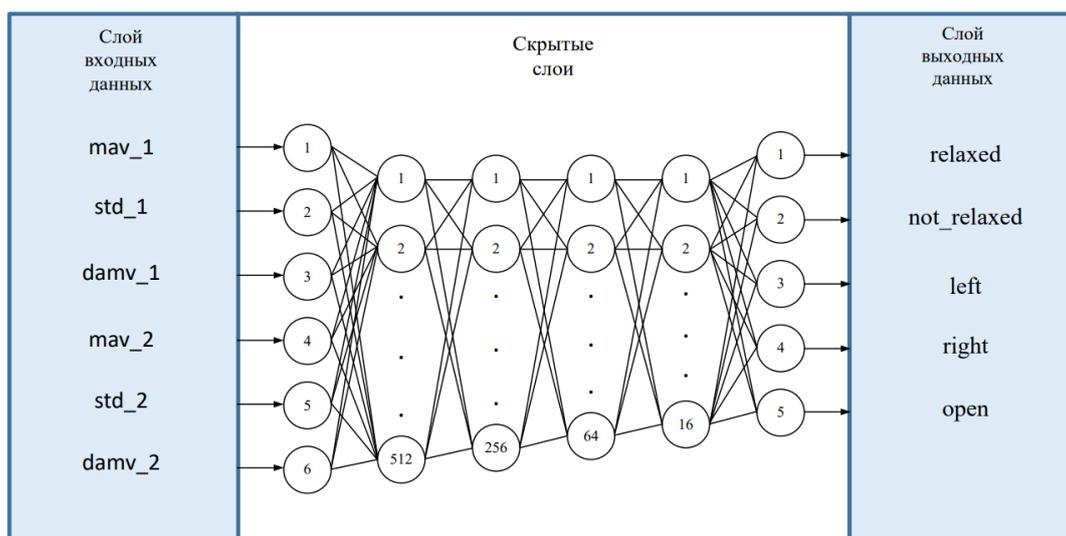


Рис. 5. Используемая структура нейронной сети

Для обработки команды в реальном времени поступающий сигнал исследовался в скользящем окне размерностью 250 значений (или 500 мс). В качестве шага скользящего окна были выбраны значения от 20 до 50. Такие параметры обеспечивают хорошее распознавание жестов, но не могут гарантировать идеальной точности в каждые 100 мс срабатывания (при шаге в 50).

Также для устранения единичных ложных срабатываний, связанных, например, с переходным процессом от одного жеста к другому, была реализована пост-обработка: окончательное принятие решения о распознанном жесте осуществляется на основе наиболее часто встреча-

ющихся всех типов жестов, распознанных за определенный момент времени.

### ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Для предварительного обучения модели была проведена серия экспериментов по сбору обучающего датасета, в котором приняли участие 15 человек, средний возраст – 30 лет. В рамках каждого этапа эксперимента испытуемые последовательно выполняли по 10 секунд управляющие жесты (см. рис. 3). Всего для каждого человека было проведено 10 таких этапов. Сбор данных проводился в одинаковых условиях, испытуемым были даны одинаковые указания в одинаковой последовательности.

Оценка точности работы модели проводилась в два этапа. На первом этапе оценивалась точность в рамках индивидуализированного подхода, при котором модель обучалась и тестировалась на данных каждого испытуемого отдельно, при этом в тренировочный набор данных вошли данные девяти этапов эксперимента, а данные десятого этапа были использованы в качестве тестового. Результат представ-

лен в табл. 1. Вторым этапом оценки точности работы модели использовался общий подход для проверки способности модели к обобщению данных по всем испытуемым и распознаванию общих для различных людей паттернов. При данном подходе модель была предобучена на данных, собранных для 14 добровольцев, а в качестве тестового датасета были взяты данные пятнадцатого. Результат представлен в табл. 2.

**Таблица 1.** Метрики тестирования модели при индивидуализированном подходе

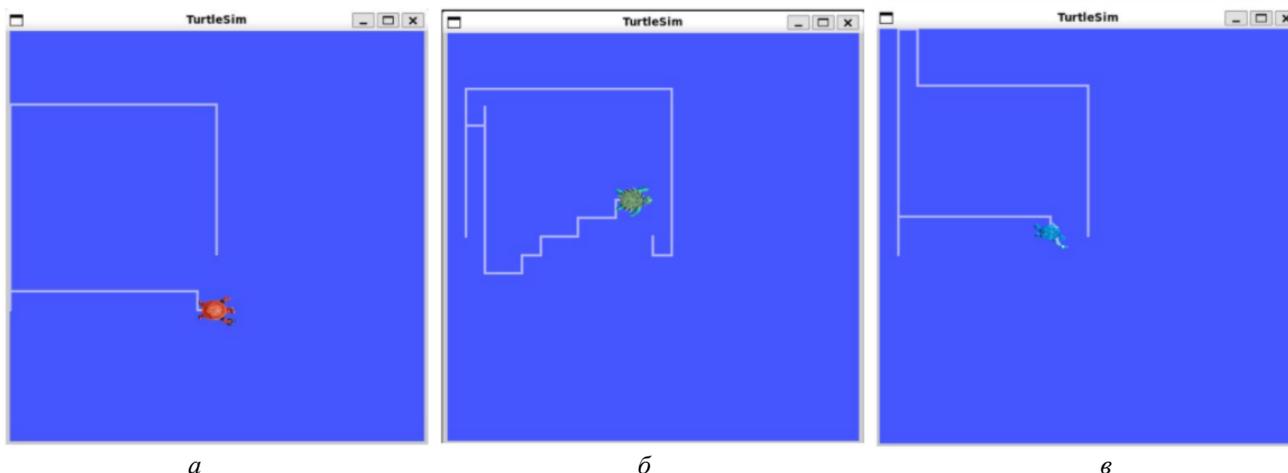
Управляющий жест	TP	TN	FP	FN	Precision	Recall	F1-score
Расслабленная ладонь	22	88	3	0	0.88	1.00	0.94
Сжатый кулак	21	88	0	1	1.00	0.95	0.97
Кисть влево	20	88	0	2	1.00	0.91	0.95
Кисть вправо	21	87	1	1	0.95	0.95	0.95
Широко раскрытая ладонь	19	85	3	3	0.86	0.86	0.86

**Таблица 2.** Метрики тестирования модели при общем подходе

Управляющий жест	TP	TN	FP	FN	Precision	Recall	F1-score
Расслабленная ладонь	22	87	2	0	0.92	1.00	0.86
Сжатый кулак	17	81	7	6	0.71	0.74	0.72
Кисть влево	19	85	4	3	0.83	0.86	0.84
Кисть вправо	21	88	1	1	0.95	0.95	0.95
Широко раскрытая ладонь	14	85	4	8	0.84	0.84	0.83

Отдельно было проведено тестирование «Квадрат», в рамках которого испытуемые работали со всей реализованной системой в комплексе. Для данного этапа тестирования в качестве модели управляемого робота был использован пакет turtlesim, входящий в состав платформы ROS2: благодаря графическому интерфейсу turtlesim, испытуемые могли наблюдать в режиме «вид сверху» траекторию, которую проходит робот-черепашка во время управления им. Задачей испытуемых было провести робота

по траектории «квадрат» против часовой стрелки. В тестировании «Квадрат» приняли участие трое испытуемых, ранее не участвовавших в тестировании. Для распознавания команд была использована предобученная модель, полученная на предыдущем этапе эксперимента; также было проведено дообучение (калибровка) модели для каждого испытуемого на данном этапе. Результаты тестирования в виде полученных траекторий представлены на рис. 6.



**Рис. 6.** Результаты тестирования «Квадрат»: траектории, полученные участниками тестирования

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках тестирования были проведены проверки того, насколько корректно разработанная система распознает отдельные команды, а также насколько данная система является удобной для пользователей при выполнении задания по перемещению мобильного робота.

Тестирование распознавания отдельных команд показало, что разработанная модель с высокой долей точности распознает паттерны управляющих жестов, в том числе модель показала хорошую обобщающую способность в рамках общего тестирования. При этом в рамках эксплуатации интерфейса точность модели может быть повышена за счет дополнительного ее дообучения перед началом работы с целью калибровки под каждого пользователя индивидуально.

В рамках тестирования «Квадрат», помимо качественных выводов о работе интерфейса, были получены отзывы испытуемых. При прохождении теста первым добровольцем было отмечено удобство использования интерфейса, произошла заминка на попытке перенаправить модель робота к траектории «Вниз» с помощью жеста «широко раскрытая ладонь», из-за чего модель сделала несколько лишних шагов влево (рис. 6,а). Однако, когда нужное положение руки для отправки команды «вниз» было найдено, завершить управление моделью получилось успешно.

При прохождении теста вторым добровольцем было отмечено затруднение в использовании интерфейса при попытке отправить команду «Направо». Важно заметить, что у пользователя ранее была травма руки, из-за чего имеются затруднения при движении кистью. Пользователь заметил, что при обнаружении неверной траектории модели робота «вверх» вместо «направо» (на рис. 6,б данный момент заметен справа), он «запаниковал и растерялся». На этом моменте пользователь решил расслабить руку, чтобы «дать ей отдохнуть», после чего снова собрался и завершил траекторию по нижнему левому углу квадрата.

При прохождении теста третьим добровольцем было отмечено удобство и легкость при использовании интерфейса. Самым сложным оказался жест «широко раскрытая ладонь» для подачи команды «Вниз». Пользователю пришлось «немного покрутить запястьем и найти верное положение для команды», чтобы исправить неверный маршрут (рис. 6,в).

Самой проблемной для выполнения оказалась команда «Вниз», которая отправляется с помощью жеста «широко раскрытая ладонь», особенно, когда пользователь использовал ее впервые. После привыкания пользователя к управлению моделью робота трудности в выполнении данной команды практически исчезли.

## ВЫВОДЫ

В данной статье была рассмотрена реализация системы управления мобильным роботом с помощью жестов руки, представлены принципы формирования набора жестов для управления и проектирования набора управляющих команд. Произведена интеграция с моделью в среде ROS2. По итогам тестирования модель распознавания жестов показала высокие результаты точности, в особенности с учетом дообучения для повышения степени индивидуализированности и калибровки под каждого пользователя. Тестирование на модели с участием испытуемых, не имеющих никакого практического опыта управления с помощью ЭМГ-интерфейсов, также прошло успешно. Система управления обеспечивает распознавание жестов и передачу управляющих команд от пользователя роботу в режиме реального времени. Отмечено удобство в использовании. Потенциальными возможностями для развития интерфейса являются расширение набора жестов, интеграция данного интерфейса в качестве одного канала системы управления с несколькими интерфейсами [9–11] и проведение большего количества экспериментов в различных условиях окружающей среды для достижения наибольшей точности при распознавании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gopal P., Gesta A., Mohebbi A. A Systematic Study on Electromyography-Based Hand Gesture Recognition for Assistive Robots Using Deep Learning and Machine Learning Models // *Sensors*, 2022, V. 22. № 10. 3650. DOI: 10.3390/s22103650.
2. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The Decomposition Method of Multichannel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. V. 948. P. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4\_73.
3. Han J.S., Song W.K., Kim J.S., Bang W.C., Lee H., Bien Z. New EMG pattern recognition based on soft computing techniques and its application to control a rehabilitation robotic arm // *Proc. of 6th international*

conference on soft computing (IIZUKA2000), 2000. P. 890–897.

4. *Лобов С.А., Миронов В.И., Кастальский И.А., Казанцев В.Б.* Совместное использование командного и пропорционального управления внешними робототехническими устройствами на основе электромиографических сигналов // *Современные технологии в медицине*. 2015. Т. 7. № 15. С. 30–38.

5. *Reifinger S., Wallhoff F., Ablassmeier M., Poitschke T., Rigoll G.* Static and Dynamic Hand-Gesture Recognition for Augmented Reality Applications // *Human-Computer Interaction. HCI Intelligent Multimodal Interaction Environments*, 2007. V. 4552. P. 728–737. DOI: 10.1007/978-3-540-73110-8\_79.

6. *Исмайлова К.Ш.* Факторы, влияющие на искажение измерительной информации в электромиографии // *Наука, техника и образование*. 2017. №10. С. 21–23.

7. *Zhang X., Huang H.* A real-time, practical sensor fault-tolerant module for robust EMG pattern recogni-

tion // *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2015. V. 12. P. 1–16. DOI: 10.1186/s12984-015-0011-y.

8. *Phinyomark A., Phukpattaranont P., Limsakul C.* Feature reduction and selection for EMG signal classification // *Expert systems with applications*, 2012. V. 39. № 8. P. 7420–7431. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.102.

9. *Gridnev A.A., Voznenko T.I., Chepin E.V.* The decision-making system for a multi-channel robotic device control // *Procedia computer science*, 2018. V. 123. P. 149–154. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.024.

10. *Kim D., Jung H., Shin S.* System and method of controlling mobile robot using inertia measurement unit and electromyogram sensor-based gesture recognition. Patent KR. No. 20170030139, 2015.

11. *Petrova A.I., Voznenko T.I., Chepin E.V.* The Impact of Artifacts on the BCI Control Channel for a Robotic Wheelchair // *Mechanisms and Machine Science (book series)*, 2020. V. 80, P. 105–111. DOI: 10.1007/978-3-030-33491-8\_12.

---

**Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 176–183**

---

## **GESTURE-BASED CONTROL SYSTEM FOR MOBILE ROBOT IN ROS2 ENVIRONMENT**

*V.A. Babanina<sup>1</sup>, A.I. Petrova<sup>1</sup>, T.I. Voznenko<sup>1,\*</sup>*

*<sup>1</sup>Institute of Cyber Intelligence Systems,*

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia*

*\*e-mail: [TIVoznenko@mephi.ru](mailto:TIVoznenko@mephi.ru)*

Received April 21, 2024; revised April 25, 2024; accepted May 14, 2024

The article presents the implementation of a control system for a mobile robot in ROS2 environment using static hand gestures recognized using electromyogram (EMG) signals. The key component of this system is the algorithm for converting raw EMG signal into discrete control commands. In this implementation, the principle of generating control commands to handle mobile robot movement is considered. Also, various characteristics of gestures, such as their complexity of execution and recognition, as well as the degree of physical fatigue of the operator when performing a gesture for a long period of time, have been considered in the design of the command system. Gesture recognition based on data from 2 EMG sensors is implemented using a neural network. The developed control system was integrated with the software interface of the mobile robot in the ROS2 environment. The presented system has shown a high degree of reliability in testing, as well as the convenience of its use by test subjects.

*Keywords:* human-machine interface, electromyography, ROS2, mobile robot, control channel.

### REFERENCES

1. *Gopal P., Gesta A., Mohebbi A.* A Systematic Study on Electromyography-Based Hand Gesture Recognition for Assistive Robots Using Deep Learning and Machine Learning Models. *Sensors*, 2022. Vol. 22. No. 10, 3650. DOI: 10.3390/s22103650.

2. *Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V.* The Decomposition Method of Multi-channel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair. *Advances in Intelligent Systems*

and Computing, 2020, Vol. 948. Pp. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4\_73.

3. *Han J.S., Song W.K., Kim J.S., Bang W.C., Lee H., Bien Z.* New EMG pattern recognition based on soft computing techniques and its application to control a rehabilitation robotic arm. *Proc. of 6th international conference on soft computing (IIZUKA2000)*, 2000. Pp. 890–897.

4. *Lobov S.A., Mironov V.I., Kastal'skij I.A., Kazancev V.B.* Sovmestnoe ispol'zovanie komandnogo i proporcional'nogo upravleniya vneshnimi roboto-

teknicheskimi ustrojstvami na osnove elektromiograficheskikh signalov [Sharing command and proportional control of external robotic devices based on electromyographic signals]. *Sovremennye tekhnologii v medicine*, 2015. Vol. 7. No. 15. Pp. 30–38 (in Russian).

5. *Reifinger S., Wallhoff F., Ablassmeier M., Poitschke, T., Rigoll, G.* Static and Dynamic Hand-Gesture Recognition for Augmented Reality Applications. *Human-Computer Interaction. HCI Intelligent Multimodal Interaction Environments*, 2007. Vol. 4552. Pp. 728–737. DOI: 10.1007/978-3-540-73110-8\_79.

6. *Ismajlova K.Sh.* Faktory, vliyayushchie na iskazhenie izmeritel'noj informacii v elektromiografii [Factors influencing distortion of measurement information in electromyography]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2017. No. 10. Pp. 21–23 (in Russian).

7. *Zhang X., Huang H.* A real-time, practical sensor fault-tolerant module for robust EMG pattern recognition. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2015. Vol. 12. Pp. 1–16. DOI: 10.1186/s12984-015-0011-y.

8. *Phinyomark A., Phukpattaranont P., Limsakul C.* Feature reduction and selection for EMG signal classification. *Expert systems with applications*, 2012. Vol. 39. No. 8. Pp. 7420–7431. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.102.

9. *Gridnev A. A., Voznenko T. I., Chepin E. V.* The decision-making system for a multi-channel robotic device control. *Procedia computer science*, 2018. Vol. 123. Pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.024.

10. *Kim D., Jung H., Shin S.* System and method of controlling mobile robot using inertia measurement unit and electromyogram sensor-based gesture recognition. Patent KR. No. 20170030139, 2015.

11. *Petrova A.I., Voznenko T.I., Chepin E.V.* The Impact of Artifacts on the BCI Control Channel for a Robotic Wheelchair. *Mechanisms and Machine Science* (book series), 2020. Vol. 80. Pp. 105–111. DOI: 10.1007/978-3-030-33491-8\_12.