

УДК 004.032.26+577.352.5+621.865.8
DOI: 10.18799/29495407/2023/2/23

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЧЕЛОВЕКА

Бошляков Андрей Анатольевич,
boshlyakov@bmstu.ru

Жарков Максим Иванович,
m.zharkov.11@gmail.com

Шилов Никита Александрович,
nikita.shilov.2000@inbox.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

В статье проведен обзор различных методов управления манипулятором, аргументирован выбор конкретного метода, исходя из заданных требований к условиям работы, произведен выбор аппаратных средств для реализации метода, а также рассмотрены методы фильтрации задающего сигнала и способы его преобразования в сигнал управления манипулятором.

Ключевые слова: нейросеть, биопотенциал, электромиография, манипулятор.

Введение

Человек обладает феноменальной способностью взаимодействовать с объектами внешнего мира при помощи своих физиологических особенностей. Наличие конечностей, сенсорных механизмов, органов чувств и восприятия и многое другое позволяет человеку чувствовать себя наиболее комфортно в неструктурированной быстроменяющейся среде. Используя свои способности, люди могут точно позиционировать объекты, модулировать силу захвата, а также самостоятельно принимать решения по исполнению какого-либо действия с объектом. На сегодняшний день такой уровень свободного манипулирования над объектами не доступен роботизированным системам. Например, такая простоя на первый взгляд для человека операция, как очистка вареного яйца от скорлупы, может оказаться нерешаемой для робота.

Но в то же время и у человека есть свои слабые места. Человек не способен поднять предмет большого веса, а если и способен, то может нанести вред собственному здоровью. В данной ситуации робототехнические системы можно сконструировать так, как этого требует целевая нагрузка, и у робота не возникнет никаких проблем с ее подъемом и перемещением. Человек не может без дополнительного снаряжения и риска для здоровья работать в местах, загрязненных радиоактивными отходами, в местах с высокой температурой или давлением внешней среды, в местах с неподходящими габаритами. В то же время робот может быть сконструирован таким образом и из таких материалов, что для него работа в подобных условиях не составит особого труда.

Управление манипулятором с помощью джойстиков или клавиш не дает необходимой скорости и точности работы. Поэтому предлагается использовать систему отслеживания движений оператора и воспроизведение его действий манипулятором.

Системы отслеживания действий на основе нателных треков не дают информации о прилагаемом человеком усилии. Системы на основе соматосенсорного управле-

ния вносят неточности и неудобны из-за наличия дополнительных механических систем на теле человека, особенно это проявляется при использовании таких систем в качестве датчиков положения и датчиков прилагаемого кистью усилия. Поэтому предлагается использовать систему нателных датчиков, снимающих показатели непосредственно с мышц человека, что дает информацию как о положении рук спасателя, так и о прилагаемом к объекту усилии. Система может быть построена на основе совместной регистрации электроимпедансного и электромиографического сигнала с одной системы электродов. Такой способ делает возможным организацию антропоморфного управления, пропорционального степени сокращения мышцы человека, с временными задержками не более чем в организме.

Системы управления роботом на основе биосигналов человека могли бы быть использованы в спасательных операциях, где окружающая среда крайне опасна для человека-спасателя.

Обзор существующих органов и методов управления манипуляторами

В первую очередь обозначим область использования и критически необходимые требования, предъявляемые к проектируемой в работе системе.

Область использования: чрезвычайные ситуации; работа с повышенным риском для здоровья и жизни человека.

Выдвигаемые требования к системе и их аргументирование:

1. Быстрая подготовка системы к работе. В условиях чрезвычайной ситуации все действия должны выполняться с максимально возможной скоростью.
2. Удобство в использовании, простота интерфейса управления. Управление системой производится в условиях высоко стресса и нехватки времени, в связи с этим необходимо минимизировать все промежуточные действия, связанные с управлением, которые ложатся на оператора.

3. Точность работы системы, сравнимая с человеческой. Предполагается, что в задачи разрабатываемой робототехнической системы будут входить действия, от которых напрямую зависит жизнь человека (к примеру, оказание первой помощи). Поэтому в данном случае необходим соответствующий уровень точности, чтобы обеспечивать выполнение требуемых операций.
4. Относительно низкая стоимость. В тех случаях, когда покупка какой-либо вспомогательной системы оказывается достаточно дорогой для исполняющей организации, последняя видит более целесообразным поднятие зарплаты рабочему за вредность труда, чем приобретение дорогостоящего устройства. Необходимо минимизировать количество данных случаев путем повышения уровня доступности разрабатываемой системы.

Существующие методы управления робототехническими системами

В статье [1, 2] был проведен детальный обзор существующих методов управления робототехническими системами.

Полностью автоматические системы на данный момент не могут быть использованы в (подумать над тем, что написано про методы, а потом про выводы) задачах, связанных с такими ответственными действиями, как спасение человеческих жизней, поэтому их использование не предполагается.

Биотехнические системы не удовлетворяют условию удаленности оператора относительно места происшествия. Выполнение данного условия необходимо, так как должны обеспечиваться заданные требования по безопасности оператора.

Рассмотрим в качестве целевого метода управления интерактивный (дистанционный) метод управления. Система управления роботом-спасателем предполагает объединение принципов копирующего, полуавтоматического и диалогового управления. Таким образом оператор сможет управлять манипулятором с помощью движения собственной руки, что является наиболее интуитивно понятным интерфейсом управления для человека.

Существующие пульты управления манипулятором

Для управления манипуляторами погрузчиков и промышленными манипуляторами используют пульты с клавишами, джойстиками, сенсорными экранами и многофункциональными задающими рукоятками [3, 4].

Такие пульты используют при следующих операциях: сварка, укладка на паллеты, окраска, ушивание, лазерная резка и другие. Джойстики или сенсорные экраны позволяют быстро переместить манипулятор, но точно контролировать положение с их помощью трудно. С помощью клавиш можно задавать координаты. Такие варианты удобны на производстве, но не подходят в случае необходимости управления каждой частью манипулятора отдельно.

В качестве пульта используют и шаровой манипулятор [5]. Такой способ подходит только для выбора заранее предусмотренных действий и программ и не подходит для управления манипулятором напрямую.

Для управления манипулятором также используют экзоскелетные системы [6]. Преимущества такой системы – точность, скорость, обратная связь по усилию. Но также есть и недостатки: высокая цена, ограниченные углы поворота руки, долгая подготовка к работе, скованность движений.

В связи с недостатками рассмотренных органов управляющие сигналы планируется получать непосредственно с рук оператора, а именно с тактильных датчиков.

Выбор датчиков фиксации движения

В настоящее время проводятся эксперименты по управлению манипулятором с помощью VR-технологий. При использовании контроллеров управление получается достаточно точным, но руки оператора должны быть свободны для имитации захвата окружающих манипулятор предметов [7]. При использовании базовых станций оператор сможет захватывать предметы руками, но точность определения положения рук будет недостаточной в связи с ограниченной разрешающей способностью камер. К тому же в таком случае может присутствовать эффект перекрытия рук предметами или самими руками.

Поэтому, как было сказано ранее, комплект датчиков должен находиться на теле оператора, при этом не сковывать движения и определять прилагаемые усилия. Рассмотрим датчики, которые можно применить в системе [8–10].

Датчики ускорения, или акселерометры [11], – приборы, измеряющие проекцию кажущегося ускорения (разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением). По конструктивному исполнению акселерометры подразделяются на однокомпонентные, двухкомпонентные, трёхкомпонентные, соответственно, и позволяют измерять ускорение вдоль одной, двух и трёх осей. Плюсами таких датчиков являются малые размеры, малая стоимость, небольшое количество проводов для подключения.

Датчики, измеряющие электрические сигналы человека:

1. Электроэнцефалограф в основном представлены в виде шлемов с большим количеством электродов, крепящихся к коже головы. Долгое обучение, большое количество проводов, малая точность определения необходимого действия, сложность крепления электродов делают их неприменимыми в проектируемой системе.
2. Электромиографический датчик удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системе. С помощью электродов электромиограф получает сигнал непосредственно с мышцы человека. Для подключения требуется небольшое количество проводов.
3. Датчик электроимпедансной активности мышц имеет компактные размеры, легок и не сковывает движения. Датчик измеряет комплексное сопротивление мышцы, на основе этих данных можно определить степень сжатия мышцы и физический размер мышцы, а следовательно, и положение части руки.

Электромиографический и электроимпедансный датчики можно применять вместе, так как оба устройства могут использоваться одни и те же тактильные электроды. В таком случае будет представлена информация и о положе-

нии рук оператора, и о прилагаемом усилии. При этом количество нательных элементов практически не увеличивается, но сильно повышается точность и объем данных.

Совместно с биодатчиками предполагается использовать акселерометры для упрощения вычислений точного положения рук оператора, а также для уменьшения количества биодатчиков. Крепить их можно непосредственно на электроды датчиков электромиографической и электроимпедансной активности, что не изменит степень удобства устройства и скорость подготовки к выполнению операций.

Фильтрация задающего сигнала

Сигналы, снимаемые с кожи человека, сильно зашумлены. Следовательно, необходима их фильтрация. Наиболее подходящими могут быть: фильтр на основе персептрона [12], согласованный фильтр или гребенчатый фильтр. Согласованный фильтр обеспечивает максимальное отношение сигнал/шум в случае, если фильтр согласован с полезным сигналом, где вид полезного сигнала может быть получен на основе нейросети [13]. При известных максимальных и минимальных значениях входных параметров согласованный фильтр работает намного лучше, чем нейронные сети, но, когда параметры не известны или могут варьироваться, целесообразно использовать нейросетевые фильтры. С помощью гребенчатого фильтра можно обеспечить несколько полос пропускания с необходимыми частотами. При совместном использовании гребенчатого и нейросетевого фильтра можно контролировать сдвиг фазы для получения наиболее предпочтительной полосы пропускания [14, 15].

Обработка входного сигнала

После определения снимаемого сигнала необходимо задать соответствие между ним и управляющим воздействием по перемещению звеньев манипулятора в пространстве. В случае управления с помощью биоэлектрических сигналов человека невозможно однозначно определить функцию, связывающую входную и выходную

величину. Принято решение использовать для этой цели искусственные нейронные сети (ИНС).

Биоэлектрический сигнал представляет собой распространяющуюся во времени функцию. Ее первичная обработка – фильтрация и извлечение полезного сигнала. Далее при применении преобразования Фурье к обработанному сигналу он принимает вид многомерного тензора. Подобный входной сигнал можно обрабатывать сверточными нейронными сетями [16–18].

Другой подход к обработке сигнала – различные математические операции над сигналом с целью получения числовой характеристики (усреднение, аппроксимация и т. д.). Так обработку проходят несколько сигналов, снимаемых с оператора (биоэлектрический, биоэмпедансный и т. д.).

В конечном итоге на первом этапе обработки входного сигнала мы получаем задающий вектор характеристик, с которым необходимо сопоставить выходной вектор – вектор перемещения звеньев манипулятора. Для этого необходимо решить задачи препроцессинга данных, поиска подходящей архитектуры нейронной сети и определения качества ее работы.

На рисунке продемонстрирована последовательность обработки и преобразований данных.

Опишем этапы преобразования сигнала от входа к выходу по схеме, представленной на рисунке. Электрические импульсы, продуцируемые человеком в момент движения и нагрузки руки, фиксируются соответствующими нательными датчиками. Полученный сигнал проходит этап предобработки (фильтрации), после чего формируется вектор входного воздействия – задающий вектор, состоящий из значений сигналов, снятых с определенной частотой дискретизации. Полученный вектор поступает на вход обученной модели ИНС, которая решает задачу поиска скрытой зависимости. Полученный вектор является управляющим. Его значения после преобразований поступают на соответствующие звенья манипулятора (или модель манипулятора в среде симулирования). Таким образом осуществляется процесс управления.



Рисунок. Преобразование данных

Figure. Data conversion

Заключение

Был проведен обзор существующих методов управления манипуляционными роботами для определения наиболее подходящих, а также обзор органов управления манипуляционными роботами; оценены их преимущества и недостатки. Принято решение, что система управления манипулятором должна включать в себя пульт на основе нательных биодатчиков и датчиков положения в пространстве рук оператора.

Проведен обзор существующих датчиков, способных определять кинематическое состояние объекта, а также биодатчиков. Оценены их достоинства, недостатки и об-

ласти применения, что позволило определить предварительный набор датчиков, целесообразный для дальнейшего проектирования системы управления манипулятором на основе биосигналов человека с контролем прилагаемого усилия.

Выдвинута гипотеза по внедрению ИНС в систему управления.

В дальнейшей работе планируется провести сбор данных на тестовом стенде для обучения ИНС. Далее будут проведены оценочные мероприятия работы алгоритмов ИНС с целью их внедрения в реальные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные понятия и терминология в области манипуляторов // Строй-Техника.ру. URL: <https://stroy-technics.ru/article/osnovnyeponyatiya-i-terminologiya-v-oblasti-manipulyatorov> (дата обращения: 21.04.2023).
2. Робототехника в особых условиях, дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. URL: <http://roboticslib.ru/books/item/f00/s00/z0000033/st014.shtml> (дата обращения: 21.04.2023).
3. Пульт управления Szgh для робота 8-осного манипулятора для промышленного применения. URL: https://ru.made-in-china.com/co_szghauto/product_Szgh-Teach-Pendant-of-8-Axis-Robot-Arm-for-Industrial-Welding-Machine-Assembly-Robot-or-Educational-Robotic-Arm_uosiuhsieu.html (дата обращения: 21.04.2023).
4. Как можно расширить функционал кран-манипулятора? (часть 1: Дистанционное радиоуправление). URL: <http://service-palfinger.ru/blog/194/> (дата обращения: 21.04.2023).
5. Акционерное Общество Научно-Производственное Предприятие «Рубин». URL: <http://www.npp-rubin.ru/m/catalog/sredstva-vt-i-specialnye-moduli/pult-distancionnogo-upravleniya-operatora-mnogofunkcionalnyi> (дата обращения: 21.04.2023).
6. Перчатка-экзоскелет // Festo. URL: https://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/perchatkaekzoskelet_usilit_uku_v_sotni_raz (дата обращения: 21.04.2023).
7. Управление ТНПА и роботизированным манипулятором с помощью технологий виртуальной реальности // VRLAB. URL: <http://vrlab.smtu.ru/project/manipulator> (дата обращения: 21.04.2023).
8. Классификация датчиков, основные требования к ним. URL: http://www.electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm (дата обращения: 21.04.2023).
9. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений. URL: https://tp.prosoft.ru/docs/shared/webdav_bizproc_history_get/141826/141826/ (дата обращения: 21.04.2023).
10. Преобразователи скорости на основе СКБТ. URL: <https://studfile.net/preview/2396678/page:68/> (дата обращения: 21.04.2023).
11. Акселерометр // Национальная библиотека им. Н.Э. Баумана. URL: <http://www.sensorica.ru/d10.shtml> (дата обращения: 21.04.2023).
12. Айзикович А.А., Усынин А.Ю. Применение персептрона в цифровой фильтрации сигналов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-perseptrona-v-tsifrovoy-filtratsii-signalov/viewer> (дата обращения: 21.04.2023).
13. Сравнение методов распознавания сигналов. Нейронные сети против согласованного фильтра. URL: <https://habr.com/ru/post/318886/> (дата обращения: 21.04.2023).
14. Гребенчатый фильтр // PROAVTODAY. URL: https://www.proavtoday.ru/theory/sound_systems/comb-filter/ (дата обращения: 21.04.2023).
15. Мониторинг задержки при проведении онлайн-видеотрансляций и телемостов. URL: <https://habr.com/ru/post/267269/> (дата обращения: 21.04.2023).
16. Сверточные нейронные сети. URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Сверточные_нейронные_сети (дата обращения: 21.04.2023).
17. Pham Van Cuon, Wang Yao Nan. Adaptive trajectory tracking neural network control with robust compensator for robot manipulators // Neural Computing and Applications. – 2015. – № 27 (2). DOI: 10.1007/s00521-015-1873-4
18. What is an encoder decoder model? URL: <https://towardsdatascience.com/what-is-an-encoder-decoder-model-86b3d57c5e1a> (дата обращения: 21.04.2023).

Дата поступления: 30.06.2023

Дата принятия: 20.10.2023

Информация об авторах

Бошляков А.А., кандидат технических наук, доцент кафедры СМ7 Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Жарков М.И., магистрант Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Шилов Н.А., магистрант Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

UDC 004.032.26+577.352.5+621.865.8

DOI: 10.18799/29495407/2023/2/23

MANIPULATOR CONTROL SYSTEM BASED ON HUMAN BIOELECTRIC SIGNALS

Andrey A. Boshlyakov,
boshlyakov@bmstu.ru

Maksim I. Zharkov,
m.zharkov.11@gmail.com

Nikita A. Shilov,
nikita.shilov.2000@inbox.ru

Bauman Moscow State Technical University,
2nd Baumanskaya street, 5, bld. 1, Moscow, 105005, Russia.

The article provides an overview of various methods of manipulator control, gives the reason of selecting a specific method based on the certain requirements for working conditions. The authors selected the hardware for the method implementation and considered the methods of filtering the master signal, as well as the ways of converting it into a manipulator control signal.

Key words: neural network, biopotential, electromyography, manipulator.

REFERENCES

1. Osnovnye ponyatiya i terminologiya v oblasti manipulyatorov [Basic concepts and terminology in the field of manipulators]. *Stroy-Tekhnika.ru*. Available at: <https://stroy-technics.ru/article/osnovnye-ponyatiya-i-terminologiya-v-oblasti-manipulyatorov> (accessed 21 April 2023).
2. Robototekhnika v osobyykh usloviyakh, dstantsionno upravlyaemye roboty i manipulyatory [Robotics in special conditions, remotely controlled robots and manipulators]. Available at: <http://roboticslib.ru/books/item/f00/s00/z0000033/st014.shtml> (accessed 21 April 2023).
3. Pult upravleniya Szgh dlya robota 8-osnogo manipulyatora dlya promyshlennogo primeneniya [Szgh Control Panel for 8-Axis Robot Arm for Industrial Application]. Available at: https://ru.made-in-china.com/co_szghauto/product_Szgh-Teach-Pendant-of-8-Axis-Robot-Arm-for-Industrial-Welding-Machine-Assembly-Robot-or-Educational-Robotic-Arm_uosiuhsu.html (accessed 21 April 2023).
4. Kak mozno rasshirit funktsional kran-manipulyatora? (chast 1: Dstantsionnoe radioupravlenie) [How can you expand the functionality of the crane? (Part 1: Radio Remote Control)]. Available at: <http://service-palfinger.ru/blog/194/> (accessed 21 April 2023).
5. Aktsionernoe Obshchestvo Nauchno-Proizvodstvennoe Predpriyatie «Rubin» [Joint Stock Company Scientific and Production Enterprise "Rubin"]. Available at: <http://www.npp-rubin.ru/m/catalog/sredstva-vt-i-specialnye-moduli/pult-distancionnogo-upravleniya-operatora-mnogofunktsionalnyi> (accessed 21 April 2023).
6. Perchatka-ekzoskelet [Exoskeleton glove]. *Festo*. Available at: https://zoom.cnews.ru/md/news/line/perchatkaekzoskelet_usilit_ruku_v_sotni_raz (accessed 21 April 2023).
7. Upravlenie TNPA i robotizirovannym manipulyatorom s pomoshchyu tekhnologii virtualnoy realnosti [Control of ROV and robotic manipulator using virtual reality technologies]. *VRLAB*. Available at: <http://vrlab.smtu.ru/project/manipulator> (accessed 21 April 2023).
8. Klassifikatsiya datchikov, osnovnye trebovaniya k nim [Classification of sensors, basic requirements for them]. Available at: http://www.electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm (accessed 21 April 2023).
9. Metody obrabotki signalov induktivnykh datchikov lineynykh i uglovyykh peremeshcheniy [Methods for processing signals from inductive linear and angular displacement sensors]. Available at: https://tp.prosoft.ru/docs/shared/webdav_bizproc_history_get/141826/141826/ (accessed 21 April 2023).
10. Preobrazovateli skorosti na osnove SKVT [Speed converters based on SKVT]. Available at: <https://studfile.net/preview/2396678/page:68/> (accessed 21 April 2023).
11. Akselerometr [Accelerometer]. *Natsionalnaya biblioteka im. N.E. Bauman* [National Library named after N.E. Bauman]. Available at: <http://www.sensorica.ru/d10.shtml> (accessed 21 April 2023).
12. Ayzikov A.A., Usynin A.Yu. *Primenenie perseptrona v tsifrovoy filtratsii signalov* [Application of a perceptron in digital signal filtering]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenienie-perseptrona-v-tsifrovoy-filtratsii-signalov/viewer> (accessed 21 April 2023).
13. *Sravnenie metodov raspoznavaniya signalov. Neyronnye seti protiv soglasovannogo filtra* [Comparison of signal recognition methods. Neural networks versus a matched]. Available at: <https://habr.com/ru/post/318886/> (accessed 21 April 2023).
14. *Grebentatnyy filtr* [Comb filter]. *PROAVTODAY*. Available at: https://www.proavtoday.ru/theory/sound_systems/comb-filter/ (accessed 21.04.2023).
15. *Monitoring zaderzhki pri provedenii onlayn-videotranslyatsiy i telemostov* [Monitoring latency during online video broadcasts and teleconferences]. Available at: <https://habr.com/ru/post/267269/> (accessed 21 April 2023).
16. *Svertochnye neyronnye seti* [Convolutional neural networks]. Available at: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Convolutional_neural_networks (accessed 21 April 2023).
17. Pham Van Cuon, Wang Yao Nan. Adaptive trajectory tracking neural network control with robust compensator for robot manipulators. *Neural Computing and Applications*, 2015, no. 27 (2). DOI: 10.1007/s00521-015-1873-4
18. *What is an encoder decoder model?* Available at: <https://towardsdatascience.com/what-is-an-encoder-decoder-model-86b3d57c5e1a> (accessed 21 April 2023).

Received: 30 June 2023.
Reviewed: 20 October 2023.

Information about the authors

Andrey A. Boshlyakov. Cand. Sc., associate professor, Bauman Moscow State Technical University.

Maksim I. Zharkov, master's student, Bauman Moscow State Technical University.

Nikita A. Shilov, master's student, Bauman Moscow State Technical University.