

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2019-8-49-57>

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОЗДАВАЕМЫХ ПО ОБРАЗУ ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Масленников А.Л., Щербак О.Ю.

Ключевые слова: биотехнические системы, бионический подход, системы управления, интеллектуальное управление, экспертные системы, человеко-машинные системы, экзоскелеты, инженерно-физиологические системы.

Аннотация. В статье рассматриваются сложности разработки и перспективы развития различных типов биотехнических систем, связанных с двигательной системой человека. В результате анализа обосновывается, что наиболее важными направлениями для улучшения биотехнических систем являются получение математических моделей, обладающих достаточно высокой степенью подобия соответствующей физиологической системе, а также формирование методов и критериев для интеллектуализации подобных систем. Другими словами, в управление требуется включение механизмов принятия решений в ответ на действия человека или механизмов интеллектуальной экспертной оценки состояния физиологической системы.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF BIOTECHNICAL SYSTEMS DESIGNED BASED ON THE HUMAN MOTOR SYSTEM

Maslennikov A.L., Scherbak O.Yu.

Keywords: biotechnical systems, bionics, control systems, intelligent control systems, expert systems, man-machine systems, exoskeleton, engineering-physiological systems.

Abstract. The article discusses the existing difficulties in developing various types of biotechnical systems, based on the dynamics of the human motor system, as well as the prospects for their development. As a result of the analysis, it is concluded that the most important areas for improving of biotechnical systems are following: determination of mathematical models that have a fairly high degree of similarity to the corresponding physiological system, as well as the design of methods and criteria for such systems intellectualization. In other words, the control system requires the inclusion of decision-making mechanisms in response to human actions or the mechanisms of intellectual expert assessment of the physiological system condition.

Введение

В последние десятилетия активно ведутся разработки биотехнических систем различного назначения, которые, как правило, либо непосредственно проектируются по образу физиологической системы, т.е. на основе бионического подхода, либо должны учитывать поведение физиологической системы в составе технической системы [1, 2]. Необходимость подобных систем очевидна – они помогают улучшить качество жизнедеятельности или повысить точность диагностики возможных заболеваний у человека. Особый интерес представляют биотехнические системы, разрабатываемые по образу двигательной системы человека.

Подобные биотехнические системы можно классифицировать по трем основным видам: человеко-машинные системы, экзоскелеты и инженерно-физиологические системы [3]. В человеко-машинных системах человек находится в контуре управления и непосредственно влияет своими

движениями на функционирование всей системы в режиме реального времени. Экзоскелеты или экзопротезы – это технические системы, которые управляются по сигналам, снимаемым с человека в режиме реального времени (как правило, с использованием электромиографии, механомиографии, электрокардиографии, электроэнцефалографии или различных систем захвата движения). Инженерно-физиологические системы осуществляют сбор и анализ данных, могут включать механизмы экспертной оценки состояния физиологической системы.

Каждая из данных систем строится по своим принципам, но обязательно состоит из аппаратной и программной частей. В данной статье рассматриваются основные проблемы, стоящие на пути развития биотехнических систем, а также описываются перспективные направления развития аппаратной и программной частей биотехнических систем, создаваемых по образу двигательной системы человека.

Примеры рассматриваемых биотехнических систем

Человеко-машинные системы. Достаточно часто эти системы называют системами человек-оператор, тем не менее, в системах человек-оператор человек влияет на работу системы опосредовано и непостоянно, только когда в этом есть необходимость, например оператор станка с ЧПУ [4]. Примером же человеко-машинных систем может служить система управления пилотируемым летательным аппаратом, где пилот непосредственно своими действиями управляет движением технической системы [5]. В данных системах, как правило, техническая часть достаточно хорошо проработана, но слабо развит контроль действий человека и их влияние на техническую часть системы. Другими словами, в человеко-машинных системах управление должно обеспечивать гарантированное качество работы всей системы при условии наличия некорректных или неправильных действий человека, учитывая особенности его динамики, например запаздывание, обусловленное временем на принятие решений. На текущий момент подобное управление реализуется с использованием достаточно жестких – не интеллектуальных критериев, использование которых затруднено в виду отсутствия достаточно адекватной математической модели поведения человека. в составе биотехнической системы [6-8].

Экзоскелеты. Примерами экзоскелетов могут служить биотехнические системы, которые помогают человеку поднимать и переносить грузы большой массы или обеспечивают двигательную функцию в процессе реабилитации после травм или в случае паралича [9-11]. В случае экзопротезов речь идет о полной замене ампутированной конечности. Оба типа систем объединяет одно – управление должно строиться таким образом, чтобы наиболее точно повторять динамику двигательной системы человека или ее отдельных элементов, а как следствие, управление должно формироваться с использованием математических моделей высокой степени подобия физиологической системы.

Инженерно-физиологические системы. Примером подобных систем могут служить системы, целью функционирования которых является определение и анализ двигательной активности [12, 13]. Помимо этого, к данному классу можно отнести биотехнические системы, реализующие процесс и контроль реабилитации пациентов, например, перенесших инсульт [14]. Еще одним примером инженерно-физиологических систем можно считать системы экспертной диагностики состояния человека или оценки эффективности тренировок спортсменов [15-16]. Однако, на текущий момент подобных полностью функционирующих систем не существует, точнее для этих систем интеллектуальная часть, формирующая экспертную оценку, реализована в достаточно простом виде [17-18]. Отметим также, что для использования методов интеллектуальной экспертной оценки, как и в предыдущих случаях, требуется знание математических моделей, описывающих динамику физиологической системы.

Таким образом, можно констатировать, что на сегодняшний день управление в биотехнических системах реализуется за счет достаточно простых методов теории управления, где задача синтеза решается с целью получения заданных технических характеристик работы системы, например по быстродействию или по точности, как правило, в предположении, что система линейная и стационарная. Другими словами, формируемая система управления не имеет достаточно высокой степени подобия физиологической системе. Помимо этого, необходима разработка интеллектуальных критериев для полноценного функционирования экспертных систем диагностики состояния физиологических систем человека, а также соответствующих методов формирования управляющих воздействий.

Перспективы развития аппаратной части

Улучшение аппаратной части может быть достигнуто за счет использования новых материалов – облегчающих вес конструкции, ее эргономичность; новых исполнительных устройств, обеспечивающих точность и быстродействие, сопоставимые с характеристиками физиологической системы; датчиков, реализующих более точные измерения. Однако, даже без этих улучшений, структуру и компонентный состав аппаратной части можно считать сформировавшимися и обеспечивающими функционирование подобных систем на достаточно высоком уровне. Стоит отметить, что процесс разработки аппаратной части для многозвенных (многоэлементных) биотехнических систем достаточно высок, но в первую очередь связан со сложностью реализации управления всей системой.

Перспективы развития программной части

Развитие программной части биотехнических систем, создаваемых по образу двигательной системы человека, может быть направлено на разработку более совершенных методов управления, делающих работу биотехнической системы сопоставимой с работой физиологической системы. Другими

словами, требуется разработка новых систем управления, в которых управление формируется на основе бионического подхода, т.е. по тем же алгоритмам и подходам, как это реализовано природой в человеке. Для этого необходимо получение математических моделей, описывающих динамику физиологической системы. Очевидно, что получение точных моделей в данном случае невозможно, а речь идет о математических моделях, обладающих достаточной степенью адекватности, позволяющей сравнивать поведение биотехнической и физиологической систем.

Для определения математических моделей используют методы теории идентификации, в частности методы структурно-параметрической идентификации [19]. Соответствующие теоретические положения теории идентификации, принципиально, достаточно хорошо проработаны, хотя и могут потребовать доработки для случая идентификации непрерывных динамических систем, в том числе с заданными типами нелинейностей. Отметим, что для решения задачи идентификации используют инженерно-физиологические системы, включающие в себя систему сбора и алгоритмы обработки экспериментальных данных.

Тем не менее? для решения задачи структурно-параметрической идентификации остается открытым вопрос о разработке математических моделей-кандидатов, описывающих динамику физиологической системы, структура и параметры которой должны иметь определенную связь физиологической системой (например, жесткость и демпфирование в суставе, наличие блока описывающего динамику мышцы и др.). Разработка подобных моделей-кандидатов ведется достаточно давно, а их адекватность подтверждается сравнением результатов моделирования с результатами практического эксперимента [20-21]. Однако, как правило, эти модели линейные и стационарные, что существенно снижает их степень адекватности.

При разработке систем управления биотехническими системами необходимо учитывать механизмы адаптации и обучения, которые присутствуют у человека [22]. Характер механизмов адаптации весьма сложен и включает в себя несколько уровней, формализация которых на текущий момент весьма затруднительна [23]. Механизмы обучения можно реализовывать, используя методы машинного обучения [24-25]. Под обучением в данном случае понимается формирование, запоминание и реализация, так называемых, шаблонов движений, т.е. движений, которым человек научился и постоянно повторяет, например ходьба [26-27]. Определение шаблонов движений можно реализовать с помощью комбинации систем захвата движения и методов машинного обучения, теории оценивания и теории идентификации. Однако, для получения системы управления биотехнической системы наиболее близкой по динамике к физиологической, процесс обучения должен быть реализован в виде непрерывного функционирования – в режиме реального времени, что потребует детальной

доработки соответствующих методов, в том числе и включение в состав управления интеллектуальной составляющей.

Отдельно стоит упомянуть о разработке экспертных систем оценки диагностики состояния пациента или определения характеристик его двигательной активности, например, для оценки эффективности беговых тренировок. Основной сложностью данных разработок будет необходимость формирования методов и критериев принятия решений с интеллектуальной составляющей, учитывая многокритериальность задачи, обусловленную физиологией.

Заключение

В работе рассмотрены примеры биотехнических систем, создаваемых по образу двигательной системы человека, приведены основные сложности разработки этих систем. Во-первых – это отсутствие математических моделей, обладающих достаточно большой степенью подобия физиологической системе, а во-вторых, достаточно слабая проработка методов интеллектуализации рассматриваемых технических систем. В качестве перспектив развития подобных систем можно выделить следующие направления научных исследований, а именно: получение новых математических моделей, обладающих большой степенью адекватности, а также разработка методов интеллектуального управления или интеллектуальных критериев экспертной оценки диагностики состояния физиологической системы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор №13174ГУ/2018 от 24.05.2018).

Список литературы

1. Анохин П.К. Избранные труды: Кибернетика функциональных систем. М.: Медицина, 1998. 400 с.
2. Ершов Ю.А., Щукин С.И. Основы анализа биотехнических систем. Технические основы БТС: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 526 с.
3. Ахутин В.М., Немирко А.П., Першин Н.Н. и др. Биотехнические системы. Теория и проектирование. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. 204 с.
4. Пшеничный А.В., Соловьев В.Л. К вопросу об информационном взаимодействии в интерфейсе “человек-оператор - система управления” станком с ЧПУ // Материалы секционных заседаний 54-й студенческой научно-технической конференции ТОГУ. 2014. С. 155-160.
5. Жетов С.Ю., Себряков Г.Г. Моделирование многофункциональной деятельности человека-оператора при управлении летательным аппаратом

- // Сборник статей. Передача, приём, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах. 2016. С. 266-275.
6. Себряков Г.Г. Характеристики деятельности человека-оператора в динамических системах слежения и наведения летательных аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. Вып. 11. С. 2-8.
 7. Суворов Н.Б., Фролова Н.Л. Компьютерные системы оценки состояния человека-оператора в системах управления летательными аппаратами. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2005. 31 с.
 8. Бурлак Е.А., Набатчиков А.М. Полунатурный исследовательский стенд для оценивания характеристик деятельности человека-оператора при управлении дистанционно-пилотируемым летательным аппаратом // Труды МАИ. 2013. Вып. 68. 4 с.
 9. Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С. и др. Экзоскелеты: управление движением экзоскелета нижних конечностей при ходьбе. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2016. 190 с.
 10. Воробьев А.А., Петрухин А.В., Засыпкина О.А. и др. Экзоскелет как новое средство в реабилитации и реабилитации инвалидов (обзор) // Современные технологии в медицине. 2015. Вып. 2. С. 185-197.
 11. Котов С.В., Гурбина Л.Г., Бобров П.Д. и др. Применение комплекса "интерфейс "мозг - компьютер" и экзоскелет" и техники воображения движения для реабилитации после инсульта // Альманах клинической медицины. 2015. Вып. 39. С. 15-21.
 12. Князь В.А. Оптическая система захвата движения для анализа и визуализации трехмерных процессов // ГРАФИКОН'2015: труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции. 2015. С. 232-236.
 13. Гайниязов И.М., Обабков И.Н., Хлебников Н.А. Метод захвата движений как средство естественного интерфейса // ГРАФИКОН'2017: Труды 27-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению. 2017. С. 193-196.
 14. Щербак О.Ю., Масленников А.Л., Задорожная Н.М. Прототип стенда для исследования объема движения лучезапястного сустава // Политехнический молодежный журнал МГТУ имени Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2018. Вып. 5. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-5-315.
 15. Цыганкова И.С., Масленников А.Л., Задорожная Н.М. Прототип системы для оценки эффективности беговых тренировок // Политехнический молодежный журнал МГТУ имени Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2018. Вып. 6. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-6-337.
 16. Прилуцкий Д.А., Тележинский А.И., Устинов А.О. Оценка функционального состояния спортсменов методом беспроводной регистрации альфа-ритмов мозга // Научная жизнь. 2011. Вып. 4. С. 46-52.
 17. Греченева А.В., Константинов И.С., Кузичкин О.Р. Алгоритмическое обеспечение системы диагностики опорно-двигательного аппарата на базе

- акселерометрических гониометров // Информационные системы и технологии. 2016. Вып. 6. С. 62-69.
18. Антонова Н.Е., Большаков А.А., Киселев В.В., Лобанов В.В. Применение гибридной интеллектуальной системы поддержки принятия решений в стабиллометрии // Вестник тамбовского государственного технического университета. 2014. Вып. 2. С. 235-243.
 19. Ljung L. System Identification: Theory for the User. Prentice Hall: 2 edition, 1999. 640 p.
 20. Maslennikov A.L. Robust Analysis and Control Design of the Head-Neck System (Master's thesis). Available at: <https://d.lib.msu.edu/etd/2194>
 21. Peterson B.W., Choi H., Hain T., Keshner E., Peng G.C.Y. Dynamic and Kinematic Strategies for Head Movement Control // The Vestibular Labyrinth in Health and Disease, 2001, vol. 942, p. 381-393.
 22. Шмидт Р. и др. Физиология человека: В 3-х томах. / Пер. с англ. под редакцией П.Г. Костюка. М.: Мир, 1996.
 23. Nikolaidis S. Mathematical models of adaptation in human-robot collaboration: PhD Thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, December, 2017.
 24. Bishop Christopher M. Pattern Recognition Machine Learning. Springer, 2006, 738 p.
 25. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / Пер. с англ. А.А. Слинкина – М.: ДМК Пресс, 2015, 400 с.
 26. Ivanenko Y.P., Dominici N., Daprati E., Nico D., Cappellini G., Lacquaniti F. Locomotor body scheme // Human Movement Science, vol. 30, issue 2, April 2011, p. 341-351.
 27. Zelik K.E., La Scaleia V., Ivanenko Y.P., Lacquaniti F. Can modular strategies simplify neural control of multidirectional human locomotion? // Journal of Neurophysiology, 2014, vol. 11, issue 8, p. 1686-1702.

References

1. Anokhin P.K. Selected Works: Cybernetics of Functional Systems. Moscow: Medicine, 1998, 400 p.
2. Ershov Yu.A., Schukin S.I. Fundamentals of the analysis of biotechnological systems. Technical basics of BTS: a training manual. Moscow: Publishing house of MSTU. N.E. Bauman, 2001, 526 p.
3. Akhutin V.M., Nemirko A.P., Pershin N.N. and other Biotechnical systems. Theory and design. Orenburg: GOU OGU, 2008, 204 p.
4. Pshenichny A.V., Soloviev V.L. On the issue of information interaction in the "human-operator-control system" interface with a CNC machine // Materials of breakout sessions of the 54th student scientific and technical conference of the Pacific National University. 2014, pp. 155-160.
5. Zhetov S.Yu., Sebyakov G.G. Modeling the multifunctional activity of a human operator when controlling an aircraft // Collection of articles.

- Transmission, reception, processing and display of information about fast processes, 2016, pp. 266-275.
6. Sebyakov G.G. Characteristics of the human operator in dynamic tracking and guidance systems of aircraft // *Bulletin of computer and information technologies*. 2007, no. 11, pp. 2-8.
 7. Suvorov N.B., Frolova N.L. Computer systems for assessing the state of a human operator in aircraft control systems. Saint Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2005, 31 p.
 8. Burlak EA, Nabatchikov A.M. A semi-natural research stand for evaluating the characteristics of a human operator when controlling a remotely piloted aircraft // *Transactions of MAI*. 2013, no. 68, 4 p.
 9. Yatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S. et al. Exoskeletons: controlling the movement of the exoskeleton of the lower extremities when walking. Kursk: University Book Closed Joint-Stock Company, 2016, 190 p.
 10. Vorobyov A.A., Petrukhin A.V., Zasyapkina O.A. et al. Exoskeleton as a new tool in the rehabilitation and rehabilitation of persons with disabilities (review) // *Modern technologies in medicine*, 2015, no. 2, pp. 185-197.
 11. Kotov S.V., Gurbina L.G., Bobrov P.D. et al. Application of the “brain – computer” and exoskeleton interface complex and motion imagination techniques for rehabilitation after a stroke // *Clinical Medicine Almanac*, 2015, no. 39, pp. 15-21.
 12. Knyaz' V.A. Optical motion capture system for analysis and visualization of three-dimensional processes. GRAFIKON'2015: Proceedings of the 25th Anniversary International scientific conference, 2015, pp. 232-236.
 13. Gainiyarov I.M., Obabkov I.N., Khlebnikov N.A. The method of motion capture as a means of a natural interface // *GRAFIKON'2017: Proceedings of the 27th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision*, 2017, pp. 193-196.
 14. Scherbak O.Yu., Maslennikov A.L., Zadorozhnaya N.M. Prototype of the stand for study range of motion of a wrist joint // *Polytechnic youth herald of the Bauman Moscow State Technical University*, 2018, vol. 5. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-5-315.
 15. Tsygankova I.S., Maslennikov A.L., Zadorozhnaya N.M. Prototype of the system for monitoring running effectiveness // *Polytechnic youth herald of the Bauman Moscow State Technical University*, vol. 6. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-6-337.
 16. Prilutsky D.A., Telezhinsky A.I., Ustinov A.O. Assessment of the functional state of athletes by the method of wireless recording of alpha-rhythms of the brain // *Scientific Life*, 2011, vol. 4, pp. 46-52.
 17. Grecheneva A.V., Konstantinov I.S., Kuzichkin O.R. Algorithmic support of the diagnostic system of the musculoskeletal system based on accelerometer goniometers // *Information Systems and Technologies*, 2016, no. 6, pp. 62-69.

18. Antonova N.E., Bolshakov A.A., Kiselev V.V., Lobanov V.V. Application of a hybrid intelligent decision support system in stabilometry // Bulletin of the Tambov State Technical University, 2014, no. 2, pp. 235-243.
19. Ljung L. System Identification: Theory for the User. Prentice Hall: 2 edition, 1999, 640 p.
20. Maslennikov A.L. Robust Analysis and Control Design of the Head-Neck System (Master's thesis). Available at: <https://d.lib.msu.edu/etd/2194>
21. Peterson B.W., Choi H., Hain T., Keshner E., Peng G.C.Y. Dynamic and Kinematic Strategies for Head Movement Control // The Vestibular Labyrinth in Health and Disease, 2001, vol. 942. pp, 381-393.
22. Schmidt R. et al. Human physiology: In 3 volumes. / Translation from English edited by P.G. Kostyuk. Moscow: Mir, 1996.
23. Nikolaidis S. Mathematical models of adaptation in human-robot collaboration: PhD Thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, December, 2017.
24. Bishop Christopher M. Pattern Recognition Machine Learning. Springer, 2006, 738 p.
25. Flach P. Machine learning. Science and the art of constructing algorithms that extract knowledge from data. Translation from English edited by A.A. Slinkina - Moscow.: DMK Press, 2015, 400 p.
26. Ivanenko Y.P., Dominici N., Daprati E., Nico D., Cappellini G., Lacquaniti F. Locomotor body scheme // Human Movement Science, vol. 30, issue 2, April 2011, pp. 341-351.
27. Zelik K.E., La Scaleia V., Ivanenko Y.P., Lacquaniti F. Can modular strategies simplify neural control of multidirectional human locomotion? // Journal of Neurophysiology, 2014, vol. 11, issue 8, pp. 1686-1702.

Масленников Андрей Леонидович – старший преподаватель кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия.	Maslennikov Andrey Leonidovich – senior lecturer, Department “Automatic Control Systems”
Щербак Ольга Юрьевна – студентка	Scherbak Olga Yurievna – student
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия	Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Received 02.11.2019