

БИОНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

BIONIC PRINCIPLES DESIGN OF ROBOTIC SYSTEMS

Ю.Т. КАГАНОВ, С.В. ХЕЙЛО, А.К. ПОЛЕТИКА

YU.T. KAGANOV, S.V. KHEYLO, A.K. POLETIKA

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет),
Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство))

(Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: yurijkaganov@gmail.com; sheilo@yandex.ru

В работе рассматриваются основные бионические принципы проектирования конструкций и управления робототехническими системами. В качестве примеров таких робототехнических систем рассматриваются роботы-манипуляторы типа "хобот". К таким системам также относятся 3D-принтеры, используемые в аддитивных технологиях. Одним из направлений исследований является применение многоагентного подхода для управления коллективом роботов, участвующих в решении сложных стратегических задач. В этом случае возникает необходимость в использовании современных методов искусственного интеллекта, в частности, методов глубокого обучения, теории нечеткого управления, биоинспирированные методы оптимизации. Такой подход может быть использован для управления сложными робототехническими системами на основе параллельных механизмов.

The work considers the basic bionic principles of design of structures and control of robotic systems. As examples of such robotic systems, we consider robotic manipulators of the "trunk" type, as well as complex systems based on the use of parallel mechanisms. Such systems include 3D printers used in additive technologies. Another direction is the use of a multi-agent approach to manage a team of robots involved in solving complex strategic tasks. In this case, there is a need to use modern methods of artificial intelligence, and, in particular, methods of deep learning,

the theory of fuzzy control, bioinspired optimization methods. The same approach can be used to control complex robotic systems based on parallel mechanisms.

Ключевые слова: бионические принципы, робототехнические системы, параллельные механизмы, "хобот", 3D-принтер, многоагентный подход, глубокое обучение, нечеткое управление.

Keywords: bionic principles, robotic systems, parallel mechanisms, "trunk", 3D printer, multi-agent approach, deep learning, fuzzy control.

Введение

В настоящее время формируется Индустрия 4.0. В области легкой промышленности это приводит к появлению нового поколения автономных роботов, в том числе для 3D-печати. Такие роботы различаются по размерам и функциям – от беспилотных аппаратов до автономных мобильных роботов для технологических и подъемно-транспортных операций, снабженных искусственным интеллектом. Робототехнические комплексы такого типа способны распознавать и анализировать информацию, получаемую из окружения, и действовать с ее учетом. Применение таких робототехнических систем на предприятиях текстильной промышленности позволяет повысить его технико-организационные и экономические показатели. В текстильной и легкой промышленности на одну технологическую операцию приходится 3...6 транспортных операций. Эти операции выполняют технологические и транспортные роботы. Использование современных подходов к проектированию и реализации технологических процессов и транспортных операций с использованием бионических принципов позволяет существенно сократить время выполнения операций и увеличить их эффективность. Примером внедрения роботизированного производства обуви и ее печати является опыт компании "Адидас", позволяющий сократить ее производство до нескольких дней. Таким образом, уже в настоящее время робототехнические системы такого типа находят все большее применение в легкой промышленности.

При этом одним из наиболее перспективных подходов к созданию технических систем является подход, основанный на ис-

пользовании бионических принципов. Первоначально бионика основывалась на использовании аналогии между биологическими системами и техническими системами. Однако за прошедшие годы огромный прогресс в развитии биологии как науки и колоссальный рывок в области технологии позволил значительно пересмотреть принципы бионики как технической науки, позволяющей выйти на новый уровень технологического развития.

Основные принципы бионики состоят в следующем:

- создание технических систем на основе использования фундаментальных принципов организации биологических систем,
- разработка конструкций технических систем, функциональность которых по оптимальности сравнима с биологическими системами,
- проектирование систем управления, использующих модели систем управления и адаптации, основанных на биологических прототипах,
- разработка технических систем, встраиваемых в биосферные процессы без их разрушения (экологически выверенные технические решения).

Эти принципы в наибольшей степени применимы к такой области техники, как робототехнические системы. Современные робототехнические системы по своей функциональности приближаются к биологическим системам. Разработка роботов, конструктивно обладающих большим числом подвижностей, значительно превышающей число степеней свободы традиционных роботов, позволяет обеспечивать работы в сложных экстремальных условиях. Приме-

нение подобных роботов в медицине позволяет выполнять операции с высокой точностью и надежностью. Другим примером использования современных конструкций роботов являются аддитивные технологии, в частности 3-D принтеры. Как правило, такого рода роботы основаны на использовании кинематических цепей, состоящих из параллельных механизмов. Биологические прототипы подобных механизмов очень широко используются живыми системами (хобот слона, тело змеи, рыбы и т.п.). С другой стороны, управление подобными роботами традиционными методами, основанными на теории автоматического управления, оказывается неэффективным. Это обусловлено тем, что наличие одновременно работающих приводов, связанных с большим числом кинематических цепей, приводит к необходимости использования методов управления, характерных для живых систем. Такими методами являются методы, основанные на использовании эволюционных алгоритмов, теории многоагентных систем, нейронных сетей, теории обучения с подкреплением, теории нечетких вычислений, искусственного интеллекта. Развитие робототехники должно привести к еще большей ее "биологизации". Помимо использования систем искусственного интеллекта, привлекаемого для управления автономным роботом, развивается направление, ориентированное на коллективы автономных роботов. В дальнейшем будут создаваться такие коллективы роботов, которые могут встраиваться в экологические структуры биосферы без ее разрушения. Это могут быть определенные техно-биоценозные образования, способные значительно повысить качество жизни человека и при этом не создавать напряжения в биосферных процессах.

Особенности бионического подхода к проектированию конструкций робототехнических систем

В настоящее время основным типом манипуляционных систем промышленных роботов являются механические манипуляторы, представляющие собой пространственные механизмы последовательной структуры в виде разомкнутых или замкну-

тых кинематических цепей. Такие манипуляторы обладают рядом недостатков – прежде всего, недостаточной жесткостью и, следовательно, низкой точностью, а также относительно небольшим числом степеней свободы при заданных размерах манипулятора. Поэтому проводятся интенсивные исследования альтернативных манипуляционных систем – биоинспирированных роботов-манипуляторов. Прежде всего, к этому классу манипуляторов относятся континуальные и дискретные роботы, имитирующие хобот слона.

Различные конструкции континуальных роботов типа хобот рассмотрены в работах [1...5]. В значительной мере преодолеть указанные выше недостатки традиционных многозвенных манипуляторов могут манипуляторы типа хобот, построенные на основе многосекционных механизмов с параллельной структурой [6...13].

Многосекционные манипуляторы типа хобот (ММТХ), построенные на основе механизмов параллельной структуры, являются одним из классов дискретных хоботоподобных манипуляторов (рис. 1 – робот-хобот).

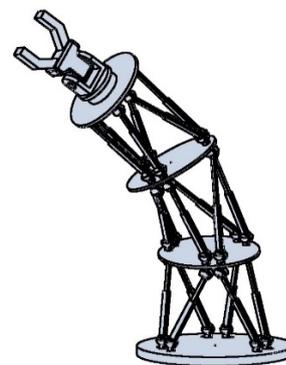


Рис. 1

Преимуществами ММТХ являются высокая точность исполнения движений, большие скорости и ускорения рабочего органа (например, схвата), значительная степень унификации мехатронных узлов и возможность реализации большого числа степеней свободы при относительной компактности конструкции. Основные недостатки заключаются в возможной интерференции отдельных кинематических цепей манипулятора и необходимости ее учета, а также в создании более сложной системы

управления по сравнению с традиционными многозвенными манипуляторами последовательной структуры. В целом ММТХ позволяют в значительной степени избежать недостатков, присущих классическим многозвенным манипуляторам.

Бионические системы управления

Задача управления ММТХ представляет собой серьезную проблему, так как помимо управления каждой секцией (платформой) манипулятора необходимо обеспечивать управление всей конструкцией в целом. Таким образом, система управления многосекционным манипулятором должна представлять собой иерархическую структуру. Проблеме управления ММТХ адекватен многоагентный подход и нейронечеткие технологии (рис. 2 – структура многоагентной системы управления ММТХ; система управления состоит из блоков [6]) [14...21].

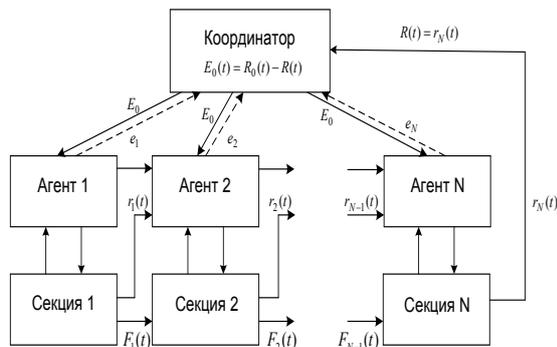


Рис. 2

Координатор, определяющий движение исполнительного органа (рис. 3 – структура координатора многоагентной системы управления ММТХ). Координатор вычисляет положения (скорости и ускорения) исполнительного механизма $R(t)$, а также его ошибку $E_0 = R_0(t) - R(t)$. Далее координатор на основе ошибок E_0 , $e = (e_1, e_2, \dots, e_N)$ формирует глобальную целевую вектор-функцию G_0 (время отработки траектории, энергетические затраты и т.д.) для ее многокритериальной оптимизации. Здесь и далее для простоты записи в качестве секций ММТХ рассматриваем трипод (рис.4 – структура агента многоагентной системы управления ММТХ).

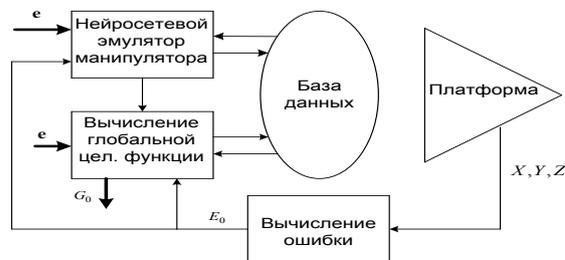


Рис. 3

Агенты, определяющие движение каждой из секций. Совокупность агентов представляет собой систему взаимосвязанных агентов, взаимодействующих как непосредственно между собой, так и через параметры управляемых ими секций. Агент с номером i системы управления (рис. 4) определяет положение базы соответствующей секции манипулятора r_{i-1} ; вычисляет положение управляемой им платформы r_i ; вычисляет ошибку положения (скорости и ускорения) этой платформы e_i ; формирует сигналы управления приводами актуаторов $F_{1,j}$.

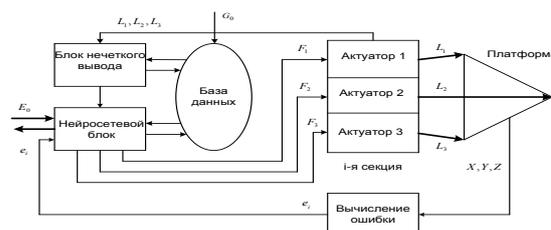


Рис. 4

Агент многоагентной системы управления ММТХ выполняет следующие функции: получает информацию из внешней среды, а также от соседних с ним агентов; получает информацию от агента более высокого уровня (координатора); обучается в процессе взаимодействия; воздействует на внешнюю среду. При взаимодействии агентов между собой вырабатывается компромиссное решение, которое запоминается как самими агентами, так и координатором.

Блок нечеткого вывода агента выполняет преобразование перемещений актуаторов L_1, L_2, L_3 соответствующей платформы в нечеткие переменные с соответствующими значениями функций принад-

лежности (стадия фазсификатора); нечеткий *modus ponens* на основе нечетких продукционных моделей Мамдани, Ларсена или Такаги-Сугено (стадия логического вывода); вычисление четких значений переменных путем использования центроидного метода (стадия дефазсификации) [16], [17].

Нейросетевой блок агента (рис. 5 – структура нейросетевого блока многоагентной системы управления ММТХ) выполняет обучение эмулятора платформы с учетом ошибки верхнего уровня E_0 , то есть формирует вектор весовых коэффициентов $W_{i,j}$; вырабатывает сигналы, осуществляющие управление соответствующим актуатором.

Структурная схема нейросетевой адаптивной системы автоматического управления (САУ) одной из штанг трипода представлена на рис. 5. Регулятор построен на основе нейросетевой инверсной модели объекта управления, а в качестве эталонной модели используется еще одна многослойная нейронная сеть. Задачи обучения обеих нейронных сетей, по своей сути, представляют собой задачи нейросетевой идентификации соответствующих динамических систем. В качестве эталонной и инверсной моделей используются многослойные нейронные сети типа NARX [8, 17]. При этом процесс обучения многоагентной системы осуществляется на основе стратегии SARSA обучения с подкреплением [11], [15], [22].

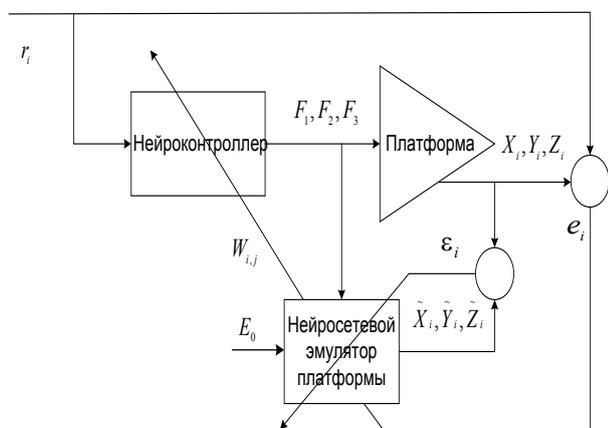


Рис. 5

Современный уровень развития техники предъявляет новые требования к созданию сложных робототехнических систем. Работы в экстремальных условиях, медицина, сложное технологическое оборудование, военная техника требуют принципиально новых подходов, основанных на биологических принципах проектирования технических систем. Поэтому возникает необходимость в использовании бионического принципа в проектировании механизмов и управления такими системами. В данной работе рассмотрено проектирование робототехнической системы на основе параллельных механизмов, а также использование системы нейронечеткого управления. В качестве объекта была представлена робототехническая система типа "хобот".

ЛИТЕРАТУРА

1. Mahfoudi Chawki, Amouri Ammar, Zaatri Abdelouahab. New Approach to Modeling a planar flexible continuum robot simulating elephant trunk // Journal of New Technology and Materials. – 2013. Vol. 03. №02. P. 8...13.
2. Shao Tiefeng, Zhang Libin, Du Mingyu, Bao Guanjun, Yang Qinghua. Fruit harvesting continuum manipulator inspired by elephant trunk // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2015, Vol.8, №1. P.57...63. DOI: 10.3965/j.ijabe.20150801.008
3. Yunfang Yang, Wenzeng Zhang. ET Arm: Highly Compliant Elephant-Trunk Continuum Manipulator // 7th International Conference, ICIRA 2014. – 2014. Vol. 8917. P. 288...299.
4. Anand Kumar Mishra, Emanuela Del Dottore, Ali Sadeghi, Alessio Mondini, Barbara Mazzolai. SIMBa: Tendon-Driven Modular continuum arm with soft reconfigurable gripper // Frontiers in Robotics and AI. – 2017. Vol.4. Article 4. DOI: 10.3389/frobt.2017.00004
5. Inderjeet Singh, Yacine Amara, Othman Lakhal, Achille Melingui, Rochdi Merzouki. PH Model-Based Shape Reconstruction of Heterogeneous Continuum Closed Loop Kinematic Chain: An Application to Skipping Rope / 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE Xplore: DOI: 10.1109/IROS.2018.8593934
6. Гаврилов С.В., Коноплев В.А. Компьютерные технологии исследования мозговых мехатронных систем. – СПб.: Наука, 2004.
7. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-ма-

нипулятора типа "хобот". 1. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа "трипод" // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2009. № 10. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/133262.html>

8. Карпенко А.П., Казанов Ю.Т. Синтез много-секционных роботов-манипуляторов параллельной структуры типа "ХОБОТА" // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана Электр. Журн. – 2014. № 4.

9. Anand Kumar Mishra, Emanuela Del Dottore, Ali Sadeghi, Alessio Mondini, Barbara Mazzolai. SIMBa: Tendon-Driven Modular continuum arm with soft reconfigurable gripper // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2017. Vol.4. Article 4. DOI: 10.3389/frobt.2017.00004

10. Yongjie Zhao, Yongxing Zhang, Jianyuan Li, Lei Jin, Jun He, Xingwei Zhang, Xinjian Lu. Inverse displacement analysis of a hyper-redundant bionic trunk-like robot // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2020. January-February. P.1...11.

11. Glazunov V., Kheylo S. Dynamics and control of planar, translational, and spherical parallel manipulators. In: *Dynamic balancing of mechanisms and synthesizing of parallel robots*. Springer. – 2016. P. 365...403.

12. Kheylo S.V., Tsarkov A.V., Garin O.A. Kinematic analysis of novel 6-dof robot/ *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Vol. 1126, 2020. P.442...450.

13. Glazunov V., Nosova N., Kheylo S., Tsarkov A. Design and Analysis of the 6-DOF Decoupled Parallel Kinematic Mechanism. In: *Dynamic Decoupling of Robot Manipulators*, Springer. – 2018, P. 125...170

14. Алфимцев А.Н. Мультиагентное обучение с подкреплением. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021.

15. Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018.

16. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

17. Sigeru Omatu, Marzuki Khalid, Rubiyah Yusof. *Neuro-Control and its Application*. Springer-Verlag, London Limited. 1996.

18. Schwartz H. *Multi-Agent Machin Learning: A Reinforcement Approach*. NY: John Wiley & Sons, 2014.

19. Singh P. et al. *Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial*. Boca Raton: CRC press, 2020.

20. Yang X.S. (ed.) *Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence: Algorithms, Theory and Applications*. – NY: Academic Press, 2020.

21. Singh P. et al. *Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial*. Boca Raton: CRC press, 2020.

22. Sutton R.S., Barto A.G. *Reinforcement learning: An introduction*. – Cambridge: MIT press, 2018.

REFERENCES

1. Mahfoudi Chawki, Amouri Ammar, Zaatri Abdelouahab. New Approach to Modeling a planar flexible continuum robot simulating elephant trunk // *Journal*

of New Technology and Materials. – 2013. Vol. 03. №02. P. 8...13.

2. Shao Tiefeng, Zhang Libin, Du Mingyu, Bao Guanjun, Yang Qinghua. Fruit harvesting continuum manipulator inspired by elephant trunk // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2015, Vol.8, №1. P.57...63. DOI: 10.3965/j.ijabe.20150801.008

3. Yunfang Yang, Wenzeng Zhang. ET Arm: Highly Compliant Elephant-Trunk Continuum Manipulator // 7th International Conference, ICIRA 2014. – 2014. Vol. 8917. P. 288...299.

4. Anand Kumar Mishra, Emanuela Del Dottore, Ali Sadeghi, Alessio Mondini, Barbara Mazzolai. SIMBa: Tendon-Driven Modular continuum arm with soft reconfigurable gripper // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2017. Vol.4. Article 4. DOI: 10.3389/frobt.2017.00004

5. Inderjeet Singh, Yacine Amara, Othman Lakhel, Achille Melingui, Rochdi Merzouki. PH Model-Based Shape Reconstruction of Heterogeneous Continuum Closed Loop Kinematic Chain: An Application to Skipping Rope / 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE Xplore: DOI: 10.1109/IROS.2018.8593934

6. Gavrilov S.V., Konoplev V.A. *Computer technologies for the study of multilink mechatronic systems*. - St. Petersburg: Nauka, 2004.

7. Kaganov Yu.T., Karpenko A.P. Mathematical modeling of kinematics and dynamics of a robot-manipulator of the "trunk" type. 1. Mathematical models of the manipulator section as a mechanism of parallel kinematics of the "tripod" type // *Nauka i obrazovanie. MSTU im. N.E. Bauman. Electron. magazine* 2009. No. 10. Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/133262.html>

8. Karpenko A.P., Kaganov Yu.T. Synthesis of multi-section robotic manipulators of the parallel structure of the type "KHOBOTA" // *Science and Education of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman Electric. Journal*. - 2014. No. 4.

9. Anand Kumar Mishra, Emanuela Del Dottore, Ali Sadeghi, Alessio Mondini, Barbara Mazzolai. SIMBa: Tendon-Driven Modular continuum arm with soft reconfigurable gripper // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2017. Vol.4. Article 4. DOI: 10.3389/frobt.2017.00004

10. Yongjie Zhao, Yongxing Zhang, Jianyuan Li, Lei Jin, Jun He, Xingwei Zhang, Xinjian Lu. Inverse displacement analysis of a hyper-redundant bionic trunk-like robot // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2020. January-February. P.1...11.

11. Glazunov V., Kheylo S. Dynamics and control of planar, translational, and spherical parallel manipulators. In: *Dynamic balancing of mechanisms and synthesizing of parallel robots*. Springer. – 2016. P. 365...403.

12. Kheylo S.V., Tsarkov A.V., Garin O.A. Kinematic analysis of novel 6-dof robot/ *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Vol. 1126, 2020. P.442...450.

13. Glazunov V., Nosova N., Kheylo S., Tsarkov A. Design and Analysis of the 6-DOF Decoupled Parallel

Kinematic Mechanism. In: Dynamic Decoupling of Robot Manipulators, Springer. – 2018, P. 125...170

14. Alfimtsev A.N. Multi-agent reinforcement learning. - М.: MSTU im. N.E. Bauman, 2021.

15. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. Deep learning. - St. Petersburg: Peter, 2018.

16. Pegat A. Fuzzy modeling and control / Per. from English. – М.: BINOM. Knowledge Lab, 2009.

17. Sigeru Omatu, Marzuki Khalid, Rubiyah Yusof. Neuro-Control and its Application. Springer-Verlag, London Limited. 1996.

18. Schwartz H. Multi-Agent Machin Learning: A Reinforcement Approach. NY: John Wiley & Sons, 2014.

19. Singh P. et al. Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial. Boca Raton: CRC press, 2020.

20. Yang X.S. (ed.) Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence: Algorithms, Theory and Applications. – NY: Academic Press, 2020.

21. Singh P. et al. Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial. Boca Raton: CRC press, 2020.

22. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement learning: An introduction. – Cambridge: MIT press, 2018.

Рекомендована кафедрой теоретической и прикладной механики РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 07.02.22.
