

УДК 004.896

DOI: 10.47928/1726-9946-2020-20-3-30-37

Классификация реконфигурируемых модульных робототехнических систем

Павлюк Н. А.

Представлено академиком АМАН Шибзуховым З.М.

Модульные робототехнические системы (МРС) отличаются способностью реконфигурироваться для создания двумерных и трехмерных структур различной функциональности. За счет реконфигурируемости модульная система позволяет решать широкий спектр задач, невыполнимых для отдельного робота с неизменной структурой. Конструкция модульных робототехнических устройств (МРУ) предусматривает их контактное физическое соединение, допускающее вращение устройств относительно друг друга и реконфигурацию всей системы. Основные проблемы разработки модельно-алгоритмического и программно-аппаратного обеспечения функционирования контактного соединения гомогенных робототехнических устройств связаны с ограниченными возможностями отдельных роботов и сложностью учета их кинематических и динамических параметров в процессе сборки в единые конструкции и последующей реконфигурации в трехмерном пространстве [1-3].

Например, M-Block [4] – это модульный, самонастраивающийся кубический робот с магнитной связью, приводимый в действие угловым моментом. Модули передвигаются, получая нужный момент инерции благодаря раскручиванию маховика. Маховик, расположенный внутри модуля и ориентированный в плоскости предполагаемого движения, используется для сохранения момента импульса до тех пор, как тормозной механизм будет задействован для замедления маховика, и в течение короткого времени маховик оказывает высокий крутящий момент на модуль. Каждый модуль может также перемещаться независимо от остальных, чтобы пересечь плоскую неструктурированную среду. Экземпляры M-Block могут собираться в кубические или прямоугольные конфигурации.

В работе [5] представлена научно-образовательная модульная роботизированная мобильная платформа, состоящая из пластикового каркаса, изготовленного на 3D-принтере, гусеничного шасси, аккумулятора, STM32-микроконтроллера, мини-компьютера Raspberry Pi. Программное обеспечение использует операционную систему для роботов ROS. Авторы утверждают, что отличительной особенностью представленного прототипа является возможность разработки и установки дополнительных аппаратных модулей без необходимости модифицировать прошивку устройства. Представлено 4 модели модулей расширения для платформы: ультразвуковой и инфракрасный датчики препятствий, гироскоп и камера.

В работе [6] предложена новая модульная архитектура для многоцелевых БПЛА – DRA. Представлен модульный робот DRA-MR1, имеющий возможность распределения электрических, механических и вычислительных ресурсов между модулями. Робот состоит из трех типов модулей: управляющего модуля PM1, состоящего из мини-компьютера Raspberry pi 3, камеры и коннекторов для передачи данных и электроэнергии другим

модулям; двигательных модулей РМ2 с несущим винтом и двигателем; соединительного модуля РМ3, отвечающего за передачу данных и электроэнергии. Предложенная архитектура позволяет использовать произвольное количество двигательных или иных модулей, которые можно подключить без перестраивания всего робота.

В работе [7] представлен модульный робот-гексапод. Робот состоит из педипуляторов, на каждый из которых приходится по 3 степени свободы, микроконтроллер, модули беспроводной связи, а также электромагнит для соединения с другими модулями. Связь между модулями обеспечивается по радиоканалу с помощью nRf модуля. Дистанционное управление роботом осуществляется по Bluetooth через мобильный телефон. Представлено две схемы передвижения на выбор пользователя: волновая и трипод. В работе [8] представлен модульный робот для мойки окон Mantis. В отличие от представленных на рынке роботов для мойки окон, предложенное решение способно переходить между стеклянными панелями. Робот состоит из трех соединенных между собой модулей, оснащенных оборудованием для фиксации и перемещения по наклонным, а также вертикальным поверхностям, индуктивными датчиками для определения металлических оконных рам и подъемным механизмом для их преодоления. Модульная конструкция робота позволяет роботу сохранить сцепление с рабочей поверхностью при отказе одного или двух модулей.

В работе [9] описан социальный модульный робот SMOOTH, состоящий из трех модулей: робототехнической платформы, вычислительных устройств и сенсоров, обеспечивающих многомодальное восприятие среды и взаимодействие с конечными пользователями. Представлены три варианта дизайна корпуса робота, ориентированных на положительное восприятие пользователей: лебедь, мышь и пингвин, устанавливаемых на робототехнической платформе. Утверждается, что для широкого распространения социальных роботов, они должны соответствовать следующим требованиям: финансовая доступность, модульность, позволяющая изменять конфигурацию отдельно взятого робота или робототехнической системы, простота в использовании и положительное восприятие конечными пользователями.

Многофункциональный модульный 3D-печатный робот Dtto может реконфигурировать узлы и оперативно менять их положение в процессе работы в зависимости от текущей задачи. В его основу положен аналогичный проект MTRAN III [10]. Каждая секция 3D-печатного робота состоит из двух сочлененных подвижных фаланг. Сформированные цепи способны передвигаться различными способами, например, ползать подобно змее, что позволяет повышать проходимость в сравнении с колесными и шагающими роботами, хотя и за счет снижения скорости. Также робот может принять вид тетрапода с четырьмя ногами, или даже соединить «голову» и «хвост» и перекатываться в нужном направлении.

Самосборный модульный робот (SMR) SambotII [11] разработан на основе SambotI, который представляет собой ранее построенный гибридный тип SMR, способный к автономному перемещению и самостоятельной сборке. SambotI обладает с ограниченными возможностями процессор STM-32. Для улучшения вычислительных возможностей применяется двухъядерный процессор x86 и разработана иерархическая программная

архитектура с пятью уровнями. Кроме того, для улучшения его возможностей восприятия среды используются блок лазерной камеры и блок светодиодной камеры для получения информации о расстоянии и угле, соответственно, и изменяемые цвета светодиодные фонари используются для идентификации различных пассивных стыковочных поверхностей во время процесса стыковки.

В работе [12] представлена двухмерная модульная робототехническая система M-Lattice, разработанная для построения гексагональной решетки, состоящей из робототриподов. Робот-трипод представлен в виде мета-модуля из трех манипуляторов, включающих в себя телескопические и поворотные приводы, а также соединительные механизмы в качестве рабочих органов. Такая конструкция позволяет модулю перемещаться в пределах двухмерной гексагональной решетки для ее реконфигурирования, оставаясь соединенным с ней как минимум одним манипулятором. Движение робота в системе состоит из этапов сокращения длины телескопических приводов, разворота манипуляторов в нужном направлении и последующем расширением телескопических приводов. Представленные способы перемещения устройств отличаются количеством одновременно двигающихся модулей, начиная от двух и заканчивая пятью.

В работе [13] представлен модульный робот DILL, использующий привод на основе электропостоянного магнита. Каждый робот выполнен в форме куба со стороной 1,5 см и весит 12 граммов. Конструкция роботов DILL включает в себя 6 электропостоянных и 4 неодимовых магнита. Движение модулей осуществляется скольжением по поверхности со скоростью до 2 см в секунду, и было протестировано на поверхностях с разным коэффициентом трения: бумага, дерево, стекло и зацементированная плоскость. В работе [14] представлена модульная призматическая робототехническая система, где каждый робот состоит из привода, соединительного узла и шарнира. Отличительной особенностью робота является пассивность шарнира, расположенного в центре устройства, и движения за счет переходов между состояниями приводов. У привода есть три состояния: активное, пассивное и блокировка. Это позволяет роботам перемещаться самостоятельно и с помощью других роботов в конфигурации. При этом система устойчива к воздействию внешних сил.

Предлагаемый в [15] прототип функционально-ориентированного модульного робота состоит из многоцелевой мобильной модульной платформы (шасси и полуприцеп) и двух взаимозаменяемых инструментов (чистящая и моющая насадки) для выполнения работ в условиях космоса. На шасси имеется возможность установки специального 3D-сканера или манипулятора с заменяемыми инструментами. Предлагаемая система управления робота позволяет автоматизировать ряд работ по техническому обслуживанию внутренних поверхностей труб по прямым участкам 10 метров длиной с супервизорным дистанционным контролем операторов. В данной работе модульный принцип используется для изменения конфигурации робота путем смены различных рабочих инструментов на манипуляторе.

В работе [16] представлен модульный робот usBot, модули которого способны к программируемому стохастическому соединению между собой. Вводится понятие модели гибридного куба, имитирующего ограниченное детерминированное движение. Каждый робот представляет из себя куб со стороной 5 см, имеет параллельно соединительный и разъединительный механизмы. Сенсорная система роботов для распознавания и обмена данными построена на двойных ИК-сенсорах. Время работы на одном заряде аккумулятора составляет 90 минут.

В работе [17] представлена концепция дизайна самонастраиваемого модульного робота UBot, способного выполнять задачи передвижения, самостоятельной реконфигурации и манипуляции. Робот состоит из нескольких стандартных модулей. Каждый модуль имеет кубическую структуру на основе универсального шарнира и имеет четыре соединительные поверхности, которые могут подключаться или отключаться от соседних модулей. Разработан механизм соединения крюкового типа, который может быстро и надежно сцепляться с соседними модулями. Этот механизм самоблокируется после подключения и не потребляет энергии. В модуле использовалась технология беспроводной связи, которая позволяет избежать намотки кабеля и повысить гибкость передвижения и самонастройки. Разработанная система ориентации может определять четыре возможных направления по металлическим контактам. Группа модулей UBot может адаптировать свою конфигурацию и функции к изменяющейся среде без внешней помощи, изменяя их соединения и положения. Для достижения небольших габаритов и массы при проектировании модулей используются компактные механические конструкции и электрические системы. Самонастраиваемая роботизированная система Roombots [18] разрабатывается с целью практического применения в области модульной реконфигурируемой мебели. Роботы могут перемещаться и взаимодействовать друг с другом, а также с предметами интерьера в подготовленной структурированной среде, используя механические устройства соединения. Также возможно перемещение за счет вращательного движения исполнительных механизмов. В работе [19] представлен робот FreeBOT, модули которого разработаны как магнитопроводящая сфера, не требующая точного совмещения устройств при соединении и специальных коннекторов. Робот состоит из железного корпуса в виде сферы, двух резиновых колес, приводов, роликов, рамы, магнита, аккумулятора и контроллера. Робот может передвигаться по магнитопроводящим плоскостям.

В данном исследовании аналитический обзор существующих МРС и, в частности, отдельных МРУ, позволил выделить ряд критериев для оценивания параметров и характеристик этих устройств, определяющих их функциональные возможности и сценарии применения. На рисунке 1 приведена классификация МРУ на основе ключевых характеристик.

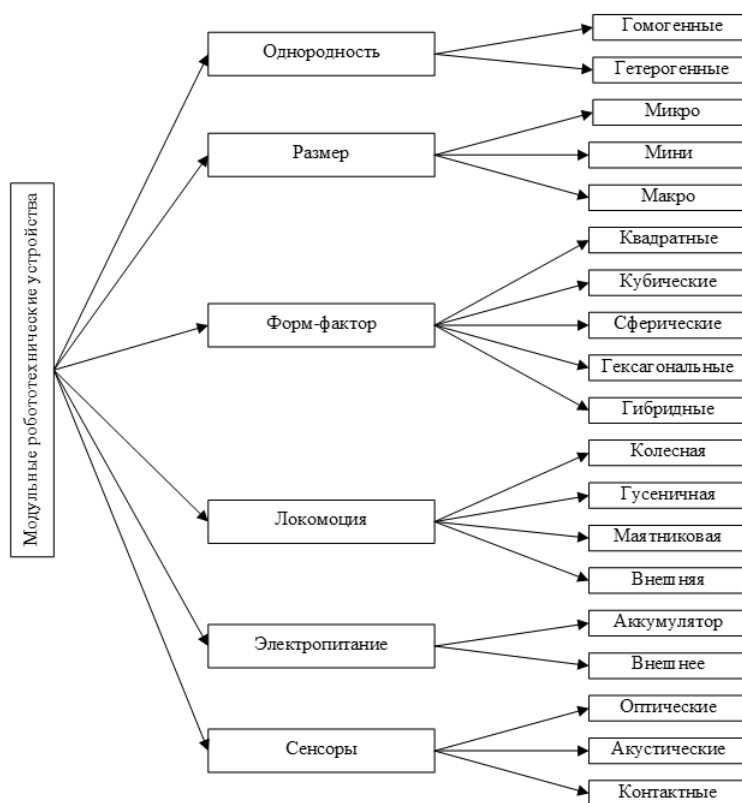


Рисунок 1 – Классификация МРУ

Одним из основных факторов, определяющих возможности реконфигурирования, является однородность устройств в системе. Если в одной конфигурации МРУ будут конструктивно отличаться друг от друга, то общая функциональность будет зависеть от работоспособности каждого из них. Это обуславливается тем, что в случае изменения параметров конфигурации под воздействием внешних факторов, либо же поломке одного из устройств система может выйти из строя, так как неподходящее под новые параметры, или же неисправное устройство невозможно будет заменить другим устройством из системы. В случае идентичности МРУ в системе, устройства могут заменять друг друга в любом месте конфигурации. В работе [20] приводятся общепринятые классификации модульных робототехнических устройств по размеру, форм-фактору и способам локомоции. МРУ классифицируются в том числе и по типу электропитания, по наличию или отсутствию встроенного аккумулятора, а также по типу используемых сенсоров, применяемых для ориентации в пространстве и построения конфигурации.

В силу конструктивных особенностей для МРУ характерны следующие функциональные ограничения: малый набор функций, малые вычислительные мощности, малая емкость бортового источника питания, низкая скорость и малая дальность передвижения. При проектировании МРУ учитывается, какие характеристики должно иметь отдельное устройство, так и характеристики МРС, конфигурируемой множеством таких устройств. Соединение МРУ между собой – отдельная приоритетная задача, для решения которой могут применяться механические, магнитные и химические соединительные устройства. На рисунке 2 приведена классификация устройств соединения модульных роботов.

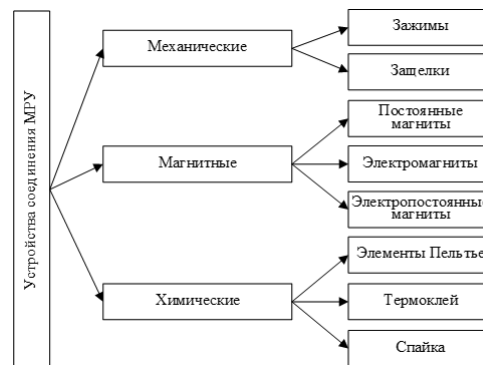


Рисунок 2 – Классификация устройств соединения МРУ

Реконфигурация МРС разделяется на детерминированную и недетерминированную. Детерминированная реконфигурация характеризуется управлением локомоцией каждого устройства в конфигурации, предсказуемостью результата работы, корректирует ошибки во время выполнения операций и отслеживает общее состояние системы. Недетерминированная реконфигурация характеризуется стохастическим движением устройств, в том числе под влиянием внешних сил, отслеживанием состояния системы и итоговой реконфигурации. В работе [21] МРС классифицируются по степени взаимодействия устройств во время конфигурирования и после него. В работе [22] для классификации МРС приводится структура МТЕ.

На рисунке 3 приведена классификация МРС по ключевым характеристикам.

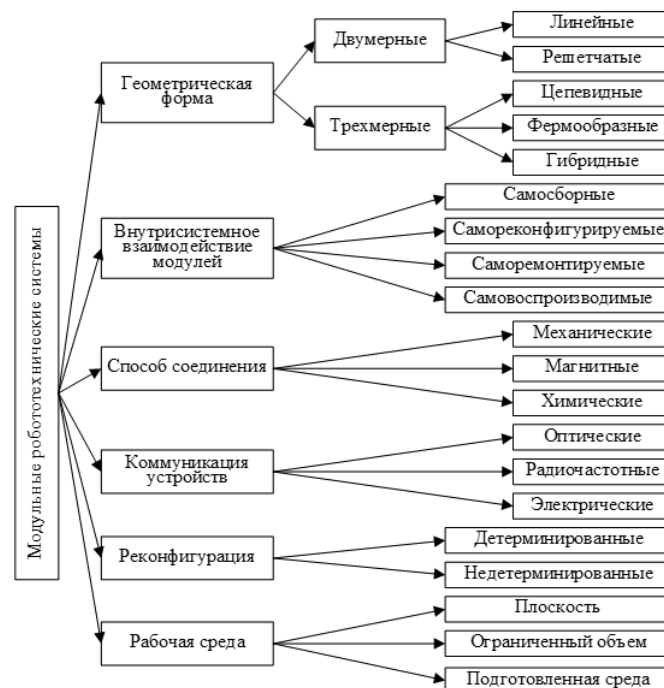


Рисунок 3 – Классификация МРС

В данном исследовании представлены аналитический обзор и классификация модульных робототехнических систем и модульных робототехнических устройств, в частности. Выявлены основные проблемы МРС, к которым следует отнести: низкую точность позиционирования устройств относительно друг друга, высокие требования к математическому обеспечению и встроенным вычислительным модулям, а также низкое качество соеди-

нения и скорость конфигурирования. Коммуникация устройств системы может осуществляться с применением оптических, радиочастотных и электрических средств связи. При конфигурировании МРС различают два основных класса конфигураций: двумерные и трехмерные. Двумерные конфигурации строятся на плоскости и бывают линейными или решетчатыми. При этом трехмерные конфигурации начинаются с построения простой двумерной и уже в процессе дальнейшего конфигурирования переходят в трехмерные цепевидные, фермообразные или гибридные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.П., Ким В.Л., Подураев Ю.В. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов // Робототехника и техническая кибер. 2016. № 3 (12). С. 23–29.
2. Андреев В.П., Подураев Ю.В. Функционально-модульный принцип построения гетерогенных мобильных роботов // Экстремальная робототехника. 2016. Т. 1, № 1. С. 39–49.
3. Ронжсин А.Л., Павлюк Н.А., Михальченко Д.И. Конструкция и принципы функционирования магнитно-механических коннекторов модульного робота // VI Международная конференция Прогресс транспортных средств и систем. 2018.
4. Romanishin J.W., Gilpin K., Rus D. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 3-7 Nov. 2013, Art. no. 6696971, pp. 42884295.
5. Tkáčik M., Březina A., Jadlovska S. Design of a Prototype for a Modular Mobile Robotic Platform. IFAC-PapersOnLine, 2019, vol. 52, Iss. 27, pp. 192–197. 10.1016/j.ifacol.2019.12.755.
6. da Silva Ferreira M.A., Begazo M.F.T. et al. Drone reconfigurable architecture (DRA): a multipurpose modular architecture for unmanned aerial vehicles (UAVs) // J. of Intelligent & Robotic Systems, 2020, vol. 99, pp. 517–534. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01129-4>
7. Gnana Sheela K., Menon P.J., Swetha S., Vandana C.M., Mendez R. Review on bio-inspired modular robotic system // Materials Today: Proceedings, 2020, vol. 24, part 3, pp. 1918–1923.
8. Vega-Heredia M., Mohan R.E. et al. Design and modelling of a modular window cleaning robot // Automation in Construction, 2019, vol. 103, pp. 268–278.
9. Juel W.K., Haarslev F., Ramirez E.R. et al. SMOOTH Robot: design for a novel modular welfare robot. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, vol. 98, pp. 19–37. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01104-z>
10. Murata S. M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system / Murata S., Yoshida E., Kamimura A., Kurokawa H., Tomita K., Kojaji S. // IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2002, vol. 7, № 4, pp. 431–441.
11. Tan W., Wei H., Yang B. SambotII: A New Self-Assembly Modular Robot Platform Based on Sambot // Applied Sciences, 8, 1719. 10.3390/app8101719
12. Yang Z., Wu Y., Fu Z., Fei J., Zheng H. A unit-compressible modular robotic system and its self-configuration strategy using meta-module // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, vol. 49, pp. 39–53.
13. Li Zhu, El Baz D. A programmable actuator for combined motion and connection and its application to modular robot // Mechatronics, 2019, vol. 58, pp. 9–19.
14. Li W., Richardson R.C., Kim J. A tri-state prismatic modular robotic system // Mechatronics, 2019, vol. 64, pp. 102287.

15. *Negri S.P. et al.* A modular mobile robotic architecture for defects detection and repair in narrow tunnels of CFRP aeronautic components // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 55, pp. 109–128.
16. *Usman A. Fiaz et al.* usBot A Modular Robotic Testbed for Programmable Self-Assembly // *IFAC PapersOnLine*, 209, vol. 52, № 15, pp. 121–126.
17. *Tang S. et al.* The UBot modules for self-reconfigurable robot // *Proceedings of the ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots*, 2009, pp. 529– 535.
18. *Hauser S., Mutlu M., Léziart P.-A., Khodr H., Bernardino A., Ijspeert, A.J.* Roombots extended: Challenges in the next generation of self-reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture // *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, vol. 127, pp. 103467. 10.1016/j.robot.2020.103467.
19. *Liang G., Luo H., Li M., Qian H., Lam T.L.* FreeBOT: A Freeform modular self-reconfigurable robot with arbitrary connection point – design and implementation // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 25-29, 2020, Las Vegas, NV, USA (Virtual), pp. 988–995.
20. *S. Sankhar Reddy Chennareddy, Agrawal A., Karuppiah A.* Modular self-reconfigurable robotic systems: A Survey on hardware architectures // *Journal of Robotics*, 2017, vol. 15, Article ID 5013532, 19 p. <https://doi.org/10.1155/2017/5013532>
21. *Alattas R.J., Patel S., Sobh T.M.* Comprehensive Survey of Evolutionary Morphological Soft Robotic Systems // *arXiv preprint arXiv:1702.02934*. 2017.
22. *Ahmadzadeh H., Masehian E., Asadpour M.* Modular Robotic Systems: Characteristics and Applications // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, vol. 81, pp. 317–357. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0237-8>

ABSTRACT

In this paper analytical review and classification of existing modular robotic systems are presented, based on the key features of the devices and their configurations. The principal issues concerning modular robotic devices, systems and connection devices are described.

Keywords: modular robotic system, modular robot, modular robotic device, classification.

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg;
antei.hasgard@ias.spb.su

© N.A. Pavliuk, 2020

АННОТАЦИЯ

В работе представлены аналитический обзор и классификация существующих модульных робототехнических систем, основанная на ключевых характеристиках устройств и образуемых конфигураций. Описаны основные проблемы модульных робототехнических устройств, систем и устройств соединения.

Ключевые слова: модульная робототехническая система, модульный робот, модульное робототехническое устройство, классификация.

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург;
antei.hasgard@ias.spb.su

© Н.А. Павлюк, 2020