

Исследование методов реконфигурации многофункционального модульного робота

А.С. Павлов
Кафедра прикладной математики и
компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный
университет
Ставрополь, Россия
e-mail: losde5530@gmail.com

А.А. Апурин
Кафедра организации и технологии защиты
информации
Северо-Кавказский федеральный
университет
Ставрополь, Россия
e-mail: apurin.a@icloud.com

У.В. Заволокина
Кафедра организации и технологии защиты
информации
Северо-Кавказский федеральный
университет
Ставрополь, Россия
e-mail: zzeseftt@yandex.ru

Н.Э. Степанян
Кафедра организации и технологии защиты
информации
Северо-Кавказский федеральный
университет
Ставрополь, Россия
e-mail: nerses_stepanyan@mail.ru

Аннотация¹

Модульные роботы, состоящие из множества однотипных модулей, являются одной из самых сложных областей робототехники. Каждый вновь добавленный элемент изменяет форму и возможности конечного устройства, например, добавляет функционал или позволяет роботу перемещаться в новых плоскостях. При этом процесс реконфигурации кинематической структуры представляет собой последовательность перемещений каждого модуля робота из начального положения исходной конфигурации в конечное положение требуемой конфигурации. В данной работе исследованы основные проблемы разработки модульных роботов, а также представлен аналитический обзор методов реконфигурации многофункциональных модульных роботов.

1. Введение

Создание модульного робота с адаптивной (реконфигуративной) кинематической структурой в наше время – это одно из самых многообещающих направлений в робототехнике. Модульных роботов создают, используя однотипные модули, которые объединяются в цельную конструкцию. Соединение однотипных модулей разрешает выстраивать

совершенно разные по своей структуре механизмы. Это дает значительные преимущества по сравнению с классическими мобильными роботами: более высокая надёжность и преодоление различных по сложности препятствий. Модульная робототехника объединяет в себе все самые новые успехи робототехники, мехатроники, теории управления. Важнейшей областью применения модульных роботов является экстремальная робототехника, основная цель которой заключается в создании и внедрении комплексов, используемых в экстремальных ситуациях.

Реконфигурация (а также адаптивность и наращиваемость) кинематической структуры получается именно благодаря модульности построения кинематической структуры модульных роботов. При этом нужно учитывать специфику поставленных задач при неопределённости состояния окружающей среды, изменениях извне, а также текущего состояния всех имеющихся подсистем. Такая совокупность всех функций и возможностей делает обязательным разработку интеллектуальных систем управления, у которых распределена структура аппаратных средств. Данные средства обеспечивают выполнение таких функций, как передвижение робота в предварительно незнакомых средах, так и автоматическое соединение структур и алгоритмов для управления модульным роботом. Благодаря своим особенностям построения, а также высокой функциональной гибкости можно выделить обширный круг возможностей и применения модульных роботов: бытовая сфера, особые задачи военных подразделений, создание требующихся конструкций, наблюдение за требуемым пространством, изучение строения поверхности

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь, Ханты-Мансийск, Россия, 2019

различных планет и космических тел и многое другое.

Реконфигурируемые модульные роботы представляют собой робототехнические системы, состоящие из множества однотипных модулей, которые имеют возможность выполнять обмен данными и перемещаться относительно друг друга, создавая различные конфигурации [1, 2]. Пример реконфигурации модульного робота показан на рисунке 1.

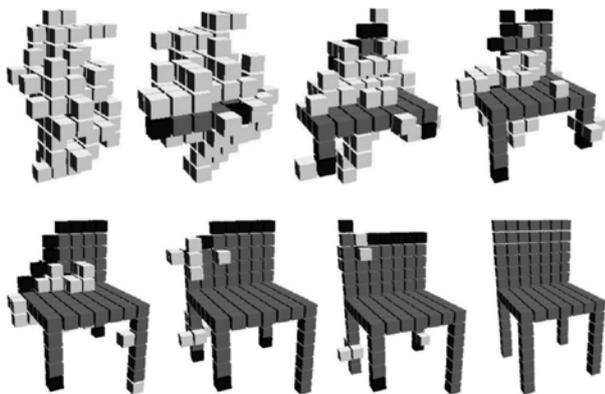


Рисунок 1. Пример реконфигурации модульного робота из начальной конфигурации в конечную

Модульные роботы имеют следующие отличительные особенности:

- Универсальность – используется для выполнения широкого круга задач.
- Надежность – в случае неисправности соответствующий модуль может быть заменен без прекращения выполнения целевой задачи.

- Доступная цена – массовое производство идентичных модулей позволяет снизить общую стоимость.

Модульные роботы - это в основном набор простых роботов с кинематическим ограничением и несколькими степенями подвижности, которые присоединяются или отсоединяются друг от друга и образуют модульную структуру или конфигурацию. Такие конфигурации могут иметь различную морфологию, например, для прохода в узкие туннели или преодоления пересеченной местности, чтобы обеспечить выполнение конкретной задачи. Они обычно оснащены не только базовыми компонентами обычных роботов, такими как приводы, датчики, источник питания, устройства связи и процессорные устройства, а также компоненты специального назначения, такие как активные и пассивные разъемы для крепления и отсоединения модулей, а также механизмы передачи крутящего момента. С момента создания модульных роботов было разработано множество моделей и их типов, и существует множество модульных робототехнических систем, предназначенных для конкретных задач [3, 4].

Модульные роботы являются одной из самых сложных областей робототехники в целом. Каждый вновь добавленный элемент изменяет форму и возможности конечного устройства, например, добавляет функционал или позволяет роботу перемещаться в новых плоскостях [1]. Модульная конструкция встречается в разработках Festo Molecubes [5], CellRobot KEYi TECH [6] в устройствах, созданных в лаборатории MIT [7], и различных роботов-змей [8]. В таблице 1 представлен обзор существующих решений в области модульной и групповой робототехники.

Таблица 1. Сравнительная характеристика робототехнических комплексов

Робот	Датчик/ Модуль	Движение / Макс. Скорость	Размер	Время работы	Университе т/ Институт	Описание
CellRobot	Камера, датчик расстояния, bluetooth, гироскоп, акселерометр	колесо, 12.5 см/с	25.4 см	1-3 ч	KEYi TECH	Головной модуль поддерживает до 20 модулей для создания нужной конфигурации. Есть возможность программирования и отладки алгоритмов управления
Cellulo	структурированная камера с плотным рисунком, ёмкостный сенсор	Всенаправленное шариковое колесо, 20 см/с	7.5 см	1-2 ч	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland	Используется в исследованиях в области реабилитации, игр и взаимодействия человека с компьютером, как дополнение к образовательному процессу
Colias-III	Камера, датчик расстояния, света, удара, дальномер	колесо, 35 см/с	4 см	1-3 ч	CIL at University of Lincoln, UK	Предназначен для внедрения биоинспирированных систем видения
Droplets	Датчик света	вибрация	4.4 см	24ч+	Correll Lab	Открытая аппаратно-

					at the University of Colorado	программная экспериментальная платформа для крупномасштабных исследований роевого поведения
Kilobot	Датчик расстояния, света	вибрация, 1 см/с	3.3 см	3 - 24 ч	Harvard University, USA	Роботизированная платформа для роя роботов с такими функциями, как групповая зарядка и групповое программирование.
Mona	Датчик расстояния, удара, дальномер, радиочастотный датчик	колесо, 5 см/с	6.5 см	Непрерывно	The University of Manchester, UK	Робот с открытым исходным кодом, предназначен для тестирования методов группового управления
SuperBot	Датчик расстояния, bluetooth, ИК-датчик, гироскоп, акселерометр	вибрация	13x6.5 x6.5 см	-	University of Southern California, USA	Модульный робот с децентрализованной системой управления. Основные функции: произвольное совмещение блоков, их взаимозаменяемость, формирование общей электрической и информационной сети, приём и передача данных

Как правило, модульные роботы предназначены для работы в недетерминированной среде. При этом, чтобы успешно выполнить требуемую задачу, необходимо в масштабе реального времени реагировать на изменение условий окружающей среды. Таким образом, целью данной работы является обзор методов реконфигурации многофункциональных модульных роботов.

2. Анализ методов реконфигурации кинематической структуры модульных роботов

Новое поколение модульных робототехнических систем требует применения вычислительных средств с высокой производительностью, надежностью и низкой потребляемой мощностью. Кроме того, с появлением новых технологий нанoeлектроники возникают новые проблемы, связанные с адаптацией к этим технологиям существующих способов представления и обработки информации.

Уровень эффективности систем обработки данных модульных роботов по такому, в частности, показателю как быстродействие, оказывает постоянно возрастающее влияние на качественное выполнение целевой функции. Однако, несмотря на впечатляющие успехи науки и вычислительной техники последнего десятилетия, для решения многих практических задач достигнутой на сегодняшний день производительности явно недостаточно. Ресурсы вычислительной техники, постоянно совершенствуются и увеличиваются, но не могут быть безграничными в принципе.

Проблема повышения эффективности реконфигурации модульных роботов является весьма

острой и до сих пор не нашла своего окончательного решения в большинстве прикладных задач.

Очевидно, что решение данной проблемы возможно только на основе комплексного подхода, который будет использовать все многообразие методов и средств. При этом правильный подбор соответствующих методов позволит разработать наиболее оптимальную траекторию повышения эффективности реконфигурации кинематической структуры модульных роботов.

Согласно [9] задача реконфигурации модульного робота может быть сформулирована следующим образом: даны начальная и целевая конфигурации кинематической структуры модульного робота, необходимо определить последовательность перемещений каждого модуля, необходимых для формирования целевой конфигурации. Разработка методологии реконфигурации модулей является фундаментальной проблемой модульной робототехники.

Самоорганизация и реконфигурация модульных роботов представляют собой сложную задачу по трем причинам.

Во-первых, количество возможных уникальных конфигураций для модульного робота очень велико:

$$(c \times w)^n,$$

где n – количество модулей, c – количество возможных подключений на модуль, w – способы соединения модулей вместе [10].

Во-вторых, поскольку модули могут перемещаться или состыковываться асинхронно, количество возможных перемещений каждого модуля робота для формирования целевой конфигурации, равно:

$$O(m^k),$$

где m – количество возможных перемещений, а k – количество модулей, которые могут свободно перемещаться [11].

В-третьих, как следствие двух перечисленных причин, область решения задачи реконфигурации модульного робота увеличивается экспоненциально с возрастанием n , что затрудняет поиск оптимального решения.

Существующие подходы к управлению робототехническими системами можно разделить на две категории: централизованное и децентрализованное управление. Поскольку модульные роботы могут состоять из огромного количества модулей, централизованный алгоритм будет превышать доступную память на одном устройстве, тогда как распределенный алгоритм позволит осуществлять масштабирование системы. В распределенных алгоритмах управления каждый модуль может рассматриваться как автономный агент.

Реконфигурация структуры робота состоит из двух этапов: (1) определение свободных позиций, доступных для стыковки, и (2) стыковка модулей в свободные позиции. При построении всей структуры модули стыкуются в свободных позициях, но некоторые позиции могут стать недоступными, заблокированные другими модулями в силу кинематических ограничений, как показано на рисунке 2.

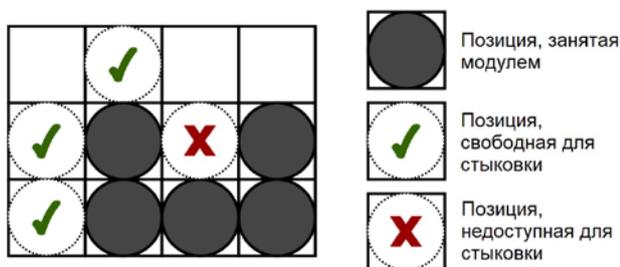


Рисунок 2. Пример конфигурации с позицией, недоступной для стыковки

В данный момент выделяют 3 основных принципиальных подхода к решению задачи планирования пути перемещения робота при реконфигурации кинематической структуры, представленных на рисунке 3.

Sample-based, или вероятностный подход заключается в том, чтобы вместо ресурсо-затратного полного моделирования конфигурационного пространства исследовать его вероятностным путем: рассматривать набор случайных конфигураций, отбрасывая ненужные и составляя карту местности. Недостаток подхода заключается в невозможности однозначно определить отсутствие решения и построить оптимальное, а не допустимое решение.

Подход на основе методов потенциальных полей в качестве карты местности использует потенциальное векторное поле, в котором целевое положение притягивает робота, а препятствия – отталкивают. Подход хорошо работает в определенном классе задач, однако неспособен эффективно искать траекторию в пространствах с высокими размерностями.

Комбинаторный подход использует аналитические алгоритмы, производит моделирование конфигурационного пространства и находит полное решение. Применение комбинаторных алгоритмов очень эффективно в случае малой размерности конфигурационного пространства, но сложно в использовании в сложных пространствах в силу их высокой алгоритмической и вычислительной сложности.

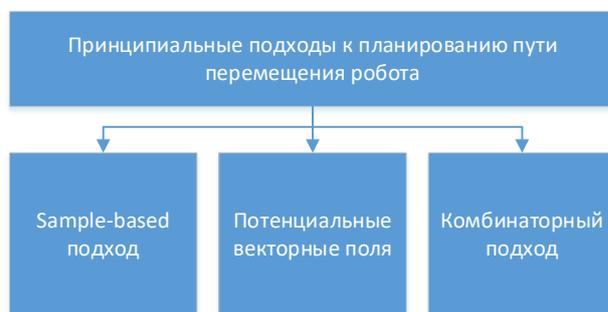


Рисунок 3. Принципиальные подходы к планированию пути перемещения робота

Таким образом, использование аналитических подходов представляется перспективным при решении задачи планирования пути перемещения модульного робота при формировании конфигурации.

В последнее десятилетие исследования функционирования модульных роботов направлено на рассмотрение по аналогии с живыми многоклеточными организмами [12]. Для изучения вопроса с данной точки зрения применяется различный математический аппарат, такой как: нейронные сети, генетические алгоритмы, клеточные автоматы, методы роевого интеллекта и т.д.

Общим недостатком такого подхода является сложность разработки правил, согласно которым модули робота должны взаимодействовать для выполнения целевой функции в недетерминированной среде.

На данный момент есть немало методов реконфигурации кинематической структуры многофункционального модельного робота, и каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Для лучшего понимания поставленной цели, рассмотрим несколько методов реконфигурации.

Первым рассмотрим метод «визуализации движения мехатронно-модульного робота» [13]. При использовании данного метода движение робота

обуславливается последовательным воспроизведением повторных движений всеми модулями системы как элементами кинематической цепи, из-за этого все модули от первого до последнего волнообразно перемещаются заданное расстояние. Данный метод позволяет использовать визуализированную картину перемещений модульного робота, что в дальнейшем используется при отработке интеллектуальных систем контроля движения этих роботов.

Другим рассмотренным методом будет «реконфигурация пространственного положения модулей роботов» [14]. Сутью данного метода является оценка числа коллизий, образующихся тогда, когда роботы одновременно движутся прямолинейно к своим указанным точкам. Недостатком данного метода является его сложность. Так как роботы движутся прямолинейно, то затраты энергии на перемещение являются минимальными. Также преимуществом данного метода является его быстрота исполнения. Продемонстрированная модель демонстрирует перемещение, совершаемое большим числом маленьких роботизированных комплексов. Данный метод может найти применение при транспортировке пострадавших в требуемой позе. Другим практическим применением данного метода является формирование плоскости изображаемой фигуры в пространстве, которая позволяет регистрационным устройствам удалённо находить требуемые типы объектов.

Следующий метод, который будет рассмотрен – это метод «распределённой координации архитектуры для управления несколькими роботами» [15]. Данный метод предоставляет единую распределённую архитектуру управления формированием, вмещающее произвольное количество лидеров группы и допускающее произвольные взаимодействия между роботами как на уровне оценки состояния пласта, так и на уровне управления транспортным средством. Используя расширенный алгоритм оценки, основанный на консенсусе, модули приходят к согласию по изменению положения во времени. Затем модульные средства применяют согласованный алгоритм управления пластом для отслеживания их желаемых положений и сохранения геометрии пласта со своими соседями. Введение множественных лидеров группы и межроботной связи позволит осуществлять индивидуальный отказ лидера группы и последователя с учётом того, что имеется наличие ограниченного обмена информацией в рамках формирования. Увеличивая количество лидеров группы в формировании, повышается устойчивость к одной точке отказа. Данный метод эффективен при использовании платформы с множеством роботов и лидеров группы. Однако достижение эффективности требует немалых финансовых вложений.

Ещё одним методом реконфигурации является «децентрализация контроллеров для реконфигурации

роботизированных модулей» [16]. Рассматривается синтез контроллеров для роя роботов при создании желаемого двумерного геометрического шаблона, заданного простой замкнутой плоской кривой с локальными взаимодействиями для избежания столкновений или поддержания заданных ограничений относительного расстояния. Контроллеры децентрализованы в том смысле, что роботам не нужно обмениваться информацией или знать информацию о состоянии друг друга. Роботы используют датчики, позволяющие им получать информацию об относительном положении соседей в известном диапазоне. Данный метод удобен для построения двумерных структур. Стоит отметить, что ограниченные ресурсами малоразмерные роботы не могут оценивать собственное состояние, а генерация шаблонов в фиксированной системе координат невозможна без программного решения проблемы.

3. Заключение

Модульный реконфигурируемый робот - это робот, который состоит из нескольких физически связанных модулей, которые могут изменять соединения для изменения общей формы робота. Учитывая их морфологическую гибкость, реконфигурируемые роботы могут демонстрировать высокую степень универсальности: чтобы быстро перемещаться по ровной местности, модули могут преобразовываться в круглую форму и вращаться; чтобы перемещаться в ограниченном пространстве, модули могут преобразовываться в змею и ползать; и чтобы манипулировать объектом, модули могут преобразовываться в форму, специализированную для характеристик объекта и/или типа требуемой манипуляции. Эти особенности реконфигурируемых модульных робототехнических систем имеют ряд преимуществ по сравнению с классическим исполнением конструкции роботов. Исследования в области роботов с адаптивной конфигурацией начались в конце 1980-х годов, основной идеей заключалась в разработке системы автономных роботов, которые могли бы совместно формировать различные формы для выполнения задач. За последние три десятилетия был достигнут значительный прогресс, и было построено множество модульных роботов. В настоящее время многие исследователи по всему миру ведут работу по данной тематике и достигли определенного прогресса. Анализ последних достижений и существующих решений поможет определить будущее направление развития модульной робототехники. Таким образом, в данной работе были рассмотрены существующие решения в области модульной робототехники, исследованы актуальные проблемы создания модульных роботов, а также был проведен обзор существующих методов реконфигурации кинематической структуры модульных роботов, проанализированы их особенности, достоинства и недостатки.

Список используемых источников

1. M. Yim, W.-M. Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins, and G. Chirikjian, «Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]», *Robotics Automation Magazine, IEEE*, vol. 14, no. 1, pp. 43-52, March 2007.
2. M. Yim, P. White, M. Park, and J. Sastra, «Modular selfreconfigurable robots», *Enc. of complexity and systems science*, pp. 5618-5631, 2009.
3. Ризванов Д.А., Юсупова Н.И. "Интеллектуальная поддержка принятия решений при управлении ресурсами сложных систем на основе многоагентного подхода" *Онтология проектирования*, vol. 5, no. 3 (17), 2015, pp. 297-312.
4. Богданов А.А., Сычков В.Б., Жиденко И.Т., Кутлубаев И.М. "Создание и исследование робототехнической системы с интерактивным управлением" *Решетневские чтения*, vol. 1, no. 16, 2012, pp. 230-231.
5. V. Zykov & P. William & Lassabe, N & H, Lipson. (2008). *Molecubes Extended: Diversifying Capabilities of Open-Source Modular Robotics*.
6. KEYi TECH. CellRobot. Retrieved from: <http://www.keyirobot.com/home.html>.
7. J. W. Romanishin, K. Gilpin, S. Claici, and D. Rus, "3D M-Blocks: self-reconfiguring robots capable of locomotion via pivoting in three dimensions," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '15)*, pp. 1925–1932, Seattle, Wash, USA, May 2015.
8. Liljebäck, Pål & Pettersen, K.Y. & Stavadahl, Øyvind & Gravdahl, Jan. (2013). *Snake Robots: Modelling, Mechatronics, and Control*. doi: 10.1007/978-1-4471-2996-7.
9. Michael Park, Sachin Chitta, Alex Teichman, and Mark Yim. 2008. *Automatic Configuration Recognition Methods in Modular Robots*. *The International Journal of Robotics Research* 27, 3-4 (March 2008), 403–421. <https://doi.org/10.1177/0278364907089350>.
10. Jérôme Barraquand and Jean-Claude Latombe. 1991. *Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach*. *The International Journal of Robotics Research* 10, 6 (Dec. 1991), 628–649. <https://doi.org/10.1177/027836499101000604>.
11. Bie, D., Wang, Y., Zhang, Y., Liu, C., zhao, J., & Zhu, Y. (2018). *Parametric L-systems-based modeling self-reconfiguration of modular robots in obstacle environments*. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. <https://doi.org/10.1177/1729881418754477>.
12. Герасин, П.В., Редько, Ю.С., Мартынов, В.В. (2011). *Визуализация движения мехатронно-модульного робота*. *Вестник Донского государственного технического университета*, 11 (5), 776-778.
13. Ватаманюк Ирина Валерьевна, Панина Гаянэ Юрьевна, Ронжин Андрей Леонидович (2015). *Реконфигурация пространственного положения роя роботов. Управление большими системами: сборник трудов*, (58), 285-305.
14. Ren, Wei & Sorensen, Nathan. (2008). *Distributed coordination architecture for multi-robot formation control*. *Robotics and Autonomous Systems*. 56. 324-333. 10.1016/j.robot.2007.08.005.
15. Hsieh, M., Kumar, V., & Chaimowicz, L. (2008). *Decentralized controllers for shape generation with robotic swarms*. *Robotica*, 26(5), 691-701. doi:10.1017/S0263574708004323.