А. Д. Ковалев

**ПОДХОД К РЕКОНФИГУРАЦИИ МОДУЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО АЛГОРИТМА
СУБОПТИМАЛЬНОГО ПОИСКА***

**Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук**

artem.kovalev1992@gmail.com

Представлен подход к соединению модульных роботов, включающий в себя алгоритм поиска плана реконфигурации GreedyCM. Данная составляющая позволяет находить решения, близкие к оптимальным, за время, которое полиномиально зависит от размера модульной системы.

Ключевые слова: робототехнические системы, модульные роботы, кинематика, реконфигурация, кинематическая цепь.

A. D. Kovalev

**APPROACH TO RECONFIGURATION OF A MODULAR ROBOT SYSTEM
WITH A SUBOPTIMAL SEARCH POLYNOMIAL ALGORITHM**

**St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences**

An approach to connecting modular robots is presented, which includes the algorithm of suboptimal reconfiguration search GreedyCM. This component allows to find nearly optimal solutions in timeframes, polynomially dependent on the robotic system size.

Keywords: robotic systems, modular robots, kinematics, reconfiguration, kinematic chain.

Введение

Модульные робототехнические системы представляют собой multifunctional ре-

конфигурируемые структуры, которые используются для построения различных двумерных и трехмерных формаций. При разработке алго-

ритмов контактного соединения модулей возникают проблемы, связанные с отсутствием учета кинематических и динамических свойств модульной системы [1, 2]. Для реконфигурации модульной робототехнической системы необходимы алгоритмы управления попарными соединениями роботов при формировании и поддержании конфигурации. Таким образом, актуальна проблема расширения существующих комбинированных методов реконфигурации модульных робототехнических систем.

В зависимости от компоновки модулей различают следующие структуры: в виде цепи, решетчатые/сетчатые, в виде фермы и гибридные. Модульные роботы в виде цепи представлены линейными или древовидными системами. Примерами подобных разработок являются Polybot [3] и Conro [4–6]. Данные модули способны собираться в гексаподы и работать по принципу бегущей петли.

Робототехнические системы, имеющие решетчатую структуру, состоят из взаимосоединенных модулей, расположенных в узлах двумерной или трехмерной сетки [7, 8]. Главная особенность такой структуры заключается в соединении каждого модуля со смежными устройствами. Для автономной реконфигурации такой системы требуется определение функции (метрики) стоимости [9], которая выражает усилие, необходимое для реконфигурации. Алгоритм реконфигурации представляет собой последовательность движений отдельных модулей или ветви модулей, которая выбирается, исходя из условия минимума затраченного усилия.

В робототехнических структурах типа ферма модули являются узлами балочных систем и гранями балок [10]. Так в конструкции робота Tetrobot [11] установлены регулируемые стрелы. Алгоритм управления Tetrobot предусматривает несколько итераций, в ходе которых определяются смещения узлов, в результате чего достигается целевое положение робота.

Гибридные системы имеют свободную форму, при которой модули занимают произвольное положение [12]. Для построения формации прежде всего необходимо иметь информацию о положении модулей в пространстве. Соответствующий алгоритм локализации, представленный в работе [13], основан на методе нормализованного разреза, что позволяет детектировать области с повышенной плотностью точек.

Алгоритм реконфигурации модульной робототехнической системы

Алгоритм реконфигурации включает определение кинематических ограничений, налагаемых на робототехническую систему, а также расчет количества шагов реконфигурации. Структура модульного робота представляется в виде неразмеченного, ненаправленного, невзвешенного графа, где вершинами являются модули, а гранями – узлы [14–16]. Затем вычисляется количество операций, необходимых для выполнения реконфигурации, и проводится кинематический анализ модульной системы.

Используя матрицы смежности графов начальной и конечной (целевой) конфигураций $A_{initial}$ и A_{final} модульной системы, необходимо определить минимальное множество отличий между этими двумя состояниями. Оптимальное множество шагов реконфигурации также определяется при помощи данных матриц и может быть представлено как матрица разности двух конфигураций. Матрица разности для произвольного порядка модулей:

$$D = PA_{final}P^T - A_{initial}, \quad (1)$$

где P – матрица перестановки [16, 17]. Если модули i и j должны быть отсоединены в процессе реконфигурации, элемент матрицы $d_{ij} = -1$; если модули должны быть соединены, то $d_{ij} = 1$.

Для определения матрицы разности может использоваться алгоритм поиска субоптимального плана реконфигурации GreedyCM [18, 19], который имеет NP временную сложность. Матрица разности пригодна для координирования процесса реконфигурации только тогда, когда норма матрицы разности является минимальной [14]:

$$\min \|D\|. \quad (2)$$

Алгоритмы поиска оптимального решения становятся вычислительно невыполнимыми при числе вершин в графе свыше нескольких десятков. Для преодоления данного ограничения может использоваться метод главных компонент в сочетании с паросочетанием двудольных графов [14].

После нахождения матрицы разности может быть реализована реконфигурация в соответствии с алгоритмом [14]:

- 1) поиск матрицы D . В случае нулевой матрицы D реконфигурация заканчивается;
- 2) определение возможности выполнения разъединения модулей, выполнение разъединения модулей в соответствии с полученной матрицей D и последующее обновление матрицы;

3) определение возможности выполнения операций присоединения модулей посредством кинематического анализа. Осуществимость операций определяется индексом качества соединения;

4) выполнение всех осуществимых операций и обновление матрицы D ;

5) возвращение к шагу 2 и повторение шагов 2–4 до тех пор, пока не будут выполнены все соединения, осуществимые напрямую;

6) достижение целевых точек с использованием смежных звеньев и обновление матрицы D , возвращение на шаг 2. Если не найдено смежных модулей – переход на шаг 7;

7) при необходимости разъединение модулей, которые не помечены к отсоединению в матрице D ;

8) обновление матрицы D и возвращение к шагу 2.

Реконфигурация заканчивается, когда матрица D становится нулевой.

Кинематический анализ

Так как модульная система может содержать в себе подструктуры в виде замкнутых, открытых цепей и сложных кинематических цепей, существует единый метод анализа различных кинематических подструктур [14]. Тип подструктур определяется с помощью матрицы инцидентности графа модульной робототехнической системы. Для перехода к единому методу анализа открытые цепи преобразуются в замкнутые путем добавления виртуальных звеньев. В результате этого модульная система состоит из замкнутых кинематических цепей (циклов).

После определения циклов необходимо определить уравнения для замыкания циклов

и итеративно получить решение, которое позволит модульной робототехнической системе достичь целевого положения в пространстве [20]. Уравнение замыкания j -го цикла имеет вид:

$$\varepsilon_j = \sum_{k=1}^n \pm r_{jk} e^{i\theta_{jk}} \approx 0, \quad (3)$$

где r_{jk} – длины k -го вектора в j -м цикле; θ_{kj} – ориентация k -го вектора; ε_j – ошибка замыкания цикла j .

После дифференцирования ошибки ε_j :

$$\dot{\varepsilon}_j = \sum_{k=1}^n \pm (\dot{r}_{jk} e^{i\theta_{jk}} + i \dot{\theta}_{jk} r_{jk} e^{i\theta_{jk}}) \approx 0. \quad (4)$$

Для повышения точности оценки переменных r и θ , которые отличаются от их истинного значения на значение δr , $\delta \theta$, т. е. $r_{jn-true} = r_{jn} + \delta r_{jn}$, $\theta_{jn-true} = \theta_{jn} + \delta \theta_{jn}$, необходимо разложить ε_j в ряд Тейлора:

$$(r_{j1} e^{i\theta_{j1}} + \dots + r_{jn} e^{i\theta_{jn}}) + e^{i\theta_{jn}} \delta r_{jn} + i r_{jn} e^{i\theta_{jn}} \delta \theta_{jn} = 0, \quad (5)$$

$$e^{i\theta_{jn}} \delta r_{jn} + i r_{jn} e^{i\theta_{jn}} \delta \theta_{jn} = -\varepsilon_j.$$

После этого необходимо решить систему уравнений, представленных в виде

$$Ax = -\varepsilon. \quad (6)$$

Здесь A – матрица коэффициентов $p \times q$, где $q > p$, а x – аппроксимация δ . Процесс корректировки текущих значений r , θ происходит итеративно путем добавления к ним значений δr , $\delta \theta$, пока значения δr , $\delta \theta$ не станут достаточно малыми.

Тестирование

Для апробации разработанного подхода был изготовлен прототип мобильной автономной реконфигурируемой системы (МАРС) и проведен ряд экспериментов. В виртуальной среде были проведены эксперименты по формированию трех конфигураций: «ТриМод», «Змея» и «Краб» (см. рисунок ниже, поз. а).

а

б

II

Начальные и конечные положения модулей при формировании конфигураций:

I – «ТриМод»; II – «Змея»; III – «Краб»; тестирование формации «ТриМод»:

I (а) – начальное положение; II (б) – конечное положение

Для проведения экспериментов в реальных условиях было изготовлено тестовое поле. При реконфигурации МАРС использовались маркеры дополненной реальности (ARUco-маркеры) для идентификации и позиционирования модулей, а также инфракрасные датчики для обеспечения соосности разъемов при попарном соединении роботов. Тестирование проводилось только с формацией «ТриМод» (поз. б на рисунке).

Проведенное тестирование показало успешное выполнение реконфигурации МАРС из произвольного начального положения модулей в заданную формацию при помощи разработанного подхода.

Заключение

В отличие от метода [14], в котором тетраэдры использовались для работы только с двумерными конфигурациями, предложенный подход позволяет формировать трехмерные структуры. Кроме того, алгоритм поиска субоптимального плана реконфигурации модульной робототехнической системы GreedyCM наряду с алгоритмом реконфигурации [18] позволяет находить решения, очень близкие к оптимальным, за время, которое полиномиально зависит от размера модульной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ронжин, А. Л. Конструкция и принципы функционирования магнитно-механических коннекторов модульного робота / А. Л. Ронжин, Н. А. Павлюк, Д. И. Михальченко // VI Международная конференция «Прогресс транспортных средств и систем». – 2018.
2. Андреев, В. П. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов / В. П. Андреев, В. Л. Ким, Ю. В. Подураев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 3. – С. 23–29.
3. Yim, M. A reconfigurable modular robot with multiple modes of locomotion // Proc. of the 1993 JSME Conference on Advanced Mechatronics, Tokyo, Japan. – 1993.
4. Castano, A. Mechanical design of a module for reconfigurable robots / A. Castano, P. Will // Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No. 00CH37113). IEEE. – 2000. – Т. 3. – С. 2203–2209.
5. Shen, W. M. Docking in self-reconfigurable robots / W.M. Shen, P. Will // Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180). IEEE. – 2001. – Т. 2. – С. 1049–1054.
6. Castano, A. The Conro modules for reconfigurable robots / A. Castano, A. Behar, P.M. Will // IEEE/ASME transactions on mechatronics. – 2002. – Т. 7. – № 4. – С. 403–409.
7. Koseki, M. Cellular robots forming a mechanical structure (evaluation of structural formation and hardware design of “chobie ii” / M. Koseki, K. Minami, N. Inou // in Distributed Autonomous Robotic Systems. – 2004.
8. An, B. K. Em-cube: cube-shaped, self-reconfigurable robots sliding on structure surfaces // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE. – 2008. – С. 3149–3155.
9. Chiang, C. J. Modular robot motion planning using similarity metrics / C. J. Chiang, G. S. Chirikjian // Autonomous Robots. – 2001. – Т. 10. – № 1. – С. 91–106.
10. Lyder A. Mechanical design of odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot / A. Lyder, R. F. M. Garcia, K. Stoy // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE. – 2008. – С. 883–888.
11. Hamlin, G. J. Tetrobot: a modular system for hyper-redundant parallel robotics / G. J. Hamlin, A. C. Sanderson // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE. – 1995. – Т. 1. – С. 154–159.
12. Murata, S. M-TRAN: Self-reconfigurable modular robotic system / S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, S. Kokaji // IEEE/ASME transactions on mechatronics. – 2002. – Т. 7. – № 4. – С. 431–441.
13. Funiak, S. Distributed localization of modular robot ensembles / S. Funiak, P. Pillai, M.P. Ashley-Rollman, J.D. Campbell, S.C. Goldstein // The International Journal of Robotics Research. – 2009. – Т. 28. – № 8. – С. 946–961.
14. Nelson, C.A. A framework for self-reconfiguration planning for unit-modular robots: Doctoral dissertation. Purdue University, 2005.
15. Durna, M. The self-reconfiguration of a holonic hand: the holonic regasp / M. Durna, A. M. Erkmen, I. Erkmen // Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No. 00CH37113). IEEE. – 2000. – Т. 3. – С. 1993–1998.
16. Durna M. Self-reconfiguration in task space of a holonic structure / Durna, A. M. Erkmen, I. Erkmen // Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No. 00CH37113). IEEE. – 2000. – Т. 3. – С. 2366–2373.
17. Conte, D. Thirty years of graph matching in pattern recognition / D. Conte, P. Foggia, C. Sansone, M. Vento // International journal of pattern recognition and artificial intelligence. – 2004. – Т. 18. – № 03. – С. 265–298.
18. Hou, F. Graph-based optimal reconfiguration planning for self-reconfigurable robots / F. Hou, W.M. Shen // Robotics and Autonomous Systems. – 2014. – Т. 62. – № 7. – С. 1047–1059.
19. Sheth, P.N. IMP (Integrated Mechanisms Program), a computer-aided design analysis system for mechanisms and linkage / P. N. Sheth, J. J. Uicker // Journal of Engineering for Industry. – 1972. – Т. 94. – № 2. – С. 454–464.
20. Uicker, J. J. Theory of machines and mechanisms / J. J. Uicker, G. R. Pennock, J. E. Shigley. – New York, NY: Oxford University Press, 2011. – Т. 1.