

# Метод планирования пути при формировании конфигурации многофункционального модульного робота с использованием роевой стратегии управления

В.И. Петренко

Кафедра организации и технологии защиты информации  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Россия, Ставрополь  
e-mail: vip.petrenko@gmail.com

Ф.Б. Тебуева

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Россия, Ставрополь  
e-mail: fariza.teb@gmail.com

А.С. Павлов

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

В.О. Антонов

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Россия, Ставрополь  
e-mail: ant.vl.02@gmail.com

## Аннотация<sup>1</sup>

Многофункциональные модульные роботы состоят из множества модулей, которые могут формировать кинематическую структуру в соответствии с текущей задачей. При функционировании в недетерминированной среде адаптивная кинематическая структура робота позволяет изменять конфигурацию и подстраиваться под изменение условий и ограничения окружающей среды. Однако при этом формирование требуемой конфигурации может занимать много времени, что является проблемой при необходимости выполнения целевой функции в режиме реального времени. Исходя из этого, целью данной работы является снижение времени, необходимого для формирования конфигурации модульного робота. В статье предложен метод планирования пути перемещения модулей при формировании конфигурации многофункционального модульного робота с использованием роевой стратегии управления. Данный подход позволяет в режиме реального времени осуществлять информационный обмен между

модулями робота и производить планирование пути децентрализованно для каждого модуля, независимо от их количества. Использование методов аналитической геометрии позволяет снизить вычислительную сложность метода и избежать энергетических затрат бортовых энергоресурсов робота. Представлены результаты моделирования разработанного метода для робота, состоящего из 5-50 модулей.

## 1. Введение

Реконфигурируемые мехатронно-модульные роботы (ММР) представляют собой робототехнические системы, состоящие из множества различных модулей, которые взаимодействуют между собой и обмениваются информацией для выполнения целевой функции. ММР состоит из отдельных модулей, которые имеют возможность перемещаться относительно друг друга, создавая различные конфигурации [1, 2].

ММР 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.

---

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

Метод планирования пути при формировании конфигурации многофункционального модульного робота с использованием роевой стратегии управления

При функционировании в недетерминированной среде адаптивная кинематическая структура ММР позволяет изменять конфигурацию и подстраиваться под изменение условий и ограничения окружающей среды. Однако при этом формирование требуемой конфигурации может занимать много времени, что является проблемой при необходимости выполнения целевой функции в режиме реального времени. Литература по тематике исследования представлена многочисленными разработками в данной области и обуславливает актуальность использования данных разработок в современном мире. Задачи, возникающие при разработке решений для формирования конфигурации модульных роботов, рассмотрены в следующих работах [3-17].

За последнее десятилетие было предложено множество различных методов и алгоритмов для планирования пути, включая: методы на основе графов [3-5], искусственные потенциальные поля [6, 7], генетический алгоритм [8, 9], нейронные сети [10], алгоритм роя частиц [11], алгоритм колоний муравьев [12, 13], алгоритм  $A^*$  [14, 15], алгоритм Дейкстры [16, 17]. В работе [9] предложен метод планирования пути модульных роботов на основе генетического алгоритма. В этом методе случайным образом генерируется популяция, хромосомы которой состоят из различных путей и конфигураций робота с переменной длиной. Целевая функция может быть задана тремя критериями: минимальное время пути, кратчайшее расстояние, минимизация энергозатрат. В работе [10] авторы использовали нейронную сеть для анализа особенностей картографических данных и прогнозирования сложности поиска маршрута на карте. В статье [11] проведено исследование проблемы оптимизации траектории движения модульного робота при возникновении неисправности модуля на основе алгоритма роя частиц. При этом задача оптимизации сводится к подбору коэффициентов целевой функции. В работе [12] для решения задачи планирования пути мобильного робота в сложных средах был применен алгоритм оптимизации колоний муравьев. Коэффициенты алгоритма были проанализированы и подобраны для функционирования робота в условиях различных рабочих областей с препятствиями различного количества, размеров и форм. Авторами работы [15] был разработан алгоритм планирования пути для мобильного робота с использованием генетического алгоритма и алгоритма  $A^*$ . Предложенный алгоритм включает в себя три шага: формирование модели мобильного робота в пространстве на основе графа Маклинка, поиск допустимого пути перемещения робота с использованием алгоритма Дейкстры и поиск глобального оптимального пути мобильного робота на основе гибридного алгоритма  $A^*$  и генетического алгоритма. В статье [16] представлено решение для планирования кратчайшего пути перемещения робота в лабиринте на основе

алгоритма Дейкстры. Результаты моделирования показали, что применение предложенного алгоритма является эффективным при планировании пути мобильного робота в среде с препятствиями.

Анализ существующих решений отражает индивидуальность использования разработанных методов под конкретную ситуацию и устройство. Таким образом, планирование пути при формировании конфигурации ММР с использованием роевой стратегии управления является актуальной задачей.

## 2. Постановка задачи

Целью данной работы является уменьшение времени, необходимого для формирования конфигурации ММР. Основной задачей является разработка метода планирования пути перемещения модулей ММР при формировании конфигурации с использованием роевой стратегии управления.

Задачу исследования можно разделить на три уровня:

- стратегический уровень планирования. На данном уровне решается вопрос глобальной навигации;
- тактический уровень планирования. Задача тактического уровня сводится к решению задачи локальной навигации;
- исполнительный уровень. Задачей данного уровня является обеспечение заданных характеристик движения модуля ММР в каждый момент времени посредством приводов.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо решить три подзадачи: построение глобальной навигации посредством информационного обмена между модулями ММР при использовании роевой стратегии управления, построение локальной навигации для формирования конфигурации, построение системы управления движением модулей ММР. Математическая постановка задачи выглядит следующим образом: необходимо определить целевое положение  $q'_i$  каждого модуля ММР для формирования требуемой конфигурации при известных собственном положении  $q_i$  и заданной конфигурации  $P$ .

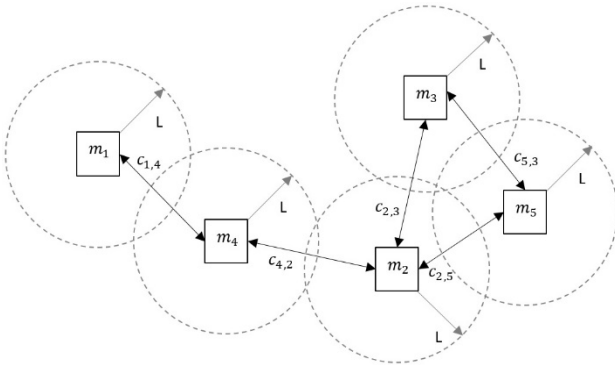
## 3. Методы

### 2.1. Информационный обмен между модулями ММР при использовании роевой стратегии управления

Каждый робот  $m_i \in R$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ , где  $M$  – количество роботов в группе, способен выполнить некоторый ограниченный набор элементарных действий  $A = a_1, a_2, \dots, a_b$ . Робот  $m_i$  участвует в информационном обмене с соседними модулями  $m_j \in Q$ , находящимися в пределах зоны видимости, ограниченной радиусом  $L$  робота  $m_i$ :

$$Q = \{m_j \mid \|q_j - q_i\| < L; j = \overline{1, N}\}. \quad (1)$$

Методы роевого взаимодействия в больших группах роботов реализуют стратегии децентрализованного управления роботами, где каждый робот самостоятельно принимает решение о своих действиях, опираясь на доступную ему информацию [5]. Каждый участник группы  $m_i$  получает информацию по каналу связи  $c_{i,j}$  лишь от нескольких соседних роботов группы  $m_j$ , расположенных в зоне видимости робота  $m_i$ , то есть в области пространства, ограниченного радиусом видимости робота  $L$ . Пример информационного обмена между модулями ММР при использовании роевой стратегии управления представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1. Информационный обмен между модулями ММР при использовании роевой стратегии управления**

При данном подходе, объемы передаваемой информации между роботами группы, находящимися в зоне видимости, а также время выбора действий робота не зависят от общего количества роботов в группе, что делает перспективным применение этих методов для управления большими группами роботов, насчитывающими сотни и даже тысячи роботов. Такая стратегия информационного обмена в группе позволяет избежать энергетических затрат бортовых энергоресурсов роботов, связанных с передачей данных на большие расстояния.

Конфигурация ММР представляет собой совокупность значений положения всех модулей, которая полностью определяет форму робота в любой момент времени. В данной работе предполагается, что целевая конфигурация задается набором координат положения геометрического центра каждого модуля  $m_i$ . Таким образом, необходимо определить целевое положение  $q'_i$  каждого модуля  $m_i$  в требуемой конфигурации ММР  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ , где  $i$ -количество модулей робота. При этом алгоритм планирования пути должен работать в масштабе реального времени с учетом бортовых ресурсов модулей ММР.

### 3.2. Планирование пути модулями ММР при формировании конфигурации

Рассмотрим задачу планирования пути при формировании конфигурации ММР при использовании роевой стратегии управления на плоскости. Данные, которые передает каждый модуль  $m_i$  при информационном обмене, представляют собой вектор  $v_{m_i}$ , содержащий координаты собственного положения, а также координаты самого дальнего робота, находящегося в зоне видимости модуля  $L$ :

$$v_{m_i} = \{q_i, q_j\} \quad (2)$$

На основе полученных данных рассчитываются расстояния между собственным положением модуля и положением соседнего модуля, а также между собственным положением модуля и координатами самого дальнего модуля, находящегося в зоне видимости соседнего модуля для каждого соседнего модуля:

$$\begin{cases} s_1 = \sqrt{(x_{q_i} - x_{q_j})^2 + (y_{q_i} - y_{q_j})^2}; \\ s_2 = \sqrt{(x_{q_L} - x_{q_i})^2 + (y_{q_L} - y_{q_i})^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $s_1$  – расстояние между модулями  $m_i$  и соседним модулем  $m_j$ ,  $s_2$  – расстояние между модулями  $m_i$  и самым дальним модулем, находящегося в зоне видимости  $L$  соседнего модуля  $m_j$ , положение которого обозначено  $q_L$ .

В случае, если  $s_2 > s_1$ , то самым дальним модулем  $m_i$  принимается модуль с координатами  $(x_L, y_L)$ , находящийся в зоне видимости  $L$  соседнего модуля  $m_j$ . Эти же данные будут переданы соседним элементам при следующей передаче данных, а координаты собственного положения заменяются координатами соседнего модуля:

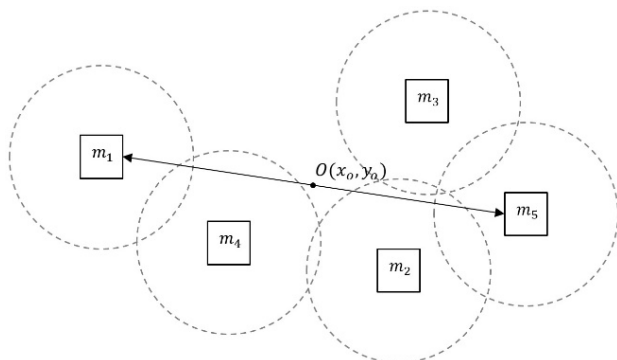
$$v_{m_i} = \begin{cases} \{q_j, q_L\}, & \text{если } s_2 > s_1; \\ \{q_i, q_j\}, & \text{если } s_2 < s_1. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, через  $n$ -ое количество итераций каждый робот группы будет знать положения самых удаленных друг от друга модулей, при этом количество итераций не зависит от количества модулей ММР. Соответственно, на основе этих данных можно определить геометрический центр требуемой конфигурации ММР. Для этого необходимо найти координаты точки  $O$  отрезка, соединяющего два самых удаленных друг от друга модуля:

$$\begin{cases} x_O = \frac{x_{q_j} + x_{q_L}}{2}; \\ y_O = \frac{y_{q_j} + y_{q_L}}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Метод планирования пути при формировании конфигурации многофункционального модульного робота с использованием роевой стратегии управления

Иллюстрация определения геометрического центра целевой конфигурации ММР представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2. Определение геометрического центра конфигурации ММР**

Получив геометрический центр конфигурации  $O(x_0, y_0)$ , необходимо рассчитать обобщенные координаты ММР, описывающие положение каждого модуля  $m_i$  в целевой конфигурации. Для этого необходимо найти вектор  $\overline{OP}$ , определяющий расстояние между рассчитанным  $O(x_0, y_0)$  и заданным  $P(x, y)$  геометрическими центрами конфигураций:

$$\overline{OP} = (x_0 - x; y_0 - y). \quad (6)$$

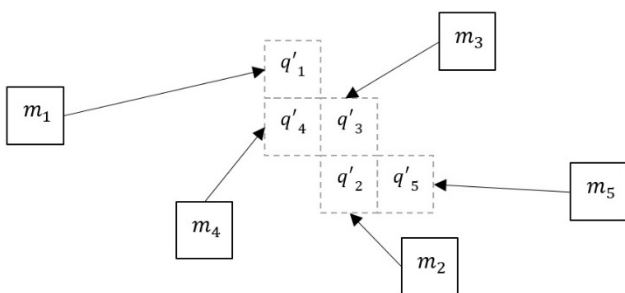
После этого можно рассчитать положение каждой точки в требуемой конфигурации ММР:

$$P' = \{p'_1 + \overline{OP}, p'_2 + \overline{OP}, \dots, p'_i + \overline{OP}\}. \quad (7)$$

Основная цель разработки метода заключается в сокращении времени формирования конфигурации ММР, поэтому критерием выбора положения является минимальное расстояние от текущей точки  $q_i$  к конечной  $q'_i$ . Таким образом, необходимо для каждого модуля  $m_i$  определить расстояние  $s'_i$  до каждого положения  $p'_i$  и выбрать положение  $p'_i$  конфигурации ММР, соответствующее минимальному расстоянию:

$$\begin{cases} s'_i = \sqrt{(x_{q_i} - x_{p'_i})^2 + (y_{q_i} - y_{p'_i})^2}, \\ \forall p'_i \in P': (s'_i \leq s'_{i-1} \Rightarrow p'_i = q'_i). \end{cases} \quad (7)$$

Иллюстрация определения положения модулей в целевой конфигурации ММР представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3. Определение положения модулей в конфигурации ММР**

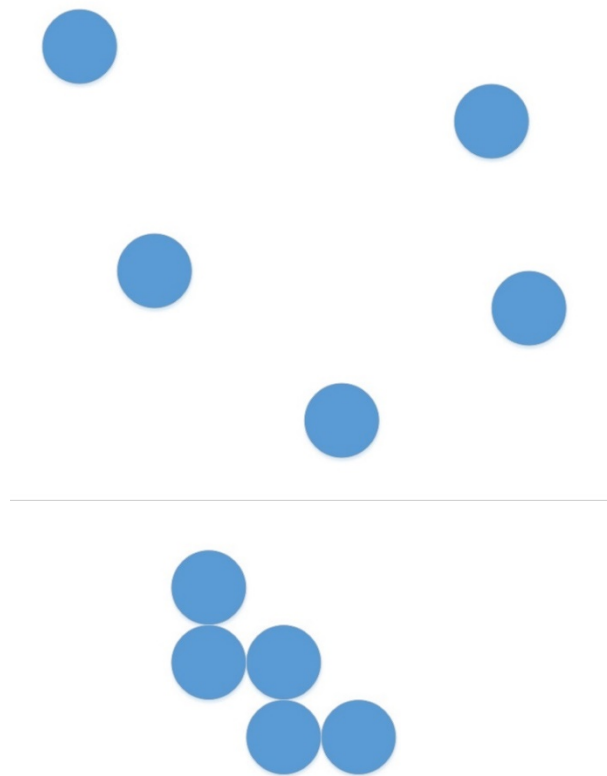
В дальнейшем, при движении к целевому положению модуля  $m_i$  по каналу связи  $c_{i,j}$  будет передаваться вектор  $v_{m_i}$ , содержащий текущие координаты модуля  $q_i$  и координаты целевого положения  $q'_i$ :

$$v_{m_i} = \{q_i, q'_i\}. \quad (8)$$

#### 4. Результаты

В целях апробации предложенного метода была произведена программная реализация алгоритма на языке программирования С#. При проведении симуляции был использован компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-8550U 1.8GHz, 8Gb RAM. Целевая конфигурация задается набором координат центра каждого модуля.

Результат симуляции планирования пути при формировании конфигурации ММР, состоящего из 5 модулей, с помощью разработанного метода представлен на рисунке 4.



**Рисунок 4. Планирование пути при формировании конфигурации ММР, состоящего из 5 модулей**

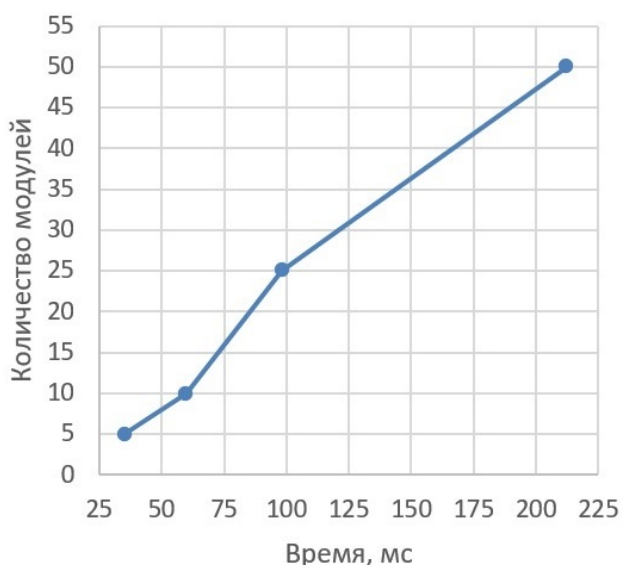
При моделировании работы алгоритма планирования пути время выполнения программы составило 30,99 мс. Преимуществом разработанного метода является низкая вычислительная сложность, что делает возможным планирование пути в режиме реального времени.

Также была проведена серия экспериментов для ММР, состоящих из 10, 25, 50 модулей. Зависимость быстродействия работы метода от количества модулей робота представлена в таблице 1.

**Таблица 1. Зависимость быстродействия метода от количества модулей ММР**

Количество модулей ММР	Время
5	34,8365 мс
10	59,8958 мс
25	98,3215 мс
50	212,4873 мс

Графически зависимость быстродействия метода представлена на рисунке 5.



**Рисунок 5. График зависимости быстродействия метода от количества модулей**

На основе данных, представленных в таблице 1 и на рисунке 5, можно сделать вывод о том, что с увеличением количества модулей ММР линейно возрастает и время, необходимое для выполнения программы. Также стоит отметить, что на время планирования пути оказывает влияние и количество соседних модулей  $m_j$ , осуществляющих передачу данных по каналу связи  $c_{i,j}$ .

Помимо того, что разработанный метод может быть применен не только для формирования конфигурации ММР, но и при управлении группой роботов в силу возможности масштабируемости системы и низкой вычислительной сложности.

## 5. Обсуждение

В предложенном методе рассчитывается только конечное положение модуля при формировании конфигурации без учета ориентации, необходимой для осуществления сцепки между модулями. Это ограничение обусловлено тем, что механизмы сопряжения отличаются у каждого модульного робота и необходимо рассматривать данную задачу

для конкретного робота. Помимо этого, метод применим только для формирования конфигурации исключительно на плоскости, для работы в трехмерном пространстве необходима модернизация разработанного метода. Таким образом, в дальнейших работах планируется исследование вышеперечисленных задач.

## 5. Заключение

Таким образом, в данной статье представлен метод планирования пути перемещения при формировании конфигурации многофункционального модульного робота с использованием роевой стратегии управления. Данный подход позволяет в режиме реального времени осуществлять информационный обмен между модулями робота и производить планирование пути децентрализованно для каждого модуля, независимо от их количества. Использование методов аналитической геометрии позволяет снизить вычислительную сложность метода и избежать энергетических затрат бортовых энергоресурсов робота. Представлены результаты моделирования разработанного метода для робота, состоящего из 5-50 модулей, а также результат исследования быстродействия метода от количества модулей робота.

## Acknowledgments (благодарности)

Исследование выполнено в рамках реализации научного проекта по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики» в рамках ФЦПР 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## 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], in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 14, no. 1, pp. 43-52, March 2007. DOI: 10.1109/MRA.2007.339623.
2. Yim, M., White, P.J., Park, M., & Sastra, J. (2009). Modular Self-Reconfigurable Robots. Encyclopedia of Complexity and Systems Science, pp. 5618-5631, 2009. DOI:10.1007/978-0-387-30440-3\_334.
3. Kovács, G., Yusupova, N., Smetanina, O., Rassadnikova, E. Methods and algorithms to solve the vehicle routing problem with time windows and further conditions (2018) Pollack Periodica, 13 (1), pp. 65-76. DOI: 10.1556/606.2018.13.1.6.
4. Kutlubaev, I.M., Zhydenko, I.G., Bogdanov, A.A. Basic concepts of power anthropomorphic grippers construction and calculation (2016) 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 -

Метод планирования пути при формировании конфигурации многофункционального модульного робота с использованием роевой стратегии управления

- Proceedings, №7910963. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910963.
5. Klimenko, A.B., Ivanov, D., Melnik, E.V. The configuration generation problem for the informational and control systems with the performance redundancy (2016) 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings, №7910901. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910901.
  6. E. Rimon and D. E. Koditschek, Exact robot navigation using artificial potential functions, in IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, no. 5, pp. 501-518, Oct. 1992. DOI: 10.1109/70.163777.
  7. S. S. Ge and Y. J. Cui, New potential functions for mobile robot path planning, in IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 16, no. 5, pp. 615-620, Oct. 2000. DOI: 10.1109/70.880813.
  8. C. Tsai, H. Huang and C. Chan, Parallel Elite Genetic Algorithm and Its Application to Global Path Planning for Autonomous Robot Navigation, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp. 4813-4821, Oct. 2011. DOI: 10.1109/TIE.2011.2109332.
  9. Haghzad Klidbary, Sajad. (2013). Finding Proper Configurations for Modular Robots by Using Genetic Algorithm on Different Terrains. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. DOI: 10.7763/IJMMM.2013.V1.78.
  10. Li, G., Fei, F., Wang, G., Lü, S., Wang, Q., Guo, D. ANN\*: A heuristic search algorithm based on artificial neural networks (2016) ACM International Conference Proceeding Series, №51, DOI: 10.1145/3028842.3028893.
  11. Jia, Q., Zhang, J., Chen, G., Sun, H., Li, T. Trajectory optimization of modular robot based on the fault-tolerant performance functions (2015) Proceedings of the 2015 10th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2015, №7334178, pp. 580-585. DOI: 10.1109/ICIEA.2015.7334178.
  12. Uriol, R., Moran, A. Mobile robot path planning in complex environments using ant colony optimization algorithm (2017) 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2017, №7942653, pp. 15-21. DOI: 10.1109/ICCAR.2017.7942653.
  13. M. Brand, M. Masuda, N. Wehner and Xiao-Hua Yu, Ant Colony Optimization algorithm for robot path planning, 2010 International Conference On Computer Design and Applications, Qinhuangdao, 2010, pp. V3-436-V3-440. DOI: 10.1109/ICCD.2010.5541300.
  14. R. Kala, A. Shukla, R. Tiwari, S. Rungta and R. R. Janghel, Mobile Robot Navigation Control in Moving Obstacle Environment Using Genetic Algorithm, Artificial Neural Networks and A\* Algorithm, 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, CA, 2009, pp. 705-713. DOI: 10.1109/CSIE.2009.854.
  15. C. Zeng, Q. Zhang and X. Wei, Robotic Global Path-Planning Based Modified Genetic Algorithm and A\* Algorithm, 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shangshai, 2011, pp. 167-170. DOI: 10.1109/ICMTMA.2011.613.
  16. Huijuan Wang, Yuan Yu and Quanbo Yuan, Application of Dijkstra algorithm in robot path-planning, 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Hohhot, 2011, pp. 1067-1069. DOI: 10.1109/MACE.2011.5987118.
  17. Y. Wang and X. Yu, Research for the Robot Path Planning Control Strategy Based on the Immune Particle Swarm Optimization Algorithm, 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, Sanya, Hainan, 2012, pp. 724-727. DOI: 10.1109/ISdea.2012.649.