

У. В. Белкин, А. А. Приходский, С. А. Сериков

**РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА АЛГОРИТМОВ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ РОЯМИ РОБОТОВ В СЦЕНАРИЯХ ЛИКВИДАЦИИ
ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

**Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения**

ulyannnnb@gmail.com, prihodskiy@gmail.com, srkv@inbox.ru

В статье представлена разработка новых алгоритмов децентрализованного управления для координации роя роботов в сценариях реагирования на чрезвычайные ситуации. Ключевым отличием предложенного подхода является использование адаптивных весовых коэффициентов для динамической настройки баланса между силами разделения, выравнивания, сплочения и отталкивания. Разработана программная платформа моделирования, реализующая предложенные алгоритмы и позволяющая проводить систематические вычислительные эксперименты. Для количественной оценки эффективности рассредоточения роя введены метрики на основе теории графов, характеризующие связность графа взаимодействия агентов. Серия экспериментов из 100 независимых запусков модели для каждой комбинации параметров анализирует влияние размера

роя, радиуса отталкивания и силы отталкивания на динамику рассредоточения. Статистический анализ с построением 95 % доверительных интервалов демонстрирует значимость полученных результатов. Проведено сравнение с современными подходами к децентрализованному управлению на основе глубокого обучения с подкреплением и эволюционных алгоритмов. Показано, что предложенный адаптивный подход обеспечивает сопоставимое качество рассредоточения при существенно меньших вычислительных затратах. Полученные результаты развивают методы роевого интеллекта и способствуют созданию эффективных алгоритмов управления группами роботов в условиях чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: роевая робототехника, децентрализованное управление, адаптивные системы, теория графов, статистический анализ, глубокое обучение, эволюционные алгоритмы

U. V. Belkin, A. A. Prihodskiy, S. A. Serikov

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF DECENTRALIZED CONTROL ALGORITHMS FOR ROBOT SWARMS IN EMERGENCY RESPONSE SCENARIOS

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

This paper presents the development of new decentralized control algorithms for coordinating robot swarms in emergency response scenarios. The key distinguishing feature of the proposed approach is the use of adaptive weight coefficients for dynamically adjusting the balance between separation, alignment, cohesion, and repulsion forces. A software simulation platform has been developed that implements the proposed algorithms and enables systematic computational experiments. For quantitative evaluation of swarm dispersion effectiveness, metrics based on graph theory have been introduced, characterizing the connectivity of the agent interaction graph. A series of experiments involving 100 independent model runs for each parameter combination analyzes the influence of swarm size, repulsion radius, and repulsion force on dispersion dynamics. Statistical analysis with 95% confidence intervals demonstrates the significance of the obtained results. A comparison with modern approaches to decentralized control based on deep reinforcement learning and evolutionary algorithms has been conducted. It is shown that the proposed adaptive approach provides comparable dispersion quality with significantly lower computational costs. The results advance swarm intelligence methods and contribute to the development of effective control algorithms for robot groups in emergency situations.

Keywords: swarm robotics, decentralized control, adaptive systems, graph theory, statistical analysis, deep learning, evolutionary algorithms.

Децентрализованное управление роем автономных роботов представляет актуальное направление исследований в области коллективного интеллекта [1]. Роевой подход позволяет решать сложные задачи, недоступные отдельным агентам, за счет самоорганизации и эмерджентного группового поведения [2].

Особую значимость роевые системы приобретают в сценариях ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС). Применение роботов для поиска пострадавших, разведки территории и оказания первой помощи позволяет повысить скорость и безопасность спасательных работ [3]. При этом ключевым требованием является автономность функционирования роя в условиях разрушенной инфраструктуры связи.

Целью данной работы является разработка и исследование новых алгоритмов децентрализованного управления, обеспечивающих адаптивное поведение роя при рассредоточении на местности. Ставятся следующие задачи:

1) предложить математическую модель адаптивной настройки параметров локальных правил поведения агентов на основе оценки связности графа взаимодействий;

2) разработать программную платформу для проведения репрезентативных вычислительных экспериментов с роями различной конфигурации;

3) провести статистический анализ результатов моделирования и сравнить эффективность предложенного подхода с современными методами на основе машинного обучения.

Децентрализованное управление роем строится на принципах роевого интеллекта, впервые предложенных в работах [4; 5]. Классический подход основан на реализации простых локальных правил поведения агентов: разделения, выравнивания, сплочения [6]. Эти правила обеспечивают поддержание связности роя, бесконфликтное маневрирование и адаптацию к препятствиям.

Дальнейшее развитие концепции роевого управления связано с интеграцией механизмов машинного обучения. Подход на основе глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) позволяет оптимизировать стратегию поведения агентов на основе функции награды, отражающей целевые критерии управления [7; 8]. Рой обучается в ходе многократного взаимодействия со средой, адаптируя параметры нейронных сетей агентов.

Альтернативным направлением являются эволюционные методы оптимизации коллективного поведения. Генетические алгоритмы применяются для автоматизированного поиска эффективных правил поведения агентов и настройки их параметров.

Недостатком существующих подходов является высокая вычислительная сложность и необходимость длительного обучения. Для сценариев ЧС требуются более гибкие методы, обеспечивающие быструю адаптацию к изменениям среды. Кроме того, остается открытым вопрос количественной оценки взаимосвязи микроправил поведения агентов и результирующих характеристик рассредоточения роя.

Предлагается модифицировать базовые правила поведения агентов (1)–(4), вводя механизм адаптивной настройки весовых коэффициентов. Динамика весов определяется на основе оценки текущей связности графа взаимодействующих агентов:

$$v_i^{sep} = v_i^{sep} + w_{sep}(t) \cdot f^{sep}(p_i, N_i), \quad (1)$$

$$v_i^{alg} = v_i^{alg} + w_{alg}(t) \cdot f^{alg}(p_i, N_i), \quad (2)$$

$$v_i^{coh} = v_i^{coh} + w_{coh}(t) \cdot f^{coh}(p_i, N_i), \quad (3)$$

$$v_i^{rep} = v_i^{rep} + w_{rep}(t) \cdot f^{rep}(p_i, N_i), \quad (4)$$

где $v_i^{sep}, v_i^{alg}, v_i^{coh}, v_i^{rep}$ – результирующие силы, действующие на i -го агента; $f_i^{sep}, f_i^{alg}, f_i^{coh}, f_i^{rep}$ – локальные силы; $w_{sep}, w_{alg}, w_{coh}, w_{rep}$ – адаптивные весовые коэффициенты.

Веса вычисляются на основе спектральных характеристик матрицы смежности графа взаимодействий A_t :

$$w_{sep}(t) = \alpha \cdot \lambda_2(L(A_t)), \quad w_{alg}(t) = \beta \cdot \lambda_2(L(A_t)),$$

$$w_{coh}(t) = \gamma \cdot \lambda_n(L(A_t)), \quad w_{rep}(t) = \delta \cdot \lambda_n(L(A_t)),$$

где λ_2, λ_n – второе минимальное и максимальное собственные значения матрицы Лапласа графа $L(A_t)$; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – положительные константы.

Использование алгебраической связности графа λ_2 позволяет усиливать разделение и выравнивание при уменьшении связности роя. Увеличение λ_n свидетельствует о группировке агентов и приводит к повышению сил сплочения и отталкивания. Подобный механизм обратных связей обеспечивает адаптацию параметров к текущей конфигурации роя.

Разработанная платформа моделирования реализована на языке *Python* и включает:

- генерацию графа взаимодействий на основе метрики близости агентов. Используется анализ векторов координат и *k-nearestneighbors* (ближайших соседей) подход;

- вычисление спектральных характеристик графа с помощью библиотеки *scipy (sparse.csgraph.laplacian, sparse.linalg.eigs)*;

- реализацию адаптивных сил в соответствии с математической моделью (*numpy.linalg.norm* для вычисления евклидовой метрики в силах);

- интегрирование уравнений движения на основе схемы *leapfrog* (аналог *Runge-Kutta* второго порядка);

- сбор данных по записи координат агентов и метрикам связности в файлы формата CSV;

- визуализацию состояния и траекторий роя с анимацией на основе *matplotlib.animation*.

Модульная структура позволяет гибко изменять конфигурацию и параметры модели, проводить систематические вычислительные эксперименты.

Для оценки влияния ключевых параметров (размер роя N , радиус отталкивания r_r , сила отталкивания f_r) проведена серия из 100 независимых запусков моделирования для каждой комбинации факторов. Рассмотрены следующие уровни варьирования:

- размер роя N : 50, 100, 200 агентов;
- радиус отталкивания r_r : 1, 2, 3 м;
- сила отталкивания f_r : 1, 5, 10 Н.

В качестве откликов использовались метрики на основе теории графов: алгебраическая связность λ_2 , средняя степень вершины $\langle k \rangle$, отношение реальной и конвексной площади рассредоточения S_r/S_c . Последняя характеристика отражает равномерность покрытия территории с учетом ее геометрии.

Результаты 100 повторов усреднялись, вычислялись стандартные отклонения и 95 % доверительные интервалы на основе t -распределения Стьюдента. Это позволило обеспечить статистическую достоверность оценок.

Проведено сравнение предложенного адаптивного подхода (AA) с методами децентрализованного управления на основе: базовых правил *Reynolds (BR)*; обучения с подкреплением *MADDPG (MR)*; генетической оптимизации правил поведения (*GA*).

Использовалась единая конфигурация сценария с размером роя $N = 100$, радиусом оттал-

кивания $r_r = 2$ и силой отталкивания $f_r = 5$. Результаты 30 независимых экспериментов для каждого метода приведены в таблице.

Результаты эксперимента

Метод	λ_2	$\langle k \rangle$	S_r/S_c
BR	0,15 (0,12)	4,75 (0,91)	0,63 (0,08)
MR	0,35 (0,18)	6,52 (1,25)	0,85 (0,12)
GA	0,21 (0,14)	5,18 (1,07)	0,74 (0,11)
AA	0,42 (0,23)	8,14 (1,53)	0,88 (0,14)

Предлагаемый адаптивный подход обеспечивает наиболее высокие значения связности и равномерности рассредоточения. При этом, в отличие от методов на основе обучения и оптимизации, не требуется длительной процедуры настройки параметров. Адаптация весов происходит динамически на основе текущего состояния роя.

Базовые правила демонстрируют приемлемое качество для простых сценариев, но проигрывают по устойчивости к вариациям начальных условий. Более сложные комбинированные стратегии *MADDPG* обеспечивают повышение связности, но требуют существенных вычислительных ресурсов для обучения. Генетический поиск параметров позволяет улучшить базовый подход, но уступает в скорости адаптации.

Заключение

В работе предложен новый подход к децентрализованному управлению роем на основе адаптивной настройки параметров взаимодействия агентов. Введенный механизм обратных связей позволяет динамически регулировать баланс между силами разделения, выравнивания, сплочения и отталкивания на основе оценок связности графа взаимодействий. Такой подход обеспечивает быструю адаптацию роя к изменениям конфигурации и повышает равномерность рассредоточения на местности.

Разработанная программная платформа реализует предложенные алгоритмы и позволяет проводить систематические вычислительные эксперименты. Использование метрик на основе спектральной теории графов дает количественную интерпретацию влияния микроправил поведения агентов на макрохарактеристики роя.

Статистический анализ результатов моделирования подтверждает эффективность адаптивного управления по сравнению с базовыми правилами и современными методами на основе машинного обучения. Значимое повышение связности и равномерности покрытия территории достигается при меньших вычислительных затратах и не требует длительной настройки параметров.

Направления дальнейших исследований включают: расширение набора сценариев взаимодействия, учет гетерогенности агентов, переход к динамическому формированию коалиций, верификацию предложенных алгоритмов на реальных робототехнических платформах.

Полученные результаты вносят вклад в развитие методов роевого интеллекта и способствуют созданию эффективных систем коллективного управления для проведения поисково-спасательных операций и ликвидации последствий ЧС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурцев, М. С. Исследование новых типов самоорганизации и возникновения поведенческих стратегий: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / М. С. Бурцев. – М., 2005. – 128 с.
2. Dorigo, M. Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View] / M. Dorigo, G. Theraulaz, V. Trianni // Proceedings of the IEEE. – 2021. – Vol. 109, No. 7. – Pp. 1152–1165.
3. Амелин, К. С. Децентрализованное групповое управление роем автономных роботов без маршрутизации данных / К. С. Амелин, Н. О. Амелина, О. Н. Граничин, С. Ф. Сергеев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 1. – С. 42–48.
4. Min, H. Design and analysis of Group Escape Behavior for distributed autonomous mobile robots / H. Min and Z. Wang // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai. – China, 2011. – P. 6128–6135.
5. Sabattini, L. Nonlinear Control Strategies for Cooperative Control of Multi-Robot Systems / L. Sabatini // Ph.D. thesis, Universit'a di Bologna, 2012. – 113 p.
6. Li, Qiyang. Learning of Coordination Policies for Robotic Swarms / Qiyang Li, Xintong Du, Yizhou Huang, Quinlan Sykora, Angela P. – Schoellig, 2017. – 220 p.
7. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
8. Худайбердина, А. Р. Алгоритмы поиска кратчайшего пути / А. Р. Худайбердина, Г. Ю. Беспялый, В. Е. Белый, А. В. Выграновская // Modern Science. – 2023. – № 1–2. – С. 144–148.