

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.241.5

УДК 519.876.5, 004.896:621.865

С.Г. Попов, Д.Е. Моторин

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ И ГРУППОВОЙ СТРАТЕГИЙ ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ДИНАМИЧЕСКОЙ КАРТЕ

S.G. Popov, D.E. Motorin

RESEARCH OF THE ALGORITHMS OF INDIVIDUAL AND GROUP MOVEMENT STRATEGIES OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS ON A DYNAMIC MAP

Рассмотрено решение задачи движения двух роботов к цели с использованием алгоритмов индивидуальной и групповой стратегий достижения цели на динамической географической карте с изменяемыми параметрами радиуса беспроводной связи и области видимости каждого робота. Предложены распределенные алгоритмы выбора пути, с помощью которых роботы, обладающие ограниченной информацией, совместно решают задачу движения к цели пути. Программная реализация и исследование качества функционирования алгоритмов выполнено в среде MatLab. Показано, что в условиях высокой плотности заполнения карты препятствиями и высокой динамики эффективной оказывается групповая стратегия достижения цели. Результаты исследования могут использоваться для моделирования индивидуального и группового движения роботов в условиях ограниченной радио- и визуальной видимости в динамической среде.

ГРУППА РОБОТОВ; ИНДИВИДУАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ; ГРУППОВАЯ СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ; ДИНАМИЧЕСКАЯ КАРТА; АЛГОРИТМ ДВИЖЕНИЯ; МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The paper considers the solution to the problem of two robots moving towards the target using the algorithm of individual and group strategy motion on a dynamic terrestrial map with variable parameters of the wireless connection radius and the visibility radius. The authors offer a distribution algorithm of path selection which helps robots using limited information to solve the problem of moving towards the target together. MatLab was used for programming and analyzing the algorithms. The results of the simulation show that the group strategy is more effective with a high density of the obstacles on the map and a high dynamic. The results can be used for simulating the individual and group strategies of movement in the conditions of limited radio and visual radius in a dynamically changing environment.

GROUP OF ROBOTS; INDIVIDUAL CONTROL STRATEGY; GROUP CONTROL STRATEGY; DYNAMIC MAP; MOTION ALGORITHM.

Решение задачи координированного перемещения автономных роботов в целевую точку предполагает выбор из двух подхо-

дов: индивидуального и группового управления [10]. При индивидуальном управлении группа роботов воспринимается как

совокупность отдельных объектов, каждый из которых движется по собственным траекториям. При групповом способе роботы решают задачу движения сообща и выстраивают общую траекторию движения.

Примерами группового движения роботов является автоматизированное движение при наличии человека оператора, задающего целевую точку в реальном масштабе времени, оптимальное движение до которой рассчитывает группа [1], алгоритмы, ориентированные на поддержание строгой иерархии подчинения роботов [2] или поддержание строя при движении в группе [3–6]. Эти алгоритмы ориентированы на заранее сформированную группу, уделяют внимание поддержанию формы строя и рассматривают задачу смены лидера, обеспечивая функционирование группы на тактическом уровне. Реализации [7, 8], в которых роботы двигаются в статической среде, карта которой не изменяется, ограничиваются однократным построением маршрутов.

При движении в динамической среде важной задачей является использование общей карты местности [9], предполагающей решение задачи предварительной оценки достижимости цели средствами серверной стороны. Авторами рассмотрена ситуация, в которой географическая карта меняется с течением времени, и предложены индивидуальная и групповая стратегии управления движением роботов. В этом случае цель управления состоит в нахождении и реализации такой индивидуальной или согласованной последовательности действий каждого робота, при которых будет достигнута конечная цель пути всеми роботами группы за минимальное время. Предложенные алгоритмы будут использованы для предварительного планирования движения роботов на динамической карте, а система моделирования позволит оценить применимость стратегии индивидуального или группового управления в зависимости от конкретных свойств роботов и интенсивности изменения внешней среды.

Постановка задачи

Цель работы – анализ эффективности

применения групповой и индивидуальной стратегии движения роботов к целевой точке маршрута в условиях динамической карты, ограниченной области видимости сенсоров и радиуса связи каждого робота.

Рассмотрим дискретную карту, по которой движутся из начальных точек k гомогенных роботов. Размер карты $(m \times n)$, размер каждой ячейки карты соответствует габаритным размерам робота. Любая ячейка карты может принимать значения 0 – запрещенная зона, 1 – разрешенная для прохода зона. С частотой ω для каждого периода времени ячейка карты $E_{i,j}$ может менять значение $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$.

У каждого робота зафиксирована начальная точка его расположения и конечная точка маршрута $Z(z_1, \dots, z_k)$. Будем считать, что роботы движутся в одну точку z .

Группа роботов $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ движется по дискретной карте. Каждый робот R_i обладает приемопередающим устройством с радиусом связи r_{Ci} . Причем для рассматриваемой задачи $r_{C1} = r_{C2} = \dots = r_{Ck} = r_C = \text{const}$. Также каждый робот обладает радиусом видимости местности r_{Bi} . Для рассматриваемой задачи $r_{B1} = r_{B2} = \dots = r_{Bk} = r_B = \text{const}$. Будем рассматривать роботов всегда исправных и движущихся с одинаковой скоростью v .

В начальный момент времени $t = 0$ движения робот R_i получает точную карту территории $E^{m \times n}(t_0)$. С течением времени карта меняется, робот может актуализировать карту, при этом в имеющейся у робота карте $R_i(E_i^{m \times n}(t_h))$ область $E_i^{Ri, rBi}$ заменяется на актуальную с радиусом r_{Bi} и центром в точке его расположения. Пара роботов, находящаяся на расстоянии не более r_{Ci} , образует канал связи друг с другом, и i -й робот получает актуальную информацию о местности от j -го, то есть они обмениваются актуальными областями $E_j^{Rj, rBj}$. Актуализация областей видимости карты производится с частотой изменения карты ω каждого робота.

Целью движения группы роботов является достижение конечной точки траектории z за минимальное время $R\{p_1, p_2, \dots, z\} \rightarrow \min$, что может быть достигнуто реализацией двух стратегий: индиви-

дуального и группового движения. В этих стратегиях состояние «робот-среда» описывается [10] как

$$S(t) = \langle R_1(t), R_2(t), E(t) \rangle,$$

но во встроенной системе управления робота состояние «робот-среда» будет описываться как

$$S(t) = \langle R_1(t), R_2(t), E^*(t) \rangle,$$

что вызвано ограниченным диапазоном актуализации карты роботом. Карта $E^*(t)$ будет обновляться только в областях $E_j^{R_i, r_{Bi}}$. При индивидуальной стратегии управления или при отсутствии связи при групповом управлении у каждого робота будет своя карта $E^*(t)$.

За коллизию при движении роботов принимается: пересечение траектории движения со стеной, занятость целевой точки маршрута или одновременное пересечение траекторий с другим роботом. Коллизии встречи с препятствиями разрешаются на этапе построения кратчайшего маршрута с обходом препятствий. Коллизия занятости конечной точки маршрута одним роботом предполагает перемещение второго робота в ближайшую свободную точку рядом с целевой.

Стратегия индивидуального управления. Траектория движения каждого робота суть последовательность перемещений $R_i\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, z_i\}$. При индивидуальной стратегии управления разрешение коллизий во время движения происходит по информации о видимых изменениях в области $E_i^{R_i, r_{Bi}}$. При попадании в радиус видимости робота r_{Bi} другого робота последний воспринимается как препятствие.

Стратегия группового управления. Траектория движения робота будет представлять собой последовательность перемещений $R_i\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ig}, p_{o(g+1)}, \dots, z_i\}$, где $\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ig}, \dots\}$ – последовательность перемещений робота до точки сбора для движения в группе, $\{\dots, p_{o(g+1)}, \dots, z_i\}$ – последовательность движения группы роботов, g – момент встречи роботов, z_i – ближайшая к z точка, занятая роботом.

При групповой стратегии управления разрешение коллизий во время движения

происходит по информации, полученной по каналам связи при r_{Ci} и видимости при r_{Bi} . При наличии связи роботы согласуют траектории движения, а в области, где $r_{Bi} > r_{Ci}$, применяется способ разрешения коллизий индивидуальной стратегии.

Методика индивидуального и группового управления роботами

Для решения задачи предложена модель индивидуального и группового управления двумя роботами в динамической среде.

Индивидуальная стратегия управления. При индивидуальной стратегии управления рассматриваются два автономных робота без средств связи, с координатами $R_1(t) = [x_1, y_1]$ и $R_2(t) = [x_2, y_2]$, движущихся в среде $E(t)$, изменяющейся с частотой ω . Оба робота имеют набор операций движения:

$$A_i \subset \{x_i(t) + 1, y_i(t) + 1, x_i(t) - 1, y_i(t) - 1, x_i(t), y_i(t)\}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Автономный робот обладает картой $E_i^*(t)$, представляющей собой карту местности, обновляемую с частотой ω в области $E_i^{R_i, r_{Bi}}$.

Роботы должны прибыть в точку с координатами $z_{11}(x_{11}, y_{11})$. Каждый робот построит свою траекторию движения $\{p_{11}, p_{12}, \dots, z_{2h1}\}$ и $\{p_{21}, p_{22}, \dots, z_{2h2}\}$, причем прибытие в конечную точку может быть в разное время $h_1 \rightarrow \min$ и $h_2 \rightarrow \min$. При этом получение информации о расположении второго робота будет происходить только в том случае, когда он попадает в область видимости робота $E_i^{R_i, r_{Bi}}$.

Групповая стратегия управления. При групповой стратегии управления рассматриваются два автономных робота с возможностью кооперативной работы:

$$R_i(t) = [x_i(t), y_i(t), cr_i(t), gr_i(t), gl_i(t)]^T, \quad (2)$$

$$i = 1, 2,$$

где $x_i(t), y_i(t)$ – координаты i -го робота в момент времени t ; $cr_i(t)$ – маркер канала связи; $gr_i(t)$ – маркер группы (i -й робот находится в группе); $gl_i(t)$ – маркер ведущего группы, что означает, что i -й робот является лидером группы.

Каждый робот имеет множество до-

пустимых действий (1) и карту местности $E_i^*(t)$, обновляемую с частотой ω в области собственной видимости $E_i^{Ri,rBi}$ и при наличии канала связи в области второго робота $E_j^{Rj,rBj}$.

При использовании такой стратегии первая цель роботов – организация группы:

$$gr_1(t) \wedge gr_2(t)=1, \quad (3)$$

т. е. каждый робот выставил маркер присоединения к группе

$$(gl_1(t) \leftrightarrow gl_2(t))=1. \quad (4)$$

Это значит, что один из роботов принял лидерство, а второй будет за ним следовать. Для этого каждый робот, имея начальную информацию, полученную в момент времени $t = 0$, строит траекторию для образования группы $(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ig})$.

При движении навстречу друг к другу сокращается расстояние между роботами, и при условии

$$\sqrt{(x_1(t) - x_2(t))^2 + (y_1(t) - y_2(t))^2} < r_c, \quad (5)$$

возможен обмен фрагментами карты и местоположениями, т. е. помимо собственного обзора робот получает актуальную область $E_j^{Rj,rBj}$.

При выполнении условия (5) каждый робот определяет расстояние до точки z . На основании полученных данных разрешаются равенства (3) и (4), после чего из текущего положения определяется траектория движения до конечной точки $\{p_{ig}, \dots, z\}$ и точка встречи g' с учетом новой информации о карте и втором члене группы $\{p_{\text{текущее}}, \dots, p_{ig}\}$. В случае невозможности достижения точки встречи g' каждый робот начинает движение согласно индивидуальной стратегии управления.

При групповой стратегии управления время достижения точки z будет одинаковым у каждого члена группы.

Алгоритмы стратегий управления

Алгоритм индивидуальной стратегии управления реализуется последовательно блоками актуализации области карты, расчета траектории движения и разрешения коллизий. Блок-схема алгоритма пред-

ставлена на рис. 1 б. При индивидуальной стратегии у роботов отсутствует связь друг с другом и они не могут заранее договориться о последовательности совместных действий. В этом случае коллизия столкновения может быть разрешена в области видимости:

$$\sqrt{(x_1(t) - x_2(t))^2 + (y_1(t) - y_2(t))^2} < r_b, \quad (8)$$

т. е. видимый робот воспринимается как препятствие, которое необходимо обойти.

Алгоритм групповой стратегии реализуется в три этапа: движения роботов для образования группы, образования группы и совместного движения к цели. Блок-схема алгоритма групповой стратегии управления представлена на рис. 1 а. Для поиска оптимальных путей $\{p_{i1}, \dots, z\}$ на каждом шаге алгоритмов используется волновой алгоритм Ли с четырехсвязной областью достижимости.

Этап построения траектории движения для образования группы начинается в момент времени $t = 0$, когда каждый робот получает точную карту $E_i^*(0) = E(0)$ с расположением препятствий и положением второго робота. Если роботы видят друг друга или между ними установлена радиосвязь, они обязательно встретятся, потому что они непрерывно обмениваются текущими координатами друг друга, и этап установления группы всегда завершается успешно. В случае если расстояние между роботами больше радиуса связи, и они не видят друг друга, оба робота строят свои траектории движения навстречу друг к другу исходя из возможных действий A_i . Так как на начальном этапе роботы пользуются идентичной информацией, то и проложенные ими пути будут совпадать. Середина планируемого пути принимается за точку встречи. Точка встречи остается неизменной в связи с тем, что после первого шага положение одного робота не известно другому, т. к. его траектория искажается возникающими и исчезающими препятствиями. Каждый робот движется к точке встречи, огибая возникающие препятствия. Если путь до точки встречи не может быть построен, или не достигнут за число шагов больше чем $2n$,

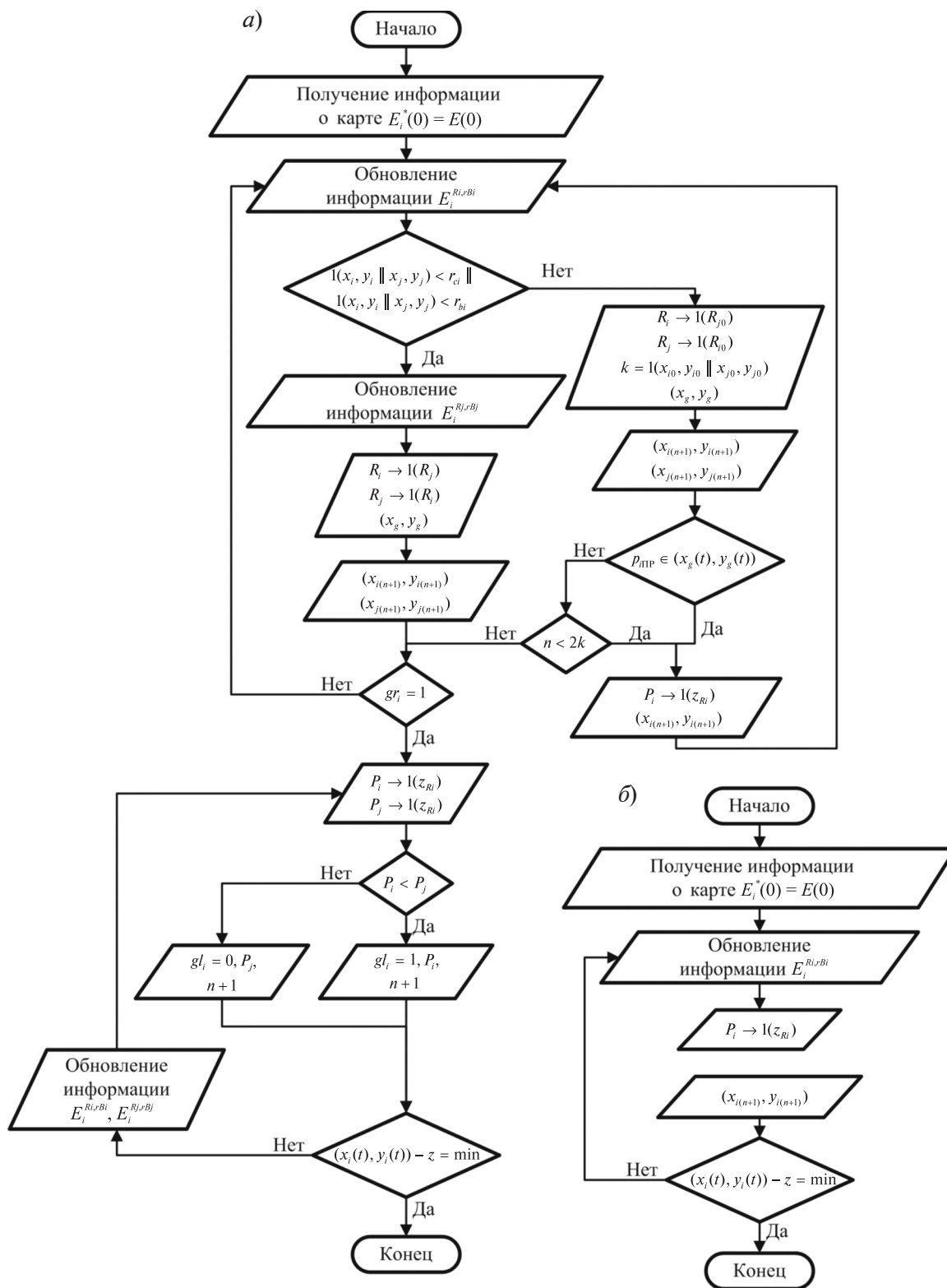


Рис. 1. Блок-схема алгоритмов:

а – алгоритм групповой стратегии управления; *б* – алгоритм индивидуальной стратегии управления ($p_{пп}$ – пройденный на данный момент путь, P_i – вектор координат рассчитанной траектории)

где n – кратчайшее расстояние между начальной точкой и точкой встречи, то этап движения к точке встречи прерывается, и реализуется индивидуальная стратегия достижения цели. Если в процессе движения будет установлена радиосвязь или роботы увидят друг друга, они продолжают выполнять этап создания группы в условиях наличия связи. Если связь так и не налажена, каждый робот по достижении планируемой точки встречи приостанавливает этап построения группы и начинает реализацию индивидуальной стратегии движения к цели, сохраняя возможность образования группы при появлении связи. Повторное образование группы считается целесообразным, если время движения для объединения в группу меньше, чем наибольшее время индивидуальной стратегии.

Группа считается созданной в момент, когда роботы заняли соседние клетки, образовали плотную группу и далее будут двигаться с минимальной дистанцией. Увеличение дистанции между роботами может привести к появлению препятствия между ними, вызвать распад группы, потребовать возврата на этап образования группы, что приведет к удлинению траектории и увеличению времени достижения цели. Выбор ведущего осуществляется путем сравнения расстояния от роботов до цели. Ведущим становится робот, у которого расстояние до цели меньше. В ходе движения этап выбора ведущего и ведомого может повторяться в зависимости от изменения положения препятствий на карте. После образования группы реализуется этап совместного движения к цели.

Этап группового движения к заданной точке состоит в непрерывном построении пути ведущим и ведомым роботами. Из двух траекторий выбирается кратчайшая, по которой и осуществляется движение. Если путь невозможно построить, то группа останавливается и ждет появления пути. Цель считается достигнутой, если ведущий робот достиг целевой точки, а ведомый находится в окрестности, ограниченной от целевой четырехсвязной областью. Предложенные стратегии сочетают групповую и индивидуальную стратегии движения, что

обеспечивает реализацию кооперативных действий в условиях изменяющейся карты местности.

Реализация среды моделирования и алгоритмов управления движением роботов

Для исследования эффективности функционирования алгоритмов разработана и реализована программная среда, состоящая из четырех модулей: управления глобальной картой, взаимодействия и управления с алгоритмами роботов и алгоритма движения робота.

Модуль управления и отображения глобальной карты предназначен для моделирования свойств внешней среды и позволяет определять: размер карты, процент заполнения карты препятствиями, частоту изменения препятствий и длительность моделирования. В функции модуля входит: создание, отображение и пошаговое изменение карты.

Модуль взаимодействия с алгоритмами роботов определяет положение роботов на глобальной карте на каждом шаге: расстояние между роботами, наличие визуальной видимости и радиосвязи, вычисление динамической области видимости, передача данных в алгоритмы управления роботами, отображение новых положений на глобальной карте.

Модуль управления алгоритмами движения роботов обеспечивает передачу в алгоритм начальных точек движения роботов, целевой точки маршрута, радиусов видимости и радиосвязи, полной карты в начале моделирования и динамической области видимости с положением второго робота на каждом шаге. Модуль получает от алгоритма координаты следующей точки и признак достижения цели.

Модуль алгоритма движения реализует алгоритм, представленный на рис. 1. При получении управления алгоритм выполняет один шаг: вычисляет новые координаты робота, а затем возвращает управление модулю управления алгоритмами для обновления состояния среды.

Структурная схема модулей программной среды приведена на рис. 2.

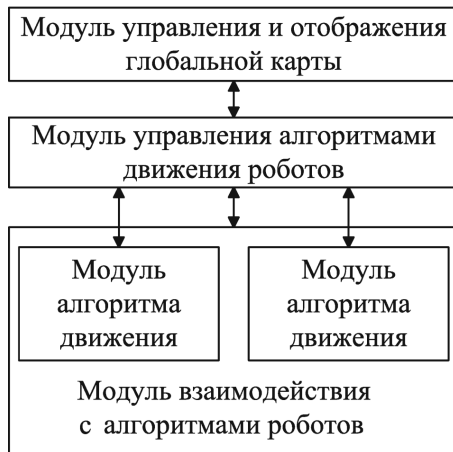


Рис. 2. Структурная схема среды моделирования управления движением роботов

Цикл моделирования состоит в последовательном вызове модулей с реализацией пошагового режима алгоритма движения. Выполнение цикла моделирования прекращается в момент, когда роботы достигнут цели, или модельное время превысит 200 единиц — в этом случае задача считается невыполненной.

Программная реализация среды моделирования и алгоритмов выполнена в среде

MatLab версии 2013b. Для хранения глобальной и локальных карт использована матрица, каждый модуль реализован набором функций. Передача данных осуществлена вызовом с параметрами и возвратом значений. Визуализация моделирования осуществлена с помощью динамического интерфейса, реализованного последовательным выводом данных функцией `subplot()`. По окончании каждого цикла моделирования процент заполнения карты, число шагов, число роботов, достигших цели, признак объединения в группу, процент заполнения и интенсивность изменения карты сохранялись в выходном файле. Пример интерфейса среды моделирования приведен на рис. 3.

Условия проведения и результаты экспериментов

Исследование алгоритмов индивидуальной и групповой стратегий движения роботов осуществлялось запуском среды моделирования с последовательным перебором значений радиуса связи, области видимости роботов и процентом заполнения карты препятствиями. Для каждой комбинации

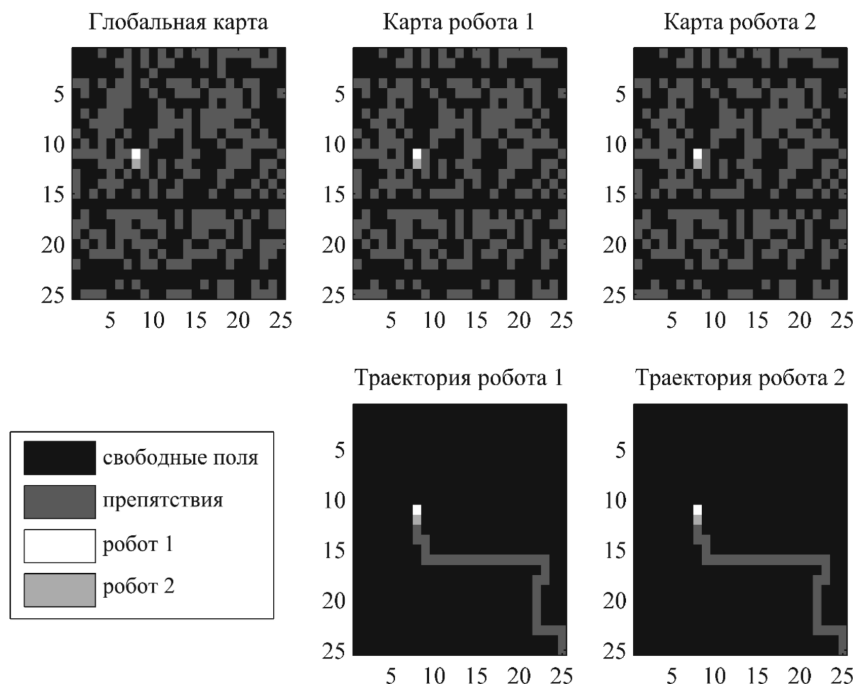


Рис. 3. Пример интерфейса программы в процессе эксперимента

Параметры тестирования среды моделирования и алгоритмов

Параметр или константа	Значение
Размер карты, ед. ²	25
Радиус связи, ед.	3, 5, 10, 25
Радиус видимости, ед.	1, 5
Заполнение карты препятствиями, %	0–60 с шагом 5
Число роботов, шт.	2
Максимальное число шагов моделирования, шт.	200
Стратегия движения	Индивидуальная, групповая

значений параметров цикл моделирования выполнялся сто раз. Значения параметров приведены в таблице.

Для оценки алгоритма использована карта размером 25×25 клеток, начальными точками траектории роботов выбраны правый верхний и левый нижний углы карты. Цель роботов – точка в правом нижнем углу. В ходе моделирования для групповой стратегии управления произведено 9600 повторений при различном процентном заполнении карты препятствиями, радиусом связи и радиусом обзора роботов. Для индивидуальной стратегии управления произведено 2400 повторений при различном процентном заполнении карты препятствиями и радиусом обзора роботов.

Зависимость времени выполнения задания t_b при индивидуальной стратегии движения от процента заполнения карты β при

различных значениях радиуса обзора $r_{Bi} = 1; 5$ представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что при увеличении радиуса обзора робота r_{Bi} время достижения цели уменьшается за счет более раннего построения траектории в обход другого робота и препятствий, благодаря увеличению области карты с достоверной информацией о среде.

Рис. 5 демонстрирует характер зависимости времени достижения цели от радиусов связи и видимости при $r_{Ci} = 3; 5; 10; 25$ и $r_{Bi} = 1$. Так увеличение радиуса связи ведет к уменьшению времени достижения цели. Такой эффект связан с тем, что роботы на этапе формирования группы при движении друг к другу получают увеличенный фрагмент актуальной карты тем раньше, чем больше радиус связи. Особенно этот эффект сказывается в случае $r_{Ci} = 25$, когда вся карта доступна каждому роботу на про-

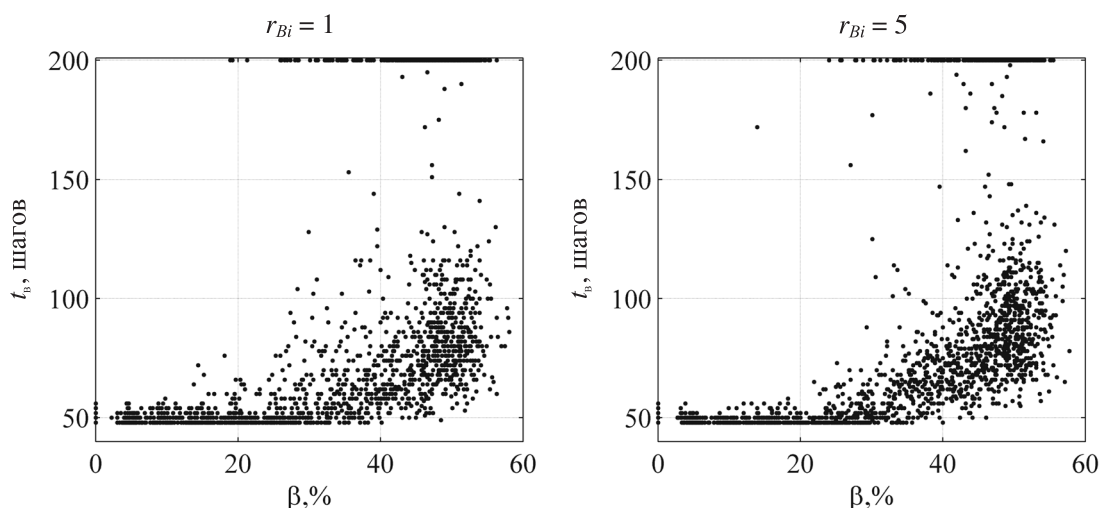


Рис. 4. Результаты моделирования времени выполнения задания для индивидуальной стратегии управления ($r_{Bi} = 1; 5$)

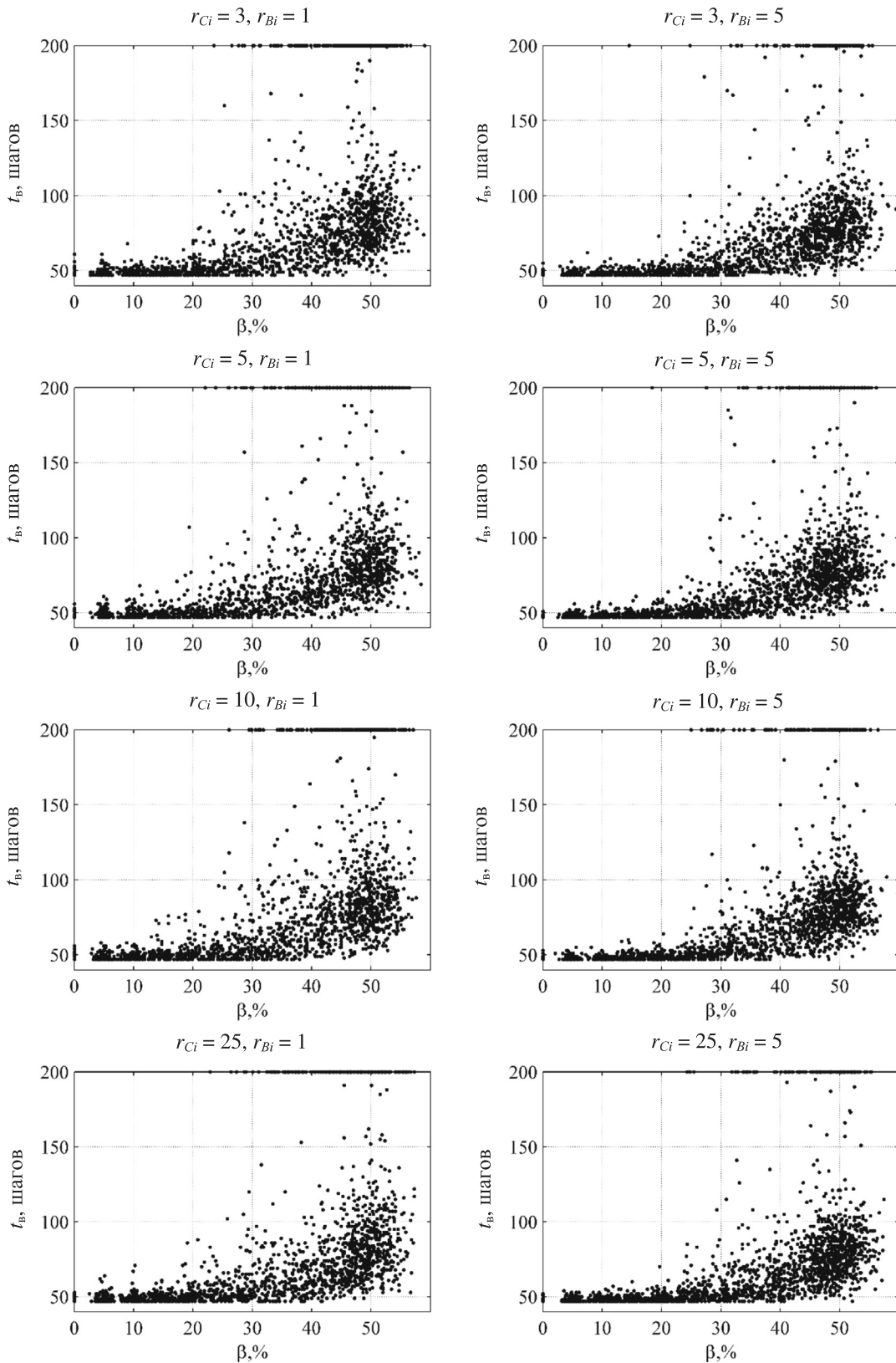


Рис. 5. Результаты моделирования групповой стратегии управления ($r_{Ci} = 3;5;10;25$ и $r_{Bi} = 1;5$)

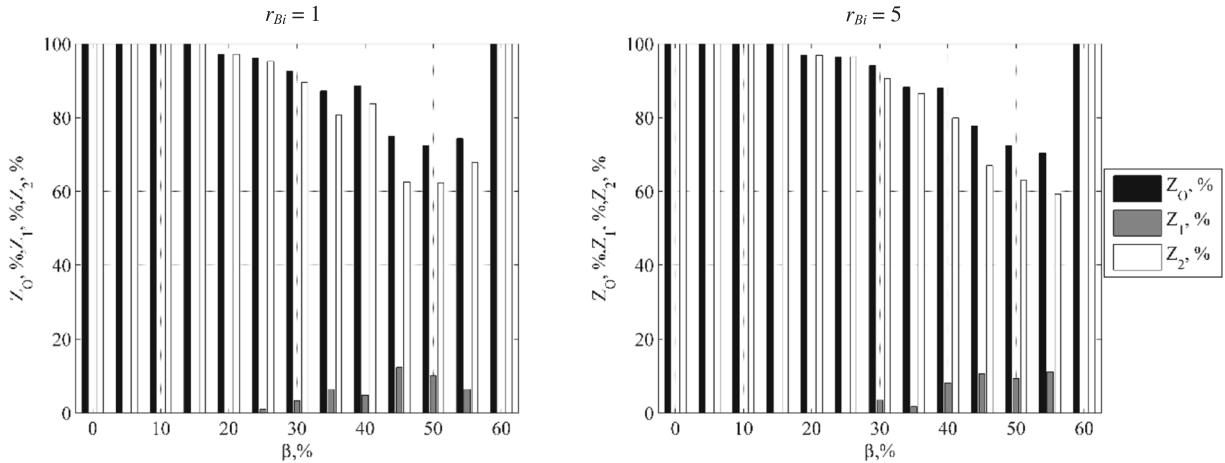


Рис. 6. Гистограммы распределения вероятности достижения цели при индивидуальной стратегии управления:
 Z_0 – хотя бы одним роботом; Z_1 – одним из роботов; Z_2 – двумя роботами при $r_{Bi} = 1; 5$

тяжении всего времени движения.

Сравнивая эффективность групповой и индивидуальной стратегии, можно сделать вывод, что процент заполнения карты препятствиями определяет эффективность применения стратегии: при заполнении карты препятствиями до 20 % достижение цели при групповом управлении требует больше времени. Это связано с затратами времени на образование группы, когда роботы движутся навстречу друг к другу. При заполнении карты препятствиями более чем на 20 % ситуация становится обратной: в этом случае сумма времён образования группы и движения к цели групповой стратегии становится меньше, чем максимальное время достижения цели любым из роботов при реализации индивидуальной стратегии.

Вероятности достижения целевой точки при различном заполнении карты препятствиями в индивидуальной и групповой стратегиях представлены на рис. 6 и 7 соответственно. Для построения гистограмм обобщены результаты с шагом в 5 % при условии заполнения карты препятствиями β от нуля до 60 %.

Из гистограммы на рис. 6 видно, что начиная с 20 % заполнения карты препятствиями, вероятность достижения цели как двумя, так и одним роботом снижается на 5 % за шаг, что связано с нахождением в

среднем более длинного кратчайшего пути на каждом шаге робота. Увеличение радиуса видимости не приводит к увеличению вероятности достижения цели, т. к. другой робот воспринимается при построении пути как еще одно препятствие.

Анализ гистограмм на рис. 7 при r_{Ci} равном 10 выявляет повышение вероятности достижения цели в среднем на 5,08 % при изменении r_{Bi} от единицы до пяти, а при фиксированном r_{Bi} равном единице увеличение радиуса связи с трех до 25 приводит к увеличению средней вероятности достижения цели только на 1,59 %, что связано с малым размером области обмена актуальной картой каждого робота.

В работе исследованы два алгоритма индивидуального и группового движения группы роботов к целевой точке. Особенности алгоритмов являются непрерывные проверка возможности образования группы и поддержание кратчайших путей достижения целевой точки каждым роботом.

Нами предложена среда моделирования с использованием алгоритмов движения роботов, обеспечивающая функционирование алгоритмов в условиях изменения числа препятствий, интенсивности изменения обстановки, коммуникационных и сенсорных возможностей роботов в группе. Результаты моделирования показывают, что на более

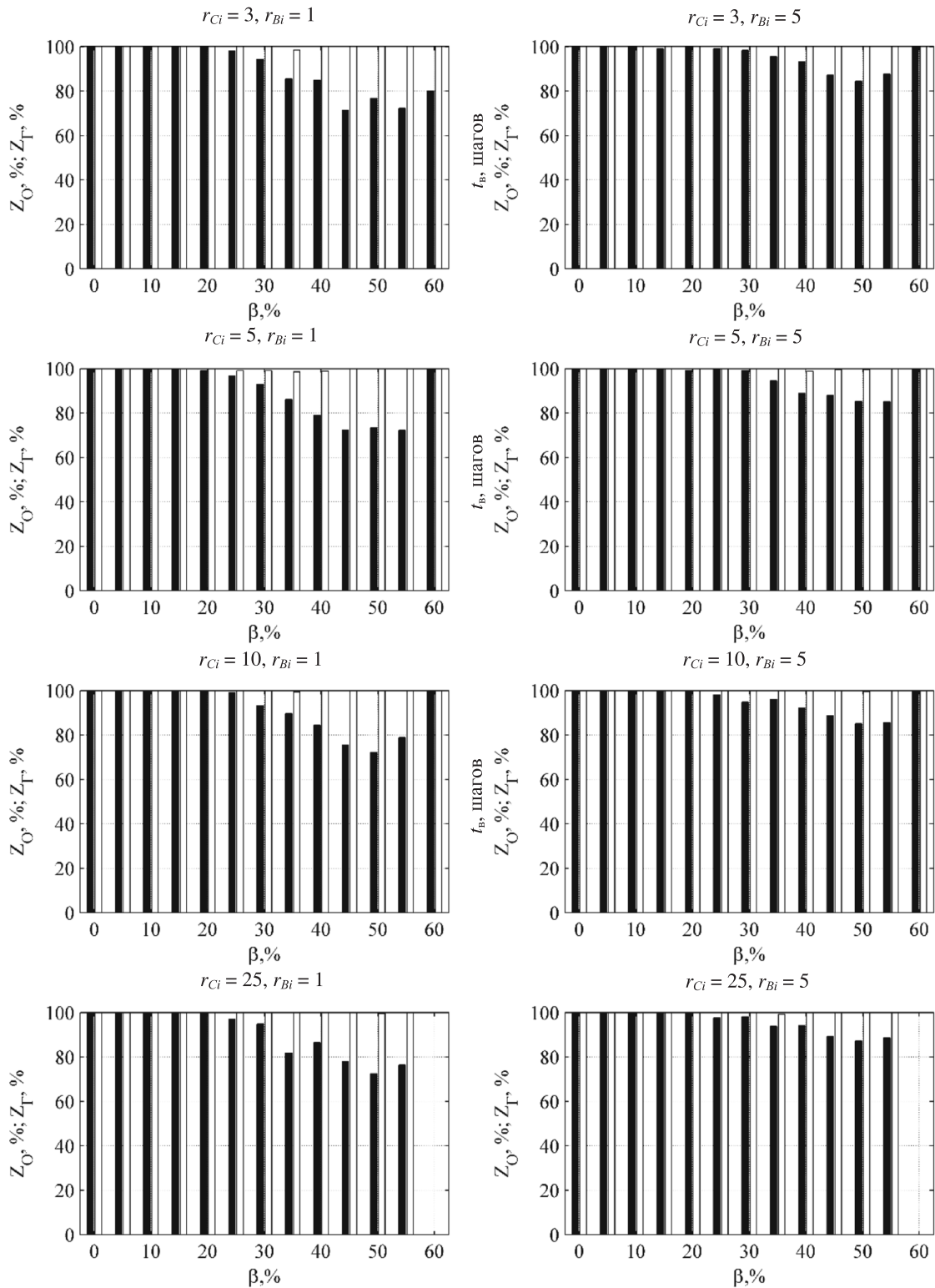


Рис. 7. Гистограммы распределения вероятности достижения цели при групповой стратегии управления:

Z_O – достижение цели; Z_T – объединения в группу при $r_{Ci} = 3; 5; 10; 25$ и $r_{Bi} = 1; 5$

■ $Z_O, \%$; □ $Z_T, \%$

плотно заполненных и интенсивно изменяющихся картах предложенная групповая стратегия эффективнее индивидуальной, а рост радиуса связи без увеличения радиуса области видимости не ведет к сокращению времени достижения цели.

Продолжением работы может стать обеспечение индивидуальных значений параметров сенсоров и коммуникационных средств, индивидуализация карт местности для каждого из роботов, моделирование

отказов транспортной коммуникационной или сенсорной подсистем, формирование нескольких критериев качества достижения цели, к которым относятся минимизация затраченной при движении энергии или выбор пути, вероятность достижения цели по которому максимальна.

Исследование выполнено при поддержке URP исследовательского подразделения «Форд Моторс». Статья опубликована при поддержке РФФИ, грант № 16-29-04319.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Noritaka Sato, Kazuyuki Kon, Hiroaki Fukushima, et al.** Map-based navigation interface for multiple rescue robots // Proc. of the 2008 IEEE Internat. Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. Sendai, Japan, 2008.

2. **Madhevan B. Sreekmar M.** A Systematic implementation of role assignment in multi robots using leader follower approach: analytical and experimental evaluation // Proc. of the 13th Internat. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision. Marina Bay Sands, Singapore. 2014.

3. **Dingjiang Zhou, Mac Schwager.** Virtual rigid bodies for coordinated angle maneuvering of teams of micro aerial vehicles // Proc. of the 2015 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation.

4. **Shuang Liu, Dong Sun, Changan Zhu.** Coordinated motion planning for multiple mobile robots along designed paths with formation requirement // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2011. Vol. 16. No. 6.

5. **Denny J., Giese A., Mahadevan A., et al.** Multi-robot caravanning // 2013 IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems.

Tokyo, Japan, 2013.

6. **Cucu L., Rubenstein M., Nagpa R.** Towards self-assembled structures with mobile climbing robots // Proc. of the 2015 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation. Washington State Convention Center, Seattle, Washington. 2015.

7. **Kuo-Ho Su, Tan-Phat Phan.** Robot path planning and smoothing based on fuzzy inference // Proc. of the 2014 IEEE Internat. Conf. on System and Engineering. Shanghai, China. 2014.

8. **Sajjad Manzoor, Youngjin Choi.** Neural oscillator-based multi-robot coordination algorithm to catch-observe-protect a target // Proc. of the 2015 IEEE, Internat. Conf. on Mechatronics and Automation. Beijing, China

9. **Zaborovsky V., Muliukha V., Popov S., Lukashin A.** Heterogeneous Virtual Intelligent Transport Systems and Services in Cloud Environments // Proc. of the 13th Internat. Conf. on Networks. Nice, France. 2014. Pp. 236–241.

10. **Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.

REFERENCES

1. **Noritaka Sato, Kazuyuki Kon, Hiroaki Fukushima, et al.** Map-based navigation interface for multiple rescue robots, *Proceeding of the 2008 IEEE, International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, Sendai, Japan, October 2008.

2. **Madhevan B., Sreekmar M.** A Systematic implementation of role assignment in multi robots using leader follower approach: analytical and experimental evaluation, *Proceeding of the 2014 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Marina Bay Sands, Singapore, Dec. 10-12, 2014.

3. **Dingjiang Zhou, Mac Schwager,** Virtual rigid bodies for coordinated angle maneuvering of teams of micro aerial vehicles, *Proceeding of the*

2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation.

4. **Shuang Liu, Dong Sun, Changan Zhu** Coordinated motion planning for multiple mobile robots along designed paths with formation requirement, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, Vol. 16, No. 6.

5. **Denny J., Giese A., Mahadevan A., et al.** Multi-robot caravanning, *Proceeding of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, Nov. 3-7, 2013.

6. **Cucu L., Rubenstein M., Nagpa R.** Towards self-assembled structures with mobile climbing robots, *Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington State Convention Center, Seattle, Washington,

May 26-30, 2015.

7. **Kuo-Ho Su, Tan-Phat Phan** Robot path planning and smoothing based on fuzzy inference, *Proceeding of the 2014 IEEE International Conference on System and Engineering*, Shanghai, China, July 11-13, 2014.

8. **Sajjad Manzoor, Youngjin Choi** Neural oscillation-based multi-robot coordination algorithm to catch-observe-protect a target, *Proceeding of the 2015 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China, Aug. 2-5.

9. **Zaborovsky V., Muliukha V., Popov S., Lukashin A.** Heterogeneous Virtual Intelligent Transport Systems and Services in Cloud Environments, *Proceedings of the 13th International Conference on Networks*, Nice, France, Feb. 23-27, 2014, Pp. 236–241.

10. **Kalyayev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.** *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]*. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2009, 280 p. (rus)

ПОПОВ Сергей Геннадьевич – доцент кафедры телематики Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: popovserge@spbstu.ru

POPOV Sergey G. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: popovserge@spbstu.ru

МОТОРИН Дмитрий Евгеньевич – аспирант кафедры телематики Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: d.e.motorin@gmail.com

MOTORIN Dmitrii E. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: d.e.motorin@gmail.com