

# Метод решения задачи анализа связности карты при картировании местности робостаяей с коммуникацией\*

В.Е. Павловский<sup>I</sup>, В.В. Павловский<sup>II</sup>

<sup>I</sup> ФИЦ ИГМ им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва, Россия

<sup>II</sup> Российский экономический университет (РЭУ) им. Г.В.Плеханова, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Описывается алгоритм, решающий задачу анализа связности карты, которая строится распределенной информационной системой роботов. Такая задача может быть реализована стаей (роем, т.е. стаей без вожака) летающих роботов-разведчиков, например, для контроля возможности прохода между препятствиями группой наземных роботов, которым сообщается разведанная информация. Анализ связности карты выполняется на основе специальной перенумерации областей связности, которая реализуется в обмене данными между роботами-разведчиками.

**Ключевые слова:** мобильный робот, картирование, карта, связность карты.

DOI 10.14357/20718594180314

## Введение

Задача картирования местности, т.е. построения карты, является одной из центральных при обеспечении движения мобильных роботов (МР) в сложной или неизвестной среде. Подобные задачи составляют широкий класс задач информационного обеспечения МР. К таким задачам относятся разведка и исследование неизвестной местности, ориентирования и навигации на местности, контроля, либо инспекции разведанных районов и другие аналогичные. В связи с важностью таких задач к настоящему времени появилось большое число систем, в целом обеспечивающих и поддерживающих их решение. Это, прежде всего системы, отображающие на карте рельеф местности и препятствия. Такие системы созданы для роботов, для групп роботов [1-3], или как помощники человеку, работающему в естественной среде. К последним относится, например, эксперимен-

тальная носимая интеллектуальная система на базе сенсора типа Kinect и лазерного дальномера [4,5], созданная в MIT (США). При этом значительное число современных исследований выполнено как создание систем одновременно-го картирования и навигации (локализации) роботов – систем класса SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Однако важно отметить, что практически все такие системы ограничиваются рассмотрением внешних контуров (габаритов) препятствий, тогда как в ряде прикладных задач также важным является исследование внутренней «топологии» препятствий, особенно при протяженных их размерах.

Данная работа продолжает направление, начатое авторами в [11]. Как и ранее, рассматривается стая роботов, в которой для всех роботов задана одинаковая и при этом достаточно простая модель поведения. При этом интерес представляет возможность синтеза сложного поведения стаи в целом и решения стайей содержательных задач на основании относительно

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 16-08-00880-а, 16-01-00131-а, 15-07-07483-а, 16-29-04412-офи-м) и при поддержке Программы РАН 1.31, раздел "Актуальные проблемы робототехники".

✉ Павловский Владимир Евгеньевич e-mail: vlpavl@mail.ru

простых правил для отдельных роботов. В предыдущей работе моделировалось и исследовалось движение стаи к целям и обход препятствий, а задачей данной работы является исследование стай окружающей среды, в частности - анализ карты местности. Подобные задачи хорошо подходят для распределенных систем. Отметим, что в контексте данной работы не делается различие между однородной (гомогенной) стайей реактивных роботов без водителя и роем одинаковых роботов. Тем не менее, упомянутую большую группу будем здесь называть стайей.

В настоящей работе для анализа выбрана одна из фундаментальных топологических характеристик карты - связность. Предполагается, что на местности имеются объекты - препятствия или ориентиры, и роботы снабжены соответствующими датчиками для их определения. Задачей стаи является определение количества областей связности, на которые карта разбивается этими объектами.

С одной стороны, такая задача анализа связности области, разделенной препятствиями, возникает при выяснении возможности прохода и в дальнейшем ее можно развивать к поиску пути через лабиринт. Скажем, стая летающих роботов может изучить рельеф с воздуха и предложить маршрут для наземной группы.

С другой стороны, эту задачу можно рассматривать как шаг к распределенному исследованию и распознаванию изображений. Например, хорошо известные изображения (геоглифы) в пустыне Наска имеют огромные размеры, и с земли целиком не видны - понимание этих изображений появилось только после аэрофотосъемки. Но аэрофотосъемка невозможна при ограниченной видимости - в тумане, в дыму или под водой. В этом случае исследование таких объектов становится подходящей задачей для стаи роботов, каждый из которых наблюдает только отдельные элементы рисунка, и которые, взаимодействуя, определяют его свойства в целом. Поэтому в качестве последнего примера в работе модель применяется к фотографии одного из изображений в пустыне Наска.

## Анализ связности карты

Решение этой задачи разбивается на два последовательных этапа.

1. Распределение стаи в исследуемой области. Стая выдвигается в намеченную

область и рассеивается, образуя большое облако.

2. Анализ геометрических свойств карты. На этом этапе стая считается неподвижной. Предполагается, что после выполнения задачи стая возвращается к месту отправления и «сдает» выполненную работу, т.е. передает ее потребителю.

**Этап 1. Распределение стаи.** На этом этапе роботы должны выдвинуться в исследуемую область и образовать рассеянное облако. Для настройки нужного поведения стаи использовалась развитая в предыдущей работе [11] идея «псевдосил», которые «подталкивают» роботов в нужном направлении. Но это не физические взаимодействия, а поведенческие правила - «желание» роботов двигаться в том или ином направлении. И поэтому, в отличие от физических сил, псевдосилы определяют не ускорения, а скорости роботов. Таким образом, упрощается управление и не возникают нежелательные режимы типа колебательных. В тоже время, подбором этой функции можно программировать роботов для синтеза нужного поведения стаи в целом.

Для образования рассеянного облака псевдосила, действующая на робот номер  $k$ , задается соотношением:

$$\bar{F} = - \sum_j f(|\bar{r}_j - \bar{r}_k|) \frac{\bar{r}_j - \bar{r}_k}{|\bar{r}_j - \bar{r}_k|} + K_3 \frac{\bar{r}_T - \bar{r}_k}{|\bar{r}_T - \bar{r}_k|} + K_4 \frac{\bar{r}_T - \bar{r}_A}{|\bar{r}_T - \bar{r}_A|}. \quad (1)$$

Первое слагаемое представляет собой сумму по всем остальным роботам и определяет «отталкивание» роботов друг от друга, которое и приводит к нужному рассеиванию стаи. Функция  $f(r)$  задает величину отталкивания и вычисляется как максимум из двух функций:

$$f(d) = \max(K_1 f_1(d), K_2 f_2(d))$$

$$f_1(d) = \begin{cases} 1 & d \leq d_1 - \Delta \\ (d_1 - d)/\Delta & d_1 - \Delta < d \leq d_1 \\ 0 & d > d_1 \end{cases}$$

$$f_2(d) = \begin{cases} \left(1 - \frac{d}{d_2}\right)^2 & d \leq d_2 \\ 0 & d > d_2 \end{cases}$$

Причем  $d_1 > d_2$ ,  $K_1 < K_2$ . Как видно из формул, первая величина  $K_1 f_1$  постоянна до определенного радиуса  $d_1$ , затем спадает до нуля.

Это основная псевдосила, определяющая рассеивание стаи. Вместе с более слабым притяжением к центру, которое задается двумя последними слагаемыми формулы (1), это отталкивание приводит к тому, что соседние роботы распределяются примерно на расстоянии  $d_1$  друг от друга.

Вторая величина  $K_2 f_2$  действует в малом радиусе  $d_2$ , но быстро квадратично растет. Эта псевдосила, введенная в предыдущей работе [11], препятствует столкновениям роботов, если в процессе движения по каким-либо причинам (например, отталкивание от других роботов стаи) два робота слишком сильно сближаются. Сила отталкивания, определяемая функцией  $f(r)$ , равна нулю за пределами некоторого радиуса, поэтому сумма в первом слагаемом формулы (1) фактически ведется только по роботам в определенной окрестности и может определяться каждым роботом локально.

Второе и третье слагаемое в формуле (1) задают «притяжение» стаи к цели – к исследуемой области, центр которой задан координатами  $r_T$  (*Target*). Второе слагаемое описывает притяжение к цели непосредственно выбранного робота. Но использование одного этого слагаемого привело к следующей проблеме: при большой константе притяжения  $K_3$  облако роботов получается сильно неравномерным – сгущается к центру, поскольку роботы по краям тянутся к центру и своим отталкиванием дополнительно прижимают к центру роботы в середине. А при малой константе  $K_3$  роботы выдвигаются к цели слишком медленно.

Поэтому в систему было добавлено последнее слагаемое, описывающее притяжение к цели всей стаи. В этой формуле  $r_A$  – центр масс стаи, вычисляемый как среднее арифметическое координат всех роботов,  $\bar{r}_A = \frac{1}{n} \sum_j \bar{r}_j$ .

Это слагаемое помогает «подтолкнуть» стаю к месту выполнения задачи, не вызывая деформации облака. При этом коэффициенты выбираются так, что  $K_3$  мало и  $K_4 > K_3$ . Второе слагаемое в формуле (1) с малым  $K_3$  все равно необходимо, иначе отталкивание роботов может привести к фрагментации облака. Слабое притяжение всех роботов к центру обеспечивает цельность облака и примерно круглую форму, не мешая рассеиванию на заданное расстояние. Тем самым второе слагаемое в (1)

удерживает все облако от "рассыпания", преодолевая взаимные отталкивания и сохраняя общую конфигурацию облака.

Завершение первого этапа можно определять либо по тому, что роботы перестали заметно смещаться (на моделировании видно, что стая после выдвижения и рассеивания достаточно быстро стабилизируется), либо просто по таймеру, выделяя на этот этап определенное время, по истечении которого роботы останавливаются и переходят ко второму этапу.

**Этап 2. Анализ карты.** На этом этапе предполагается, что роботы рассеялись на местности и уже не движутся. После этого каждый робот определяет, видит ли он картографируемые объекты в определенной окрестности. Как сказано выше, предполагается, что для этого роботы оснащены некоторыми датчиками, от которых описываемая модель абстрагируется. Вместо этого для каждого робота задается фиксированная окрестность радиуса  $r_1$  и считается, что робота известно, пересекается ли эта окрестность с одним из объектов на местности.

На основании этой информации анализ связности выполняется с помощью следующего алгоритма, основанного на волновом алгоритме (алгоритме маршрутизации – используется волновое распространение данных, номеров роботов):

1. Каждый робот хранит числовую переменную – номер. В начале всем роботам присваиваются различные номера от 1 до  $N$ , где  $N$  – количество роботов в стае.
2. После рассмотрения препятствий те роботы, которые видят препятствие, заменяют свой номер на  $-1$  и далее в анализе не участвуют.
3. Каждый робот, используя функцию коммуникации, связывается со всеми роботами в определенной окрестности заданного радиуса  $r_2$ . Пусть номер данного робота  $x$ , а номер его соседа  $y$ . Если  $x > 0$  и  $y > 0$  и  $y < x$ , то робот заменяет свой старый номер  $x$  на номер соседа  $y$ . Иначе говоря, для каждой пары соседних роботов, ни один из которых не видит препятствие, робот с большим номером заменяет свой номер на меньший номер соседа.
4. Операция 3 повторяется, пока номера роботов не перестают меняться.

В процессе применения операций 3 и 4 в каждой области связности постепенно распространяется наименьший из номеров роботов, попавших в эту область - в результате все роботы в области получают этот номер, тогда как в других областях номера всех роботов будут также одинаковыми, но другими. Таким образом, количество областей связности будет равно количеству различных номеров, оставшихся в стае (не считая номера -1).

В этом алгоритме  $r_1$  и  $r_2$  являются параметрами – это размер области видимости (наблюдения) и размер области соседства роботов, соответственно. Их схема приведена на Рис. 1. При моделировании оптимальные результаты получились при соотношении радиусов  $r_2 = 2r_1$ .

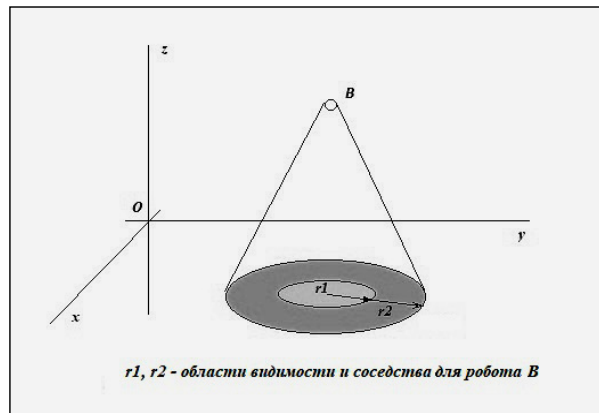


Рис. 1. Область видимости и область соседства объектов в стае

|    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
| 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |

|    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 2  | 3  | -1 | 5  | 6  | 7  |
| 8  | 9  | 10 | -1 | 12 | 13 | 14 |
| 15 | 16 | 17 | -1 | 19 | 20 | 21 |

Рис. 2. Начальный этап распространения номеров

|   |   |    |    |    |    |    |
|---|---|----|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 2  | -1 | 5  | 5  | 6  |
| 1 | 2 | 3  | -1 | 5  | 6  | 7  |
| 8 | 9 | 10 | -1 | 12 | 13 | 14 |

|   |   |   |    |   |   |   |
|---|---|---|----|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | -1 | 5 | 5 | 5 |
| 1 | 1 | 2 | -1 | 5 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 3 | -1 | 5 | 6 | 7 |

Рис. 3. Промежуточный этап распространения номеров

|   |   |   |    |   |   |   |
|---|---|---|----|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | -1 | 5 | 5 | 5 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 5 | 5 | 5 |
| 1 | 1 | 2 | -1 | 5 | 5 | 6 |

|   |   |   |    |   |   |   |
|---|---|---|----|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | -1 | 5 | 5 | 5 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 5 | 5 | 5 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 5 | 5 | 5 |

Рис. 4. Финальный этап распространения номеров

Диаграммы, показанные на Рис. 2-Рис. 4, показывают, как распространяются номера в простом примере группы из  $3 \times 7 = 21$  робота, средние три из которых увидели препятствие (отмечены на рисунках темной полосой).

В результате, в стае осталось два различных номера, не считая -1 - единица и пятерка. Следовательно, стая обнаружила две области связности.

В заключение приведем еще несколько примеров работы программы моделирования.

**Простое кольцевое препятствие.** На Рис. 5 и Рис. 6 - начальная конфигурация, выдвижение роботов, завершение распространения и окончание анализа – найдены две области связности. Схематично на фазе окончания анализа (Рис. 6 справа) на роботах изображаются спе-

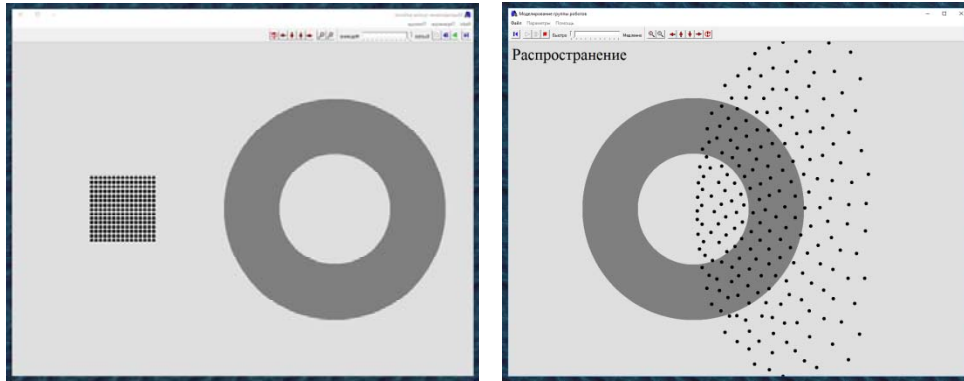


Рис. 5. Начальная конфигурация, выдвижение роботов

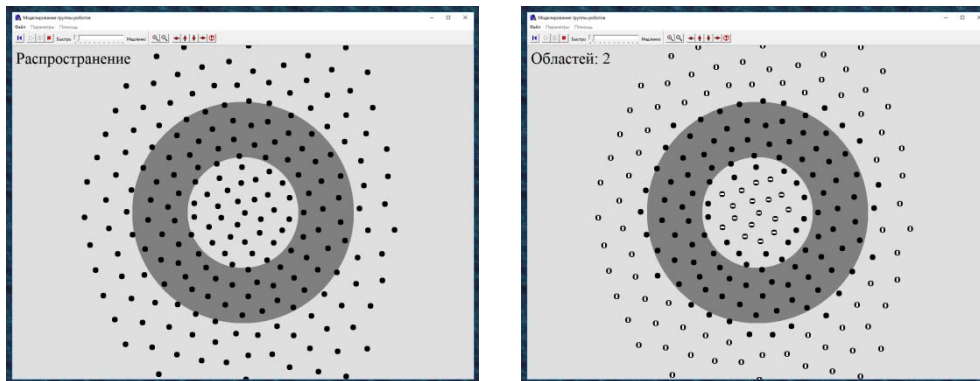


Рис. 6. Завершение распространения и окончание анализа

циальные маркеры состояния. Они показывают, видит ли данный объект препятствия или определил искомые области связности карты.

**Препятствия – «восьмерка» и отсутствие препятствий.** Стая корректно определяет три области связности в первом случае и одну во втором.

**Усложненные препятствия.** В этих четырех примерах (Рис. 7-Рис. 10) первые три случая – препятствия без прохода и без сквозного прохода, в четвертом примере препятствие с

проходом во внутреннюю зону. Эта последняя ситуация может оказаться важной для построения маршрута такого прохода.

**Изображение (геоглиф) из пустыни Наска.** На последнем изображении (Рис. 10) примечателен одиночный робот внизу (показан белой стрелкой), нашедший «лишнюю» область: хотя из этой области есть выход, но он слишком мал, а роботов не так много, их радиусы видимости велики, и поэтому разрешения стаи не хватило, чтобы распознать этот выход.

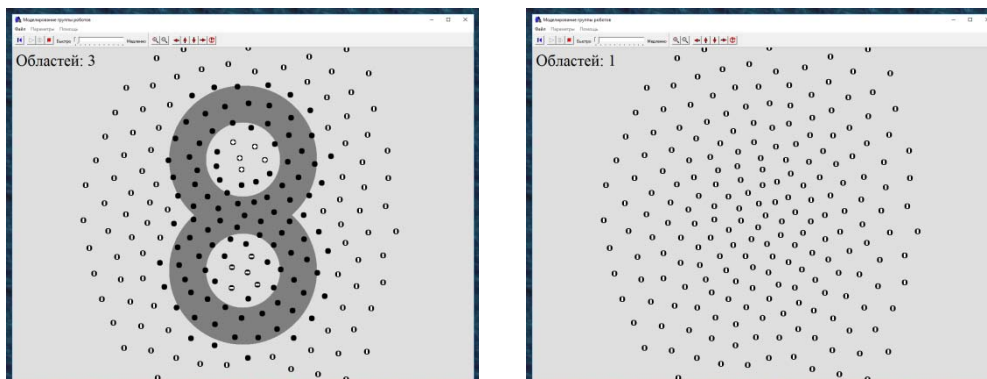


Рис. 7. Препятствие «восьмерка» и отсутствие препятствий

Все рисунки показаны в интерфейсе программы моделирования, которая реализована как расширение аналогичной программы [11]. Все эти иллюстрации – рабочие моменты моделирования в созданной программе.

## Заключение

Для экспериментов была соответствующим образом модифицирована программная моделирующая система, описанная в [11]. Все изображения эпизодов моделирования, как отмечалось, получены с ее помощью. Проведены серии экспериментов по моделированию созданного алгоритма. Алгоритм показал устойчивое и достаточное эффективное функционирование.

Таким образом, в целом можно отметить, что метод работоспособен, но для распознавания изображений с мелкими деталями требуется стаи (рои) из большого количества роботов с небольшими точными зонами видимости. В развитие описанного исследования предполагается рассмотреть задачу определения такого соответствующего задаче количества информационных роботов.

## Литература

1. Зенкевич С.Л., Минин А.А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2007, №8, с.5-12.
2. Шварц Д., Куприянов Д.В. Построение карт местности робототехническими системами // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8, с.695-698.
3. Грудинин В.С., Грудинин С.В., Малышев Е.Н. Групповое картирование местности роботами // В сб. общество, наука, инновации (нпк-2016) Сборник статей 2-е издание, исправленное и дополненное. Вятский государственный университет. 2016. с.2422-2429.
4. Электронный ресурс. <http://news.mit.edu/2012/automatic-building-mapping-0924> MIT NEWS. Automatic building mapping could help emergency responders.
5. Электронный ресурс. <https://habrahabr.ru/post/152337/> 26 сентября 2012 в 16:26 И.Сименко. В MIT разработали систему построения карт в реальном времени для спасателей.
6. Leonard, J.J.; Durrant-Whyte, H.F. (1991). Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. // Intelligent Robots and Systems' 91. Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS'91. IEEE/RSJ International Workshop on: 1442–1447. DOI:10.1109/IROS.1991.174711.
7. Электронный ресурс: <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/stder08tro.pdf>. Bastian Steder, Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard. Visual SLAM for Flying Vehicles. 5 p.
8. Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, BenWegbreit. FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem. // Carnegie-Mellon University, Stanford University, Copyright 2002, American Association for Artificial Intelligence AAAI, (www.aaai.org). AAAI-02 Proceedings, 2002, pp.593-598.
9. Dae Hee Won, Sebum Chun, Sangkyung Sung, Young Jae Lee, Jeongho Cho, Jungmin Joo, and Jungkeun Park. INS/vSLAM System Using Distributed Particle Filter. // International Journal of Control, Automation, and Systems (2010) 8(6): p. 1232-1240 DOI: 10.1007/s12555-010-0608-7.
10. Andrew J., Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, Olivier Stasse. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. // IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. 29, No. 6, June 2007. pp. 1-16.
11. Павловский В.Е., Павловский В.В. Математическая модель двумерной гомогенной стаи роботов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015, №4, с. 62-71.

## Method for solution the task of analysis of map connectivity when mapping the area by roboswarm with communication

V. E. Pavlovsky<sup>I</sup>, V. V. Pavlovsky<sup>II</sup>

<sup>I</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, Russia

<sup>II</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

The algorithm solving a problem of the map connectivity analysis which is realizing by the distributed information robotic system is described. Such task can be realized by swarm of the flying robotic intelligence agents, for example, for control of a possibility of pass between obstacles of group of land robots which are given the reconnoitered information. The analysis of the map connectivity is made on the basis of special renumbering of areas of connectivity which is implemented in data exchange between robotic intelligence agents.

**Keywords:** mobile robot, mapping, map, connectivity of the map.

DOI 10.14357/20718594180314

## References

1. Zenkevich S.L., Minij A.A. Postroenie kartymobilnym robotom osnachennym lasernym dalномером методом rekurrentnoi filtratsii. [Mapping by the mobile robot equipped with laser range finder, by method of recurrent filtration. // *Mechatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*. 2007, №8, pp.5-12.
2. Shwarz D., Kuprianov D.V. Postroenie kart mestnosti robototekhnicheskimi sistemami. [Environment mapping by robotic systems] // *Izv. VUZov. PRIBOROSTROENIE*. 2016. v. 59, № 8, pp.695-698.
3. Grudin V.S., Grudin S.V., Malyshev E.N. Gruppovoe kartirovanie mestnosti robotami. [Group mapping of the area by robots]. // *V sb. OBSHESTVO, NAUKA, INNOVACII (NPK-2016) Sbornik statei 2-e izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe*, Vyatskii gosudarstvennyi universitet, pp.2422-2429.
4. Electronic resource. <http://news.mit.edu/2012/automatic-building-mapping-0924> MIT NEWS. Automatic building mapping could help emergency responders. 2012.
5. Electronic resource. <https://habrahabr.ru/post/152337/> 26 sentyabrya 2012 I.Simenko. V MIT razrabotali sistemu postroeniya kart v realnom vremeni dlya spasatelei. [Automatic building mapping could help emergency responders].
6. Leonard, J.J.; Durrant-Whyte, H.F. (1991). Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. // *Intelligent Robots and Systems' 91. Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS'91. IEEE/RSJ International Workshop on*: 1442–1447. DOI:10.1109/IROS.1991.174711
7. Electronic resource: <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/std08tro.pdf>. Bastian Steder, Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard. Visual SLAM for Flying Vehicles. 5 p.
8. Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, Ben Wegbreit. FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem. // *Carnegie-Mellon University, Stanford University, Copyright 2002, American Association for Artificial Intelligence AAAI*, ([www.aaai.org](http://www.aaai.org)). AAAI-02 Proceedings, 2002, pp.593-598.
9. Dae Hee Won, Sebum Chun, Sangkyung Sung, Young Jae Lee, Jeongho Cho, Jungmin Joo, and Jungkeun Park. INS/vSLAM System Using Distributed Particle Filter. // *International Journal of Control, Automation, and Systems* (2010) 8(6): pp. 1232-1240 DOI: 10.1007/s12555-010-0608-7
10. Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, Olivier Stasse. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. // *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, Vol. 29, No. 6, June 2007. pp. 1-16.
11. Pavlovsky V.E., Pavlovsky V.V. Matematicheskaya model dvumernoi homogennoi stai robotov. [Mathematical model of two-dimensional homogeneous swarm of robots] // *IliPR*, 2015, №4, pp. 62-71.