

УДК 681.5

## Коллективный алгоритм выделения операционных подпространств для группы роботов при решении задачи покрытия территории

**В.А. Александров, А.И. Кобрин**

*Рассмотрено создание коллективного алгоритма выделения операционных подпространств в рабочей среде группы роботов. Необходимость разделения рабочего пространства возникает при решении задачи покрытия территории группой роботов, так как выделение подпространств для каждого робота позволяет избежать разрешения коллизий (столкновений, пересечения траекторий и т. п.) и подзадачи взаимной оптимизации (отсутствие «двойной» работы, оптимизация по суммарному пути, пройденному группой и т. п.), которые возникают при функционировании группы роботов в одном рабочем пространстве.*

**Ключевые слова:** мобильные роботы, группа роботов, покрытие территории, коллективный алгоритм.

*The article is dedicated to the collective operational environment subspace dividing algorithm for the robotic group in the coverage area problem. Collision avoidance between robots in group operating on limited space is a result of such dividing process. In addition, the algorithm solves a problem of collective optimization («double» work reducing, summary path optimization, etc.) in area coverage problem solving.*

**Keywords:** mobile robots, robotic group, area coverage, collective algorithm.

Решение важных задач в современном мире, таких как разминирование, картографирование, поиск пропавших людей и так далее, требует обследования и покрытия территории в пределах которой решается задача [1]. Эффективным вариантом решения задачи покрытия территории является применение групп мобильных роботов. Однако в этом случае возникают проблемы, связанные с координацией взаимодействий группы, функционирующей на отведенном пространстве. Для решения проблемы коллизий, возникающих в процессе покрытия, предлагается использовать алгоритм, результатом которого является разбиение рабочей среды на операционные подпространства. Внутри этих пространств решение задачи покрытия территории мобильным роботом выполняется без учета возможных коллизий.

Моделирование задачи покрытия территории проводилось при помощи программно-аппаратного комплекса [2] — разработки кафедры теоретической механики и мехатроники МЭИ (ТУ). Комплекс состоит из системы имитационного моделирования [3] и испытательного полигона, снабженного набором препятствий, зарядными станциями,



**АЛЕКСАНДРОВ**  
Владимир Александрович  
ассистент, аспирант  
кафедры «Теоретическая  
механика и мехатроника»  
(Московский  
энергетический институт  
(ТУ))



**КОБРИН**  
Александр Исаакович  
профессор, кафедры  
«Теоретическая механика  
и мехатроника»  
(Московский  
энергетический институт  
(ТУ))

и целевыми точками с инфракрасными (ИК) метками. Габаритные размеры испытательного полигона 1,5×2 м. Исследовательские роботы (рис. 1), используемые для тестирования алгоритмов на реальном полигоне, представляют собой однотипные автономные мобильные платформы с дифференциальным приводом. Мобильный робот оснащен набором бортового оборудования, в который входят: восемь дальномерных модулей, радиомодуль двухсторонней связи, два инфракрасных локатора, способных детектировать специальные ИК-метки, ИК-приемопередающий канал ограниченной дальности, одометрические датчики, два двигателя постоянного тока, система индикации и звукового оповещения. Диаметр мобильного робота 120 мм, а высота не превышает 70 мм. Большое количество датчиков обусловлено необходимостью применения системы навигации без использования внешней коррекции при решении задач мобильным роботом. Благодаря этому алгоритмы, разрабатываемые программно-аппаратным комплексом, могут применяться в структурно аналогичных задачах, в которых по каким-либо причинам отсутствует возможность внесения внешней коррекции в навигационную систему робота.

Основными возможностями программной части [4] комплекса являются: моделирование внешнего контура управления мобильных роботов-прототипов с учетом ограничений САУ

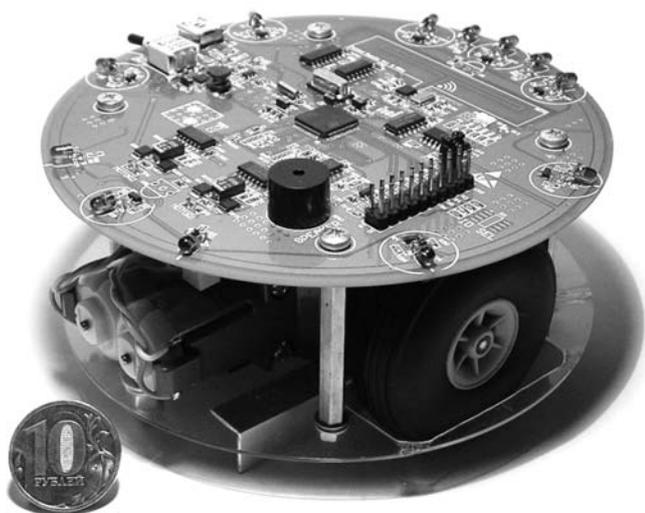


Рис. 1. Общий вид исследовательского мобильного робота

приводов, а также полного набора их бортового оборудования; визуализация моделируемой сцены в плоском и перспективном представлении; моделирование системы коммуникации с возможностью вариации таких параметров, как мощность передатчика и чувствительность приемника; статистические оценки работы группы мобильных роботов, протоколирование выполняемых действий, контроль работы без использования графического интерфейса.

Рабочей средой робототехнической системы является огражденная территория, которая в системе имитационного моделирования представлена в виде плоскости окруженной фиксированными границами (рис. 2).

В определенной таким образом рабочей среде  $E$  функционирует группа роботов  $G$ :

$$G = [R_1(t), R_2(t), \dots, R_6(t)]; \quad (1)$$

$$R = [R_1(t), R_2(t), \dots, R_K(t)],$$

где в качестве элементов вектор-функции  $R(t)$  выступают физические параметры робота: текущее положение, скорость, угловая скорость, показания датчиков и др.

В работе [1] приведено описание алгоритма итерационной процедуры оптимизации кол-

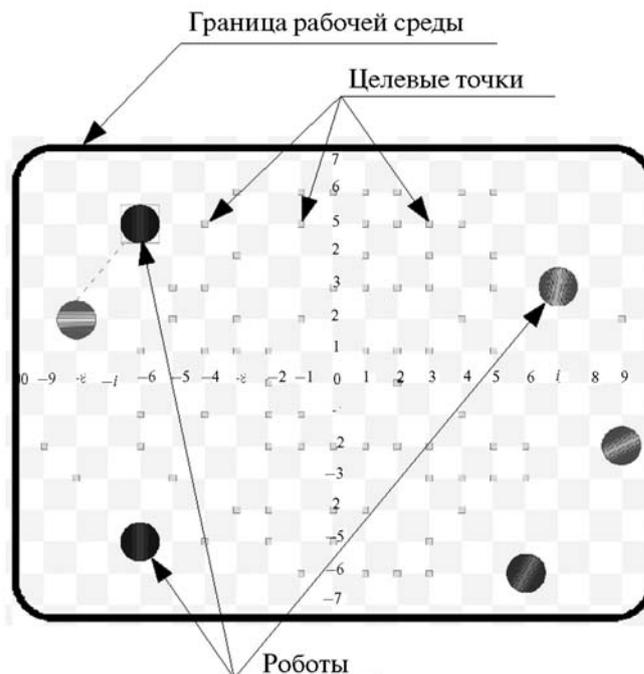


Рис. 2. Представление рабочей среды в системе имитационного моделирования

лективных действий в группе роботов, на основе которой разработан ускоренный алгоритм коллективного распределения целей. С помощью системы моделирования программного-аппаратного комплекса проводилось исследование алгоритма применяемого для решения задачи покрытия территории.

На плоскости рабочей среды в случайном порядке размещались целевые точки, которые необходимо посетить мобильным роботам для выполнения задачи покрытия территории. Эксперименты проводились для трех различных начальных положений мобильных роботов: шесть роботов располагается в линию вдоль длинной стороны полигона, по три робота вдоль левой и правой коротких сторон полигона и вдоль короткой стороны полигона. В базовом алгоритме отсутствует разрешение коллизий и поэтому работа алгоритма завершалась, если возникало столкновение или все целевые точки были пройдены. В качестве показателя полноты решения задачи использовалось отношение количества посещенных целевых точек к изначальному их количеству. Усредненные данные полноты решения задачи  $E_f$  при вариации диаметра робота  $D$  и для постоянного шага сетки целевых точек равного 10 см приведены на рис. 3.

Алгоритм показывает изначальную эффективность около 70%, что означает возникновение столкновений, вызванных пересечением траекторий, только в самом конце решения задачи. Однако, при приближении диаметра мобильного робота к шагу сетки, эффективность резко снижается вследствие возникновения

столкновений уже в самом начале процесса покрытия территории.

Для полного исключения возможности столкновений роботов был разработан много-агентный алгоритм выделения операционных подпространств на основе итерационного алгоритма кластеризации Ллойда [5]. Его структурная схема представлена на рис. 4. Связь между мобильными роботами-агентами в группе организована в соответствии с архитектурой

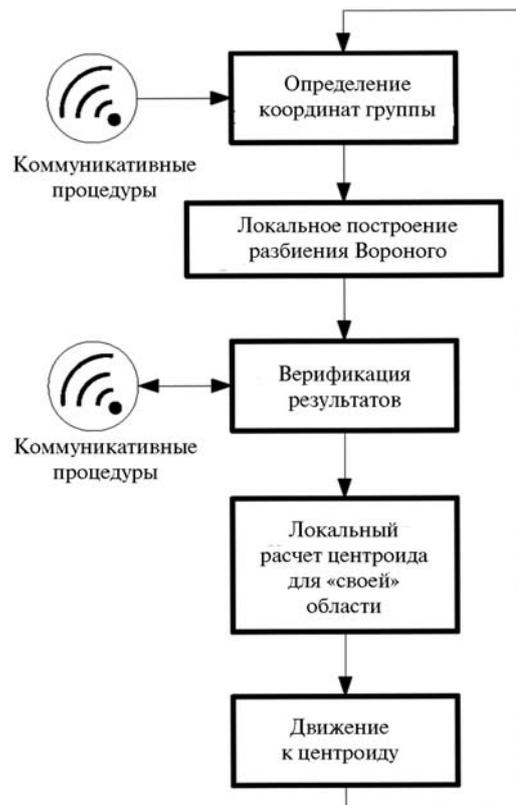


Рис. 4. Структурная схема многоагентного алгоритма выделения операционных подпространств

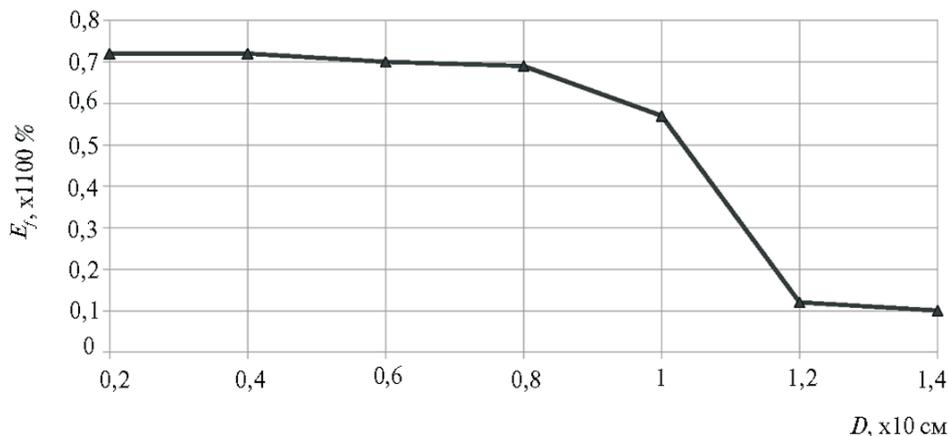


Рис. 3. Зависимость полноты решения задачи покрытия территории от диаметра мобильного робота

распределенной ограниченной доски объявлений [6].

Работа алгоритма начинается с определения координат группы мобильных роботов. При этом информационное поле доски объявлений, соответствующее координатам, заполняется каждым мобильным роботом.

Обозначим  $C_g$  массив координат всех мобильных роботов в группе:

$$C_g(t) = \begin{bmatrix} (x_1(t), y_1(t)) \\ (x_2(t), y_2(t)) \\ \vdots \\ (x_6(t), y_6(t)) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Дискретность системы управления с учетом непрерывности и неизменности управляющих параметров и измерений на промежутке времени  $\Delta t$  позволяет представить этот массив в следующем виде:

$$C_g[i] = \begin{bmatrix} (x_1[i], y_1[i]) \\ (x_2[i], y_2[i]) \\ \vdots \\ (x_6[i], y_6[i]) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $i = 0, \dots, N$ ,  $t = \Delta ti$ . После формирования для всех точек этого массива каждым мобильным роботом производится триангуляция Делоне, которой затем однозначно сопоставляется разбиение Вороного [7, 8]. Затем проводится анализ полученных данных на предмет наличия вершин на бесконечности и производится обрезание границ разбиения [9] в соответствии с границей рабочей области заданной вершинами многоугольника:

$$B = \begin{bmatrix} (B_x[0], B_y[0]) \\ (B_x[1], B_y[1]) \\ \vdots \\ (B_x[M], B_y[M]) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $M$  — количество вершин многоугольника рабочей области.

Далее выполняется верификация результатов в группе, полученных мобильными робота-

ми локально. Она сводится к подтверждению информации публикуемой на доске объявлений о текущих вершинах разбиения. Сформированная мозаика показана на рис. 5. Затем каждый мобильный робот локально рассчитывает площадь и центростид области разбиения построенной относительно его текущего месторасположения:

$$\begin{aligned} A_j &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{G_N[j]-1} (g_x[j, i]g_y[j, i+1] - g_x[j, i+1]g_y[j, i]); \\ P_x[j] &= \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{G_N[j]-1} (g_x[j, i] + g_x[j, i+1]) \times \\ &\quad \times (g_x[j, i]g_y[j, i+1] - \\ &\quad - g_x[j, i+1]g_y[j, i]); \\ P_y[j] &= \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{G_N[j]-1} (g_y[j, i] + g_y[j, i+1]) \times \\ &\quad \times (g_x[j, i]g_y[j, i+1] - \\ &\quad - g_x[j, i+1]g_y[j, i]), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $G[j] = [g_x[j, i], g_y[j, i], i = 0..G_N[j]]$ , — массив координат области разбиения для месторасположения  $j$ -го мобильного робота;  $A_j$ ,  $P[j]_x$ ,  $P[j]_y$  — площадь этой области и координаты ее центростида.

Координаты центростида, полученного на текущем шаге, становятся целевой точкой для позиционирования мобильного робота. Таким образом, в результате работы алгоритма, рабочая область функционирования группы мобильных роботов делится на операционные подпространства с равными площадями. После этого задача сводится к оптимизации покрытия территории для одного мобильного робота в пределах полученных областей разбиения.

В отличие от алгоритма, представленного в работе [10], в приведенном алгоритме используется итерационное обновление координат центростидов, что сокращает путь до требуемой конфигурации мобильных роботов в рабочей области, однако предъявляет повышенные требования к системе распределенной коммуникации. Кроме того, введена многоагентная

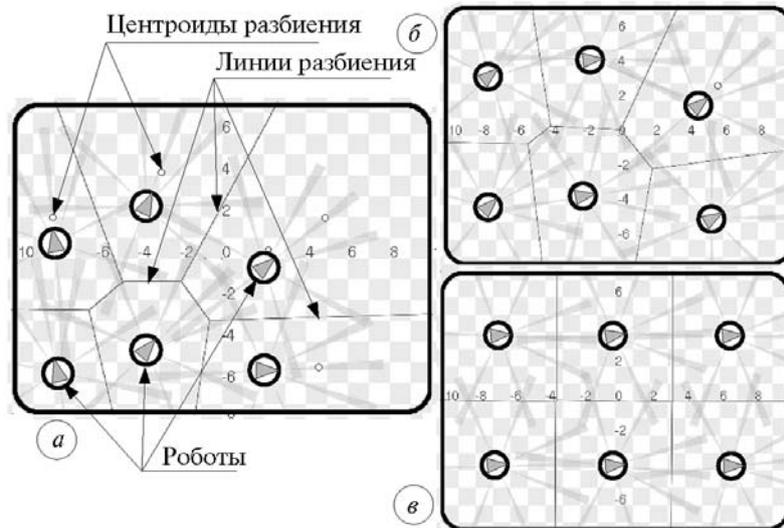


Рис. 5. Результаты работы алгоритма в среде имитационного моделирования:  
 а — начало работы; б — середина; в — финал

система обмена информацией с применением распределенной ограниченной доски объявлений, а также реализован алгоритм построения разбиения Вороного для произвольных границ рабочей области.

**Литература**

1. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов // М: Физматлит, 2009, 280 с.
2. Александров В.А., Кобрин А.И. Программно-аппаратный комплекс для моделирования задач группового управления мобильными роботами // Вестник МЭИ, 2010, № 3.
3. Александров В.А., Кобрин А.И. Система имитационного моделирования для разработки алгоритмов коллективного управления группой роботов // I Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Инновационные подходы к развитию вооружения, военной и специальной техники», Москва, 9–10 декабря 2010.
4. Свидетельство о регистрации ПО для ЭВМ «SwarmControl». № 20111613492.

5. Qiang D., Emelianenko M., Ju L. Convergence of the Lloyd algorithm for computing centroidal Voronoi tessellations // SIAM Journal on Numerical Analysis 44. 2006. P. 102–119.
6. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: Философия, психология, информатика // М: Едиториал УРСС. 2002. 352 с.
7. [http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/cpp\\_src/table\\_voronoi/table\\_voronoi.html](http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/cpp_src/table_voronoi/table_voronoi.html)
8. Burkardt J., Gunzburger M., Peterson J., Brannon R. User Manual and Supporting Information for Library of Codes for Centroidal Voronoi Point Placement and Associated Zeroth, First and Second Moment Determination // Technical Report: SAND2002–0099, Sandia National Laboratories, February 2002.
9. <http://www.cs.man.ac.uk/~toby/alan/software/index.html>
10. Breitenmoser A., Schwager M., Metzger J.-C., Siegwart R., Rus D. Voronoi coverage of non-convex environments with a group of networked robots // ICRA 2010, Anchorage, AK. P. 4982–4989.

Статья поступила в редакцию 05.09.2011 г.