

А.В. Назарова, Т.П. Рыжова

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МУЛЬТИАГЕНТНОГО
УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМОЙ**

Рассмотрены вопросы управления мультиагентной робототехнической системой. Проведен сравнительный анализ типов распределенных робототехнических систем. Описаны модульная структура системы управления коллективом роботов и алгоритм распределения задач в группе роботов, а также алгоритмы перемещения роботов к целевым точкам в среде с препятствиями и равномерного размещения роботов в рабочей зоне.

E-mail: avn@mx.bmstu.ru, tatiana281186@yandex.ru

Ключевые слова: мультиагентная робототехническая система, управляющий центр, модульная система управления, декомпозиция глобальной задачи, модель переговоров «Аукцион», метод потенциалов.

В настоящее время все большую актуальность приобретают мультиагентные робототехнические системы (МРТС), которые находят широкое применение в областях, связанных с риском для жизни и здоровья человека. Так, в химической и атомной промышленности, при техногенных и природных катастрофах МРТС могут использоваться для инспекции и исследования труднодоступных помещений, наблюдения за различными объектами, построения карты химического загрязнения рабочего пространства и решения других задач.

Как правило, один активный элемент системы (агент) владеет лишь частичным представлением о глобальной проблеме, а значит, он может решить только некоторую часть общей задачи. В связи с этим для решения сложной задачи необходимо иметь некоторое множество агентов различной специализации, организовать между ними эффективное взаимодействие и построить на их основе единую мультиагентную систему.

Данная статья предлагает общую концепцию построения МРТС.

Структура системы управления МРТС. Известны различные способы организации сложных технических и социальных систем: централизованный, иерархический, распределенный с взаимодействием между группами элементов либо между терминальными элементами. Укрупненно выделяют три типа распределенных робототехнических систем (РТС) – централизованные, децентрализованные и гибридные [1]. В *централизованных системах* процессы декомпозиции глобальной задачи и обработки полученной агентами инфор-

мации проходят под управлением единого управляющего центра. В *децентрализованных системах* такой центр отсутствует, задания распределяются в процессе взаимодействия агентов, обработка полученной информации также осуществляется агентами. *Гибридная система* – это комбинация централизованной и децентрализованной систем. Здесь декомпозиция глобальной задачи выполняется за счет обмена информацией между агентами, а обработка данных осуществляется управляющим центром. В табл. 1 приведен сравнительный анализ рассмотренных типов РТС.

Гибридная система обладает достоинствами централизованных и децентрализованных систем и лишена большинства их недостатков. В связи с этим целесообразно строить МРТС как гибридную систему.

Таблица 1

Сравнительный анализ типов распределенных РТС

Характеристика	Тип системы		
	Централизованная	Децентрализованная	Гибридная
Надежность	–	+	+
Быстродействие	–	–	+
Самоорганизация	–	+	+
Нахождение наилучших вариантов распределения	+	–	–
Расход вычислительных ресурсов роботов	+	–	+

В состав гибридной МРТС должны входить следующие элементы:

- управляющий центр;
- коллектив агентов-роботов, имеющих различную специализацию;
- вспомогательное оборудование.

Управляющий центр формирует команды управления коллективом роботов и содержит многопроцессорный компьютер, несколько мониторов и пульт дистанционного управления. С помощью пульта управления оператор в зависимости от ситуации может включить автоматический режим работы МРТС или управлять ею в ручном режиме с помощью специальных команд управления.

Роботы, входящие в состав коллектива, могут обладать различными функциональными возможностями и объединяются в группы по специализации. Получив определенное задание от управляющего центра, коллектив роботов посредством обмена сообщениями проводит декомпозицию поставленной задачи, удовлетворяющую некоторому заданному критерию. Информация, принятая роботами в про-

цессе выполнения задания, обрабатывается многопроцессорным компьютером управляющего центра. Мониторы отображают текущее состояние системы и окружающей среды, что позволяет оператору осуществлять наблюдение и контроль.

В качестве вспомогательного оборудования могут выступать системы определения координат роботов, различные датчики дополнительной информации об окружающей среде, расположенные в рабочей зоне, и т. п.

Система управления МРТС должна удовлетворять модульному принципу, что позволяет использовать ее в различных приложениях путем замены или модификации отдельных специализированных модулей, входящих в ее состав.

На рис. 1 приведена структура разработанной модульной системы управления МРТС, построенной по иерархическому принципу и удовлетворяющей гибриднему типу РТС.

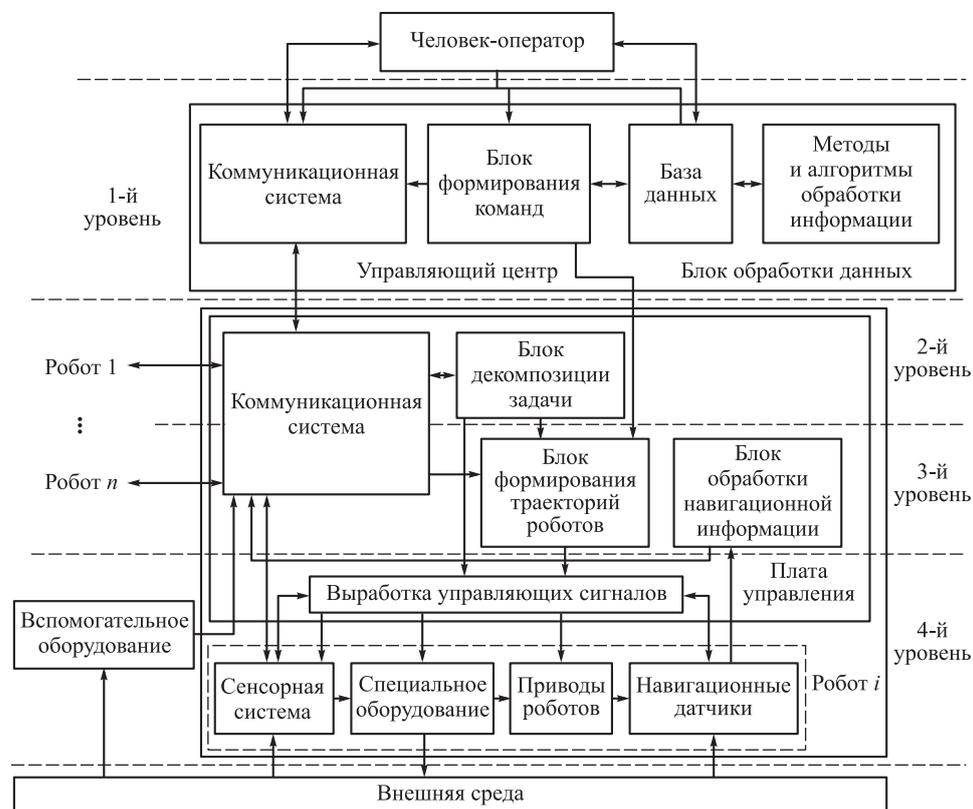


Рис. 1. Структурная схема системы управления МРТС

В функции человека-оператора входят выбор и назначение команд управления, а также наблюдение за состоянием системы.

Первый (верхний) *уровень* представляет собой управляющий центр, в состав которого входят блок формирования команд и блок

обработки данных. Первый формирует последовательность команд в зависимости от указаний оператора и текущего состояния системы, а также передает команды управления и исходные данные роботам. Второй включает базу данных, которая содержит информацию, получаемую агентами-роботами и вспомогательным информационно-измерительным оборудованием, а также содержит библиотеку методов и алгоритмов обработки данных. С помощью этих алгоритмов формируется новая информация, которая заносится в базу данных. Это могут быть различные картограммы, прогнозы изменения состояния окружающей среды и т. п. На основе подобных данных управляющий центр может сформировать новое задание для коллектива роботов.

Второй уровень отвечает за декомпозицию глобальных задач, решаемых МРТС, на более простые задачи и их распределение в коллективе. В качестве мультиагентных алгоритмов декомпозиции целесообразно использовать одну из моделей переговоров. Результатом работы такого алгоритма может быть, например, определение координат целевой точки для каждого робота. В разработанной системе предлагается использовать модель переговоров «Аукцион».

На *третьем уровне* осуществляется совместное формирование траекторий выполняющих задания роботов, которое реализовано с помощью мультиагентных алгоритмов, основанных на методе потенциалов, а именно алгоритма равномерного распределения роботов в рабочей зоне и алгоритма перемещения роботов к целевым точкам в среде с препятствиями. Для формирования траекторий необходимо регулярно определять координаты роботов в рабочем пространстве, что требует построения комбинированной навигационной системы.

Четвертый уровень – исполнительный. На нем осуществляется выработка управляющих сигналов для роботов, навигационных датчиков, специального и вспомогательного оборудования.

Разработанная МРТС может использоваться для решения многих задач, в частности для мониторинга и обследования рабочей зоны, поиска объектов в рабочем пространстве, выполнения различных технологических и транспортных операций. Реализацию перечисленных задач обеспечивают три базовых мультиагентных алгоритма:

- распределение задач в группе роботов (декомпозиция);
- перемещение роботов к целевым точкам в среде с препятствиями;
- равномерное размещение роботов в рабочей зоне.

Остановимся на этих алгоритмах более подробно.

Распределение задач в группе роботов. Рассмотрим коллектив, состоящий из n роботов (рис. 2). Каждый робот может выполнять одну или несколько задач из заданного списка типов задач l . Глобальная задача разделена на m более простых задач. Для решения каждой j -й задачи требуется n_j роботов, где $j = 1, \dots, m$. На указанном рисун-

ке C_{ij} – «стоимость» выполнения i -м роботом j -й задачи, $j = 1, \dots, n$. В качестве «стоимости» может рассматриваться, например, время, затраченное роботом на выполнение данной задачи.

Мультиагентное распределение задач обеспечивает модель переговоров «Аукцион», основанная на обмене информацией между отдельными агентами. На аукционе некоторые ресурсы, необходимые для достижения цели несколькими агентами, выставляются на «продажу». Эти ресурсы ограничены, поэтому агенты соперничают между собой в процессе «торгов».

Возможности «покупки» ресурсов агентами также ограничены, а ее целесообразность оценивается функцией полезности ресурса (критерием оптимальности), которая, как правило, вычисляется в виде разности между «доходом» от использования ресурса и затратами на его «покупку». На аукционе один из агентов играет особую роль лидера (аукционера) [2]. Алгоритм, реализующий процедуру аукциона, является итерационным и включает последовательность шагов.

Шаг 1. Управляющий центр сообщает всем роботам-агентам количество и тип задач, а также число роботов, необходимое для решения каждой задачи.

Шаг 2. Каждый агент формирует ценовой массив, в который записывает «стоимость» выполнения отдельных задач. Таким образом, формируется таблица, характеризующая возможности коллектива роботов (табл. 2).

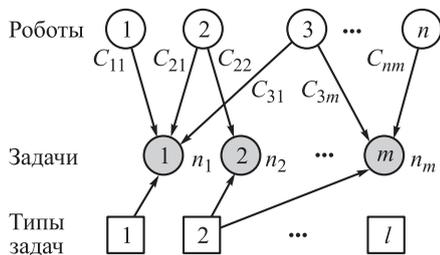


Рис. 2. Декомпозиция. Постановка задачи

Таблица 2

Возможности коллектива роботов

Робот	Задача			
	1	2	...	m
1	–	C_{12}	...	–
2	C_{21}	–	...	C_{2m}
...
n	–	C_{n2}	...	C_{nm}

Шаг 3. Каждый агент сортирует ценовой массив в порядке возрастания.

Шаг 4. Если агент может выполнять только одну задачу, он не участвует в аукционе и начинает выполнять соответствующую задачу.

Шаг 5. Выбор аукционера. Лидером становится незанятый агент, имеющий наименьший порядковый номер.

Шаг 6. Лидер выбирает лучшую (наименее затратную) из своих задач (например, задачу k) и отправляет запрос остальным агентам: «У кого k -я задача также является лучшей?»

Шаг 7. Аукционер формирует структуру данных, содержащую номера ответивших агентов и их соответствующие «цены». Кроме того, лидер (аукционер) вносит в структуру собственные данные.

Шаг 8. В зависимости от числа элементов массива возможны три ситуации, описанные в табл. 3.

Таблица 3

Ситуации, возникающие в ходе проведения аукциона

Условие			Действие			
			Выбор всех роботов массива	Выбор роботов, предложивших наименьшую цену	Оповещение роботов о выполнении задачи k	Исключение задачи k из ценовых массивов роботов
Количество элементов массива	=	n_k	+	-	+	+
	<		+	-	+	-
	>		-	+	+	+

Шаг 9. Переход к шагу 4. Алгоритм выполняется до тех пор, пока ценовые массивы роботов содержат хотя бы один элемент.

Пример. Рассмотрим коллектив из пяти роботов ($n = 5$). Каждый робот должен переместиться в одну из трех заданных целевых точек ($m = 3$). Известно требуемое количество роботов для каждой целевой точки (ЦТ): $n_1 = 2, n_2 = 1, n_3 = 2$. Необходимо распределить целевые точки таким образом, чтобы каждый робот при перемещении в выбранную точку стремился пройти как можно меньшее расстояние, учитывая интересы других роботов. Расстояния между роботами и целевыми точками известны.

В данном случае «стоимость» C_{ij} – это расстояние между i -м роботом и j -й целевой точкой, где $i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, 3$. Ценовые массивы роботов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Ценовые массивы роботов

Робот 1		Робот 2		Робот 3		Робот 4		Робот 5	
ЦТ	«Цена»								
1	4	1	2	1	3	1	4	1	6
2	1	2	5	2	4	2	2	2	4
3	6	3	3	3	5	3	3	3	2

В соответствии с шагом 3 алгоритма каждый робот сортирует свой ценовой массив в порядке возрастания. Результаты сортировки приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты сортировки ценовых массивов

Робот 1		Робот 2		Робот 3		Робот 4		Робот 5	
ЦГ	«Цена»								
2	1	1	2	1	3	2	2	3	2
1	4	3	3	2	4	3	3	2	4
3	6	2	5	3	5	1	4	1	6

Первый круг аукциона. Лидер – робот 1. Его лучшая целевая точка $k = 2$.

Роботу 1 ответил робот 4; всего 2 робота.

Поскольку $n_2 = 1$, а робот 1 предлагает меньшую «цену», то робот 1 отправляется к целевой точке 2, которая исключается из ценовых массивов роботов.

Результаты первого круга аукциона приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты первого круга аукциона

Робот 2		Робот 3		Робот 4		Робот 5	
ЦГ	«Цена»	ЦГ	«Цена»	ЦГ	«Цена»	ЦГ	«Цена»
1	2	1	3	3	3	3	2
3	3	3	5	1	4	1	6

Второй круг аукциона. Робот 2 – лидер. Его лучшая целевая точка $k = 1$.

Лидеру ответил робот 3; всего 2 робота.

Поскольку $n_1 = 2$, оба робота отправляются к целевой точке 1, которая исключается из ценовых массивов роботов.

Результаты, полученные во втором круге аукциона, показаны в табл. 7.

Таблица 7

Результаты второго круга аукциона

Робот 4		Робот 5	
ЦГ	«Цена»	ЦГ	«Цена»
3	3	3	2

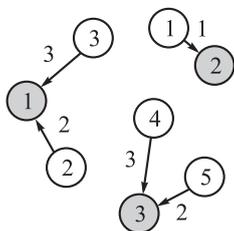


Рис. 3. Распределение целевых точек с помощью модели «Аукцион»:

○ – роботы; ● – целевые точки

Третий круг аукциона. Робот 4 – аукционер. Здесь все аналогично второму кругу аукциона. Роботы 4 и 5 отправляются к целевой точке 3.

Результат работы алгоритма показан на рис. 3, где над стрелками указаны расстояния между соответствующими роботами и целевыми точками.

Как видим, большинство роботов отправилось к ближайшим целевым точкам, что подтверждает эффективность предложенного алгоритма.

Перемещение роботов к целевым точкам в среде с препятствиями. После распределения целевых точек в коллективе необходимо обеспечить перемещение роботов к выбранным целям. Данная задача решена с использованием метода потенциалов.

Пусть n – число роботов, входящих в состав системы; m – количество целевых точек, расположенных в рабочем пространстве; r – число статических препятствий в рабочей зоне. Каждый робот системы должен перемещаться к одной целевой точке (у нескольких роботов может быть одна и та же целевая точка), избегая столкновений с другими роботами и статическими препятствиями. Предполагается, что координаты всех роботов и статических препятствий в каждый момент времени известны.

Метод потенциалов [3–4] в данной задаче может быть представлен в следующем виде. Припишем роботам и статическим препятствиям отрицательные заряды, а целевым точкам – положительные. Тогда каждый робот притягивается к своей целевой точке со скоростью, зависящей от расстояния между ним и этой точкой. Он отталкивается от всех остальных роботов и статических препятствий со скоростями, также зависящими от соответствующих расстояний. Направления скорости притяжения i -го робота к целевой точке V_i^f , $i = 1, \dots, n$, скоростей отталкивания i -го и j -го роботов друг от друга: V_{ij} и V_{ji} , $j = 1, \dots, n$, и скорости отталкивания i -го робота от l -го статического препятствия, V_{il}^s , $l = 1, \dots, r$, показаны на рис. 4.

Таким образом, для i -го робота в каждый момент времени формируется значение и направление его скорости V_i как сумма векторов:

$$V_i = V_i^f + \sum_{j=1}^{n-1} V_{ij} + \sum_{l=1}^r V_{il}^s. \quad (1)$$

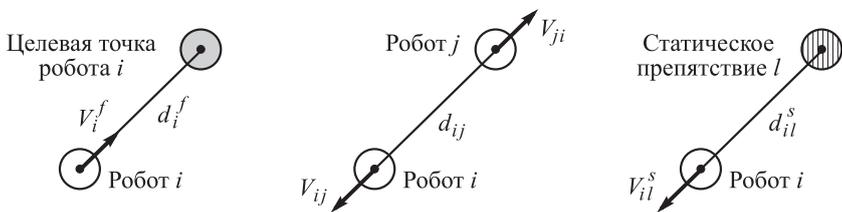


Рис. 4. Направления скоростей отталкивания и притяжения:

d_i^f – расстояние между i -м роботом и его целевой точкой; d_{ij} – расстояние между i -м и j -м роботами; d_{il}^s – расстояние между i -м роботом и l -м статическим препятствием

Модуль скорости V_i^f определяется по формуле

$$V_i^f = V_m Q_i^f,$$

где V_m – максимальная скорость робота; Q_i^f – коэффициент относительного расстояния между роботом i и его целевой точкой:

$$Q_i^f = \frac{d_i^f}{d_{\max}}, \quad (2)$$

где d_{\max} – максимально возможное расстояние между объектами рабочей зоны (определяется геометрией рабочего пространства).

Модуль скорости V_{ij} : $V_{ij} = V_m Q_{ij}$, где коэффициент Q_{ij} относительного расстояния между i -м и j -м роботами определяется по формуле

$$Q_{ij} = \begin{cases} \frac{R - d_{ij}}{R}, & \text{если } d_{ij} < R; \\ 0, & \text{если } d_{ij} \geq R, \end{cases} \quad (3)$$

где R – безопасное расстояние между двумя роботами, определяемое габаритами и скоростными характеристиками роботов.

Модуль скорости V_{il}^s : $V_{il}^s = V_m Q_{il}^s$, где коэффициент Q_{il}^s относительного расстояния между i -м роботом и l -м статическим препятствием определяется по формуле

$$Q_{il}^s = \begin{cases} \frac{R_s - d_{il}^s}{R_s}, & \text{если } d_{il}^s < R_s; \\ 0, & \text{если } d_{il}^s \geq R_s, \end{cases} \quad (4)$$

где R_s – безопасное расстояние между роботами и статическими препятствиями (зависит от максимальных габаритных размеров препятствий и размеров робота).

Чтобы получить уравнения движения системы роботов в нормальной форме, введем следующие обозначения. Пусть

$$V_i^a = \sum_{j=1}^{n-1} V_{ij} V_i^s = \sum_{l=1}^r V_{il}^s. \quad (5)$$

Скоростная составляющая V_i^a – это векторная сумма скоростей отталкивания i -го робота от соседних роботов, а скоростная составляющая V_i^s – это векторная сумма скоростей отталкивания i -го робота от статических препятствий, находящихся на небезопасном расстоянии от него.

Тогда для i -го робота получим вектор его скорости

$$V_i = V_i^f + V_i^a + V_i^s. \quad (6)$$

Разложив вектор скорости робота по координатным осям рабочего пространства, получим его уравнения кинематики

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_{vi}^x(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n); \\ \dot{y}_i = f_{vi}^y(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n), \end{cases} \quad (7)$$

где x_i, y_i – координаты i -го робота в рабочем пространстве. Величины f_{vi}^x и f_{vi}^y – скоростные функции i -го робота (в проекциях на оси координат), зависящие от координат всех роботов, входящих в состав коллектива.

В результате для n роботов получим систему уравнений, описывающую поведение группы роботов, в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{F}_v, \quad (8)$$

где \mathbf{Z} и \mathbf{F}_v – $2 \times n$ -матрицы вида

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_n)^T;$$

$$\mathbf{F}_v = (\mathbf{F}_{v1}, \mathbf{F}_{v2}, \dots, \mathbf{F}_{vn})^T.$$

Вектор $Z_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$ – вектор координат i -го робота, а $F_{vi} = \begin{pmatrix} f_{vi}^x \\ f_{vi}^y \end{pmatrix}$ –

вектор скоростных функций робота.

Решая полученную систему уравнений, можно построить траектории движения роботов, обеспечивающие их перемещение к целевым точкам и исключая столкновения друг с другом и с препятствиями.

Равномерное распределение роботов в рабочей зоне. Для обследования рабочей зоны необходимо обеспечить равномерное размещение роботов в границах зоны. Здесь также применим метод потенциалов [5].

Пусть n – количество роботов, входящих в состав системы. Рабочая зона имеет прямоугольную форму с размерами $W \times H$. Изначально роботы расположены произвольно в пределах рабочего пространства. Введем систему координат OXY , связанную с рабочей зоной. Предположим, что роботы при их равномерном распределении должны находиться на расстоянии R друг от друга и на расстоянии $R/2$ от границ рабочей зоны. Таким образом, каждый робот должен отталкиваться от другого, если расстояние между ними меньше заданного, и притягиваться к нему, если это расстояние превышает заданное значение (рис. 5). При этом каждый робот должен притягиваться к границе рабочей зоны, если расстояние до этой границы превышает $R/2$, и отталкиваться от границы, если расстояние до границы меньше $R/2$ (рис. 6).

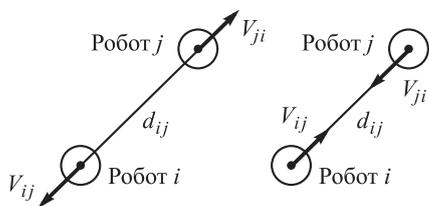


Рис. 5. Взаимодействие роботов между собой

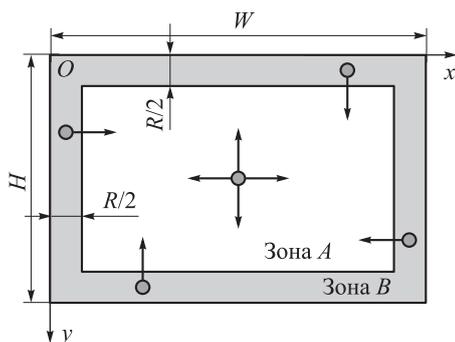


Рис. 6. Взаимодействие робота с границами рабочей зоны

Расстояние R зависит от габаритов рабочей зоны и количества роботов:

$$R = \sqrt{\frac{WH}{n}}$$

Для i -го робота в каждый момент времени формируется значение и направление его скорости V_i как векторная сумма:

$$V_i = \sum_{j=1}^{n-1} V_{ij} + V_i^b.$$

Модуль скорости V_{ij} : $V_{ij} = V_m Q_{ij}$, где коэффициент Q_{ij} относительного расстояния между i -м и j -м роботами зависит от расстояния d_{ij} между роботами:

$$Q_{ij} = \begin{cases} k_1, & \text{если } d_{ij} > R, \\ k_2, & \text{если } d_{ij} < R, \\ 0, & \text{если } d_{ij} = R. \end{cases}$$

Здесь k_1, k_2 – константы, причем $k_1 \ll k_2$. Скоростная составляющая V_i^b отвечает за взаимодействие робота с границами рабочей зоны. Значения скорости V_i^b в проекциях на оси координат определяются следующим образом:

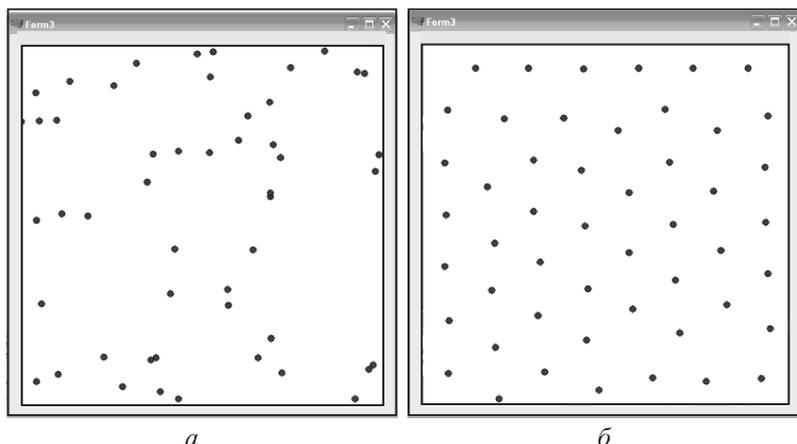
$$\begin{cases} V_i^{bx} = \pm f(R) V_m \frac{W - 2x_i}{W - R}, \\ V_i^{by} = \pm f(R) V_m \frac{H - 2y_i}{H - R}. \end{cases}$$

Здесь $f(R)$ – линейная функция; x_i, y_i – координаты робота. Знак «+» соответствует внутренней области, $x_i, y_i \in A$; знак «-» – приграничной области, $x_i, y_i \in B$.

Для проверки работоспособности метода разработана программная модель. На рис. 7, а показан пример произвольного начального расположения 50 роботов, а на рис. 7, б приведено их финальное распределение с помощью рассмотренного метода.

Результаты моделирования показали, что коллектив роботов равномерно распределяется в пределах рабочей зоны и предложенный метод распределения является работоспособным.

Таким образом, в статье представлены общие подходы к построению МПРС. Система управления МПРС построена по модульному принципу, что наделяет ее свойством универсальности. Рассмотренные методы и алгоритмы мультиагентного управления обеспечивают



a

б

Рис. 7. Результат работы программы для 50 роботов:

a – начальное расположение роботов; *б* – расположение роботов после равномерного распределения

реализацию отдельных модулей системы управления. Распределение задач в коллективе роботов осуществляется с помощью модели переговоров «Аукцион». Алгоритмы перемещения роботов к целевым точкам в среде с препятствиями и равномерного распределения роботов в рабочей зоне реализуются на основе метода потенциалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манько С. В., Романов М. П., Юревич И. Е. Интеллектуальные роботы. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.
2. www.aiportal.ru
3. Платонов А. К., Кирильченко А. А., Колганов М. А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. – М.: Изд-во ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2001. – 27 с.
4. Даринцев О. В. Система управления коллективом микроботов // Штучный интеллект. – 2006. – № 4. – С. 391–399.
5. Семовский С. В. Стохастическая модель стаи рыб – от индивидуального поведения к групповому // Математическое моделирование. – 1989. – Т. 1. – № 6. – С. 49–55.

Статья поступила в редакцию 28.06.2012