

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РОЛЕЙ В КОАЛИЦИЯХ РОБОТОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ КОММУНИКАЦИЯХ НА ОСНОВЕ РОЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Иванов Д. Я.¹

(НИИ Многопроцессорных вычислительных систем
им. академика А.В. Каляева ЮФУ, Таганрог)

В работе рассматривается задача распределения ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях. Показана актуальность применения коалиций роботов, а также актуальность решения задачи распределения ролей в коалициях роботов с применением схемы «один оператор – одна группа роботов». Дана формальная постановка задачи распределения ролей в коалиции мобильных роботов. Приведен анализ существующих подходов к распределению ролей в группах роботов, таких как решение задачи о назначении алгоритмом Куна – Манкреса, применение аппарата теории игр, применение методов теории вероятностей, муравьиного алгоритма, метода распространения волны управления с помощью механизма локального перелогосования. Предложен итерационный подход к распределению ролей в группе роботов, основанный на стратегии децентрализованного управления и принципах роевого взаимодействия. Описан метод распределения ролей в коалициях мобильных роботов и реализующий этот метод алгоритм действий отдельного робота коалиции при распределении ролей на основе предложенного подхода. Приведены результаты исследования предлагаемого подхода, проведенные с помощью компьютерного моделирования в коалициях численностью 100 роботов при распределении трех ролей. Приведены диаграммы распределения ролей во время итераций. Показаны усредненные результаты компьютерного моделирования распределения ролей при различных значениях радиуса видимости соседей в коалиции. Произведена оценка погрешности распределения ролей с использованием предложенного алгоритмически реализуемого метода и проведено сравнение с известными подходами. Показаны сферы возможного практического применения разработанного подхода.

Ключевые слова: распределение ролей, коалиция роботов, роевое взаимодействие, ограниченные коммуникации.

¹ Донат Яковлевич Иванов, к.т.н., с.н.с. (donat.ivanov@gmail.com).

1. Введение

Современные достижения в области робототехники и мехатроники позволяют создавать малоразмерные мобильные роботы, оснащенные достаточно мощными бортовыми вычислительными ресурсами, что позволяет использовать их при решении многих практических задач.

Применение дистанционно управляемых мобильных роботов целесообразно и экономически эффективно при выполнении работ в труднодоступных и опасных для человека средах. При этом решение многих практических задач требует применения большого числа мобильных роботов, объединенных в коалицию, и их скоординированной между собой работы (например мониторинг лесных массивов [37, 49, 51], нефте- и газопроводов [45, 50], геологоразведка морского дна и шельфа и др.). Преимущества группового применения роботов в задачах экстремальной робототехники очевидны [2]. Объединение некоторого множества роботов группы с целью совместного выполнения общей групповой задачи (в том числе разбитой на подзадачи) в ряде работ получило название коалиции роботов. При этом обычно считается [20, 26, 27, 31, 32, 34], что роботы группы имеют возможность входить в коалицию и выходить из нее [25–26]. В рамках данной работы будем считать, что коалиция уже сформирована и ее состав не изменяется. Также в рамках данной работы не рассматривается задача формирования строя [7, 41–43] роботов коалиции в пространстве.

Дистанционное управление коалицией роботов по принципу «один робот – один оператор» не оправдано с экономической точки зрения, а также затрудняет согласованную работу роботов. Схема управления «одна группа роботов – один оператор» повысит экономическую привлекательность использования роботов для целого ряда практических задач. Однако такая схема управления требует достаточно высокого уровня автономности коалиции роботов. Современный уровень миниатюризации и развития вычислительной техники позволяет даже малогабаритных роботов оснащать достаточно высокопроизводительными бортовыми вычислительными устройствами. Тем не менее

требуется разработка методов и алгоритмов, позволяющих мобильным интеллектуальным роботам планировать свои действия при работе в коалиции.

Наиболее перспективными подходами к управлению коалициями роботов представляются децентрализованные стратегии управления и мультиагентные системы [39], базирующиеся на принципах [44] роевого интеллекта [38].

2. Распределение ролей в группе роботов

При решении некоторых задач коалициями роботов возникает необходимость функциональной дифференциации узлов [18], т.е. распределения некоторых обязанностей или ролей в коалиции таким образом, чтобы часть роботов выполняла одни роли, а другая часть – другие. Характер распределения ролей зависит от специфики выполняемой задачи.

Например, при формировании периодического строя в больших группах мобильных роботов методом паттернов [8, 9] необходимо обеспечить равномерное распределение ролей в группе, причем каждая «роль» представляет собой целевое положение в паттерне.

Рассмотрим строй, состоящий из треугольников (см. рис. 1а). Обозначим вершины треугольника буквами латинского алфавита А, В, С. Очевидно, что для формирования целевого строя необходимо обеспечить такое распределение ролей А, В, С в группе, чтобы численность подмножества роботов с каждой из ролей равнялась $1/3$ от общей численности группы. То есть 33,(3)% роботов группы должны выбрать роль А, 33,(3)% роботов группы должны выбрать роль В, и 33,(3)% роботов группы должны выбрать роль С. При этом желательно, чтобы роботы с каждой из ролей были рассредоточены по всей группе, а не сконцентрированы в одной области (это позволит снизить энергетические и временные расходы на формирование строя).

Аналогично, при построении периодического строя из шестиугольников (рис. 1б), необходимо обеспечить квазиравномерное распределение роботов между шестью ролями: А, В, С, D, E, F.

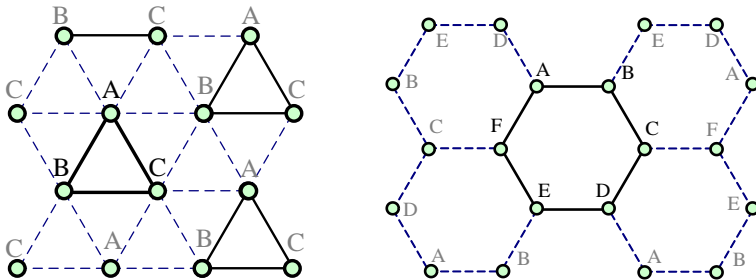


Рис. 1. Пример периодического строя, составляющий паттерн:
а) треугольник; б) шестиугольник

Другим примером может служить задача формирования мобильных сенсорных сетей быстрого развертывания на базе группы мобильных роботов. В этом случае перед роботами группы стоит задача сбора данных об окружающей среде, предварительной обработки полученных данных, обеспечения резервного хранения полученных промежуточных результатов, а также передачи полученных результатов на удаленный сервер.

Роботы группы взаимодействуют посредством локальной беспроводной сети. А передача полученных результатов на удаленный пульт управления осуществляется по другому каналу связи, обеспечивающему дальнюю связь и, как правило, требующему больших энергозатрат на поддержание связи.

С целью экономии запаса бортовых энергоресурсов роботов группы зачастую нецелесообразно возлагать на одних и тех же роботов и вычислительные, и телекоммуникационные задачи. Необходимо распределить роли между роботами группы так, чтобы в каждой отдельно взятой области пространства, покрываемой мобильной сенсорной сетью, были как роботы, занятые сбором данных, так и роботы, занятые обработкой информации и передачей результатов на удаленный сервер.

Например, все роботы коалиции заняты сбором данных о состоянии окружающей среды с помощью бортовых сенсорных устройств, однако часть роботов группы (например, 20%) дополнительно выполняет роль ретрансляторов для обеспечения передачи собранных, другая часть роботов группы (например

40%) осуществляет предварительную обработку полученных данных, а оставшиеся роботы группы осуществляют резервное хранение результатов промежуточных.

В работах [18, 19] коалицию роботов, представляющую собой некоторую фиксированную сеть с определенной конфигурацией строя – совокупность агентов, в которой отсутствует заранее определенный управляющий центр и которая обладает такими свойствами, как активность, локальность взаимодействия и функциональная неоднородность, предложено называть статическим строем. Таким образом возникает задача распределения ролей в статическом строе роботов.

3. Постановка задачи

Рассмотрим группу R , состоящую из N мобильных роботов r_i где i – уникальный идентификационный номер робота, $i = 1, \dots, N$. Каждый робот r_i в момент t описывается набором параметров: координаты робота r_i в пространстве $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$, вектор скорости $\bar{v}_i(t)$, состояние (выбранная роль) s_i из некоторого множества доступных для группы ролей $\mathbf{s} = \langle s_0, s_1, \dots, s_k \rangle$.

В начальный момент времени t_0 все роботы находятся в состоянии s_0 («роль не выбрана», или «резервный робот»). Каждый робот может самостоятельно перейти в любое другое состояние.

Все роботы группы R перемещаются внутри некоторой рабочей зоны Z шириной Z_w , длиной Z_l и высотой Z_h , избегая столкновений между собой. То есть имеется ограничение на минимальное допустимую дистанцию d_{min} между любой парой роботов группы:

$$\sqrt{(x_j(t) - x_i(t))^2 + (y_j(t) - y_i(t))^2 + (z_j(t) - z_i(t))^2} \geq d_{min},$$

$$i, j = 1, \dots, N; \quad i \neq j.$$

Бортовые средства связи позволяют каждому роботу получить данные о состоянии других роботов группы, попадающих в его зону видимости, ограниченную радиусом прямой связи l_i .

Требуется обеспечить переход числа n_m , $m = 1, \dots, k$, роботов группы R в состояние s_m , $m = 1, \dots, k$, таким образом, чтобы обеспечивалось процентное соотношение

$$(1) \quad c_m \in \left[\frac{n_m}{N} \cdot 100\% - \Delta_c \%, \frac{n_m}{N} \cdot 100\% + \Delta_c \% \right], \quad m = 1, \dots, k,$$

где Δ_c – допустимая погрешность распределения ролей в процентах от общего числа роботов коалиции. При этом

$$\sum_{m=1}^k c_m = 100\%,$$

а также в любой локальной области пространства, занимаемого коалицией роботов, размеры которой превышают $2 \cdot l_i$, выполняется условие (1).

4. Обзор существующих подходов

Можно провести параллель между задачей распределения ролей в коалициях роботов и задачей распределения целей [11, 12] (подцелей, задач) в группах роботов, решению которой посвящено достаточно большое количество научных работ (например [10, 13–17, 22, 30, 45]). В общем виде при распределении целей рассматривают некоторое множество роботов и множество целей, и необходимо определить однозначные соответствия между роботами и целями с требуемым уровнем эффективности.

В рамках рассматриваемой в данной статье задачи распределения ролей можно считать, что есть некоторое множество V «целей» v_j , число которых равно числу роботов в группе. «Цели» здесь понятия абстрактные, а не физические. Каждая цель v_j относится к одному из s_m типов (ролей). При этом количество «целей» каждого типа соответствует требуемому распределению ролей в коалиции роботов. Таким образом, можно рассмотреть двудольный граф, в левой части которого находятся роботы, в правой части находятся цели, ребра графа определяют возможные назначения целей роботам, а веса ребер определяют «стоимость» таких назначений (см. рис. 2). Тогда задача распределения целей сводится к решению задачи о назначениях [21, 23].

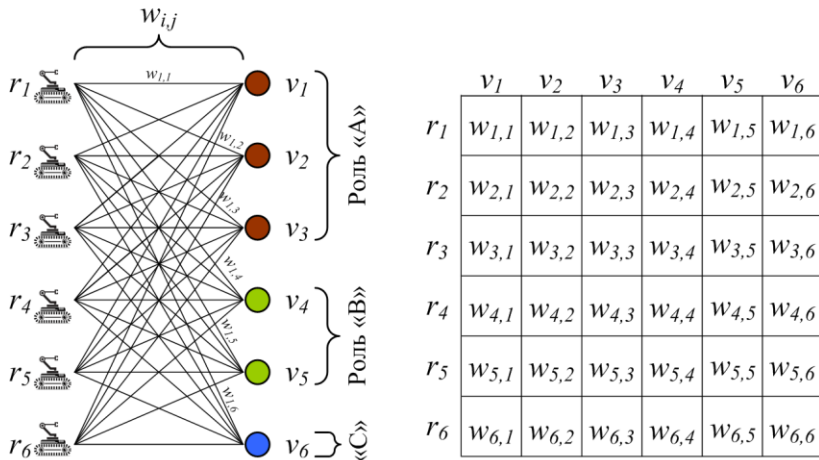


Рис. 2. Представление задачи о назначениях в виде двудольного графа (слева) и матрица стоимостей ребер графа (справа)

Известные подходы к решению задачи о назначениях, такие как «Венгерский алгоритм» (в научной литературе также встречается название *алгоритм Куна – Манкреса*) [47,48], определяют назначения в двудольном графе на основе матрицы стоимостей ребер графа. Однако численная оценка стоимостей ребер графа при распределении ролей затруднена, что препятствует использованию указанных выше методов распределения целей для решения сформулированной в данной статье задачи распределения ролей.

В теории игр [40] еще в 60-е годы XX века рассматривались игры двух лиц с нулевой суммой, когда игроки знают только результаты своих игр [28, 29]. В нашей стране были подробно изучены игры двух автоматов [24, 36]. А также проводились исследования в области игр в размещения групп автоматов [5, 6]. Однако в этих работах не учитываются ограничения на коммуникации и взаимодействия с соседями. В рассматриваемой постановке задачи роботам (автоматам) доступна информация о том, какие роли выбрали только соседние роботы.

Возникает потребность в специализированных методах решения задачи распределения ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях. Рассмотрим их подробнее.

В простейшем случае для каждой роли можно рассчитать некоторую вероятность $P_m = c_m/100$, $m = 1, \dots, k$. Тогда, воспользовавшись генератором случайных чисел, каждый робот может выбрать одну из множества ролей в соответствии с этими вероятностями. Однако такой подход применим только если строй роботов коалиции неподвижен, все роботы коалиции получают информацию о требуемом распределении одновременно и дальнейшие перемещения роботов коалиции и изменения целевых распределений ролей не предусмотрены. На практике информацию об изменении целевого распределения ролей роботы коалиции будут получать не одновременно, выполнение общей групповой задачи может приводить к перемещениям роботов в пространстве, в том числе к нарушениям требования по равномерности распределения ролей в локальных областях.

В работе [33] рассмотрена задача распределения ролей «фуражиров» и «разведчиков» между агентами в гетерогенном коллективе роботов-муравьев. В этой работе задача выбора агентом роли рассматривается как задача размещения [35], решаемая стохастическим автоматом [1] с двумя состояниями. Там же предложено, но не рассмотрено решение задачи распределения ролей автоматом с линейной стратегией. Учитывая, что основной целью работы [33] было поставлено повышение эффективности фуражирования роботами группы за счет разделения ролей, исследованию механизма распределения ролей уделено мало внимания. Тем не менее в этой работе приведены результаты компьютерного моделирования работы группы роботов-муравьев при фиксированных распределениях ролей (100% и 0%, а также 95% и 5%) и при динамическом перераспределении ролей в процессе выполнения задачи. При этом последний вариант показал более высокую эффективность.

В работе [19] предложен оригинальный подход к распределению ролей в статическом рое на основе процедуры распространения волны управления. Суть подхода заключается в том, что в гомогенной группе роботов с заранее определенной кон-

фигурацией строя, определяющей топологию сети агентов, с помощью механизма локального переголосования [46] роботов статического роя выбирается лидер, который выступает инициатором распространения волны управления. (Способы определения лидера в статическом рое также рассмотрены в работах [3,4]) Выбранный лидер выполняет роль s_0 . Роботы, имеющие прямой канал связи с лидером, получают от него иницирующий пакет, согласно которому им назначается роль s_1 . Затем эти роботы передают дальше по каналам связи волну управления, и роботы, имеющие с ними прямые каналы связи и еще не получившие назначения роли, получают роль s_2 и передают дальше волну управления до тех пор, пока не останется роботов, еще не получивших назначения роли.

Данный метод позволяет осуществлять распределение ролей в статическом строе за относительно небольшое количество итераций. В работе [19] приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие сходимость процесса переголосования при выборе лидера, а также показывающие, что количество переголосований при этом не превышает численность N группы R . Также можно отметить, что длина пути распространения волны управления даже в худшем случае также не превышает $N - 1$. Таким образом, можно предположить что распределение ролей потребует не более $2N - 1$ итераций, что вполне приемлемо для практического применения.

Однако следует учесть, что данный подход обеспечивает распределение ролей исключительно на основе текущей топологии сети (которая в свою очередь зависит от конфигурации строя роботов в пространстве и имеющихся между ними каналов связи). Таким образом невозможно получить такое распределение ролей в группе, в котором количество n_0 роботов с ролью s_0 превышает единицу. Также невозможно задать количество (или процентное соотношение) роботов с другими ролями в группе.

Можно сделать вывод, что предложенный в [19] подход к распределению ролей в статическом строе походит для узкого ряда практических применений, но не позволяет решать сфор-

мулированную выше задачу распределения ролей с заданными процентными соотношениями.

Таким образом, возникает необходимость в разработке метода и алгоритма решения задачи распределения ролей в коалициях роботов с ограниченными коммуникациями, сформулированной в разделе 3.

5. Предлагаемый метод

Предлагается решать поставленную задачу итерационно. На каждой итерации каждый робот r_i с помощью бортовых средств определяет численность N_i подгруппы R_i роботов группы R , попадающих в его зону видимости, ограниченную радиусом l_i , т.е. роботов-соседей. Затем робот производит подсчет количества n_m^i , $m = 1, \dots, k$, в своей подгруппе (роботы-соседи), выбравших одну роль s_m , $m = 1, \dots, k$. Имея данную информацию, робот может рассчитать текущее распределение ролей своей подгруппе R_i :

$$c_m^i = \frac{n_m^i}{N_i} \cdot 100\%, \quad m = 1, \dots, k.$$

Затем робот рассчитывает недостачу Δc_m^i (переизбыток) роботов для каждой роли:

$$\Delta c_m^i = c_m - c_m^i, \quad m = 1, \dots, k.$$

Доступная роботу информация о состоянии подгруппы приведена в таблице 1.

Таблица 1. Доступные роботу данные о текущем распределении ролей в его подгруппе

Роль	s_0	s_1	...	s_m	...	s_k
Требуемое распределение для всей группы, %	c_0	c_1	...	c_m	...	c_k
Текущее распределение в подгруппе, шт.	n_0^i	n_1^i	...	n_m^i	...	n_k^i
Текущее распределение, %	c_0^i	c_1^i	...	c_m^i	...	c_k^i
Недостача, %	Δc_0^i	Δc_1^i	...	Δc_m^i	...	Δc_k^i

Затем робот находит максимальную недостачу $\max \Delta c_m^i$ и выбирает соответствующую этой недостаче роль s_m .

В случае если все роли распределены в группе с погрешностью менее Δ_c , задача распределения ролей считается выполненной. В противном случае повторяется следующий этап итерационного процесса.

Алгоритм действий робота r_i при распределении ролей приведен на рис. 3.

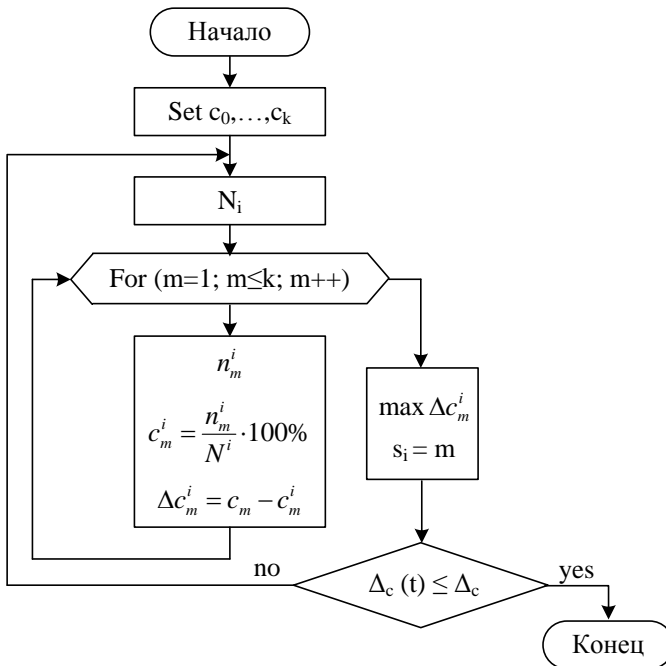


Рис. 3. Алгоритм действий робота r_i при распределении ролей

6. Компьютерное моделирование

С целью исследования предложенного метода было проведено компьютерное моделирование. Программное обеспечение, которое использовалось при моделировании, позволяет задавать

численность группы роботов, требуемое распределение ролей, радиус «видимости» роботов. На рис. 4 показан скриншот программы моделирования в начальный момент времени.

Была проведена серия программных экспериментов, которые подтвердили работоспособность предложенного подхода и сходимость итерационного процесса. В рамках данной статьи приведены основные результаты компьютерного моделирования.

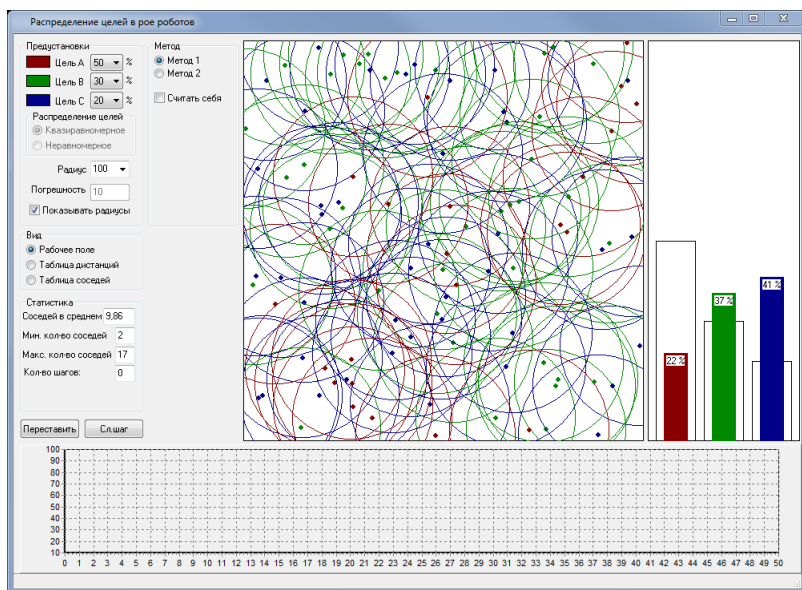


Рис. 4. Скриншот программы моделирования

Группа R численностью $N = 100$ роботов в начальный момент времени распределена случайным образом на площадке Z шириной $Z_w = 500$ м и длиной $Z_l = 500$ м. Роботы двигаются в случайном направлении с постоянной скоростью $|\underline{v}_i(t)| = 1$ м/с. Ограничение на минимальную дистанцию установлено $d_{min} = 5$ м. Радиус прямой связи l_i выбирался в интервале $l_i \in [50; 300]$ с шагом 50 м. Необходимо было распределить три роли таким образом, чтобы $c_1 = 50\%$, $c_2 = 30\%$, $c_3 = 20\%$. При

этом в начальный момент каждому роботу назначалась одна из этих трех ролей случайным образом.

Для каждого выбранного набора параметров проводилась серия модельных экспериментов. При этом учитывалось минимальное, максимальное и среднее (для всей группы) количество роботов, попадающих в одну подгруппу, количество повторений итерационного процесса, необходимых для выполнения распределения ролей, минимальная и максимальная погрешность для отдельных ролей. При анализе текущего распределения в своей подгруппе каждый робот учитывал всех роботов подгруппы, кроме себя самого.

В ходе компьютерного моделирования распределение ролей считалось завершенным в том случае, если дальнейшие итерации не приводили к перераспределению ролей. Так, на рис. 5 показано, как изменялось распределение ролей в коалиции из 100 роботов при $l_i = 300$.

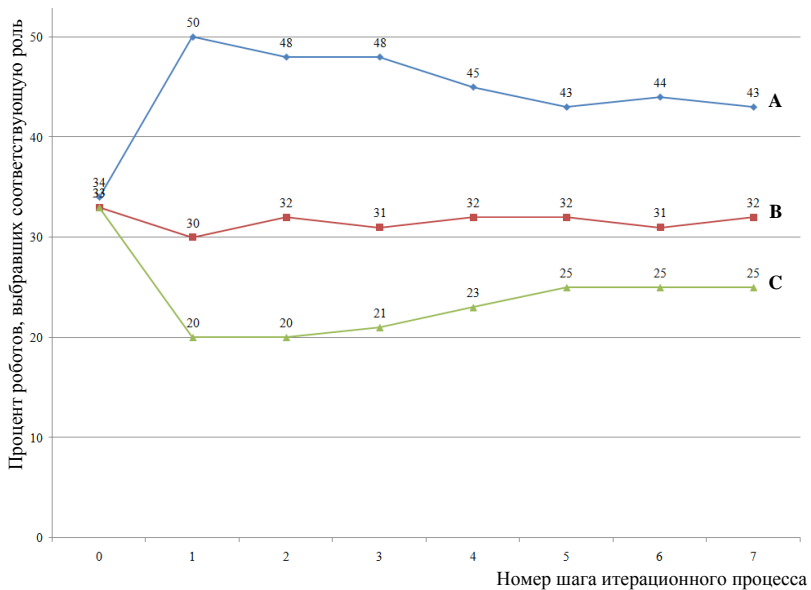


Рис. 5. Перераспределение ролей при выполнении итерационного процесса

Итерационный процесс прекратился после седьмого шага. Однако можно заметить, что при практическом применении предложенного метода распределения ролей можно считать задачу распределения ролей выполненной, как только погрешность распределения ролей перестает превышать допустимый уровень Δ_c . В примере, приведенном на рис. 5, уже на первом шаге итерационного процесса достигается требуемое распределение с $\Delta_c = 0$. В дальнейшем распределение только немного ухудшается. Однако остановка итерационного процесса при удовлетворении требуемого значения погрешности затруднена ввиду ограниченных коммуникаций. В соответствии с постановкой задачи, роботам коалиции недоступна информация о состоянии всех остальных роботов.

Усредненные результаты компьютерного моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Усредненные результаты компьютерного моделирования

Радиус видимости, м	Среднее минимальное кол-во соседей	Среднее максимальное кол-во соседей	Среднее число соседей	Среднее кол-во шагов	Среднее значение минимальной погрешности, %	Мин. Кол-во шагов	Мин. Кол-во шагов	Макс кол-во шагов
50	0	8,1	2,96	2,4	1,1	4,6	2	3
100	2,5	19,7	10,50	4,4	1,3	4,1	3	6
150	7,4	35,6	21,44	4,8	1,1	4,2	4	6
200	11,7	55,0	34,30	6,7	0,6	3,2	4	11
250	20,2	78,9	48,15	5,9	0,4	2,7	4	10
300	29,6	93,4	61,13	8,5	0,4	2,5	5	13

Следует отметить, что результаты компьютерного моделирования показали сходимость итерационного процесса в том

случае, если каждый робот учитывает текущее распределение в своей подгруппе без учета своей текущей роли. При этом количество шагов итерации относительно невелико (от 2 до 16 в проведенных модельных экспериментах) при численности группы роботов $N = 100$. При этом распределение ролей в каждой отдельно взятой локальной области было близко к целевому распределению.

7. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-29-07054.

8. Выводы

В работе предложен алгоритмически простой метод распределения ролей в группах роботов, основанный на принципах [44] роевого интеллекта [38]. Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность данного метода и сходимость итерационного процесса. За несколько итераций обеспечивается приемлемая для решения практических задач погрешность распределения ролей.

Результаты компьютерного моделирования показали, что по сравнению с описанным в [19] подходом к распределению ролей в группах роботов, предложенный в данной работе подход обеспечивает сходимость за меньшее число шагов итерации.

Учитывая, что предлагаемый метод в основе своей содержит вероятностный подход, можно заметить, что погрешность распределения и необходимое количество итерационных шагов меньше в тех случаях, когда численности локальных подгрупп оказываются выше (см. рис. 6).

Увеличивать численность локальных подгрупп без увеличения численности коалиции можно либо за счет увеличения радиуса прямой видимости, либо за счет формирования более компактного строя в группе роботов. Также в дальнейшем можно рассмотреть возможность маршрутизации при передаче сообщений о состоянии тех роботов, которые не входят в одну локальную подгруппу.

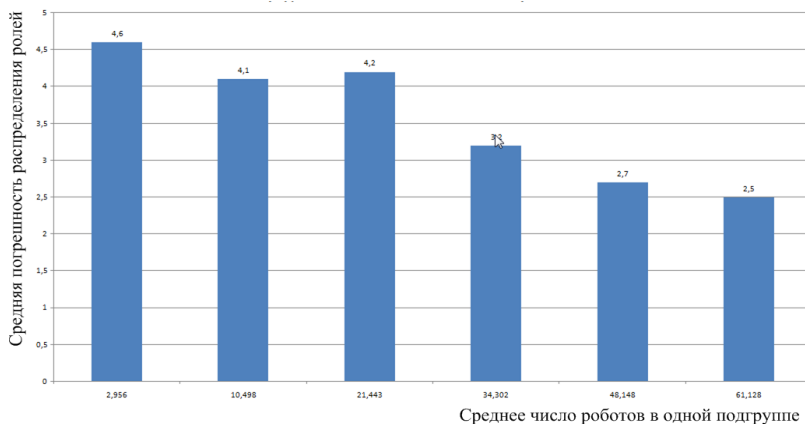


Рис. 6. График зависимости погрешности распределения ролей от среднего числа соседствующих роботов по результатам компьютерного моделирования

Следует также отметить, что в последние годы исследования в области управления многочисленных коалиций роботов выходят из области теоретических изысканий в практическую сферу. В качестве примера можно привести проект “Shooting Star” фирмы Intel, посвященный созданию рекламных световых шоу за счет большого количества квадрокоптеров [52]. В первых экспериментах было задействовано около ста квадрокоптеров, но потом численность группы довели до 500 экземпляров. При этом в группе отсутствует централизованное управление. Квадрокоптеры взаимодействуют с соседями. Пульт оператора только передает групповое задание и собирает данные о состоянии аппаратов. Похожие проекты ведутся и в других странах, что говорит о том, что применение сотен или даже тысяч микророботов – это не планы на будущее, а реалии дня сегодняшнего.

Дальнейшие исследования будут посвящены поиску методов и алгоритмов, которые позволят сократить погрешность распределения задач. Будут проведены исследования с группами другой численности, а также с роботами, скорость движения которых достаточно высока, что будет приводить к тому, что

многие роботы в процессе движения будут покидать одни локальные подгруппы и присоединяться к другим локальным подгруппам.

Литература

1. ВАРШАВСКИЙ В.И., ВОРОНЦОВА И.П. *О поведении стохастических автоматов с переменной структурой* // Автоматика и телемеханика. – 1963. – №3(23). – С. 353–360.
2. ВАСИЛЬЕВ И.А., ПОЛОВКО С.А., СМИРНОВА Е.Ю. *Организация группового управления мобильными роботами для задач специальной робототехники* // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – №1(164). – С. 119–123.
3. ВОРОБЬЕВ В.В. *Алгоритмы выбора лидера и кластеризации в статическом рое роботов* // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2017. – №3(18). – С. 166.
4. ВОРОБЬЕВ В.В. и др. *Алгоритм выбора лидера в системах с меняющейся топологией* // 15-я Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, Смоленск, 03–07 октября 2016 г. – 2016. – С. 149–157.
5. ГИНЗБУРГ С.Д., КРЫЛОВ В.Ю., ЦЕТЛИН М.Л. *Об одном примере игры многих одинаковых автоматов* // Автоматика и телемеханика. – 1964. – №5(25). – С. 668–6712.
6. ГИНЗБУРГ С.Л., ЦЕТЛИН М.Л. *О некоторых примерах моделирования коллективного поведения автоматов* // Проблемы передачи информации. – 1965. – №2(1). – С. 54–62.
7. ИВАНОВ Д.Я. *Формирование строя группой беспилотных летательных аппаратов при решении задач мониторинга* // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №4. – С. 219–224.

8. ИВАНОВ Д.Я. *Метод паттернов для формирования строя в больших группах квадрокоптеров* // *Материалы 8-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2015) в 3 т.* – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. – С. 175–177.
9. ИВАНОВ Д.Я. *Формирование строя в большой группе мобильных роботов с использованием метода паттернов* // *Робототехника и техническая кибернетика.* – 2016. – №2(11). – С. 39–44.
10. ИВАНОВ Д.Я., УСАЧЕВ Л.Ж. *Выбор целей движения при изменении строя в группе БЛА* // *XII всероссийское совещание по проблемам управления.* – 2014. С. 2015–2020.
11. КАЛЯЕВ И.А., ГАЙДУК А.Р., КАПУСТЯН С.Г. *Распределенные системы планирования действий коллективов роботов.* – М.: Янус-К, 2002. – 292 с.
12. КАЛЯЕВ И.А., ГАЙДУК А.Р., КАПУСТЯН С.Г. *Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов.* – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
13. КАЛЯЕВ И.А., КАПУСТЯН С.Г., ГАЙДУК А.Р. *Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели* // *Управление большими системами: сборник трудов.* 2010. № 30–1. С. 605–639.
14. КАЛЯЕВ И.А., КАПУСТЯН С.Г., УСАЧЕВ Л.Ж. *Метод решения задачи распределения целей в группе БЛА сетевой модели управления* // *Известия Южного федерального университета. Технические науки.* – 2016. – №12. – С. 55.
15. КАЛЯЕВ И.А., КАПУСТЯН С.Г., УСАЧЕВ Л.Ж. *Оптимизация распределения целей для задач мониторинга в сетевой модели управления группой беспилотных летательных аппаратов* // *10-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления, Дивноморское, 11-16 сентября 2017 г.* – 2017. – С. 178–181.

16. КАПУСТЯН С.Г. *Алгоритмы коллективного улучшения плана при решении задачи распределения целей в группе роботов* // Искусственный интеллект. – 2006. – №3. – С. 679–690.
17. КАПУСТЯН С.Г., УСАЧЕВ Л.Ж., СТОЯНОВ С.В. *Метод оптимального распределения целей в коллективе роботов* // Информационные технологии. – 1998. – №4. – С. 29–34.
18. КАРПОВ В.Э. *Управление в статических роях. Постановка задачи* // Труды VII Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 20–22 мая 2013 г., Коломна. – С. 730–739.
19. КАРПОВ В.Э. *Процедура голосования в однородных коллективах роботов* // 14-я Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014, 24–27 октября 2014 г., Казань, Россия: Труды конференции. – 2014. – Т. 2. – С. 159–167.
20. КАШЕВНИК А.М. *Подход к обеспечению семантической интероперабельности мобильных роботов при формировании коалиций* // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2017. – №1. – С. 90–100.
21. КИРСАНОВ М.Н. *Графы в Maple. Задачи, алгоритмы, программы*. – М.: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 168 с.
22. КИСЕЛЕВ Л.В. и др. *Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов* // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – №2. – С. 34–43.
23. КРИСТОФИДЕС Н. *Теория графов: Алгоритмический подход*. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
24. КРЫЛОВ В.Ю., ЦЕТЛИН М.Л. *Об играх автоматов* // Автоматика и телемеханика. – 1963. – №7(24). – С. 975–987.
25. КУЛИНИЧ А.А. *Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности* // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – №2. – С. 27–38.

26. КУЛИНИЧ А.А. *Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход* // Управление большими системами. – 2014. – №51. – С. 174–197.
27. КУЛИНИЧ А.А. *Модель кооперации агентов (роботов)* // Труды 14-й Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014, 24–27 сентября 2014 г. Казань. – 2014. – С. 24–27.
28. ЛЬЮС Р.Д., РАЙФА Х., ЛЯПУНОВА А.А. *Игры и решения: Введение и критический обзор*. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
29. МАК КИНСИ Д. *Введение в теорию игр*. – М.: Физматгиз, 1960.
30. МАКСИМОВ Н.А., ФЕДОРОВ А.М. *Планирование съемки разнородных целей группой беспилотных летательных аппаратов* // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №8. – С. 354–363.
31. ПЕТРОВ М.В., КАШЕВНИК А.М. *Онтолого-ориентированный подход к непрямому взаимодействию пользователей и роботов для совместного решения задач* // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2017. – №1. – С. 133–146.
32. ПРОТАЛИНСКИЙ И.О., ЩЕРБАТОВ И.А. *Исследование эффективности группового управления роботами методом имитационного моделирования* // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – №2с(4). – С. 34–37.
33. РОВБО М.А. *Распределение ролей в гетерогенном муравьино-подобном коллективе* // 15-я Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2016). Смоленск. – 2016. – Т. 2. – С. 363–371.
34. ХАВИНА И.П., МОЛЧАНОВ Г.И. *Мультиагентная система оптимального управления коалицией роботов* // Вісник НТУ «ХП». Серія «Технології в машинобудуванні». – 2017. – №17(1239). – С. 5–9.

35. ЦЕТЛИН М.Л. *Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем.* – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1969.
36. ЦЕТЛИН М.Л., КРЫЛОВ В.Ю. *Примеры игр автоматов // Доклады Академии наук.* – 1963. – Т. 149, №2. – С. 284–287.
37. CASBEER D.W. et al. *Forest fire monitoring with multiple small UAVs // Proc. of the American Control Conference, June 2005, Portland, Oregon.* – 2005. – P. 3530–3535.
38. DORIGO M., BIRATTARI M. *Swarm intelligence // Scholarpedia.* – 2007. – №9(2). – P. 1462.
39. FERBER J. *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence.* – Addison-Wesley Reading, 1999.
40. НАЈЕК В. *An Introduction to Game Theory.* – Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, 2017. – P. 116.
41. IVANOV D., KAPUSTYAN S., KALYAEV I. *Method of spheres for solving 3D formation task in a group of quadrotors // Int. Conference on Interactive Collaborative Robotics, 24-26 August, Budapest, Hungary.* – Springer, Cham, 2016. – P. 124–132.
42. IVANOV D., KALYAEV I., KAPUSTYAN S. *Formation task in a group of quadrotors // Robot Intelligence Technology and Applications 3.* – Springer, Cham, 2015. – P. 183–191.
43. IVANOV D., KAPUSTYAN S., KALYAEV I. *Method of Spheres for Solving 3D Formation Task in a Group of Quadrotors // Interactive Collaborative Robotics. Volume 9812 of the series Lecture Notes in Computer Science. Proceedings of the First International Conference, ICR 2016, Budapest, Hungary, August 24-26, 2016.* – 2016. – P. 9812.
44. KALIAEV I., KAPUSTJAN S., IVANOV D. *Decentralized Control Strategy within a Large Group of Objects Based on Swarm Intelligence // 5th Int. Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2011.* – P. 299–303.

45. KALYAEV I. et al. *A novel method for distribution of goals among UAVs for oil field monitoring* // IEEE 6th Int. Conference on Informatics, Electronics and Vision & 7th Int. Symposium in Computational Medical and Health Technology (ICIEV-ISCMT), 1-3 September 2017, Himeji, Japan. – 2017. – P. 1–4.
46. KARPOV V., KARPOVA I. *Leader election algorithms for static swarms* // Biologically Inspired Cognitive Architectures. – 2015. – No. 12. – P. 54–64.
47. KUHN H.W. *The Hungarian method for the assignment problem* // Naval research logistics quarterly. – 1955. – No. 2. – P. 83–97.
48. KUHN H.W. *The Hungarian method for the assignment problem* // 50 Years of Integer Programming 1958-2008. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 29–47.
49. MERINO L. et al. *A cooperative perception system for multiple UAVs: Application to automatic detection of forest fires* // Journal of Field Robotics. – 2006. – No. 3–4(23). – P. 165–184.
50. ONDRÁČEK J. *Intelligent Algorithms for Monitoring of the Environment Around Oil Pipe Systems Using Unmanned Aerial Systems*. – Bachelor's thesis. Czech Technical University in Prague, 2014.
51. SUJIT P.B., KINGSTON D., BEARD R. *Cooperative forest fire monitoring using multiple UAVs* // 46th IEEE Conference on Decision and Control, 10-11 Desember 2007, New Orleans, Louisiana USA. – 2007. – P. 4875–4880.
52. *Intel Lights Up the Night with 500 «Shooting Star» Drones*. – URL: <http://www.intel.com/content/www/us/en/technology-innovation/videos/drone-shooting-star-video.html> (дата обращения: 01.12.2018).

DISTRIBUTION OF ROLES IN COALITIONS OF ROBOTS WITH LIMITED COMMUNICATIONS BASED ON THE SWARM INTERACTION

Donat Ivanov, Southern Federal University Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems, Taganrog, Cand.Sc., (donat.ivanov@gmail.com).

Abstract: The paper deals with the task of assigning roles to coalition robots with limited communications. The relevance of the use of robots coalitions, as well as the urgency of solving the role distribution problem in the coalitions of robots using the "one operator - one group of robots" scheme is shown. A formal formulation of the task of role distribution in the coalition of mobile robots is given. An analysis of existing approaches to the distribution of roles in groups of robots is given, such as solving the assignment problem by the Kuhn-Mankres algorithm, using the game theory apparatus, applying the methods of probability theory, the ant algorithm, and the method of propagating the control wave using a local conversion mechanism. An iterative approach to the distribution of roles in a group of robots, based on a decentralized management strategy and the principles of swarm interaction, is proposed. A method for the distribution of roles in coalitions of mobile robots and an algorithm for the actions of a single-party coalition robots implementing roles based on the proposed approach are described. The results of the study of the proposed approach, carried out with the help of computer simulation in coalitions of 100 robots in the distribution of three roles, are presented. The diagrams of roles distribution during iterations are given. The averaged results of computer modeling of the distribution of roles for different values of the radius of visibility of neighbors in the coalition are shown. The estimation of the error of the distribution of roles using the proposed algorithmically implemented method is made and a comparison with known approaches is carried out. The areas of possible practical application of the developed approach are shown.

Keywords: distribution of roles, coalition of robots, swarm interaction, limited communications.

УДК 007.52 + 621.865.8

ББК 32.816

DOI: 10.25728/ubs.2019.78.2

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.Г. Лебедевым.

Поступила в редакцию 03.08.2018.

Опубликована 31.03.2019.