



УДК 621.398

© 2015 г. **И.А. Щербатов**, канд. техн. наук,
И.О. Проталинский, канд. техн. наук,
О.М. Проталинский, д-р техн. наук
(Астраханский государственный технический университет)

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ РОБОТОВ: КОМПОНЕНТНЫЙ ПОДХОД

Предложен метод и алгоритмическое обеспечение управления группами мобильных роботов на основе компонентного подхода. Практическая реализация предложенного метода обеспечивает повышение эффективности распределения локальных целей внутри группы роботов.

Ключевые слова: мобильный робот, группа роботов, компонента, компонентный подход, локальная цель, стратегия управления.

Введение

Наличие специальных признаков позволяет выделить новый подкласс сложных слабоформализуемых систем – *сложная слабоформализуемая многокомпонентная система* (МС) [1]. В контексте рассматриваемых сложных систем ключевым является понятие *компоненты* – множество элементов ССТС, образующих единую элементарную структуру для достижения некоторой локальной цели в процессе ее функционирования [2]. Компоненты разделяются на активные и пассивные в смысле наличия признаков рационального (интеллектуального) поведения [1]. Для выделенного подкласса сложных систем актуальной является задача разработки методологических основ управления группами компонент. Условно взаимодействие внутри компонентной структуры (организационной структуры, образованной компонентами) может быть разбито на три пары взаимодействующих компонент: «активная компонента – активная компонента», «активная компонента – пассивная компонента», «человек – активная компонента».

Вопросам группового управления элементами и подсистемами внутри сложных систем посвящено значительное число работ. Ограничим область анализируемых работ робототехническими системами, так как в контексте рассматриваемой задачи признаками интеллектуального поведения будут обладать робототехнические системы [3]. Основные принципы группового управления роботами подробно рассмотрены в работе [4].

Актуальными являются задачи группового управления роботами-манипуляторами, обеспечивающими координацию производственных траекторий

движения манипуляторов в режиме реального времени [5, 6]. Большое число задач данного класса решается в процесс управления гибкими автоматизированными системами (производствами) [7].

С развитием вычислительных возможностей управляющих устройств и систем, уменьшением их размеров, а также с появлением методов интеллектуального управления группой роботов происходит децентрализация и специфицирование функций роботов внутри коллективов [8]. Исследования в области коллективного поведения роботов и группового управления ими могут быть разбиты на несколько областей [9].

К задачам группового управления, с применением классических «строгих» методов решения, можно отнести работы на основе сетевых моделей [10, 11], а также оптимизационные методы [5]. Мультиагентные системы применяются для решения различных задач: планирования движения [12], обеспечения взаимодействия [13], прогнозирования [14] и пр. Вопросам имитационного моделирования, в том числе с применением методов роевого интеллекта, основанного на изучении и описании коллективного поведения децентрализованных самоорганизующихся систем, посвящены работы [9, 15-18]. В данных статьях рассматриваются вопросы применения роевых алгоритмов (пчелиных, муравьиных и пр.) для группового управления роботами. Эволюционные методы применяются в основном в качестве вспомогательных поисковых алгоритмов для решения типовых задач [19].

Для МС задача группового управления активными компонентами (роботами) – распределение локальных целей для каждой из компонент МС, обеспечивающих достижение единой глобальной цели [20].

Логико-лингвистическая модель цели МС:

$$I = \langle N_I, VeF, Cr_I, (\bar{r}; \bar{w}), (\underline{r}; \underline{w}) \rangle, \quad (1)$$

где N_I – конечное множество имен целей на множестве целей; VeF – естественно-языковое представление цели в вербальной форме лицом принимающим решение (ЛПР); Cr_I – конечное множество целевых критериев (в том числе частных), функций и функционалов, характеризующих достижение цели; \bar{r} , \underline{r} – цели высшего и низшего уровня иерархии целей; \bar{w} , \underline{w} – мощность (вес связи целей в графе целей) отношений подчинения (дуги в графе целей).

Замечание 1. В общем случае цели бывают: достижимые, недостижимые и слабо определенные. В данной работе сделаем допущение, что все цели являются достижимыми.

Постановка задачи группового управления компонентами

Формализованная постановка задачи группового управления, с учетом приведенного выше определения и представления цели МС в форме (1), формулируется следующим образом.

Пусть существует некоторая группа роботов $R_j, j = \overline{1, n}$, состоящая из n роботов, функционирующих в среде Q , и множество локальных целей $I_k, k = \overline{1, m}$,

объединяющее m целей (в общем случае $m \geq n$). Тогда набор достижимых локальных целей $\{I\}^* \subset \{I\}$, позволяющей группе достигать единую глобальную цель G будем называть *стратегией достижения G* . Каждая локальная цель имеет вес $w_k, k = \overline{1, m}$, характеризующий условную стоимость ее достижения роботом группы. Достижение локальной цели I_k роботом R_j предполагает выполнение последовательности операций $Z_{kj} = \{z_{1,kj}, z_{2,kj}, \dots, z_{v,kj}\}$, где v – общее число операций типа «движение вперед», «поворот», «разворот» и пр. Каждая из операций робота требует затрат основного ресурса – заряда аккумуляторной батареи $e_{v,kj}$. Таким образом, энергозатраты на достижение I_k роботом R_j можно выразить как $E_{kj} = \sum_v (z_{v,kj} \cdot e_{v,kj})$. Этот аспект накладывает ограничение вида:

$$E_{kj} + \hat{E}_j < \tilde{E}_j, \quad (2)$$

где \hat{E}_j – заряд батареи, требуемый для возврата к месту зарядки; \tilde{E}_j – общий заряд батареи, т.е. робот R_j не достигает локальной цели I_k , если заряда батареи недостаточно. Тогда $w_{kj} = (\tilde{E}_j - E_{kj}) \cdot P$, где P – стоимость единицы энергозатрат.

В качестве единой глобальной цели может выступать, например, обход всех заданных точек внутри некоторого ограниченного пространства группой роботов таким образом, чтобы энергозатраты группы были минимальными (критерий достижения цели). А таком случае суммарная стоимость стратегии $\{I\}^*$ достижения G будет определяться зависимостью:

$$W_{I^*} = \sum_l \sum_j w_{lj}. \quad (3)$$

Тогда для группы роботов $\{R\}$ необходимо выбрать такую стратегию $\{I\}^*$ достижения G , что $W_{I^*} \rightarrow \max$, т.е. $\{I\}^* \subset \{I\}: W_{I^*} \rightarrow \max$, при условии, что каждый робот R_j осуществляет достижение локальной цели с максимальным значением w_{kj} . С учетом этого задача группового управления роботами в общем виде описывается следующим образом:

$$\{I\}^* \subset \{I\}: W_{I^*} \rightarrow \max \Big| w_{kj} \xrightarrow{R_j, F} \max. \quad (4)$$

Важным ограничением является время достижения G . Таким образом, распределение локальных целей внутри группы совместно с процессом их достижения не должно превышать некоторого установленного значения $\Delta\tau$, называемого *тактом управления* (время, в течение которого состояние условной системы «группа роботов – внешняя среда» не изменится):

$$T_{I^*} \leq \Delta\tau \leq T_{\max}, \quad (5)$$

где T_{\max} – максимальное время функционирования МС.

В соответствии с компонентным подходом [2] группа роботов $\{R\}_h$ может рассматриваться как активная компонента K_h . Таким образом, МС – это объеди-

нение активных компонент $S = [K_1 \cup \dots \cup K_h] = [\{R\}_1 \cup \dots \cup \{R\}_h]$. Достижение глобальной цели МС \mathfrak{S} обеспечивается достижением целей G_h каждой из компонент (обозначим достигнутые цели $\check{\mathfrak{S}}$ и \check{G}_h , таким образом $\mathfrak{S} = \check{\mathfrak{S}} | G_h = \check{G}_h, h = \text{var}$). Тогда для компонентного уровня сложной слабо формализуемой системы задача группового управления активными компонентами будет формализована в общем виде следующим образом:

$$\begin{cases} \mathfrak{S} = \check{\mathfrak{S}} | G_h = \check{G}_h, h = \text{var} \\ \exists G_h : \exists \{I\}^* \subset \{I\} : W_{I^*} \rightarrow \max | w_{kj} \xrightarrow{R_j, F} \max, w_{kj} = (\check{E}_j - E_{kj}) \cdot P \\ E_{kj} + \hat{E}_j < \check{E}_j, T_{I^*} \leq \Delta\tau \end{cases} \quad (6)$$

В зависимости от условий функционирования группы роботов выделяют три класса задач управления [5]: задачи группового управления в стационарных организованных средах (класс А), задачи группового управления в динамических, недетерминированных ситуациях (класс В) и задачи группового управления в условиях противодействия противника (класс С). Кроме того, можно выделить наиболее сложный класс задач, объединяющий в себе В и С (класс ВС). Данные классы задач будут характеризоваться различным тактом управления на T_{\max} .

При отсутствии препятствий и заранее известной карты местности:

$$(A): \Delta\tau = T_{A, \max}. \quad (7)$$

В случае появления препятствия или противодействия в момент времени T_p возникает промежуток времени Δt_0 , который необходим для объезда или устранения препятствия:

$$(B)(C)(BC): \begin{cases} \Delta\tau_1 = T_p, \\ \Delta\tau_2 = T_{\max} - T_p - \Delta t_0. \end{cases} \quad (8)$$

При этом если препятствие или противодействие возникает повторно, то такт управления пересчитывается, таким образом происходит дальнейшее разбиение временного интервала T_{\max} . Для решения поставленной задачи синтезируем метод управления группой роботов.

Групповое управление роботами: компонентный подход

Описание метода группового управления. В качестве основы метода группового управления роботами на основе компонентного подхода (*GCCA, Group Control based on the Component Approach*) выступает идея о построении компонент с децентрализованным управлением, когда отсутствует выделенный центр управления. Введем понятие *компонентная структура*.

Определение 1. Компонентная структура (КС) – совокупность компонент, образованная под воздействием механизмов формирования структурной организации на основе единства локальной цели [1].

Замечание 2. Понятие КС введено по аналогии с понятием организационная

структура [21]. Компонентная структура типа «компонента – компонента» является простейшей. Особенности взаимодействия простейших компонентных структур могут быть распространены на любое число взаимодействующих компонент.

Постановку глобальной цели МС \mathfrak{Z} осуществляет ЛПР (рис. 1). Достижение \mathfrak{Z} обеспечивается набором локальных целей компонент G_h , которые могут быть представлены набором типовых действий роботов. Компоненты функционируют во внешней среде, характеризуемой вектором состояния $q(t), t \in [0; T_{\max}]$.

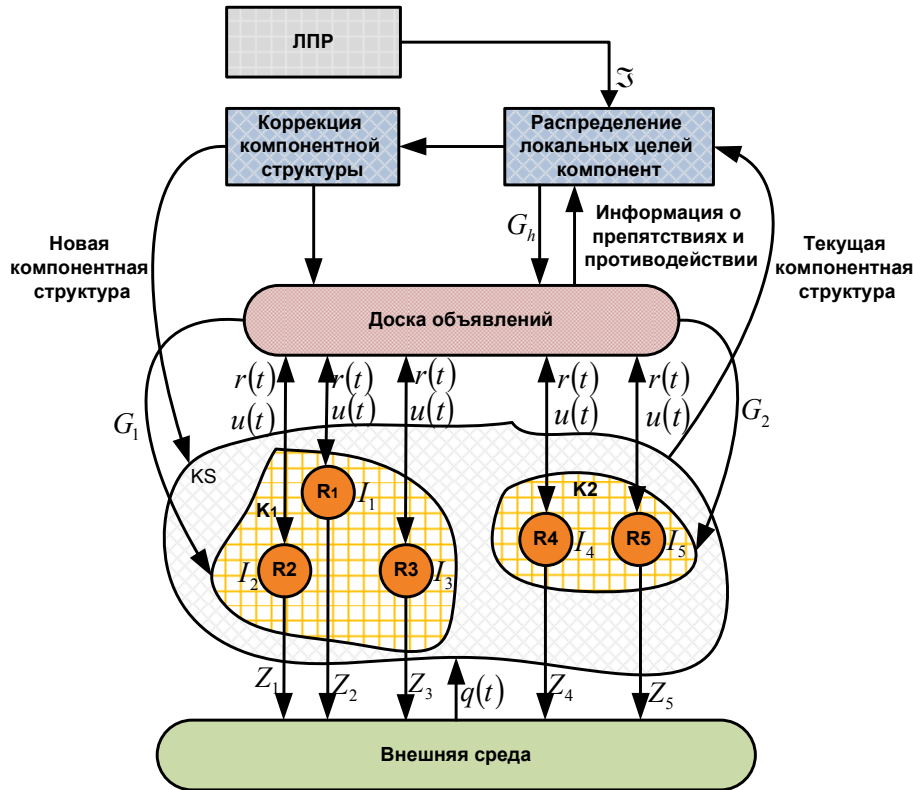


Рис. 1. Структурная схема процесса группового управления.

Обмен данными между роботами происходит с помощью «доски объявлений», представляющей собой единое хранилище, в котором помещается информация об операциях и состоянии каждого робота. Доска объявлений доступна всем роботам и обеспечивает локальные системы управления требуемыми исходными данными. Состояние робота в конкретный момент времени характеризуется вектором $r(t)$, а действия определяются последовательностью $\{z_{1,kj}, z_{2,kj}, \dots, z_{v,kj}\}$. Локальная система управления робота синтезирует управляющее воздействие $u(t)$, обеспечивающее выполнение операций и достижение I_j . Роботы объединены в компоненты K_h , которые имеют цели G_h .

Решение о выполнении действий в следующий момент времени принимаются роботом R_j на основе данных о его текущем состоянии, состоянии внешней среды и действиях, выполняемых другими роботами компоненты [5].

Достижение глобальной цели МС \mathfrak{Z} обеспечивается последовательным выполнением следующих этапов (рис. 2, жирным выделены ключевые этапы ГССА). Глобальную цель системы задает ЛПР, поэтому необходимо обеспечить

ее проверку, так как наличие недостижимой и слабо определенной цели приведет к невозможности реализации метода. При этом существует возможность коррекции глобальной цели МС (алгоритм Y-0) системой управления, установленной, например, на АРМ ЛПР.

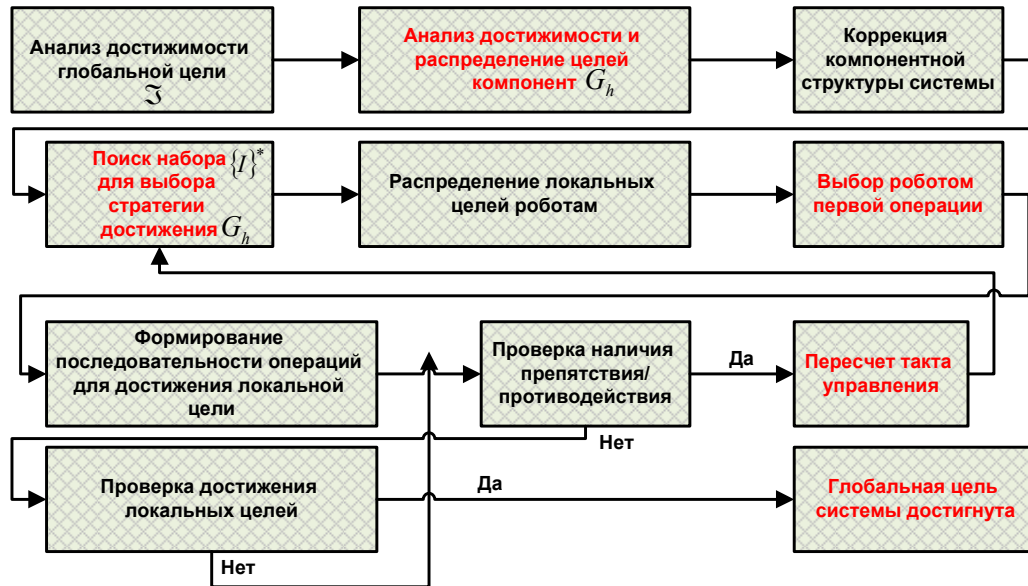


Рис. 2. Этапы метода группового управления.

Замечание 3. Конкретный алгоритм, применяемый на каждом из этапов, обозначим $Y-N$ (где N – номер алгоритма). Выбор способа реализации алгоритма остается за исследователем, который применяет ГССА.

Цели компонент распределяются исходя из двух аспектов:

если на этапе проектирования МС для каждой возможной \mathfrak{Z} найден соответствующий набор достижимых G_h , то для каждой \mathfrak{Z} формируется требуемая КС и компонентам распределяются заранее известные цели G_h (алгоритм Y-1);

если на этапе проектирования МС для каждой возможной глобальной цели \mathfrak{Z} не найден соответствующий набор достижимых G_h или возникает ранее не рассматривавшаяся \mathfrak{Z} , то формирование КС структуры и распределение целей компонентам осуществляются на основе встроенного алгоритма распределения целей компонент (алгоритм Y-2).

Следующий этап реализации метода ГССА заключается в поиске целей роботов $\{I\}^*$, обеспечивающих достижение целей каждой из компонент (алгоритм Y-3). При этом цели множества $\{I\}^*$ могут быть взаимосвязаны [20]. Крайне важным этапом является выбор каждым роботом первой операции, которую необходимо выполнить с учетом возможной взаимосвязи целей $\{I\}^*$ (алгоритм Y-4). После этого формируется последовательность операций, которую должен выполнить каждый робот, входящий в каждую компоненту (алгоритм Y-5).

Проверка наличия препятствия на пути робота (противодействия какому-либо роботу коалиции) необходима для пересчета такта управления, так как условия внешней среды изменились. Данный этап приводит к необходимости перехода к этапу выбора $\{I\}^*$. Появление итеративной составляющей метода ГССА на

данном этапе приводит к необходимости остановки роботов компоненты, для которой идентифицировано препятствие или противодействие.

Последним этапом метода GССА является проверка условия достижения всех локальных целей $\{I\}^*$ роботов, а значит и целей компонент G_h , что приводит к достижению глобальной цели всей системы \mathfrak{Z} .

Характеристика алгоритмов метода. Приведем характеристику ключевых алгоритмов метода GССА, а также возможные способы их реализации. Структура целей МС представляет собой иерархию (рис. 3).

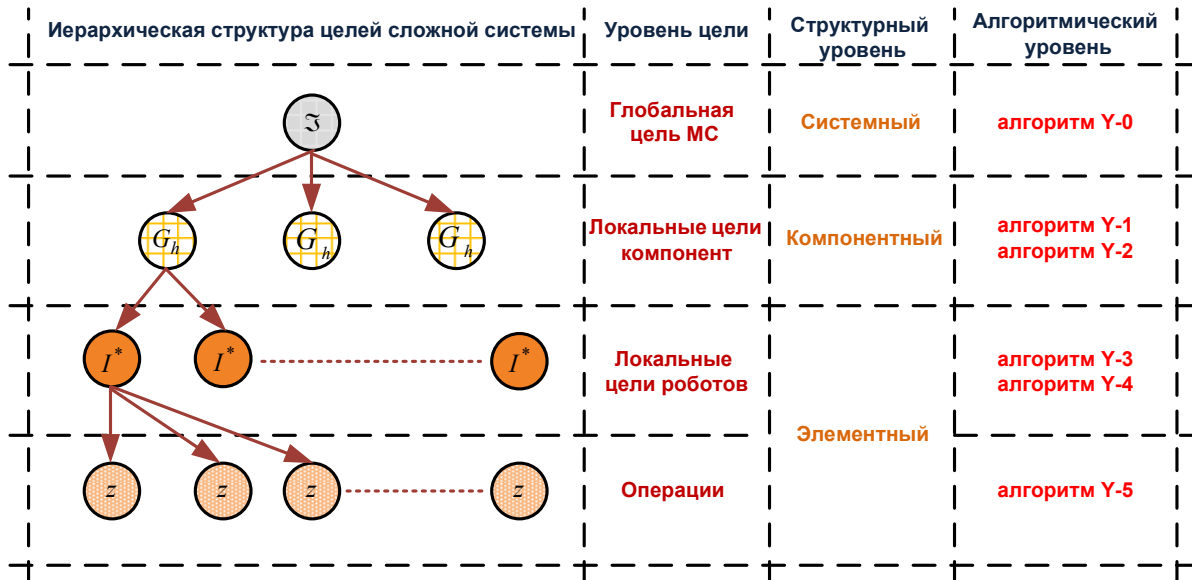


Рис. 3. Структура целей и алгоритмы метода GССА.

Существует четыре уровня целей: уровень глобальной цели, уровень локальных целей компонент, уровень локальных целей роботов и уровень операций (итог выполнения роботом конкретной типовой операции может рассматриваться как достижение цели, в таком контексте отсутствуют противоречия между понятиями "операция" и "цель").

В значительном числе работ для декомпозиции глобальной цели применяются деревья целей [22, 23]. Алгоритм коррекции глобальной цели (алгоритм Y-0) основан на предположении, что данный вид цели корректируется ЛПР или интерпретатором в момент появления факторов коррекции. Набор факторов коррекции $\{XF\}$ глобальной цели образует целевую ситуацию Sit . Поскольку \mathfrak{Z} , как правило, имеет качественное описание, то целевая ситуация может быть описана с применением нечетких множеств второго рода. Сформулируем необходимые и достаточные условия коррекции глобальной цели.

Необходимое условие:

$$\exists P' \in \{P\}: \rho = \|\Gamma' - \Gamma^*\|, \quad (9)$$

где P' – способ (метод) достижения глобальной цели; $\rho = \|\Gamma' - \Gamma^*\|$ – оценка близости до цели – точнее, критерия, который ее характеризует.

Достаточное условие:

$$\forall t > 0; \exists Sit' \in \{Sit\}: \bar{\Delta}' \leq xf' \leq \bar{\Delta} \forall xf' \longrightarrow Sit'. \quad (10)$$

Таким образом, необходимым условием коррекции глобальной цели является принципиальное наличие способа, позволяющего достигать указанной глобальной цели, а достаточным условием – вхождение факторов, характеризующих целевую ситуацию, в требуемые интервалы оценок.

Для алгоритмов Y-1 и Y-2 исходными данными являются два множества – множество локальных целей и множество компонент. Под *прямой задачей распределения локальных целей* будем понимать назначение локальных целей для определенного количества компонент, а под *обратной задачей* – формирование необходимого набора компонент, обеспечивающих достижение фиксированного количества целей.

Количественная мера оценки качества решения задачи (как прямой, так и обратной) может быть представлена в виде $\rho(I_k; I_k^*) \leq \varepsilon$, где ρ – мера близости достижения локальной целью I_k требуемого значения I_k^* , т.е. попадание значения меры близости в интервал величиной 2ε свидетельствует о достижении локальной цели I_k .

В связи с тем, что локальные цели компонент могут быть заданы различными функционалами или нечеткими целевыми функциями, необходимо выделить типы используемых мер близости локальных целей в зависимости от их вида. В том случае, если критерии заданы аналитически вычисляемыми выражениями, применяется мера вычисления «расстояния» между локальными целями [15] $\rho = \|Cr_k^* - Cr_k\|$, где Cr_k – критерий достижения цели I_k требуемого значения Cr_k^* .

При нечетких критериях достижения локальных целей может применяться специальный индекс ранжирования [24]:

$$\rho(I_k; I_k^*) = \text{sign} \text{ extr} \{ \mu_i (cr_i^* - cr_i) / d_i \}, i = \overline{1, k}, \quad (11)$$

где μ_i – значение функции принадлежности; $d_i = \max (cr_i^* - cr_i)$.

Если имеются как четкие, так и нечеткие критерии, применяется комбинация мер в форме. При этом критерии достижения целей должны удовлетворять следующим требованиям: простота, измеримость, репрезентативность и чувствительность. А иерархическая структура целей должна отвечать требованиям структурированности, согласованности, непротиворечивости и полноты.

Реализация алгоритмов Y-3 и Y-4 сводится к формированию некоторого множества стратегий $\{I^*\}$ и выбору из него наиболее эффективной I_b^* . Распределение целей роботов сводится к обеспечению максимального выигрыша группой роботов при достижении максимального выигрыша каждым из роботов.

Введем отношение предпочтения $\{I\}_l^1 \succ \{I\}_l^2$, которое означает, что $\{I\}_l^1$ предпочтительнее $\{I\}_l^2$, если выполняется условие $W(\{I\}_l^1) > W(\{I\}_l^2)$, при этом можно выделить такую стратегию I_b^* , для которой нет более предпочтительных стратегий. В этом случае I_b^* будет являться Паретто-оптимальным множеством

локальных целей. Для нахождения I_i^* каждого робота необходимо построить эстетивное дерево решений. Так как ширина эстетивного дерева ограничена, то возникает задача выбора первой операции. Условием выбора будет $W_j = \max$, а $L_j = \min$ (L_j – «расстояние» до выполняемой операции).

Комплексный критерий W_j , характеризующий эффективность стратегии, является векторным. В [20] обосновано применение метода справедливых компромиссов для поиска Паретто-оптимальной стратегии. *Справедливым* будет такой компромисс, при котором относительный уровень повышения суммарной мощности стратегии для R_j не превосходит относительного уровня понижения суммарной мощности стратегий для других роботов компоненты. Для реализации алгоритма распределения операций к каждому роботу компоненты Y-5 может, например, применяться подход, описанный в [5].

Методический пример

Для проверки работоспособности предложенного подхода использовалась группа, состоящая из трех роботов (рис. 4), отличающихся конструкцией, но обладающих одинаковой архитектурой системы управления.



Рис. 4. Экспериментальные образцы роботов: а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3.

Глобальная цель для системы, состоящей из трех роботов, сформулирована следующим образом: «Обеспечить обход 30 точек рабочего пространства с максимальной эффективностью». Рабочая зона – прямоугольное пространство размером пять на десять метров. Препятствия в рабочей зоне отсутствуют, а значит, задача несколько упрощается, это означает, что система представляет собой компоненту, и тогда глобальная цель системы фактически является целью компоненты (алгоритмы Y-0, Y-1, Y-2). Местоположение роботов, координаты точек обхода в рабочей зоне и ценность достижения каждой точки задаются случайным образом. На основании этих данных производится расчет эффективности и времени обхода каждой точки каждым роботом. На основе полученных данных производится расчет первичного шага, т.е. каждый из роботов выбирает наиболее эффективную локальную цель (алгоритм Y-3). Если i -й и j -й роботы выбирают одну точку обхода, то цель назначается для робота, имеющего наибольшую эффективность ее достижения (рис. 5а).

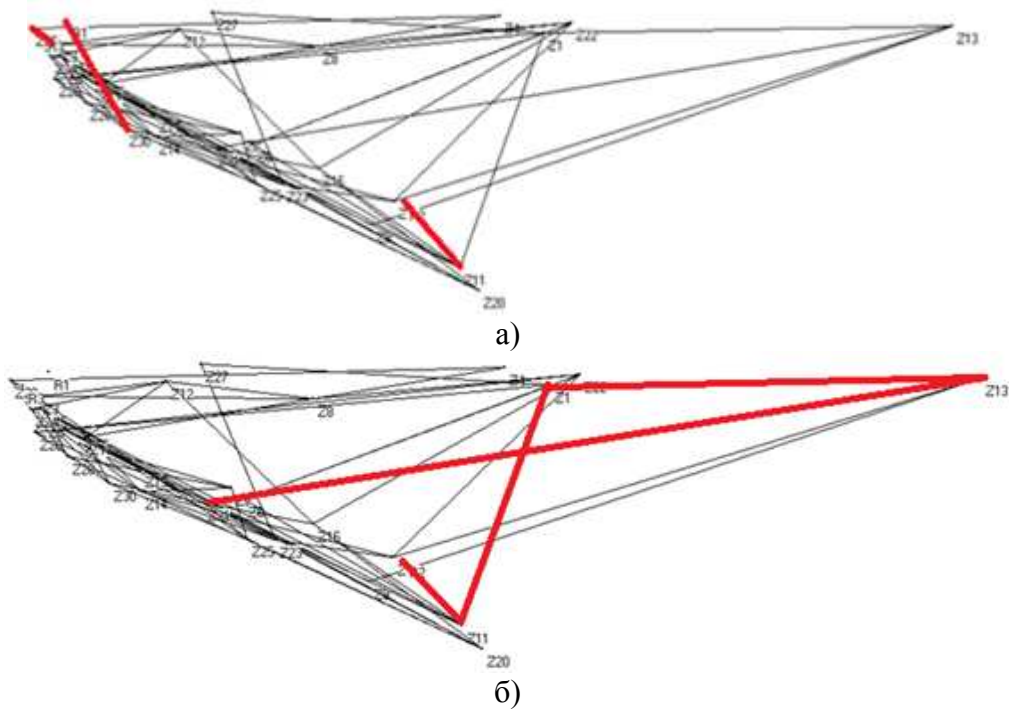


Рис. 5. Построение траектории движения роботов группы:
 а – поиск первой локальной цели для каждого из трех роботов;
 б – наиболее эффективная стратегия для второго робота.

Следующим этапом нахождения Паретто-оптимального множества локальных целей является реализация алгоритма Y-4, т.е. построение I_b^* для каждого робота группы (с использованием эстетивных деревьев) и сравнение множеств по методу справедливых компромиссов. На первой итерации реализации алгоритма поиска Паретто-оптимального множества I_b^* . Полученная стратегия имеет суммарную мощность $W_S = 354$, время изменения состава группы роботов $T = 6$ мин. На первой итерации стратегия для 2-го робота представлена на рис. 5б. Количество итераций для получения I_b^* задано равным 28.

В дальнейшем каждый из роботов приступает к выполнению выбранной стратегии (алгоритм Y-5). В процессе работы оператор имитирует неисправность одного из роботов группы, инициализируя процесс перерасчета стратегий. На основе алгоритма поиска Паретто-оптимального множества стратегий вырабатывается новое управляющее воздействие для оставшихся в группе роботов.

После этого были проведены эксперименты для подтверждения повышения эффективности метода CGGA в сравнении с ручным управлением и алгоритмом ускоренного улучшения плана. В режиме ручного управления операторы не согласовывали свои действия при достижении целей, что приводило к ситуации, когда два робота пытались выполнить одновременно одну задачу. В рамках сравнительного анализа было проведено 10 экспериментов, количество целей варьировало от 5 до 25. Результаты эксперимента приведены на рис. 6.

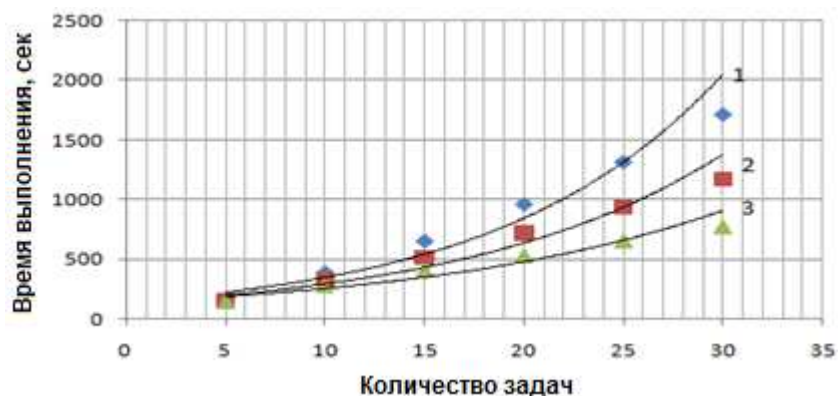


Рис. 6. Достижение глобальной цели: 1 – ручное управление; 2 – ускоренное улучшение плана; 3 – метод CGGA.

Заключение

В работе предложен метод группового управления роботами на основе компонентного подхода, отличающийся применением модифицированного алгоритма поиска Паретто-оптимального множества локальных целей, представляющих собой стратегию достижения целей всей группы. На расчетном примере показана работоспособность предложенного подхода, заключающаяся в уменьшении времени распределения локальных целей роботам группы. В рамках продолжения исследований по тематике работы предполагается модификация предложенного подхода для заранее неизвестных сред с динамическими препятствиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербатов И.А., Проталинский О.М. Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы // Управление большими системами: Сборник трудов. – 2013. – № 45. – С.30-46.
2. Protalinskii O.M., Shcherbatov I.A., Esaulenko V.N. Analysis and Modelling of Complex Engineering Systems Based on the Component Approach // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 24, No. 2. – P.276-283.
3. Shcherbatov I.A. Classification of pure formalized complex multicomponent technical systems under conditions of uncertainty // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – № 2. – С.9-12.
4. Юревич Е.И. О проблеме группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – №2. – С.9-13.
5. Каляев И.А., Капустян С.Г. Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 6. – С.33-40.
6. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами: Учеб. пособие.– СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
7. Козырев Ю.Г. Применением промышленных роботов: Учеб. пособие. – М.: КНОРУС, 2011.
8. Kaliev I., Kapustian C. Multiprocessor distributed control system of intelligent mobile robot //14-th Workshop on Distributed Control Systems. – Seoul, Korea, July 1997.
9. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желанное и действительное // Современная мехатроника. Сб. науч. трудов Всерос. науч. шк. – Орехово-Зуево. – 2011. – С.35-51.
10. Lima P.U., Luis M.M. Custodio Artificial Intelligence and Systems Theory: Applied to Cooperative Robot // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2004. – Vol. 1, No. 3. – P.141-148.

11. *Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р.* Самоорганизующиеся распределенные системы управления группой интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами. – 2010. – № 30. – С.605-639.
12. *Ota J.* Multi-agent robot systems as distributed autonomous systems // Advanced Engineering Informatics. – 2006. – Vol. 20, Iss. 1. – P.59-70.
13. *Balch T., Arkin R.C.* Communication in reactive multiagent robotic systems // Autonomous Robots. – 1994. – Vol. 1, Iss. 1. – P.27-52.
14. *Demiris Y.* Prediction of intent in robotics and multi-agent systems // Cognitive Process. – 2007. – Vol. 8. – P.151-158.
15. *Behera L.K., Sasidharan A.* Ant Colony Optimization for Co-operation in Robotic Swarms // Advances in Applied Science Research. – 2011. – Vol. 2, Iss. 3. – P.476-482.
16. *Lefranc G.* Colony of robots: New Challenge // International Journal of Computers, Communications & Control. – 2008. – Vol. III. – P.92-107.
17. *Reshamwala A., Vinchurkar D.P.* Robot Path Planning using An Ant Colony Optimization Approach: A Survey // International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence. – 2013. – Vol. 2, No.3. – P.65-71.
18. *Sahoo R.R., Rakshit P., Haidar T., Swarnalipi S., Balabantaray B., Mohapatra S.* Navigational Path Planning of Multi-Robot using Honey Bee Mating Optimization Algorithm // International Journal of Computer Applications. – 2011. – Vol. 27, No. 11. – P.1-8.
19. *Ferrauto T., Parisi D., Di Stefano G., Baldassarre G.* Different Genetic Algorithms and the Evolution of Specialization: A Study with Groups of Simulated Neural Robots // Artificial Life. – 2013. – Vol. 19, No. 2. – P. 221-253.
20. *Protalinskii I.O., Shcherbatov I.A., Shishkin N.D.* Optimal Strategy Synthesis for a Group of Mobile Robots with Variable Structure // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 24, No. 2 – P.268-275.
21. *Губко М.В., Коргин Н.А., Новиков Д.А.* Классификация моделей анализа и синтеза организационных структур // Управление большими системами. – 2004. – № 6. – С.5-21.
22. *Huget M.P.* Representing Goals in Multiagent Systems // In Proceedings of the 4th International Symposium on Agent Theory to Agent Implementation. Austrian Society for Cybernetic Studies. – 2004. – P.588-593.
23. *DeLoach S.A, Miller M.* A Goal Model for Adaptive Complex Systems // International Journal of Computational Intelligence: Theory and Practice. – 2010. – Vol. 5, №. 2.
24. *Федосеев С.А., Вожаков А.В., Гитман М.Б.* Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечетко исходной информации // Проблемы управления. – 2009. – № 5. – С. 36-43.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.С. Амосовым.

E-mail:

Щербатов Иван Анатольевич – sherbatov2004@mail.ru;

Проталинский Игорь Олегович – protalinskiy_igor@mail.ru;

Проталинский Олег Мирославович – protalinskiy@gmail.com.