

УДК 681.58:621.865.8

И.О. Шаповалов

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ***

Рассматривается использование группы транспортных роботов для согласованного перемещения объектов. Ставится задача перемещения группы объектов по плоскости с заданной скоростью по заданной траектории. Предлагается реализация взаимодействия роботов группы с помощью квазисиловых полей. Приводятся основные аналитические соотношения для предложенной методики построения распределенной системы. На основе введенных ограничений на тяговые усилия мобильных роботов строится алгоритм управления перемещением отдельных объектов. Приводится динамическая модель перемещаемых объектов. Работоспособность предложенной распределенной системы управления перемещением подтверждается результатами численного моделирования.

Группа роботов; распределенная система; управление движением; квазисиловые поля.

I.O. Shapovalov

**DISTRIBUTED MOTION CONTROL SYSTEM FOR GROUP OF LARGE-SIZE
OBJECTS**

The using of transport robot group for coordinated object moving is discussed in this paper. The task of object moving along given path with given velocity is stated. Implementation of group robot collaboration using quasi-force fields is proposed. The basic analytical expressions for the proposed distributed system design method are given. Based on the restrictions imposed on the tractive effort of mobile robots motion control algorithm for individual objects is designed. The dynamic model of moving objects is presented. The efficiency of the proposed distributed motion control system is confirmed by the simulation results.

Robot group; distributed system; motion control; quasi-force fields.

Введение. Проблема согласованного перемещения крупногабаритных объектов, не помещающихся на перемещающую платформу, на расстояния, превышающие несколько метров, имеет большую актуальность. Такой тип перемещения называется буксировкой. Решение этой проблемы усложняется, если его необходимо осуществлять в замкнутом пространстве в экстремальной среде, в которой невозможно присутствие оператора. Поскольку перемещение нескольких объектов производится одновременно, необходимо использовать группу перемещающих устройств. Применение автономных мобильных транспортных роботов в качестве таких устройств имеет значительные перспективы. Несмотря на значительные преимущества, присущие группам роботов, что в достаточной степени обосновано в [1], существуют и значительные сложности, связанные с необходимостью разработки для них специальных систем группового управления. Анализ свойств различных типов систем группового управления роботами показывает, что наиболее перспективными являются распределенные системы группового управления. Довольно полный обзор существующих систем группового управления роботами сделан в [1]. Применение групп роботов в задачах буксировки описано, например, в [2].

Постановка задачи. Поскольку управление движением является нетривиальной задачей, ее решение следует начинать с более простого случая, т.е. с управления движением на плоскости, а не в пространстве.

* Работа поддержана грантом РФФИ, проект №12-08-90050-Бел_а.

Пусть в начальный момент времени в некоторой области на плоскости произвольным образом ориентированы N одинаковых прямоугольных объектов неизменной массы m . Объекты неподвижны. К каждому объекту $O_i, i = \overline{1, N}$ присоединены два автономных мобильных робота. Процесс присоединения роботов к объекту в данной статье не рассматривается. Требуется, чтобы роботы переместили объекты к цели, избегая столкновений между объектами, по заданной траектории с заданной скоростью.

Очевидно, что если группа транспортных роботов будет передвигать объекты не последовательно, а одновременно, то возникнут проблемы синхронизации перемещений. В связи с этим задача управления движением группы крупногабаритных объектов разбивается на 2 подзадачи: перемещения отдельных объектов и согласования этих перемещений.

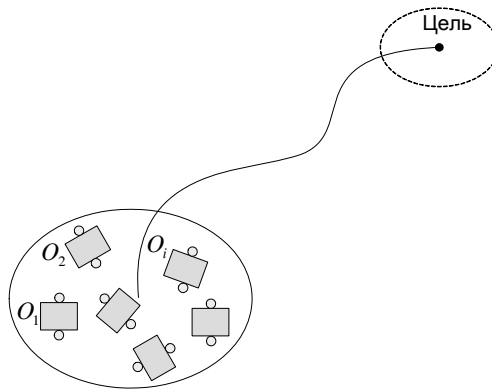


Рис. 1. Начальное положение объектов на плоскости

Решение задачи. Для решения задачи управления одновременным перемещением объектов необходимо осуществлять постоянное управление их координатами, ориентацией и скоростью при всех существующих ограничениях. В этой связи возникает задача синтеза алгоритма управления перемещением отдельного объекта.

При разработке данного алгоритма управления предполагается, что к боковым сторонам объекта симметрично относительно центра присоединены, как показано на рис. 2, два автономных мобильных транспортных робота, сила тяги которых может принимать только два значения и иметь только четыре направления.

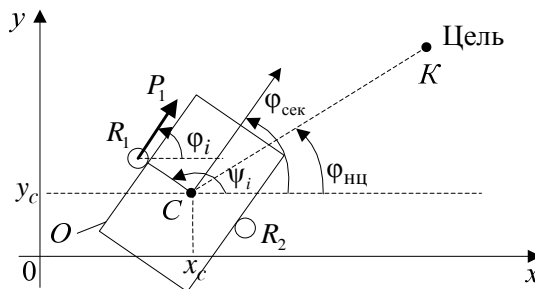


Рис. 2. Система "объект – роботы" на плоскости

Другими словами, каждый робот $R_i, i = \overline{1,2}$ формирует силу тяги $P_i = 0$ или $P_i = P_{\max}$, которая может принимать возможные направления $\varphi_i = \psi_i \pm \mu \frac{\pi}{2}, \mu = 0, 1, 2$.

Такая модель упрощенно описывает, например, речной буксир с поперечными водометными движителями и подробно рассмотрена в [3].

Требуется переместить тело из начального положения к цели по заданной траектории с заданной величиной и направлением скорости $V_{\text{зад}}$. Причем роботы формируют управления на всем протяжении процесса перемещения в зависимости от текущих условий, т.е. для каждого объекта реализуется собственная локальная система управления, реализуемая в вычислительных устройствах роботов. Принимается, что управляющие системы роботов синхронизированы или, другими словами, в принимаемых ими решениях о формируемой силе тяги не возникает противоречий.

В работе предлагается следующий алгоритм управления движением объектов: сначала роботы поворачивают объект таким образом, чтобы роботы были симметрично расположены относительно заданного направления движения, затем производится перемещение вдоль этого направления с поддержанием заданной скорости. Роботы создают момент вращения при выполнении одного из условий:

$$|\varphi_{\text{сек}} - \varphi_{\text{нц}}| > \varepsilon, |\dot{\varphi}_{\text{сек}}| > \delta, \quad (1)$$

где $\dot{\varphi}_{\text{сек}}$ – угловая скорость объекта, ε, δ – произвольно выбранные малые величины.

При выполнении первого условия момент создается для необходимого поворота объекта, при выполнении второго – для прекращения вращения по достижении заданной ориентации объекта. Вращающий момент формируется только обоими роботами одновременно.

Выбор направления вращения объекта зависит от фиксированного значения разницы $\Delta\varphi_{\max} = |\varphi_{\text{сек}} - \varphi_{\text{нц}}|$ между направлением объекта и заданным направлением движения. Значение $\Delta\varphi_{\max}$ изменяется в моменты задания нового направления движения, при прекращении вращения тела и невыполнении первого условия (1) или при невыполнении обоих условий (1). Направление момента вращения M выбирается следующим образом:

$$\begin{cases} M = -2 \cdot P \cdot l \cdot \text{sign}(\varphi_{\text{сек}} - \varphi_{\text{нц}}), & |\varphi_{\text{сек}} - \varphi_{\text{нц}}| \geq \Delta\varphi_{\max} \vee |\dot{\varphi}_{\text{сек}}| \leq \delta, \\ M = -2 \cdot P \cdot l \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}_V), & \end{cases} \quad (2)$$

где P – величина силы тяги робота, l – величина плеча силы, sign – знаковая функция.

После придания телу необходимой ориентации два робота совместно перемещают тело вдоль заданного направления по алгоритму, изложенному в [4].

Величина модуля скорости перемещаемого объекта и ее направление выбираются исходя из необходимости избегать столкновений между объектами и при этом поддерживать некоторую близость между движущимися объектами.

Интересный способ организации перемещения группы роботов с использованием подходов на основе квазисиловых полей предложен в [5]. В данной работе описана распределенная система управления группой мобильных роботов, которая позволяет осуществлять перемещение группы роботов по заданной траектории без столкновений. В статье [5] не учитывается динамика движения роботов, на их тяговые усилия не накладываются никакие ограничения, а кроме того, роботы движутся без нагрузки.

При управлении перемещением группы роботов на основе квазисиловых полей все роботы обмениваются друг с другом информацией о своей скорости и положении. Необходимое управление выбирается каждым роботом самостоятельно в 3 этапа: определение характера влияния других роботов, определение вклада других роботов в управление, вычисление управления. Формируемое i -м роботом управление представляет собой взвешенную сумму вкладов остальных роботов и вычисляется по формулам:

$$u_i = v_i \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) \end{bmatrix}, v_i = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} v_{ij} / \sum_{j=1}^N \beta_{ij}, \quad (3)$$

$$\theta_i = \arctan\left(\sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sin(\theta_{ij}) / \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \cos(\theta_{ij})\right), \quad (4)$$

где v_i и θ_i – необходимые модуль и направление скорости i -го робота; v_{ij} и θ_{ij} – модуль и направление скорости робота i , необходимой для поддержания желаемого расстояния до j -го робота; β_{ij} – весовой коэффициент, характеризующий влияние j -го робота на скорость i -го робота.

Влияние j -го робота на управление i -го робота представляет собой скорость $[v_{ij}, \theta_{ij}]$, которую должен сформировать i -й робот, чтобы сохранить нужное расстояние до j -го робота. Вычисляется эта скорость на основе небольшого набора правил поведения i -го робота при различных ситуациях, приведенного в табл. 1, по соотношениям:

$$v_{ij} = \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} v_{ij,b} / \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b}, \theta_{ij} = \arctan\left(\sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} \sin(\theta_{ij,b}) / \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} \cos(\theta_{ij,b})\right) \quad (5)$$

Таблица 1

Желаемое действие (b)	Объект $j \dots$ объекта i	Вектор скорости объекта i	
		Модуль	Направление
Притяжение	Впереди позади	Самый малый самый большой	Отворачивает
Имитация	Не важно	Заданный	Заданное
Отталкивание	Впереди позади	Самый большой самый малый	Подворачивает

Вес влияния j -го робота на управление i -го робота характеризует важность данного робота по сравнению с другими роботами и отражается в коэффициентах $\alpha_{ij,b}$. Вклады ближайших роботов имеют больший вес, чем вклады более отдаленных.

Моделирование перемещения. Работоспособность предложенной распределенной системы управления движением группы крупногабаритных объектов проверена путем численного моделирования в среде MatLab. Динамика перемещения каждого тела описывается полученными с помощью [6] соотношениями:

$$m\ddot{x} = P \cos \varphi - F_{\text{ТР}}(\dot{x}), \quad (6)$$

$$m\ddot{y} = P \sin \varphi - F_{\text{ТР}}(\dot{y});$$

$$J\ddot{\psi} = M - M_{\text{ТР}}(\dot{\psi}). \quad (7)$$

где m – масса тела, x и y – координаты центра тяжести тела, P – суммарная сила тяги, действующая на тело, $F_{\text{тр}}(\dot{x})$ и $F_{\text{тр}}(\dot{y})$ – проекции силы трения на оси координат, φ – угол направления суммарной силы тяги, J – момент инерции, $M_{\text{тр}}(\dot{\psi})$ – момент силы трения.

На рис. 3 показаны фазовые траектории движения трех объектов по синусоидальным траекториям. На рис. 4 показаны графики изменения скоростей перемещаемых объектов при $V_{\text{зад}} = 2$ м/с.

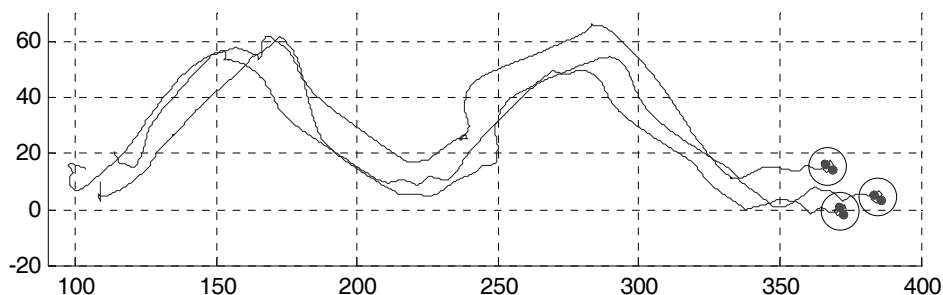


Рис. 3. Моделирование перемещения трех объектов

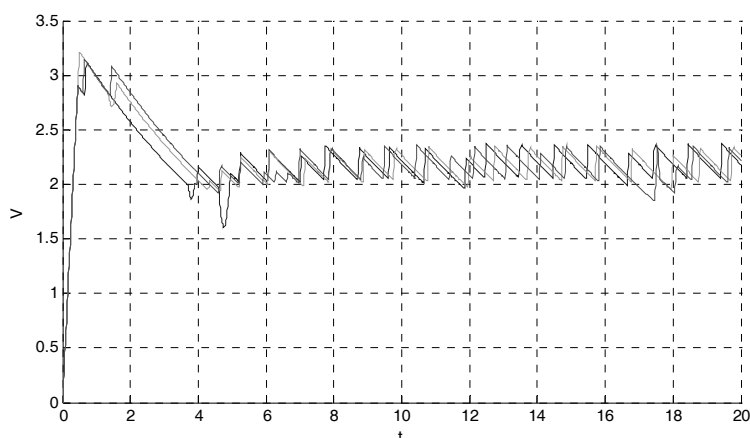


Рис. 4. Скорости движения объектов

Заключение. В статье рассмотрена задача управления процессом одновременного перемещения группы крупногабаритных объектов. Для решения данной задачи применена распределенная система группового управления мобильными роботами. Предложена организация взаимодействия между роботами группы на основе квазисиловых полей. Описан алгоритм управления перемещением отдельного объекта и осуществлено численное моделирование на основе разработанной динамической модели.

Моделирование показало, что накладываемые на тяговые усилия роботов ограничения и инерционные свойства перемещаемых объектов ухудшают качество процесса управления по сравнению с приведенным в статье [5]. Графики изменения скоростей объектов показали, что разработанная система управления позволяет получить заданное значение скорости движения с некоторой погрешностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009.
2. *Rus D., Donald B., Jennings J.* Moving Furniture with Teams of Autonomous Robots // Proceedings of The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots'. – 1995. – P. 235-242.
3. *Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шаповалов И.О.* Оптимальное перемещение тела интеллектуальным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 7. – С. 43-46.
4. *Капустян, С.Г., Шаповалов И.О.* Структура и алгоритмы действий коллектива роботов при перемещении тела // Экстремальная робототехника: Труды XXI Международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во "Политехника-сервис", 2010. – С. 375-381.
5. *Rochefort Y., Piet-Lahanier H., Bertrand S., Beauvois D., Dumur D.* Guidance of flocks of vehicles using virtual signposts // Preprints of the 18th IFAC world congress. – 2011. – P. 5999-6004.
6. Краткий физико-технический справочник. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Шаповалов Игорь Олегович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: shapovalovio@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89508473455; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Shapovalov Igor Olegovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: shapovalovio@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508473455; the department of automatic control systems; assistant.

УДК.512.53(043)

Е.С. Арапина-Арапова

**ЧАСТИЧНЫЕ ГРУППОИДЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ИНФОРМАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ**

Основным объектом исследования в работе является класс категорийных полугрупп, допускающих разложения в объединение полугрупп Брандта с общим нулем. Например, нулевое расширение фундаментального группоида любого неориентированного графа относится к полугруппам изучаемого класса. Симметрию кристаллов, при помощи группоидов Брандта, описывают Вехлер и Фиктнер. Полугруппа Брандта является наиболее естественным аналогом понятия группы. Основным методом исследования состоит в использовании операции над классами частичных группоидов, которая близка умножению классов полных группоидов, впервые рассмотренному А.И. Мальцевым. В этих терминах можно рассматривать и градуированные алгебры. Получены новые результаты, которые обобщают некоторые известные факты теории полугрупп.

Частичные группоиды; полугруппы Брандта; неориентированные графы; симметрия кристаллов.

E.S. Arapina-Arapova

APPLICATION OF PARTIAL GRUPPOIDS TO INFORMATION SYSTEMS

The main object of research in work, is the class of the category semigroups allowing decomposition in association of semigroups of Brandt with the general zero. For example, zero expansion fundamental groupoid any nondirectional count belongs to semigroups of a studied class. Symmetry of crystals, with the help groupoids Brandt, describe Vekhler and Fikhtner.