

Gaiduk Anatoly Romanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; 26, app. 2, Slesarnaya street, Taganrog, 347904, Russia; phone: +78634626287; the department of automatic control systems; professor.

Besklubova Ksenia Valeryevna – e-mail: besklubova@rambler.ru; 8/1, app. 33, Yablochkina street, Taganrog, 347904, Russia; phone: +78634387349; the department of automatic control systems; assistant.

Melnichenko Alexandra Sergeevna – e-mail: melnichenkolexx@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634387349; the department of automatic control systems; student.

УДК 681.58:621.865.8

И.О. Шаповалов, Е.Ю. Косенко

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ КВАЗИЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ УРАВНЕНИЙ*

В настоящее время во многих странах активно разрабатываются системы группового управления автономными мобильными роботами. Связано это с осознанием преимуществ, присущих этим системам. Управление группой роботов, перемещающей по плоскости крупногабаритные объекты, является сложной задачей, решаемой с помощью распределенной системы группового управления роботами. Разработана и приведена используемая при управлении квазилинейная динамическая модель подвижного объекта. Синтезированы законы управления движением группы объектов на основе функции Ляпунова, виртуальных агентов и концепции "ведущий–ведомые" с учетом ограничений, накладываемых на движение объектов и тяговые усилия роботов. Функция Ляпунова представляет собой комбинацию квазиполей притяжения и отталкивания. Предложенная схема распределенного управления позволяет группе роботов перемещать группу объектов по заданной траектории, сохраняя строй. При этом объекты не сталкиваются друг с другом. Сходимость процессов управления в синтезированной распределенной системе доказана аналитически. Кроме того, работоспособность предложенной системы группового управления роботами подтверждается результатами моделирования.

Группа объектов; распределенная система; управление движением; квазиполя; функция Ляпунова; квазилинейная форма.

I.O. Shapovalov, E.Yu. Kosenko

DISTRIBUTED MOTION CONTROL SYSTEM FOR GROUP OF LARGE-SIZE OBJECTS

Currently, many countries actively develop autonomous mobile group robot control systems. This is due to the realization of such system advantages. Group robot control to move large objects through the plane is a challenging problem solved with the help of the distributed group robot control system. Used by the control system, the quasi-linear dynamic model of the mobile object was developed and presented here. The object group motion control laws were developed on the basis of the Lyapunov function, virtual agents and the "leader–follower" conception with respect to the restrictions imposed on the object motions and the driving forces of robots. Lyapunov function is a combination the quasi attraction and repulsion fields. The proposed distributed con-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00249-а.

trol scheme allows flock motion a robot group with a group of objects along a given trajectory. Wherein the objects don't collide with each other. Convergence of control processes in the synthesized distributed system proved analytically. In addition, the performance of the proposed group robot control system confirmed by the simulation results.

Object group; distributed system; motion control; quasi fields; Lyapunov function; quasi-linear form.

Введение. Роботы в настоящее время находят применение практически во всех сферах жизни. При этом используются самые различные виды роботов, начиная от простейших бытовых роботов и заканчивая сложными промышленными комплексами. Примечательно, что все меньше используются одиночные роботы. Для разработчиков и исследователей становится все более очевидным, что группы взаимосвязанных роботов имеют значительные преимущества перед одиночными. Разработка специальных систем управления для групп роботов является предметом исследований множества исследовательских коллективов, использующих самые разные подходы [1, 2]. Однако общая методика для синтеза систем группового управления роботами (СГУР) еще не разработана [3].

Связано это с тем, что к таким системам предъявляются особые требования. СГУР должны обеспечивать решение поставленных задач при изменении структуры и состава системы, при неизвестных условиях окружающей среды и даже при противодействии.

По своим характеристикам группы роботов относятся к классу сложных нелинейных динамических систем и для управления ими применяются методы из области теории больших систем, например многоагентные системы [4] или экономические модели [5]. Применение многоагентного подхода дает удобный инструментарий для моделирования взаимодействия роботов группы. Однако часто разработка правил и протоколов взаимодействия агентов требует творческого подхода и нестандартных решений, это значительно затрудняет процесс разработки. Разработка СГУР на основе экономических моделей характеризуется схожими трудностями.

Любая разрабатываемая СГУР по умолчанию должна решать широкий спектр задач: начиная от управления движителями отдельных роботов и заканчивая распределением целей между роботами группы. Поэтому наиболее предпочтительной представляется иерархическая структура управления, состоящая из стратегического, тактического и оперативного уровней управления. В данной статье описываются законы управления, применяемые на тактическом уровне СГУР, решающие задачи перемещения по заданной траектории, обхода препятствий и движения в строю.

С точки зрения распределения управляющих функций между роботами группы принято выделять централизованные и распределенные СГУР. Несмотря на некоторые сложности реализации, распределенные системы, по сравнению с централизованными, придают системе большую гибкость, надежность и обеспечивают максимальную вероятность решения поставленной задачи в условиях агрессивной среды функционирования. В [3] наиболее перспективным представляется подход на основе децентрализованного коллективного управления, когда каждый робот самостоятельно решает, какие действия ему предпринимать для достижения общегрупповой цели на основе информации, поступающей от окружающей среды и остальных роботов. Однако следует отметить, что значительное влияние на качество распределенного коллективного управления оказывают коммуникационные ограничения [6].

Одной из задач, при решении которой могут быть реализованы преимущества, присущие группам роботов, является транспортировка грузов, в особенности крупногабаритных грузов [7]. В данной работе описывается задача перемещения нескольких крупногабаритных объектов группой автономных мобильных роботов по заданной траектории.

Постановка задачи. Пусть в начальный момент времени на горизонтальной поверхности произвольным образом расположены N объектов. Объекты неподвижны. Для упрощения динамической модели предполагается, что любой объект $O_i, i = \overline{1, N}$ представляет собой идеально круглое тело, расположенное на плоскости, с которой связана система координат xOy . К каждому объекту случайным образом присоединен кластер (подгруппа) из k автономных мобильных транспортных роботов $R_{ij}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, k}$, как показано на рис. 1. Процесс присоединения роботов к объектам в данной работе не рассматривается. Требуется, чтобы роботы переместили строй объектов к целевой области по заданной траектории, обходя встречающиеся по пути подвижные и неподвижные препятствия.

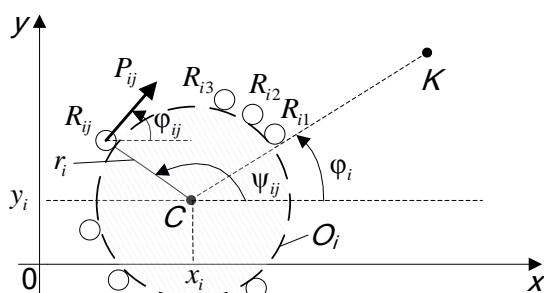


Рис. 1. Система "объект-роботы" на плоскости

Для успешного перемещения объекта роботы должны объединить свои усилия и сформировать общую силу тяги P_i , создающую вращающий момент M_i . Формирование общей силы тяги кластера роботов, присоединенных к объекту O_i , производится путем выбора активных роботов, комбинация сил тяги которых дает желаемые величину, направление и вращающий момент тягового усилия [3, 8]. Если масса и размеры роботов по сравнению с размерами перемещаемого объекта пренебрежимо малы, то после выделения активных роботов объект с присоединенными к нему роботами можно представить в виде макрообъекта круглой формы, имеющего радиус $r_i, i = \overline{1, N}$ и массу $m_i, i = \overline{1, N}$.

Модель движения объекта в виде квазилинейной системы дифференциальных уравнений для поступательного и вращательного движения записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \cos(\varphi_{vi})v_i, \\ \dot{y}_i &= \sin(\varphi_{vi})v_i, \\ \dot{\varphi}_i &= \omega_i, \\ \dot{v}_i &= a_i, \\ \dot{\omega}_i &= \varepsilon_i. \end{aligned} \tag{1}$$

где v_i, φ_{vi} – величина и направление линейной скорости объекта i ; φ_i – угол ориентации объекта; ω_i – угловая скорость объекта; a_i, ε_i – линейное и угловое ускорения объекта.

Подходы, используемые при построении системы управления. Согласно постановке задачи, СГУР должна изменить координаты группы объектов таким образом, чтобы они не только оказались в целевом положении, но в процессе пе-

ремещения сохраняли нужную ориентацию относительно друг друга в внешних объектах. То есть возникает задача минимизации отклонения текущих координат каждого объекта от вычисленных определенным образом желаемых координат. В теории нелинейных динамических систем одним из наиболее часто применяемых методов управления по отклонению является аппарат функций Ляпунова.

Управление на основе функции Ляпунова используется для реализации группой роботов движения в строю. Группа из N объектов, к каждому из которых присоединена группа роботов, ведется лидером группы. То есть для управления группой используется стратегия "ведущий–ведомые". Когда группа приближается к препятствию, объекты разделяются, огибают препятствие, а затем снова восстанавливают строй.

Построение системы управления движением группы мобильных роботов на основе стратегии управления «ведущий – ведомые» подробно описано, например, в [9].

В рамках данной стратегии из всей совокупности роботов выделяется один робот, который начинает исполнять обязанности лидера, заключающиеся в выборе общей траектории движения группы. Движение всех роботов группы вдоль задаваемой лидером траектории обеспечивается тем, что каждый робот стремится сохранять неизменным свое положение относительно лидера. Для этого используются различные механизмы. Например, в [9] вводится понятие виртуального транспортного средства. По аналогии с [9] можно ввести понятие виртуального робота. С каждым реальным ведомым роботом связан один виртуальный робот, как показано на рис. 2. При этом виртуальный робот всегда сохраняет заданное положение относительно робота-лидера. На протяжении всего движения каждый ведомый робот стремится, чтобы у него была такая же ориентация и положение, как и у виртуального робота, связанного с ним. То есть координаты и ориентация виртуального робота являются желаемыми для ведомого робота. Получается, что в процессе движения группы виртуальные роботы движутся за роботом-лидером, а ведомые роботы движутся за связанными с ними виртуальными роботами. Желаемыми координатами для ведущего робота являются либо координаты целевой области, если он перемещается к цели по кратчайшему пути, либо координаты какой-либо точки на заданной траектории движения.

На рис. 2 изображен робот R_i с координатами (x_i, y_i) центра тяжести и соответствующий ему виртуальный робот VR_i с координатами (x_{vi}, y_{vi}) . Робот R_i движется со скоростью V_i , направленной под углом θ_i к оси X . Расстояние между реальным и виртуальным роботом характеризуется координатной парой (x_{di}, y_{di}) .

Поскольку в нашем случае осуществляется управление движением группы объектов с прикрепленными к ним роботами, то будем использовать понятие виртуального, ведущего и ведомого объекта.

В работе [10] задача управления строем роботов решается на основе функции Ляпунова в квадратичной форме, являющейся объединением функций, аналитически описывающих так называемые искусственные потенциальные поля притяжения и отталкивания (квазиполя притяжения и отталкивания). Предложенная в [10] функция Ляпунова не гарантирует сходимости решения к желаемой конфигурации группы, так как производная функции Ляпунова является отрицательно полуопределенной. В данной работе предлагаются законы управления движением роботов на основе функции Ляпунова, гарантирующие сходимости решения к желаемой конфигурации группы. Законы управления получены путем модификации предложенных в [10] функций и регуляторов.

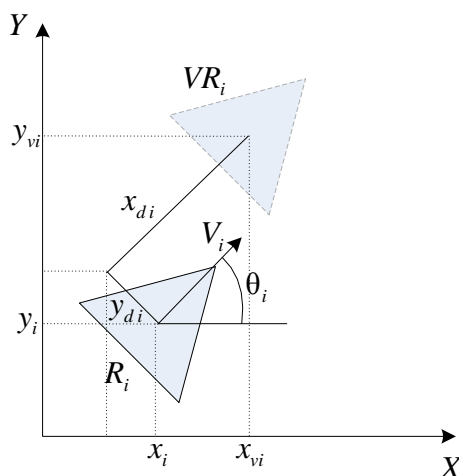


Рис. 2. Реальный робот с соответствующим виртуальным

Структура системы управления на основе функций Ляпунова требует конструирования функций стремления к цели и отталкивания от препятствия. С одной стороны, квазиполе притяжения формируется на основе комбинации функций стремления к целям. Это позволяет объектам двигаться к цели, сохраняя строй. С другой стороны, квазиполе отталкивания формируется на основе комбинации функций отталкивания от препятствий. Это позволяет объектам огибать все препятствия.

Регуляторы на основе функции Ляпунова. Одним из главных преимуществ использования управления с помощью функций Ляпунова является возможность доказательства устойчивости предлагаемого управления. Закон управления должен надлежащим образом комбинировать функции, описывающие квазиполя притяжения и отталкивания.

Если рассматривать группу объектов, динамика каждого из которых описывается уравнениями (1), то в соответствии с целями управления для придания устойчивости системе введены следующие законы управления i -м объектом:

$$a_i = - \frac{k_{i1}v_i + l_{i1} \cos \theta_i + l_{i2} + k_{i3} \cdot \frac{(x_i - xv_i)^2}{v_i} + k_{i5} \cdot \frac{(y_i - yv_i)^2}{v_i}}{l_{4i}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = - \frac{k_{i2}\omega_i + l_{i3} + k_{i4} \cdot \frac{(\theta_i - \theta v_i)^2}{\omega_i}}{l_{5i}}, \quad (3)$$

где $i = \overline{2, N}$; xv_i , yv_i , θv_i – координаты и угол поворота i -го виртуального объекта; k_{ij} , $j = \overline{1, 5}$ – настроечные коэффициенты; l_{fi} , $f = \overline{1, 5}$ – части производной от функции Ляпунова.

Рассмотрим в качестве кандидата на функцию Ляпунова системы (1) функцию

$$L(\xi) = \sum_{i=1}^N \left\{ A_i(\xi) + Q_i(\xi) \cdot \left[\sum_{k=1}^m \frac{\alpha_{ik}}{R s_{ik}(\xi)} + \frac{\gamma v_i}{U v_i(\xi)} + \frac{\gamma \omega_i}{U \omega_i(\xi)} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\beta_{ij}}{R m_{ij}(\xi)} \right] \right\}, \quad (4)$$

где α_{ik} , γv_i , $\gamma \omega_i$, β_{ij} – положительные коэффициенты, выполняющие роль настроечных параметров закона управления; $A_i(\xi)$, $Q_i(\xi)$, $Rs_{ik}(\xi)$, $Uv_i(\xi)$, $U\omega_i(\xi)$, $Rm_{ij}(\xi)$ – функции, описывающие квазиполя притяжения и отталкивания; $\xi = (x, y, \theta, v, \omega)$ – обобщенный вектор координат.

Введенному в рассмотрение функции кандидату соответствует производная по времени вдоль траектории системы (1):

$$\dot{L}(\xi) = \sum_{i=1}^N [(l_{1i} \cos \theta_i + l_{2i} \sin \theta_i + l_{4i} a_i) v_i + (l_{3i} + l_{5i} \varepsilon_i) \omega_i]. \quad (5)$$

Подставляя в выражение (5) уравнения законов управления (2), (3) и уравнения модели (1), получим отрицательно определенную функцию:

$$\dot{L}(\xi) = - \sum_{i=2}^N (k_{i1} v_i^2 + k_{i2} \omega_i^2 + k_{i3} (x_i - xv_i)^2 + k_{i4} (\theta_i - \theta v_i)^2 + k_{i5} (y_i - yv_i)^2) < 0 \quad (6)$$

при $i = \overline{2, N}$, $\forall \xi \in \Omega(L)$, $\xi \neq \xi^*$.

Так как функция (4) отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатам в функции Ляпунова, то она является функцией Ляпунова для системы (1), а $\xi^* = (xv_1, yv_1, \theta v_1, 0, 0, \dots, xv_N, yv_N, \theta v_N, 0, 0)$ является устойчивым положением равновесия в силу известной теоремы Ляпунова.

Предложенные подходы к управлению группой крупногабаритных объектов были исследованы путем численного моделирования в среде MatLab. Результаты моделирования показаны на рис. 3. Требовалось переместить 3 произвольным образом ориентированных неподвижных объекта по кратчайшему пути в целевое положение. Объект, выполняющий функции лидера, имел первоначальные координаты (20 м, 25 м); ведомые объекты имели координаты (22 м, 15 м) и (32 м, 35 м). Объект-лидер должен был остановиться в точке с координатами (135 м, 55 м). При этом ведомые объекты должны были остановиться на расстоянии 5 м от ведущего.

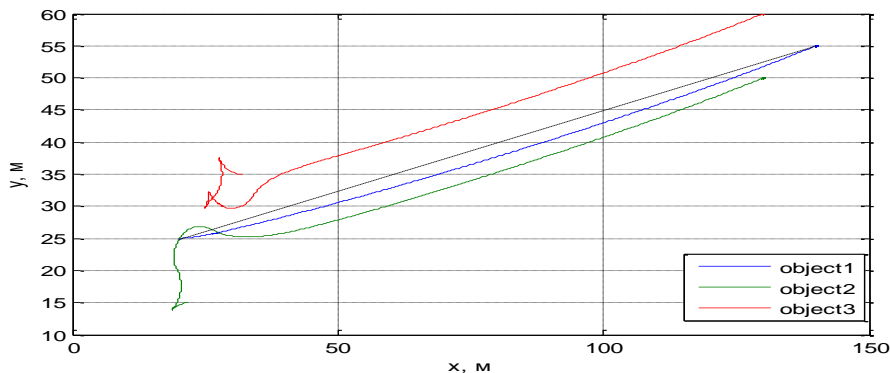


Рис. 3. Фазовые траектории движения трех объектов

Как видно из рис. 3, после некоторого переходного процесса, связанного с поворотом для ориентации максимального вектора тяги перемещающего кластера на цель, объект-лидер (object 1) перемещается к целевой точке практически по прямолинейной траектории. Траектория не прямолинейна потому, что роботы начинают перемещать объект до того, как направление максимального вектора тяги

точно совпадет с направлением на цель. Переходные процессы в траекториях ведомых объектов (object 2 и object 3) намного более заметны и продолжительны, поскольку ведомые объекты должны ориентировать направления максимальных тяговых векторов на цель и при этом соблюдать заданное расстояние друг от друга и от объекта-лидера.

Заключение. В данной работе предложена реализация системы группового управления роботами на основе принципа распределенного управления. Представлена квазилинейная динамическая модель объекта. Поставлена задача перемещения группы объектов автономными мобильными роботами. Предложена реализация распределенного управления на основе функции Ляпунова. При этом доказана сходимости процесса управления на основе предложенного подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Arai T., Pagello E., Parker L.E.* Editorial: advances in multi-robot systems // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 2002. – Vol. 18, № 5. – P. 655-661.
2. *Bayindir I., Sahin E.* A Review of Studies in Swarm Robotics // *Turkish Journal Electrical Engineering and Computer Sciences*. – 2007. – Vol. 15. – P. 115-147.
3. *Калыев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
4. *Duman H., Hu H.* Fuzzy Logic for Behaviour Co-ordination and Multi-Agent Formation in RoboCup // *Developments in Soft Computing, Advances in Soft Computing*. – 2001. – Vol. 9. – P. 191-198.
5. *Dias M.B., Zlot R., Kalra N., Stentz A.* Market-Based Multirobot Coordination: A Survey and Analysis // *Proceedings of the IEEE*. – 2006. – Vol. 94, № 7. – P. 1257-1270.
6. *Meng Z., You Z., Li G., Fan C.* Cooperative attitude control of multiple rigid bodies with multiple time-varying delays and dynamically changing topologies // *Mathematical problems in engineering*. – 2010. Article id 621594. – 19 p.
7. *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.
8. *Тумов А.Е., Шаповалов И.О.* Применение прецизионных аналоговых интерфейсов в задачах экстремальной робототехники // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 2 (139). – С. 82-88.
9. *Yoshioka C., Namerikawa T.* Formation control of nonholonomic multi-vehicle systems based on virtual structure // *Proceedings of the 17th World congress of The International Federation of Automatic control*, 2008.
10. *Sharma B., Vanualailai J.* Flocking of Multi-agents in Constrained Environments // *European journal of pure and applied mathematics*. – 2009. – Vol. 2, № 3. – P. 401-425.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., проф. 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.

Косенко Евгений Юрьевич – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79045071963; кафедра систем автоматического управления; доцент.

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.

Kosenko Evgeny Yurievich – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79045071963; the department of automatic control systems; associate professor.