

**Ryavchenko Tamila Alexeevna** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pta@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185139107; the department of automatic control systems; professor.

УДК 681.58:621.865.8

**И.О. Шаповалов**

### **ПРИМЕНЕНИЕ ГРУПП МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СЛОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧАХ**

*Рассматривается возможность использования групп транспортных роботов при постройке понтонных мостов. Ставится задача сборки моста из отдельных секций с помощью группы автономных мобильных роботов. Обсуждаются наиболее популярные методы проектирования систем группового управления роботами. Предлагается реализация взаимодействия роботов группы с помощью виртуальных агентов и потенциальных полей. Приводится динамическая модель системы управления движением. На основе приведенной модели строится алгоритм управления перемещением отдельных секций по заданным траекториям. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного метода управления перемещением.*

*Группа роботов; понтонный мост; строй; перемещение; взаимодействие.*

**I.O. Shapovalov**

### **MOBILE ROBOT GROUP USING IN COMPLEX TRANSPORT PROBLEMS**

*The possibility of transport robot group using in pontoon bridge building is considered in this paper. Problem of separate section assembling into bridge by the autonomous mobile robot group is stated. Popular methods of group robot control system designing are discussed. Robot collaboration realization through virtual agents and potential fields is suggested. Dynamics of relocation control system are given. Control algorithm of separate sections motion along given paths is designed on the base of given dynamics. Results of modeling approving efficiency of suggested method are given.*

*The robot group; the pontoon bridge; formation; relocation; collaboration.*

В последнее время в научной литературе огромное внимание уделяется изучению проблем группового управления роботами. Это связано с тем, что группы роботов обладают значительными преимуществами по сравнению с одиночными роботами. Если же сравнивать различные типы систем группового управления между собой, то наиболее перспективными выглядят децентрализованные системы управления интеллектуальными роботами. В таких системах роботы рассматриваются как автономные агенты, самостоятельно, без внешних управляющих воздействий решающие поставленные перед ними задачи путем взаимодействия друг с другом и окружающей средой.

Одной из проблем, при разрешении которой могут быть реализованы преимущества, присущие группам роботов, является сборка конструкций типа понтонных мостов. В нашем государстве с его многочисленными реками имеется постоянная потребность в создании гибких и дешевых мостовых конструкций, предназначенным для временного использования как в гражданских, так и в военных целях. Создание понтонных мостов из совокупности отдельных секций является комплексной транспортно-сборочной задачей, требующей применения сложных технических средств и их координации. Решение этой задачи еще более усложняется при необходимости ее решения в экстремальных условиях с жесткими вре-

менными ограничениями. Поэтому использование группы автономных мобильных транспортных роботов типа речных буксиров для создания понтонных мостов представляется весьма перспективным.

**Постановка задачи.** Постройка понтонного моста состоит не только в соединении понтонных секций между собой, но в таких важных подготовительных операциях, как доставка отдельных секций к водной преграде, через которую требуется построить мост, и выгрузка секций на воду. Группу роботов предлагается использовать только на основном этапе сборки, т.е. при непосредственном перемещении секций по воде к месту сборки, установке секций в требуемом положении и соединении их между собой. Исходные условия для задачи сборки моста группой роботов условно показаны на рис. 1.

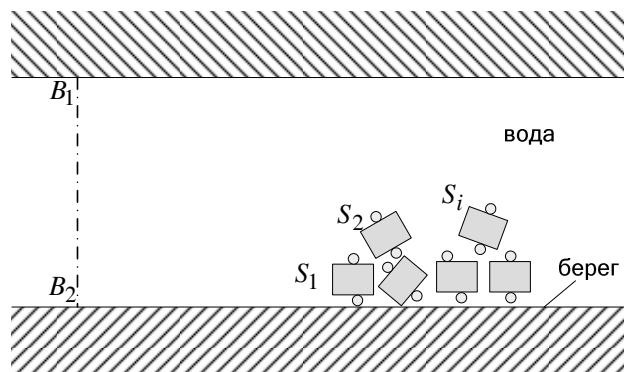


Рис. 1. Исходное положение группы роботов

Из рис. 1 видно, что в начальный момент времени на воде у берега произвольным образом расположена группа из  $N$  надводных прямоугольных понтонных секций. К каждой секции  $S_i, i = \overline{1, N}$  присоединено несколько роботов (в данном случае по 2). Требуется, чтобы транспортные роботы переместили детали моста таким образом, чтобы они расположились вплотную последовательно друг за другом в форме прямой линии перпендикулярно берегу. Продольная ось образованной конструкции должна совпадать с отрезком  $B_1B_2$ . Секции сцепляются автоматическими устройствами, расположенными на коротких сторонах каждой секции.

Очевидно, что если группа транспортных роботов будет осуществлять перемещать объекты не последовательно, а одновременно, то возникнут проблемы синхронизации перемещений. Роботы должны управлять перемещением секционных платформ таким образом, чтобы избежать столкновений не только с берегами и сторонними наводными препятствиями, но и с другими платформами. Учитывая ограниченность пространства, в котором производится сборка, а также то, что транспортные роботы на основе речных буксиров не обладают такой маневренностью, как наземные буксиры, требуется применение особых алгоритмов управления перемещением секций. Общая задача построения моста разбивается на 2 подзадачи: перемещение секций и синхронизация этого перемещения.

**Управление взаимодействием роботов.** На этапе движения объектов от первоначального положения к области, в которой будет производиться стыковка секций, решается задача управления строем роботов.

Чаще всего для построения модели, описывающей групповое взаимодействие и функционирование, используется теория графов. В качестве математического представления сетевых взаимодействий между подгруппами роботов, переме-

щающими разные секции, удобно использовать графический Лапласиан  $L = l_{ij}$ , состоящий из элементов  $l_{ii} = \sum_{i \neq j} a_{ij}$ ,  $l_{ij} = -a_{ij}$  при  $i \neq j$ . Если роботы, относящиеся к  $i$ -й секции обмениваются информацией с роботами  $j$ -й секции, то  $a_{ij} = 1$ , иначе  $a_{ij} = 0$ .

Среди всего разнообразия подходов к организации упорядоченного перемещения групп роботов выделяются 3 основных: «ведущий–ведомые», с использованием виртуальных агентов и с виртуальными потенциальными полями между роботами. При использовании идеи ведущего и ведомых роботов функция планирования и стабилизации движения по траектории выполняется только ведущим роботом, остальные же лишь следуют на заданном расстоянии за ведущим. Очевидно, что такие алгоритмы несут в себе элемент централизации и требуют введения специальных алгоритмов смены ведущего для увеличения надежности системы. Подход к построению систем с виртуальными агентами предполагает введение в группу роботов несуществующих агентов. Управление строим состоит в совмещении позиций виртуальных агентов и поддержанием постоянных расстояний до реальных агентов. Разнообразные формы строя создаются за счет задания различных расстояний от реальных роботов до виртуальных. Суть подхода к управлению группами роботов на основе виртуальных потенциальных полей состоит в том, что при чрезмерном сближении роботов возникают "силы отталкивания", а при отдалении – "силы притяжения".

Интересный способ организации перемещения группы роботов с использованием подходов на основе виртуальных агентов и потенциальных полей предложен в [1]. Комбинация двух подходов к управлению группами роботов позволяет осуществлять перемещение группы роботов по заданной траектории с избеганием столкновений с препятствиями. Данный подход не обеспечивает какую-либо заданную геометрию строя, а лишь заданные расстояния между роботами. Реализация перехода от управления строим отдельным роботом к управлению строим из групп жестко соединенных с секциями роботов не представляет никакой трудности, поэтому подход из [1] выбран для применения при постройке понтонных мостов.

В процессе перемещения все роботы обмениваются друг с другом информацией о своей скорости и положении. Необходимое управление выбирается каждым роботом самостоятельно в 3 этапа: определение влияния других роботов, определение вклада других роботов в управление, вычисление управления.

Управление  $i$ -го робота представляет собой простую взвешенную сумму вкладов остальных роботов и вычисляется по формулам:

$$u_i = v_i \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} v_{ij} / \sum_{j=1}^N \beta_{ij}, \quad (2)$$

$$\theta_i = \arctan\left(\sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sin(\theta_{ij}) / \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \cos(\theta_{ij})\right), \quad (3)$$

где  $v_i$  и  $\theta_i$  – модуль и направление управления  $u_i$  роботом по скорости;  $v_{ij}$  и  $\theta_{ij}$  – модуль и направление вклада робота  $j$  в управление;  $\beta_{ij}$  – вес этого вклада.

Вклад робота  $j$  в управление робота  $i$  представляет собой скорость, которую должен сформировать робот  $i$ , чтобы сохранить нужное расстояние до робота  $j$ . Вычисляется этот вклад на основе небольшого набора правил поведения робота  $i$  при различных ситуациях. Вес вклада робота  $j$  в управление характеризует важность вклада данного робота по сравнению с другими роботами. Вклады ближайших роботов имеют больший вес, чем вклады более отдаленных.

Виртуальные агенты используются как для обхода препятствий, так и для проведения группы по заданной траектории. В первом случае виртуальные роботы располагаются на препятствии и "отталкивают" реальных роботов, а во втором – располагаются на желаемой траектории и "притягивают" реальных роботов.

**Управление перемещением секций.** Для реализации алгоритма управления одновременным перемещением секций, построенного на основе подхода, изложенного в предыдущем пункте, необходимо осуществлять постоянное управление координатами, ориентацией и скоростью конструктивных элементов моста при всех существующих ограничениях. В этой связи возникает задача синтеза алгоритма управления перемещением одной секции.

Для упрощения динамической модели предполагается, что секция представляет собой идеально круглое тело  $M$ , расположенное на плоскости. К телу случайным образом присоединена группа автономных мобильных транспортных роботов, как показано на рис. 2. При таком подходе к расположению роботов упрощается переход к управлению двумя-четырьмя роботами, расположенными настрого в определенных позициях.

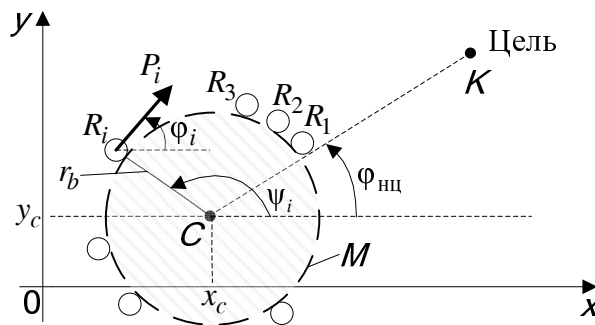


Рис. 2. Система "тело – роботы" на плоскости

Каждый робот  $R_i$  формирует силу тяги, принимающую два значения

$$P_i \in [0, P_{\max}] \text{ и имеющую четыре возможных направления } \varphi_i = \psi_i \pm \mu \frac{\pi}{2}, \mu = 0, 1, 2.$$

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 скоростью  $V_{\text{зад}}$ . Причем роботы должны вычислять необходимые управления на протяжении всей траектории движения. Очевидно, что решение такой задачи дает подходящий инструмент для управления перемещением понтонных секций по непредсказуемо меняющимся траекториям с изменением заданной скорости. Подобная задача управления группой роботов, имеющих только радиальные тяги, рассмотрена в [4].

Идея осуществления перемещением по заданной траектории состоит в том, что определяется направление касательной  $\frac{df(x)}{dx}$  к заданной траектории в точке, ближайшей к текущему положению центра тяжести тела. Затем относительно найденного направления из общей группы формируются 2 кластера роботов, суммарные силы тяги которых направлены по разные стороны от направления касательной. Вычисление направления касательной производится непрерывно, а новые активные кластеры формируются, если перестает выполняться условие

$$\operatorname{tg}(\varphi_A) \leq \frac{df(x)}{dx} \leq \operatorname{tg}(\varphi_B), \quad (4)$$

где  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  – направления суммарной силы тяги первого и второго кластера.

Для поддержания постоянной скорости используется имеющаяся на любой поверхности сила трения. Когда значение скорости тела превышает заданные пределы, все роботы отключаются, и движение происходит по инерции до тех пор, пока значение скорости не опустится ниже заданного предела. На рис. 3 показана траектория перемещения тела, полученная в результате моделирования в среде MatLab процесса перемещения круглого тела группой роботов.

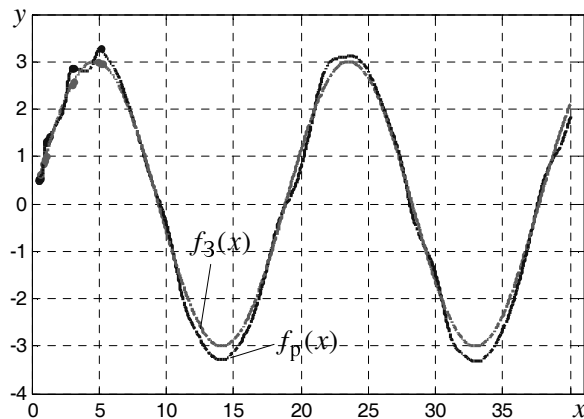


Рис. 3. Моделирование перемещения тела

Как видно (см. рис. 3), реальная траектория движения  $f_p(x)$  незначительно отличается от заданной  $f_3(x)$ . Динамика перемещения тела описывается полученными с помощью [5] соотношениями:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= P \cos \varphi - F_{TP}(\dot{x}), \\ m\ddot{y} &= P \sin \varphi - F_{TP}(\dot{y}); \end{aligned} \quad (5)$$

$$J\ddot{\psi} = -Pr \sin(\varphi - \psi) + M_{TP}(\dot{\psi}), \quad (6)$$

где  $m$  – масса тела,  $x$  и  $y$  – координаты центра тяжести тела,  $P$  – суммарная сила тяги, действующая на тело,  $F_{TP}(\dot{x})$  и  $F_{TP}(\dot{y})$  – проекции силы трения на оси координат,  $\varphi$  – угол направления суммарной силы тяги,  $\psi$  – угол присоединения (см. рис. 2),  $J$  – момент инерции,  $M_{TP}(\dot{\psi})$  – момент силы трения.

В статье рассмотрена задача построения понтонных мостов группой интеллектуальных транспортных роботов. Предложен метод организации взаимодействия между роботами, перемещающими различные секции моста. Приведены основные идеи управления перемещением отдельной секции, разработана модель динамики перемещения и осуществлено моделирование.

**Планы будущих исследований.** В настоящее время проводятся работы по упрощению алгоритма перемещения тела для случая двух и четырех роботов, соединенных с секцией симметрично. Также производится приспособление алгоритма поддержания строя отдельных роботов для случая строя из сцепленных с секциями малых групп роботов. Далее планируется объединение алгоритмов в единый алгоритм построения понтонных мостов и численное моделирование работы этого алгоритма.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009.
2. *Rocheffort Y., Piet-Lahanier H., Bertrand S., Beauvois D., Dumur D.* Guidance of flocks of vehicles using virtual signposts // Preprints of the 18<sup>th</sup> IFAC world congress, 2011.
3. *Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шаповалов И.О.* Оптимальное перемещение тела интеллектуальным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 7. – С. 43-46.
4. *Селимов Ч.Д.* Перемещение тела вдоль заданных траекторий // Материалы Пятой научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" и Второй молодежной школы-семинара "Управление и обработка информации в технических системах". – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 212-215.
5. Краткий физико-технический справочник. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Илюхин.

**Шаповалов Игорь Олегович** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: shapovalovio@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79508473455; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

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

УДК 681.325.65

**Е.А. Шестова**

#### **РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ЗНАНИЙ**

*Разработан метод решения задачи в условиях неполноты исходной информации, отличающийся формализацией параметров системы тестирования в виде лингвистических переменных, а также применением модели принятия решений на основе композиции нечетких правил вывода, дополняющей известные статистические модели оценок результатов тестирования, что позволяет не только снизить степень информационной неопределенности, но и повысить объективность оценки результатов тестирования. Разработано предметно-ориентированное программное приложение, предназначенное для обработки результатов тестирования и оценки знаний.*

*Модель; нечеткая логика; композиционная модель; тестирование.*