

УДК 681.5.013

## Метод планирования движения группы подвижных объектов с использованием динамических репеллеров и целераспределения\*

М.Ю. МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>, В.С. ЛАЗАРЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 347928, РФ, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, Южный федеральный университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: medvmihal@sfedu.ru

<sup>2</sup> 347928, РФ, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, Южный федеральный университет, аспирант. E-mail: vlazarev@sfedu.ru

В работе рассматривается проблема планирования траекторий движения группы подвижных объектов (ПО), функционирующей в двумерной неопределенной среде с неподвижными препятствиями. Актуальность этой проблемы многократно подчеркивалась в работах отечественных и зарубежных ученых. Предлагается двухуровневая структура системы планирования. Верхний уровень системы – уровень динамического целераспределения. Предполагается, что имеется число целей, равное количеству ПО в группе. Требуется распределить цели между ПО так, чтобы минимизировать заданный критерий. Каждому ПО в группе нужно прийти к цели, уклонившись от препятствий, встречающихся на пути. Нижний уровень реализует алгоритм обхода препятствий путем их преобразования в репеллеры. Метод позволяет на основе простых алгоритмов, реализуемых подвижными объектами, без использования централизованного алгоритма организовать групповое движение. Предлагается новый способ введения репеллеров, основанный на формировании неустойчивых состояний в фазовом пространстве подвижных объектов. Отталкивающие силы формируются в виде выходов динамических звеньев, интегрирующих нелинейные функции, зависящие от расстояний до препятствий. В результате получены законы изменения скоростей и направлений движения подвижных объектов. Проведено численное моделирование группы, состоящей из трех подвижных объектов в среде с неподвижными препятствиями. На основе проведенного анализа и результатов моделирования делаются выводы о применимости предложенного метода на практике. Обсуждается дальнейшее развитие предлагаемого метода планирования движения, включающее учет уравнений динамики ПО, а также адаптацию метода под трехмерную среду.

**Ключевые слова:** групповое управление, подвижный объект, децентрализованное управление, репеллер, неустойчивый режим, функция Ляпунова, целераспределение, планирование траектории

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-41-52

---

\* Статья получена 06 октября 2016 г.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда; грант 16-19-00001, выполняемый Южным федеральным университетом.

## ВВЕДЕНИЕ

Идея использования отталкивающих и притягивающих множеств в системах управления подвижными объектами впервые реализована в работах А.К. Платонова в 1970 году [1, 2], в которых представлен метод потенциалов (потенциальных полей) в задаче выбора пути для мобильного робота. За рубежом основные ссылки делаются на работы Брукса и Хатиба, которые вышли в свет в 1985 и 1896 года [3–5]. Вместе с тем работа фирмы «Хитачи» по управлению МР, в которой использованы идеи «силового поля», выпущена в 1984 году [6]. В настоящее время метод потенциалов получил широкое распространение. Обзор и анализ методов, использующих потенциальные поля, можно найти в работе [7]. В работах [8, 9] изложена идея преобразования точечных препятствий в репеллеры с использованием теоремы Ляпунова о неустойчивости. Такой подход позволяет реализовать движение в средах с препятствиями без картографирования. В [10] этот подход распространен на трехмерное пространство, а в [7] рассматривается задача движения в среде с препятствиями, которые могут образовывать различные конфигурации.

Идея представления препятствий репеллерами также может быть востребована при решении задач группового управления [11]. При этом могут рассматриваться однотипные или разнотипные группы [12, 13]. Группы зачастую состоят из интеллектуальных роботов, к которым принято относить либо системы, снабженные мощным вычислительным комплексом, либо системы, построенные на основе интеллектуальных методов, таких как аппарат нечеткой логики Л. Заде, искусственные нейронные сети и экспертные системы [14, 15].

В системах группового управления роботами более перспективной представляется децентрализованная стратегия управления, которая приводит к распределенным системам группового управления [16]. В этой связи в данной статье рассматривается задача распределенного управления группой подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями с использованием репеллеров. Целями являются точки позиционирования, количество которых равно числу ПО. Требуется оперативно распределить цели между ПО и обеспечить их движение в неопределенной среде с препятствиями.

Начало исследованиям в этой области было положено еще в 50–60-х годах прошлого века [17–19]. В работе [20] проведен всесторонний обзор исследовательских проблем того времени. Время выполнения разработанных на сегодняшний день алгоритмов целераспределения экспоненциально растет с увеличением сложности решаемой задачи. Кроме того, даже для задач сравнительно небольшого масштаба не существует общего алгоритма решения.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим подвижные объекты (рис. 1), уравнения кинематики которых имеют вид

$$\dot{y}_{1i} = V_i \cos \varphi_i, \quad \dot{y}_{2i} = V_i \sin \varphi_i, \quad (1)$$

где  $y_{1i}, y_{2i}$  – координаты ПО;  $V_i$  – скорость ПО;  $\varphi_i$  – угол курса ПО,  $i = \overline{1, n}$ .

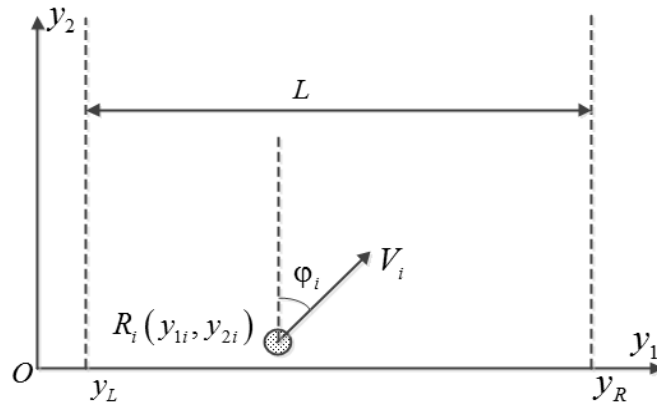


Рис. 1. Переменные состояния ПО и система координат

Положение подвижного объекта характеризуется координатами  $y_{1i}, y_{2i}$  во внешней системе  $O y_1 y_2$ . Скорость  $V_i$  и курсовой угол  $\phi_i$  являются управлениями. Каждый подвижный объект измеряет координаты соседних объектов и имеет информацию о координатах  $y_L, y_R$  области  $L$ , в которой функционирует группа. Число  $n$  подвижных объектов в группе известно. Имеется  $n$  целевых точек, которые задаются в виде координат  $x_{celj}$ , где  $n$  – порядковый номер целевой точки. Ставится задача распределения между ПО целевых точек и движения к ним в неопределенной среде с препятствиями.

## 2. МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Большинство алгоритмов, представленных в современной литературе, предназначены для решения задачи распределения целей, когда число роботов соответствует количеству целей. В этом случае для совокупности  $\mathcal{R}$ , состоящей из  $N$  роботов, существует  $N!$  возможных вариантов распределения целей [22]. Как правило, такие алгоритмы предназначены для решения задачи формирования структуры строя некоторой группой  $\Gamma_W$  роботов. В результате каждому из роботов группы назначается целевая точка в структуре строя. Задача целераспределения связана с оптимизацией заданного критерия качества группой ПО. В качестве одного из таких критериев нередко выступает дистанция до целевой позиции [23]. При этом большинство известных алгоритмов являются эвристическими.

В [24] для гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА) рассматривается задача целераспределения в динамических и неопределенных средах в реальном масштабе времени с применением гибридного алгоритма аукциона и согласования из [25]. В данном подходе каждый БЛА присваивает каждой цели обновляющееся с течением времени значение, которое определяется как разность между доходом, получаемым БЛА при выборе данной цели, и глобальной ценой за эту цель. Доход и цена могут быть вычислены на основе различных критериев в зависимости от характеристик робота, цели и среды. Каждый БЛА предлагает свою цену за цель. Цель назначается БЛА, предложившему большую цену. Для устранения конфлик-

тов используется алгоритм согласования (консенсус-алгоритм), по результатам работы которого переназначается глобальное текущее значение цены, предлагаемой за цель.

Другим возможным решением задачи распределения целей, предлагаемым в литературе, является использование потенциальных полей для притяжения роботов к свободным целевым позициям [26, 27]. Каждой целевой точке назначается положительный потенциал, который притягивает расположенных рядом роботов. При этом роботы, которым еще не назначены цели, не учитывают потенциалы занятых целевых точек. Идентификация роботами занятых целевых позиций производится с помощью сенсорной подсистемы [27] или посредством коммуникационной подсистемы [26]. Достоинствами данного подхода являются его децентрализованность и способность одновременно решать задачи целераспределения и синтеза структуры строя. Недостаток этого подхода проявляется в тех случаях, когда сенсорная и коммуникационная подсистемы роботов не позволяют идентифицировать уже занятую целевую позицию на достаточном удалении, что приводит к их избыточным перемещениям [21].

Кроме того, для решения задачи целераспределения нередко используются подходы с применением метода релаксаций Лагранжа, обучающихся алгоритмов, линейного целочисленного программирования и нелинейных сетевых потоков, динамического программирования, нечетких моделей, нейронных сетей, генетических алгоритмов, муравьиных алгоритмов, а также их комбинаций [Там же].

В данном случае решается задача целераспределения с оптимизацией суммарного расстояния, пройденного элементами группы. Ниже приводится алгоритм целераспределения.

1. Создается матрица – строка, число элементов которой равно числу целей в группе.

2. В самом начале движения вычисляется расстояние от начальной координаты объекта до каждой цели  $celr$ , где  $i$  – номер подвижного объекта в группе, а  $j$  – номер целей точки:

$$celrast_{ij} = \sqrt{(x_{celj} - x_{i0})^2 - (y_{celj} - y_{i0})^2}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – начальные координаты  $i$ -го подвижного объекта, а  $x_{celj}$  – начальные координаты  $j$ -й цели.

3. После определения расстояния от каждого ПО до каждой цели строится матрица расстояний.

$$cel_i = \begin{bmatrix} celrast_{11} & \dots & celrast \\ \dots & \dots & \dots \\ celrast_{1j} & \dots & celrast. \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. Среди элементов матрицы (3) выбираются комбинации из трех элементов, которые включают по одному элементу из каждого столбца и строки. Затем суммируются все элементы и выбирается комбинация с минимальной суммой. Если имеют место одинаковые суммы, то более предпочтительным является вариант с меньшим максимальным элементом в комбинации. В ре-

зультате получается матрица из двух столбцов, задающая соответствие между  $i$ -м ПО и  $j$ -й целью.

5. Задается направление движения на цель. Для этого рассчитывается начальный угол курса подвижного объекта по формуле

$$\varphi_i = \arctg((x_{celj} - x_{i0}), (y_{celj} - y_{i0})).$$

### 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ ГЕКСАКОПТЕРА

Чтобы обеспечить обход препятствий, встречающихся на пути, используется метод позиционно-траекторного управления с использованием неустойчивых режимов [7].

Пусть  $y_{2i} = 0$ , а  $y_{1i} \neq y_{1j}$ ,  $\forall i \neq j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ . Пронумеруем подвижные объекты таким образом, чтобы индекс  $i = \overline{1, n}$  возрастал с увеличением координаты  $y_{2i}$ . В этом случае локальный алгоритм управления для  $i$ -го подвижного объекта можно синтезировать следующим образом.

Представим для  $i$ -го подвижного объекта соседние объекты в виде репеллеров. При этом соседний слева объект должен формировать силу, выталкивающую  $i$ -й подвижной объект вправо, а соседний справа объект – влево. Функции, на основе которых формируются репеллеры для  $i$ -го подвижного объекта, представлены на рис. 2.

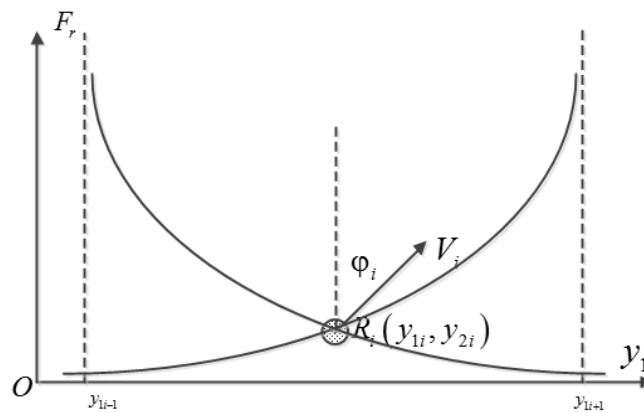


Рис. 2. Формирование репеллеров

В данной работе предлагается формировать отталкивающие силы в виде динамической переменной, являющейся результатом интегрирования функций, представленных на рис. 2.

Пусть функции, представленные на рис. 2, являются степенными функциями. Тогда указанная идея реализуется путем расширения системы (1) следующими уравнениями:

$$\dot{z}_i = \frac{1}{y_i - y_{i-1}} - \frac{1}{y_{i+1} - y_i}, \quad (4)$$

где  $y_{10} = y_L$ ,  $y_{1n+1} = y_R$ .

Как следует из уравнения (4), переменные  $z_i$  зависят от величин, обратных расстояниям между роботами  $R_{i-1}$ ,  $R_i$  и  $R_{i+1}$ .

Пусть исходные требования к траектории движения  $i$ -го подвижного объекта представлены в виде вектора

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} y_{1i} - y_{i0} \\ \dot{y}_{2i} - V_k \end{bmatrix},$$

где  $y_{i0}$ ,  $V_k$  – произвольные числа, не равные нулю.

Чтобы учесть влияние репеллеров, сформируем цель системы управления  $i$ -го подвижного объекта в виде

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} y_{1i} - y_{i0} \\ \dot{y}_{2i} - V_k \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким образом, при появлении репеллера слева от  $i$ -го подвижного объекта переменная  $z_i$  увеличивается, следовательно, составляющая  $y_{i0}(1+z_i)$  также увеличивается. При появлении репеллера справа, как следует из (4), переменная  $z_i$  уменьшается, следовательно, выражение  $y_{i0}(1+z_i)$  также уменьшается.

Производная по времени от первого элемента вектора (5) в силу уравнений (1), (4) описывается выражением

$$\dot{\Psi}_i [1] = V_i \cos \varphi_i - y_{i0} \left( \frac{1}{y_{1i} - y_{1i-1}} - \frac{1}{y_{1i+1} - y_{1i}} \right). \quad (6)$$

Потребуем, чтобы замкнутая система управления  $i$ -го подвижного объекта удовлетворяла следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_i [1] + T_{0i} \Psi_i [1] &= 0, \\ \Psi_i [2] &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

где  $T_{0i}$  – постоянные положительные числа.

Подставив в уравнение (7) выражения (5) и (6), получим

$$\begin{bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{i0} \left( \frac{1}{y_{1i} - y_{1i-1}} - \frac{1}{y_{1i+1} - y_{1i}} \right) - T_{0i} (y_{1i} - y_{i0}(1+z_i)) \\ V_k \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} V_i \\ \varphi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{u_{ix}^2 + u_{iy}^2} \\ \arctan \left( \frac{u_{iy}}{u_{ix}} \right) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Уравнения замкнутой системы управления (10), анализ которой был представлен в работе [16], имеют вид

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_{1i} \\ \dot{y}_{2i} \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{i0} \left( \frac{1}{y_{1i} - y_{1i-1}} - \frac{1}{y_{1i+1} - y_{1i}} \right) - T_{0i} (y_{1i} - y_{i0} (1 + z_i)) \\ V_k \\ \frac{1}{y_{1i} - y_{1i-1}} - \frac{1}{y_{1i+1} - y_{1i}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

В [16] показано, что в системе (10) возникают устойчивые состояния.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Пусть модель подвижного объекта в группе описывается уравнениями (1). Параметры моделирования следующие (рис. 3):

- начальные координаты подвижных объектов: (20; 0), (30; 0), (40; 0);
- координаты целевых точек: (30; 55), (40; 55), (20; 55);
- число подвижных объектов  $n = 3$ , уставки по скорости 1 м/с;
- постоянные времени  $1 \text{ с}^{-1}$ ;
- координаты центра препятствия (30, 30), радиус 7.

Результаты моделирования представлены на рис. 4.

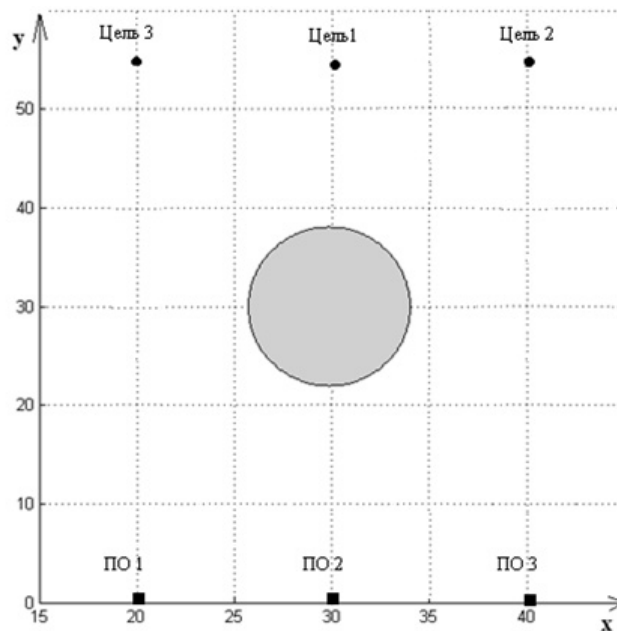


Рис. 3. Начало моделирования

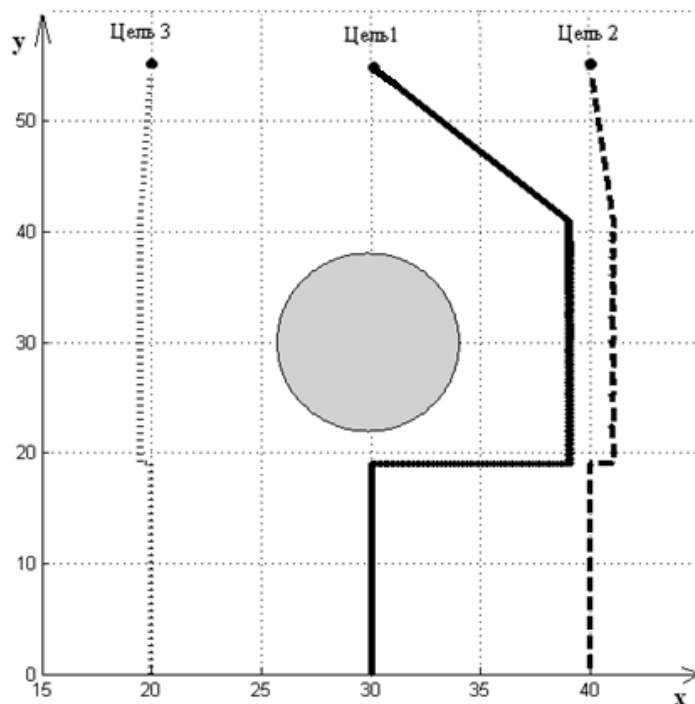


Рис. 4. Результаты моделирования

Как видно из рис. 4, цели были распределены между подвижными объектами в группе (первому была поставлена в соответствие цель под номером три, второму – под номером один и третьему – под номером два). Каждый ПО успешно достиг цели, избегая столкновений с препятствием и с другими объектами в группе.

В целях обеспечения безопасности маневры объектов начинаются за один метр до достижения препятствия. Первым маневр начинает подвижный объект, наиболее близкий к обнаруженному препятствию. Таким образом, система управления позволяет каждому подвижному объекту достигнуть целевой точки и обеспечивает обход препятствий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена двухуровневая система планирования траектории подвижных объектов в группе в условиях неопределенной двумерной среды с неподвижными препятствиями. Первый уровень системы включает алгоритм целераспределения, использующий в качестве критерия расстояние между подвижными объектами и целями. Второй уровень – уровень планирования траектории для обхода препятствий. На втором уровне используется позиционно-траекторное управление с динамическими репеллерами. Данный метод отличается от метода потенциальных полей тем, что в нем силы отталкивания от репеллеров формируются динамически, что позволяет формировать отталкивающие силы в фазовом пространстве. Данный метод может применяться в трехмерных неопределенных средах с подвижными препятствиями.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы. – М., 1974. – 27 с. – (Препринт / Институт прикладной математики АН СССР; № 124).
2. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. – М., 2001. – 32 с. – (Препринт / Рос. акад. наук, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша; № 40).
3. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – St. Louis, MO, USA, 1985. – Vol. 2. – P. 500–505.
4. Khatib O. Real-time obstacles avoidance for manipulators and mobile robots // The International Journal of Robotics Research. – 1986. – Vol. 5, N 1. – P. 90–98.
5. Brooks R.A. Self calibration of motion and stereo vision for mobile robots // 4<sup>th</sup> International Symposium of Robotics Research. – Cambridge: Mit Press, 1987. – P. 267–276.
6. Ichikawa Y., Fujie M., Ozaki N. On mobility and autonomous properties of mobile robots // Robot. – 1984. – N 44. – P. 31–36.
7. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Д.А. Белоглазов, В.Ф. Гузик, Е.Ю. Косенко, В.А. Крухмалев, М.Ю. Медведев, В.А. Переверзев, В.Х. Пшихопов, А.О. Пьявченко, Р.В. Сапрыкин, В.В. Соловьев, В.И. Финаев, Ю.В. Чернухин, И.О. Шаповалов; под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2014. – 300 с. – ISBN 978-5-9221-1595-7.
8. Пшихопов В.Х. Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 49–57
9. Пшихопов В.Х. Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 34–41.
10. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами в трехмерной среде с точечными препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 238–250.
11. Интеллектуальные роботы / И.А. Каляев и др.; под общ. ред. Е.И. Юревича. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.
12. Юревич Е.И. О проблеме группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 9–13.
13. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
14. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 1. – С. 5–21; № 2. – С. 5–22.
15. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с. – ISBN 978-5-02-037509-3.
16. Медведев М.Ю., Лазарев В.С. Алгоритм формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде с использованием неустойчивых режимов // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 3 (64). – С. 17–29.
17. Day R. Allocating weapons to target complexes by means of nonlinear programming // Operations Research. – 1966. – Vol. 14. – P. 992–1013.
18. DenBroeder G., Ellison R., Emerling L. On optimal target assignments // Operations Research. – 1959. – Vol. 7. – P. 322–326.
19. Manne A. A target assignment problem // Operations Research. – 1958. – Vol. 6. – P. 346–351.
20. Matlin S. A review of the literature on the missile-allocation problem // Operations Research. – 1970. – Vol. 18. – P. 334–373.
21. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д.А. Белоглазов, А.Р. Гайдук, Е.Ю. Косенко, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, В.В. Соловьев, А.Е. Титов, В.И. Финаев, И.О. Шаповалов; под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. – 300 с.
22. Macdonald E. Multi-robot assignment and formation control: M.S. electrical and computer engineering. – Atlanta, Ga.: Georgia Institute of Technology, 2011. – 76 p.
23. Yu J., Chung S-J., Voulgaris P. Distance optimal target assignment in robotic networks under communication and sensing constraints // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Hong Kong, China, 2014. – P. 1098–1105.
24. Real-time multi-UAV task assignment in dynamic and uncertain environments / L. Bertuccelli, H-L. Choi, P. Cho, J. How // American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Illinois, USA, 10–13 August 2009. – Chicago, 2009. – P. 1–16. – (AIAA 2009-5776).

25. Brunet L., Choi H-L., How J. Consensus-based auction approaches for decentralized task assignment // American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 18–21 August 2008. – Honolulu, 2008. – P. 1–24. – (AIAA 2008-6839).

26. Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with local coordination // IEEE Transactions on Robotics. – 2008. – Vol. 24, N 1. – P. 232–242.

27. Zavlanos M., Pappas G. Sensor-based dynamic assignment in distributed motion planning // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Roma, Italy, 2007. – P. 3333–3338.

*Медведев Михаил Юрьевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, робототехника. Имеет более 100 публикаций. E-mail: medvmihal@sfedu.ru

*Лазарев Владимир Сергеевич*, магистр техники и технологии, аспирант кафедры электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – групповое управление подвижными объектами. Имеет более 20 публикаций. E-mail: vlazarev@sfedu.ru

### ***A method of planning vehicle group movement using dynamic repellers and task assignment***

M.Yu. MEDVEDEV<sup>1</sup>, V.S. LAZAREV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southern Federal University, 2 Shevchenko St., Taganrog, Russian Federation, D. Sc.(Eng.), professor. E-mail: medvmihal@sfedu.ru

<sup>2</sup> Southern Federal University, 2 Shevchenko St., Taganrog, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: vlazarev@sfedu.ru

This paper considers the problem of planning a motion path of a vehicle group functioning in the two-dimensional indefinite environment with fixed obstacles. The relevance of this problem has repeatedly been emphasized in papers published by Russian and foreign scientists. A two-level structure of the planning system is proposed. The level of dynamic task assignment is the top level of the system. It is supposed that the number of tasks is equal to the number of vehicles in the group. It is required to assign tasks between the vehicles so as to minimize the given criterion. Each vehicle in the group needs to come to the destination by avoiding the obstacles which are found on the way. The bottom level realizes an obstacle avoidance algorithm by converting obstacles into repellers. Based on simple algorithms realized by vehicles, the method makes it possible, to organize group movement without using the centralized algorithm. A new method of introducing repellers based on the formation of unstable states in the vehicle phase space is proposed. Repellent forces are created in the form of outputs of dynamic links integrating non-linear functions depending on the distances to the obstacles. As a result laws of speed and direction change in vehicle movement are formulated. Numerical simulation of a group consisting of three vehicles in the environment with fixed obstacles is carried out. Based on the analysis and the simulation results, conclusions about the applicability of the proposed method in practice are drawn. Further development of the proposed method of movement planning with regard to vehicle dynamic equations as well as the adaptation of the method to the three-dimensional environment is discussed.

**Keywords:** group control, vehicle, decentralized control, repeller, unstable mode, Lyapunov function, task assignment, movement control

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-41-52

---

\* Received 06 October 2016.

The work was supported by the Russian Science Foundation Grant 16-19-00001 at the Southern Federal University, Russia.

## REFERENCES

1. Platonov A.K., Karpov I.I., Kiril'chenko A.A. *Metod potentsialov v zadache prokladki trassy* [Potential method in problem of the path planning]. Preprint no. 124. Institute of Applied Mathematics Academy of Sciences USSR. Moscow, 1974. 27 p.
2. Platonov A.K., Kiril'chenko A.A., Kolganov M.A. *Metod potentsialov v zadache vybora puti: istoriya i perspektivy* [Potential method in problem of the path planning: background and perspectives]. Preprint no. 40. Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences). Moscow, 2001. 32 p.
3. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 1985, pp. 500–505.
4. Khatib O. Real-time obstacles avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 1986, vol. 5, no. 1, pp. 90–98.
5. Brooks R.A. Self calibration of motion and stereo vision for mobile robots. *4<sup>th</sup> International Symposium of Robotics Research*. Cambridge, Mit Press, 1987, pp. 267–276.
6. Ichikawa Y., Fujie M., Ozaki N. On mobility and autonomous properties of mobile robots. *Robot*, 1984, no. 44, pp. 31–36.
7. Beloglazov D.A., Guzik V.F., Kosenko E.Yu., Krukhmalev V.A., Medvedev M.Yu., Pereversev V.A., Pshikhopov V.Kh., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V., Solov'ev V.V., Finaev V.I., Chernukhin Yu.V., Shapovalov I.O. *Intellektual'noe planirovanie traektorii podvizhnykh ob'ektov v sredakh s prepyatstviyami* [Intelligent planning of vehicles path in the environment with obstacles]. Ed. by V.Kh. Pshikhopov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014. 300 p. ISBN 978-5-9221-1595-7.
8. Pshikhopov V.Kh. Attraktory i repellery v konstruirovani sistem upravleniya podvizhnymi ob'ektami [Attractors and repellers in the design of control systems of mobility-governmental entities]. *Izvestiya TRTU – Izvestiya TSURE*, 2006, no. 3 (58), pp. 49–57.
9. Pshikhopov V.Kh. Organizatsiya repellerov pri dvizhenii mobil'nykh robotov v srede s prepyatstviyami [Repellers forming in the process of mobile robots movements in environment with obstacles]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 2, pp. 34–41.
10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Krukhmalev V.A. Pozitsionno-traektornoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami v trekhmernoi srede s tochechnymi prepyatstviyami [Position-path control of vehicles in the three dimensional environment with point obstacles]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southem Federal University. Engineering sciences*, 2015, no. 1 (162), pp. 238–250.
11. Yurevich E.I., ed. *Intellektual'nye roboty* [Intelligent robots]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 360 p.
12. Yurevich E.I. O probleme gruppovogo upravleniya robotami [About the problem of robots group control]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2004, no. 2, pp. 9–13.
13. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective control of robot groups]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 278 p.
14. Vasil'ev S.N. Ot klassicheskikh zadach regulirovaniya k intellektual'nomu upravleniyu [From classical control problems to intelligent control]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya – Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2001, no. 1, pp. 5–21, no. 2, pp. 5–22. (In Russian)
15. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. *Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh* [Mobile objects control in certain and uncertain environments]. Moscow, Nauka Publ., 2011. 350 p. ISBN 978-5-02-037509-3.
16. Medvedev M.Yu., Lazarev V.S. Algoritm formirovaniya traektorii gruppy podvizhnykh ob'ektov v dvumernoi srede s ispol'zovaniem neustoiichivykh rezhimov [Movement control algorithm for vehicles group in 2-D environments using unstable modes]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (64), pp. 17–29.
17. Day R. Allocating weapons to target complexes by means of nonlinear programming. *Operations Research*, 1966, vol. 14, pp. 992–1013.
18. DenBroeder G., Ellison R., Emerling L. On optimal target assignments. *Operations Research*, 1959, vol. 7, pp. 322–326.

19. Manne A. A target assignment problem. *Operations Research*, 1958, vol. 6, pp. 346–351.
20. Matlin S. A review of the literature on the missile-allocation problem. *Operations Research*, 1970, vol. 18, pp. 334–373.
21. Beloglazov D.A., Gaiduk A.R., Kosenko E.Yu., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Solov'ev V.V., Titov A.Ye., Finaev V.I., Shapovalov I.O. *Grupповое управление подвижными объектами в неопределенных средах* [Group control of mobile vehicle in uncertain environments]. Ed. by V.Kh. Pshikhopov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015. 300 p.
22. Macdonald E. *Multi-robot assignment and formation control*: M.S. electrical and computer engineering. Atlanta, Ga., Georgia Institute of Technology, 2011. 76 p.
23. Yu J., Chung S-J., Voulgaris P. Distance optimal target assignment in robotic networks under communication and sensing constraints. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 2014, pp. 1098–1105.
24. Bertuccelli L., Choi H-L., Cho P., How J. Real-time multi-UAV task assignment in dynamic and uncertain environments. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation, and Control Conference*, Chicago, Illinois, USA, 10–13 August 2009, pp. 1–16. AIAA 2009-5776.
25. Brunet L., Choi H-L., How J. Consensus-based auction approaches for decentralized task assignment. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Honolulu, Hawaii, 18–21 August 2008. pp. 1–24. AIAA 2008-6839.
26. Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with local coordination. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, vol. 24, no. 1, pp. 232–242.
27. Zavlanos M., Pappas G. Sensor-based dynamic assignment in distributed motion planning. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 2007, pp. 3333–3338.