

УДК 621.391

**АГЕНТНЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧЕ СЛЕДОВАНИЯ ПО МАРШРУТУ****Кучеров Д.П.****AGENT-BASED APPROACH TO THE PROBLEM MOVEMENTS BY THE ROUTE****Kuchеров D.**

*В статье рассматривается задача доставки груза агентами – дистанционно управляемыми роботизированными средствами колесного типа. Предполагается, что движение агентов по маршруту происходит колонной, в которую машины выстраиваются на старте, маршрут состоит из участков прямолинейного и криволинейного движения. Выдвигаются требования к параметрам движения, а именно дистанция, максимальный коридор, максимальная средняя скорость. Определяется закон управления движением для обеспечения движения по заданной траектории.*

**Ключевые слова:** маршрут движения, транспортная платформа, параметры движения, траектория.

**Постановка проблемы.** В статье предлагается решение задачи обеспечения доставки груза из одного пункта в другой за минимальное время. Груз не может быть доставлен одним транспортным средством, однако имеется возможность равномерного его перераспределения между транспортными средствами одного класса. Доставка осуществляется транспортными средствами, допускающими дистанционное управление, что, например, может происходить в случаях, связанных с повышенным риском для жизни обслуживающего персонала. В качестве транспортных средств выбраны колесные машины, движущиеся по сухому, невязкому покрытию.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Данная задача относится к задачам группового управления (управления коллективным поведением) мобильными роботами, что является достаточно актуальным направлением развития современной робототехники.

В соответствии с современными представлениями о коллективном управлении [1-3] как агентном управлении в данной постановке задачи будем трактовать транспортные средства как агенты.

Решение задачи, как правило, сводится к выбору маршрута движения и слежения за движением группы (см., например, [1-7]).

Будем считать, что потери груза связаны только с сокращением элементов группы, а причины, приводящие к сокращению числа элементов группы, отсутствуют. В этом случае основной задачей коллективного управления будем считать минимальное время доставки груза.

Данная задача является достаточно популярной среди исследователей, занимающихся дистанционным управлением движущейся транспортной платформы. При этом главное внимание уделялось определению математической модели при дистанционном управлении и построение для этой модели оптимального управления для единичной платформы. Задача может быть усложнена введением дополнительных жестких механических звеньев. При этом на участках криволинейной траектории принцип движения такой сцепки аналогичен передвижению змеи. Однако в последнее время все чаще появляются разработки, ориентированные на коллективное (групповое) управление, не предполагающим наличие жестких связей между отдельными членами группы. К таким работам, относятся работы, например, [1, 3], где предлагается, возможность иерархического представления структуры в виде «ведущий-ведомый» и разделения системы управления на подсистемы программного и позиционного управления. При этом «ведущий» (лидер) определяет цели движения и порядок следования, «ведомый» следует за «ведущим».

Для определения требований к разработке системы управления необходима информация о потенциальных возможностях системы, которая будет обеспечивать безопасность движения по маршруту следования.

Будем считать основными показателями эффективности данной задачи время доставки и исключение потерь груза в процессе движения.

**Цель.** Целью работы является обеспечение доставки груза по определенному маршруту группой из  $n$ -агентов (роботизированных средств).

**Результаты исследований.** Задача доставки груза ставится так, что допускается его распределение между отдельными транспортными средствами в равных долях. Таким образом, выбор количества транспортных средств определяется объемом груза. Груз отдельного транспортного средства полностью определяется габаритами роботизированного средства.

Движение группы осуществляется по трассе произвольной формы с постоянным сцеплением с покрытием дороги. Трасса состоит из участков прямолинейного и криволинейного движения. Транспортные средства движутся колонной из  $n$ -агентов. При этом головная машина исполняет роль лидера группы, т.е. обладает полной информацией о конечной задаче следования группы, а также имеет средства навигации и связи, как с членами группы, так и с оператором, имеющим возможность подсказывать определенные действия в процессе решения задачи. Обобщенная схема движения агентов представлена на рис. 1.

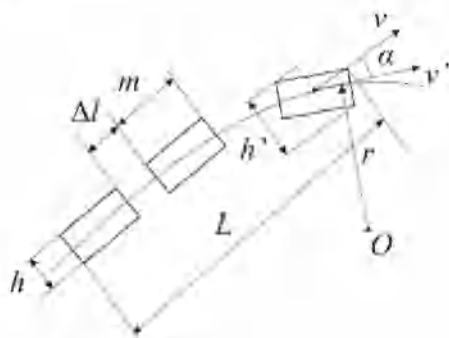


Рис. 1. Схема движения агентов

На рис. 1 введены обозначения:  $h'$  – ширина коридора;  $O$  – центр поворота;  $r$  – радиус поворота;  $v, v'$  – вектор скорости и его тангенциальная составляющая.

Требуется определить максимальные параметры следования группы из  $n$ -транспортных средств с учетом криволинейности траектории движения.

**Параметры следования машин.** С целью обеспечения безопасности движения по маршруту следования группе назначаются постоянная дистанция  $\Delta l$  между автомобилями и поперечный интервал  $\Delta h$ , за который автомобили не выходят. Маршрут состоит из участка старта, участка движения по трассе и участка финиша. Участки старта и финиша не являются точечными. Предполагается, что на участках старта/финиша поворота движение выполняется с ускорением, на прямолинейном участке выполняется равномерное движение. Размер колонны  $L$  на маршруте согласован с количеством машин в группе, размером отдельного транспортного средства  $m$  и величиной дистанции  $\Delta l$

$$L = (n - 1)\Delta l + nm \tag{1}$$

и не может выходить за пределы некоторой величины  $\Delta \delta$ , максимальное значение которой будет опре-

деляться геометрией поворота, параметрами движения и количеством транспортных средств.

Будем считать, что движение группы автомобилей осуществляется в отсутствие жесткой связи между элементами группы, что позволяет рассматривать каждый элемент группы отдельно и определить для него средние значения для коридора и максимальной средней скорости.

Будем искать среднюю скорость движения автомобиля на участке криволинейного движения радиусом  $r$  при условиях, что средняя скорость движения на равномерном участке  $v$ , автомобиль отклоняется от нормали при повороте не более чем на угол  $\alpha$  и сила тяжести в процессе движения автомобиля не изменяется. Тогда скорость автомобиля определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{gr}{\text{tg}\beta}} \tag{2}$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести, а максимальная скорость на криволинейном участке пути с радиусом  $r_{\text{max}}$  и углом отклонения от нормали  $\beta_{\text{max}}$  равна

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{gr_{\text{max}}}{\text{tg}\beta_{\text{max}}}} \tag{3}$$

Максимальная ширина коридора, определяется как разность радиусов двух точек машины – наиболее удаленной от центра поворота и наиболее близкой к нему. Следовательно, на участке криволинейного движения для габаритных размеров транспортного средства по горизонтали  $m$  и  $h$  по вертикали коридор равен

$$\frac{m^2}{r} + h \cos \alpha \leq h_{\text{ком}} \tag{4}$$

В (4) максимальное значение ширины коридора определяется при минимальном значении  $r$  и максимальном  $\alpha$ .

Интервал следования должен обеспечить время на замедление вплоть до полной остановки, в случае, если впереди идущий автомобиль применит экстренное торможение. Из курса физики известно, что тормозной путь  $S_m$  определяется скоростью автомобиля  $v$  в момент начала торможения, а также коэффициентом трения  $\mu$

$$S_m = \frac{v^2}{\mu g} \tag{5}$$

Очевидно, что выбор дистанции в группе, исходя из условий безопасности движения, должен превышать это расстояние в 2...3 раза, т.е.

$$\Delta l = (2 \dots 3) S_m \tag{6}$$

Таким образом, формулы (1)-(5) с учетом замечания (6) полностью определяют требования к движению к группе на маршруте.

**Оптимизация маршрута.** Динамика маршрута описывается дифференциальными уравнениями вида, в соответствии с [1, 3]

$$\dot{x}_i = y_i, \quad \dot{y}_i = u_i(x, y, z), \tag{7}$$

где  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ ,  $y = \{y_1, \dots, y_n\}$ ,  $z = \{z_1, \dots, z_n\}$  – координаты, скорость и ускорение центра масс  $n$  машин в декартовой системе координат, а  $u_i(x, y, z)$  – управляющее воздействие, имеющее смысл ускорения  $i$ -ого средства.

Будем считать, что в системе существует обмен информацией и каждой машине доступна информация о параметрах движения соседнего средства, т.е.  $j$ -е средство имеет информацию о  $j-1$  и  $j+1$  средствах,  $n$ -е средство имеет информацию о  $(n-1)$ -ом.

Тогда закон управления, обеспечивающий следование по траектории, может быть описан в виде

$$u_i = c_k V_i, \quad (8)$$

где  $c_k \neq 0$ ,  $k = 1, 2, 3$ ,

$$V_i = (x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}, z_i - z_{i-1}), \quad (9)$$

а  $i = 1 \dots n$ .

Закон управления (8), (9) представляет гладкую по координатам  $x, y, z$  функцию, позволяет реализовать управление с обратной связью. его эффективность определяется соответствующим выбором  $c_k$ . При выполнении закона (8), (9) каждая машина следует строго по маршруту, определяемому ведущей.

**Моделирование.** Для моделирования закона управления (8), (9) была разработана модель, представленная на рис. 2. Модель состоит из 3-х агентов, обрабатывающих задание, представляющее пилообразный сигнал с линейно-нарастающим и линейно-

спадающими фронтами, который формируется генератором. Данный сигнал поступает на входы агентов. Каждый агент представляет собой двойной интегратор, охваченный стабилизирующими обратными связями. Все агенты имеют одинаковые параметры, они отличаются только начальными условиями, определяемые исходными координатами. Уравнения (5) при моделировании принимают вид

$$\dot{x}_i = y_i, \quad \dot{y}_i = ku_i. \quad (10)$$

В (10)  $x_i, y_i$  – выходная координата и ее производная соответственно.  $i = 1, 2, 3$ , коэффициент  $k = 5$ . Начальные координаты агентов 1-3 равны (5, 0), (0, 0) и (-2, 0).

Задающее воздействие  $u(t)$  в интервале от  $t = [1, 10]$  описывается законом

$$u(t) = \begin{cases} 2/3t, & 0 \leq t \leq 6, \\ -t + 10, & 6 \leq t \leq 10. \end{cases} \quad (11)$$

В интересах изучения свойств структуры из трех агентов исследуется следование группы только по одной плоскостной координате.

На рис. 3 представлены траектории движения системы агентов. Из рис. 3 видно, что система позволяет отслеживать траекторию. Ошибки слежения связаны с произвольным выбором параметров системы.

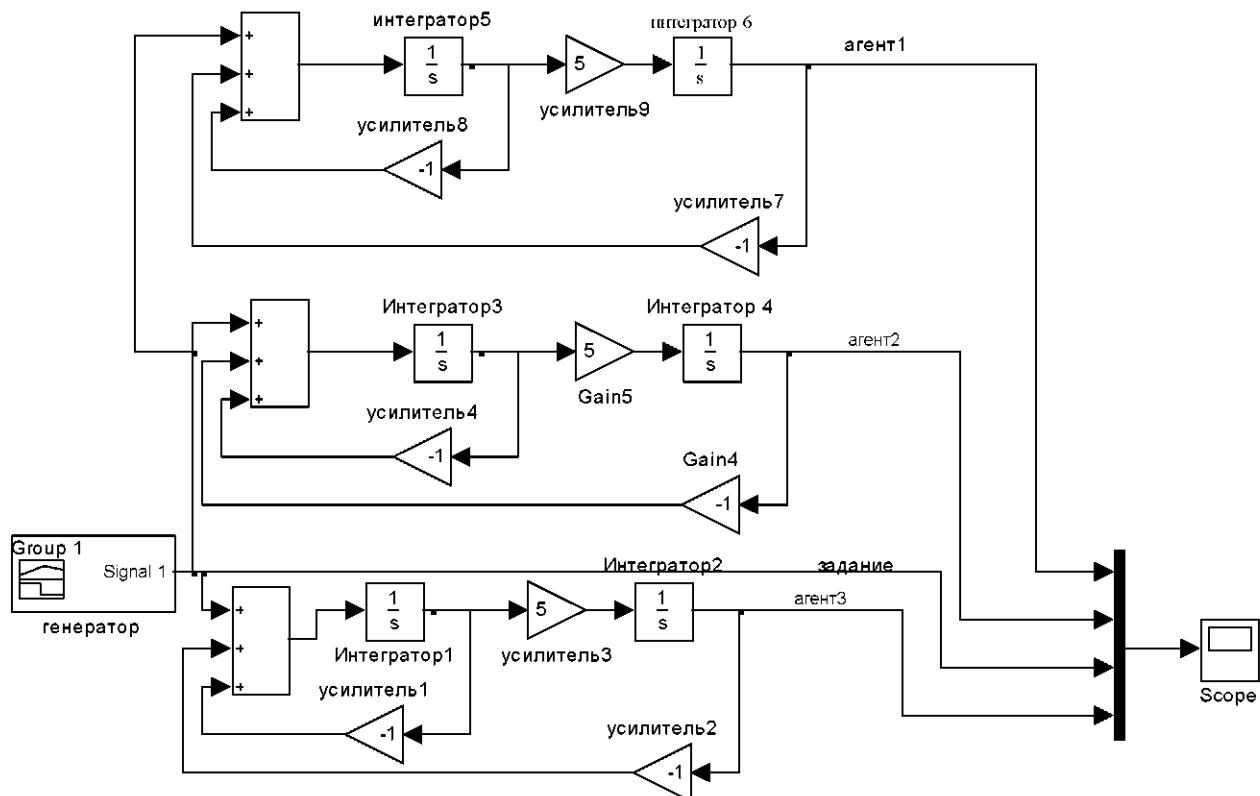


Рис. 2. Модель из 3-х агентов, обрабатывающих задание

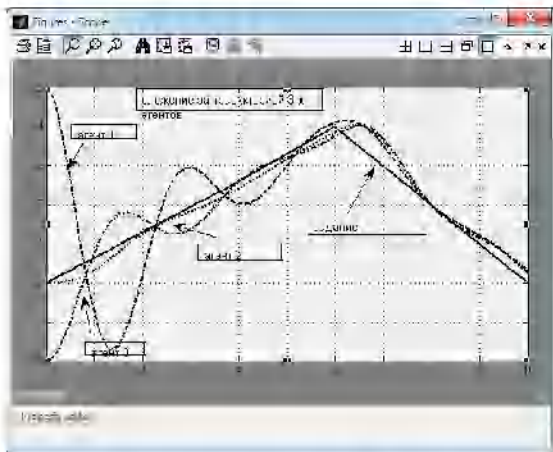


Рис. 3. Траектории агентов 1-3 и задание

**Выводы.** В статье обосновываются требования к параметрам движения колонны роботизированных средств, условия выполнения движения, исходя из представлений о физических законах движения транспортных средств. Реальная динамика маршрута определяется математической моделью системы, представляющей систему дифференциальных уравнений второго порядка. Дальнейшие исследования следует направить на оптимизацию закона управления.

#### Литература

1. Морозов Ю.В. Модификация и сравнительный анализ гладких законов управления группой агентов / Ю.В. Морозов // Автоматика и телемеханика. – № 11. – 2012. – С. 96-113.
2. Кунцевич В.М. Некоторые задачи управления групповым движением подвижных роботов / В.М. Кунцевич // Проблемы управления и автоматика. – № 1. – 2012. – С. 5-18.
3. Ларин В.В. Об отслеживании программной траектории колесным транспортным роботом / В.В. Ларин // Проблемы управления и автоматика. – № 1. – 2013. – С. 139-146.
4. Кучеров Д.П. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА / Д.П. Кучеров, А.Н. Козуб // Искусственный интеллект. – № 4 (62). – 2013. – С. 333-343.
5. Кучеров Д.П. Планирование маршрута беспилотных летательных аппаратов / Д.П. Кучеров, А.Н. Козуб // Вісник СНУ ім. В. Даша. – № 5, ч. 1. – 2013. – С. 189-192.
6. Горелов В.А. Математическая модель криволинейного движения автопоезда по недеформируемому опорному основанию / В.А. Горелов, С.А. Тропин // Журнал автомобильных инженеров. – № 5 (70). – 2011. – С. 18-22. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.aae-press.ru/f70/14.pdf>.
7. Любавский Д.С. Теоретическое исследование устойчивости на поворотах автопоезда, оснащенного управляемой пневматической подвеской / Д.С. Любавский // Научный журнал КубГАУ. – № 82 (08). – 2012. – С. 1-10. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/11.pdf>.
2. Kunccevic V.M. Nekotore zadachi upravleniya grupovim dvizheniem podvizhnyh robotov / V.M. Kunccevic // Problemi upravleniya i avtomatiki. – № 1. – 2012. – P. 5-18.
3. Larin V.B. Ob otelezhivanii programnoj tracktorii kolosnim transportnim robotom / V.B. Larin // Problemi upravleniya i avtomatiki. – № 1. – 2013. – P. 139-146.
4. Kuchero D.P. Integracionnij podhod k zadache vibora marshruta gruppi BPLA / D.P. Kuchero, A.N. Kozub // Iskustvennij intellekt. – № 4 (62). – 2013. – P. 333-343.
5. Kuchero D.P. Planirovanie marshruta BPLA / D.P. Kuchero, A.N. Kozub // Visnik SNU im. V. Dasha. – № 5. – 2013. – P. 189-192.
6. Gorelov V.A. Matematicheskaja model krivolinejnogo dvizhenia avtopoezda po nedeformiruemu opornomu osnovaniu / V.A. Gorelov, S.A. Tropin // Zhurnal avtomobilnyh inzhenerov. – № 5 (70). – 2011. – P. 18-22. – [Electronic resource]. – Mode of access: URL: <http://www.aae-press.ru/f70/14.pdf>.
7. Lubavskij D.S. Teoreticheskoe issledovanie ustojchivosti na povorotah avtopoezda, osnashchennogo upravliaemoj pnevmaticheskoi podveskoj / D.S. Lubavskij // Nauchnij zhurnal KubGAU. – № 82 (08). – 2012. – P. 1-10. – [Electronic resource]. – Mode of access: URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/11.pdf>.

#### Кучеров Д.П. Агентный підхід до задачі слідування по маршруту

У статті розглядається задача доставки вантажу агентами – дистанційно керованими роботизованими засобами колективного типу. Передбачається, що рух транспортних засобів по маршруту відбувається колоною, в яку машини виймаються на старті, маршрут складається з ділянок прямолинійного та криволинійного рухів. Висуваються вимоги до параметрів руху, а саме дистанція, максимальний коридор, максимальна середня швидкість. Визначається закон керування рухом для забезпечення руху по заданій траєкторії.

**Ключові слова:** агент, маршрут руху, транспортна платформа, параметри руху, траєкторія.

#### Kuchero D. Agent-based approach to the problem movements by the route

In this paper the problem of delivery of cargo remotely controlled robotic machines is considered. According to modern ideas on the management of the collective behavior of such machines the set of robotic machines called agents. The main purpose is to ensure the delivery of cargo on a particular route a group of n-agents. It is proposed that vehicular traffic along the route there is a column in which the machines are lined up at the start; the route consists of sections of straight and curved movements. Requirements to the motion parameters such as distance, maximum interval, average maximum speed are determined. These requirements are determined by the physical representations of the movement of vehicles. Dynamics of the objects described by a system of differential equation of the first order. Determine the traffic control law for motion along a given trajectory.

**Keywords:** agent, route, transport platform, motion parameters, trajectory.

Кучеров Д.П. – д.т.н., професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, НАУ, м. Київ, Україна, e-mail: [d\\_kuchero@ukr.net](mailto:d_kuchero@ukr.net).

Рецензент: Ульпин В.О., д.т.н., проф.

Стаття подана 13.05.2014

#### References

1. Morozov U.V. Modifikacia i sravnitel'nyj analiz gladkih zakonov upravleniya gruppoj agentov / U.V. Morozov // Avtomatika i telemchanika. – № 11. – 2012. – P. 96-113.