

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА СТАЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СРЕДЫ

Е.М. Воронов
Н.О. Хубларов

emvoronov@mail.ru
nkhublarov@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Описано создание программного имитационного комплекса в среде MATLAB 2017b для моделирования задачи стайного управления группой роботов, перемещающих платформу с заданной скоростью в некоторую целевую область плоскости движения в условиях постоянного возмущения среды. Приведены результаты моделирования решения задачи для группы из двух и четырех роботов. На базе программного комплекса в дальнейшем планируется моделирование более сложных задач стайного управления, таких как перехват цели группой малых авиационных средств поражения. Основной особенностью стайного управления является минимальный объем потребляемой информации. Такой подход увеличивает живучесть системы в целом. Время принятия группового решения практически не зависит от числа роботов в стае. Каждый робот изменяет параметры платформы, на которые влияют своими действиями и другие роботы. На основе измерений каждый робот в стае находит оптимальное управление в условиях ограниченной информации по отношению к конфигурации системы и целевых требований, что и обеспечивает выполнение поставленной задачи. Каждый робот работает независимо от других роботов

Ключевые слова

Стайное управление, имитационное моделирование, алгоритмы управления

Поступила 23.10.2018

© Автор(ы), 2019

Постановка задачи. Пусть положение массивного (круглого) плоского тела M с известной массой m , радиусом r и моментом инерции J описывается тремя параметрами: координатами x и y его центра масс и углом ψ на плоскости в правой системе координат (рис. 1).

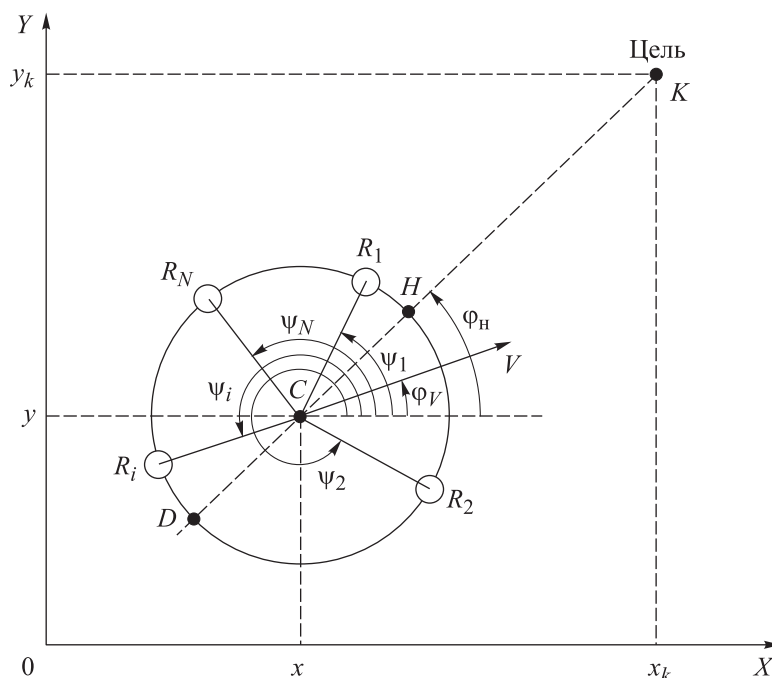


Рис. 1. Система координат

Платформа M располагается на горизонтальной плоскости и при перемещениях испытывает влияние сил трения. В произвольных точках периметра платформы M располагаются роботы R_i , $i = (1, N)$. Положение робота R_i на периметре платформы M определяется углом ψ_i (см. рис. 1 и 2).

Каждый робот может менять положение тела M с помощью некоторой силы тяги P_i , действующей под углом φ_i к оси X (см. рис. 2). Иными словами, действие \overline{A}_i робота R_i описывается вектором

$$\overline{A}_i = [a_1^i, a_2^i]; \quad a_1^i = P_i; \quad a_2^i = \varphi_i; \quad \varphi_i = \psi_i \pm \mu \frac{\pi}{2}, \quad \mu = 0, 1, 2. \quad (1)$$

Цель действий стаи роботов R_i , $i = (1, N)$, заключается в перемещении с заданной скоростью платформы M из точки C исходного положения с координатами (x_0, y_0) к точке K конечного (целевого) положения с координатами (x_k, y_k) при ограничениях $P_i \leq P_{\max}$ по кратчайшему пу-

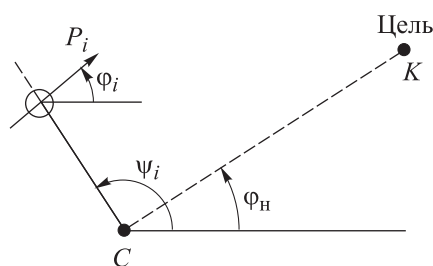


Рис. 2. Углы ориентации объекта

ти. При решении данной задачи принимаем, что суммарная масса всех роботов R_i по сравнению с массой платформы M и влияние распределения роботов по периметру тела на момент инерции системы пренебрежимо малы.

Роботы в задаче будут действовать циклически, т. е. действие-управление $\overline{A_{i, k}}$, формируемое роботом R_j , остается постоянным в течение некоторого времени Δt , а затем меняется на новое $\overline{A_{i, k+1}}$. Период Δt — постоянная величина, одинаковая для всех роботов. Расчет действия-управления $\overline{A_{i, k+1}}$ проводится каждым роботом самостоятельно в течение одного k -го периода. При этом период времени Δt достаточно мал, так что уравнения движения платформы можно считать непрерывными. Роботы в процессе движения используют лишь информацию об изменениях собственного положения, т. е. число других роботов и их расположение каждому из стаи роботов R_i неизвестны. Координаты цели и параметры платформы не меняются и известны всем роботам.

В рассматриваемой ситуации тело совершает плоские горизонтальные перемещения и вращательное движение вокруг центра масс, поэтому на тело со стороны плоскости XU действует сила трения и момент сопротивления, которые можно для простоты рассматривать как некое постоянное противодействие роботам стаи. Примем, что их величины пропорциональны квадрату скорости соответствующего движения. При решении задачи допускаем, что роботы R_i испытывают пренебрежимо малое трение. Поскольку положение роботов относительно тела не меняется, то в качестве угла ψ примем угол ориентации ψ_1 первого робота, т. е. далее $\psi = \psi_1$.

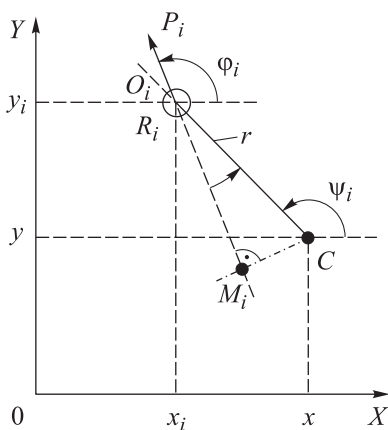


Рис. 3. Определение плеча силы тяги робота

Рассмотрим рис. 3; здесь P_i — сила тяги, развиваемая роботом R_i и направленная из точки O_i под некоторым углом φ_i ; отрезок CM_i — перпендикуляр, опущенный из точки C на направление силы P_i . Этот отрезок является плечом силы P_i , причем его длина l_i из треугольника O_iCM_i равна

$$l_i = r \sin \alpha_i, \quad (2)$$

где r — радиус тела.

Из того же треугольника находим, что

$$\alpha_i = (\psi_i - \varphi_i) \Rightarrow l_i = r \sin(\psi_i - \varphi_i). \quad (3)$$

Таким образом, согласно рис. 2 и 3, уравнения, задающие движение центра масс тела M в зависимости от действий всех роботов R_i , имеют вид:

$$m\ddot{x} = \sum_{i=1}^N P_i \cos \varphi_i - w_c \dot{x} |\dot{x}|; \quad (4)$$

$$m\ddot{y} = \sum_{i=1}^N P_i \sin \varphi_i - w_c \dot{y} |\dot{y}|; \quad (5)$$

$$J\ddot{\psi} = \sum_{i=1}^N P_i r \sin(\psi_i - \varphi_i) - w_r \dot{\psi} |\dot{\psi}|. \quad (6)$$

Здесь w_c, w_r — коэффициенты вязкого трения сопротивления продольному и вращательному движениям тела.

Угловая скорость $\omega = \dot{\psi}$ всегда направлена по вертикальной оси, так как движение тела плоскопараллельное. Значение скорости V и ее направление φ_V определяются по формулам:

$$V = \sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2}; \quad (7)$$

$$\varphi_V = \arg(\dot{x} + j\dot{y}). \quad (8)$$

В рассматриваемой задаче телом, на которое действуют роботы стаи, является платформа M . Поэтому вектор состояния платформы здесь имеет вид

$$\bar{E} = (x, y, \psi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{\psi}). \quad (9)$$

Начальное и конечное состояния платформы запишем как

$$\bar{E}^0 = (x_0, y_0, \psi_0, 0, 0, 0) \quad (10)$$

и

$$\bar{E}^k = (x_k, y_k, \psi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{\psi}). \quad (11)$$

Причем условием достижения цели считается

$$\sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2} = \alpha_k r, \quad (12)$$

где α_k — некоторое положительное число.

Выражения, описывающие изменения состояния платформы M под действием всех роботов R_i , $i = (1, N)$, входящих в стаю, согласно (4)–(6), имеют вид:

$$\dot{x} = V_x, \quad \dot{V}_x = m^{-1} \left(\sum_{i=1}^N P_i \cos \varphi_i - w_c |V_x| V_x \right); \quad (13)$$

$$\dot{y} = V_y, \dot{V}_y = m^{-1} \left(\sum_{i=1}^N P_i \sin \varphi_i - w_c |V_y| V_y \right); \quad (14)$$

$$\dot{\psi} = \omega, \dot{\omega} = J^{-1} \left(- \sum_{i=1}^N P_i r \sin(\psi_i - \varphi_i) - w_r |\omega| \omega \right). \quad (15)$$

Индивидуальная модель робота R_i описывается равенствами:

$$\dot{x}_i = V_{xi}, \dot{V}_{xi} = m^{-1} (P_i \cos \varphi_i - w_c |V_{xi}| V_{xi}); \quad (16)$$

$$\dot{y}_i = V_{yi}, \dot{V}_{yi} = m^{-1} (P_i \sin \varphi_i - w_c |V_{yi}| V_{yi}); \quad (17)$$

$$\dot{\psi}_i = \omega_i, \dot{\omega}_i = J^{-1} (-P_i r \sin(\psi_i - \varphi_i) - w_r |\omega_i| \omega_i). \quad (18)$$

Задача синтеза стайного управления роботами R_i , $i = \overline{1, N}$, в данном случае заключается в разработке алгоритма выбора каждым роботом R_i величины силы тяги $P_i \in [0, P_{\max}]$ и ее направления φ_i . В настоящей работе эта задача решается на основе следующих предпосылок.

Платформа M при заданной скорости V_3 , постоянно направленной на цель, переместится к цели за время t_3 . В общем случае при наличии некоторого числа роботов время перемещения t будет равно t_3 при выполнении следующих условий:

$$\omega(t) = 0; \quad (19)$$

$$\varphi_V(t) = \varphi_H(t); \quad (20)$$

$$V(t) = V_3 = \text{const}; \quad (21)$$

$$l(t) > \beta r, \quad (22)$$

где $l(t) = \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2}$ — расстояние между целью и телом в момент времени t ; $\varphi_H(t)$ — угол, характеризующий направление на цель в принятой системе координат.

При произвольном несимметричном расположении роботов приведенные соотношения могут рассматриваться как некоторая текущая цель, совместное достижение и поддержание которой обеспечит выполнение основной задачи управления — перемещение тела к цели с заданной скоростью за кратчайшее время. Эти условия играют роль указанной объективной оценки состояния платформы M и могут использоваться для согласования действий роботов R_i , не связанных друг с другом информационными каналами.

Постановка взята из [1–4], где рассматриваемая задача решается на основе нейросетевого подхода. В настоящей статье предлагается иной подход к решению той же задачи.

Алгоритм стайного управления. В рамках настоящей работы реализован простой, но эффективный алгоритм стайного управления роботами для решения сформулированной задачи. Алгоритм не универсален и применим лишь в случае хорошего демпфирования движения силами трения, но не использует нейронную сеть. Для моделирования применен программный пакет MATLAB 2017b. Математическая модель движения платформы M вместе с роботами создана в Simulink, а вывод результата оформлен в отдельном скрипте.

Выберем интервал времени Δt , на котором управление будет постоянным, при реализации настоящей задачи он равен 0,01 с.

В течение каждого интервала времени роботами будут осуществляться следующие действия.

Шаг 1. Определение направления на цель, т. е. определение угла между текущим расположением центра масс платформы M и цели (от 0 до 360°).

Шаг 2. Выбор модуля силы тяги и направления вектора силы тяги, создаваемой роботом (с учетом принятых ограничений).

Шаг 3. Применение управления к платформе M . Далее в течение одного такта $\Delta t = 0,01$ с управление остается неизменным. За это время осуществляется шаг 4.

Шаг 4. Расчет ожидаемых параметров платформы M в результате применения управления, вычисленного на шаге 2, спустя Δt согласно выражениям (13)–(15).

Шаг 5. Расчет собственных координат робота согласно выражениям (16)–(18).

Определение направления на цель на каждой итерации алгоритма осуществляется для последующего выбора направления вектора силы тяги, создаваемой роботом, по формуле

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{y_k - y}{x_k - x}\right), \quad (23)$$

где x, y — текущие координаты центра платформы M ; x_k, y_k — координаты цели.

Модуль силы тяги и направление вектора силы тяги выбирают, исходя из следующих соображений [1].

В начальный момент времени скорость платформы M равна нулю. Каждый робот выбирает направление вектора своей тяги таким образом, чтобы проекция силы тяги на направление к цели была максимальной. Модуль вектора силы тяги принимаем максимальным. Таким образом, осуществляется разгон платформы M до требуемой скорости за кратчай-

шее время. Спустя некоторое число тактов платформа M будет двигаться с заданной скоростью, но направление вектора скорости в общем случае не совпадает с направлением на цель. Теперь роботы выбирают направления вектора своей тяги так, чтобы создать максимальный крутящий момент, который, в свою очередь, повернет платформу M так, чтобы выполнялось условие

$$\varphi_V(t) = \varphi_H(t).$$

Модуль вектора тяги здесь также берем максимально возможным, что обеспечивает наиболее быстрый разворот скорости тела M точно на цель. Такой алгоритм управления прост в реализации, но при этом он эффективно работает лишь в случае хорошего демпфирования со стороны плоскости движения. Более универсальный алгоритм предполагает разделение роботов на две группы после достижения заданной скорости — одни поддерживают модуль скорости неизменным, другие создают крутящий момент, поворачивающий вектор скорости по направлению к цели. Такой алгоритм сложнее в реализации и на практике в рамках настоящей работы не используется.

В созданной программно-имитационной модели каждое действие робота (шаги 1–5) оформлено в отдельный блок-функцию.

Рассмотрим результаты моделирования, оценим работоспособность и эффективность применяемого алгоритма.

Результаты моделирования. Созданный программно-имитационный комплекс состоит из 9 основных блоков-функций.

1. Функция определения текущего направления на цель (соответствует шагу 1 алгоритма).

2. Функция принятия решения (одна для каждого робота, соответствует шагу 2 алгоритма).

3. Функция расчета ожидаемых параметров платформы M после применения выбранного действия (по одной для каждого робота, соответствует шагу 4 алгоритма).

4. Функция расчета параметров движения платформы M , которая соответствует шагу 3 алгоритма.

5. Блок двойного интегрирования полученных на входе функций ускорений (двух линейных и одного углового), что при заданных начальных условиях обеспечивает нахождение текущих скорости и координат платформы M .

6. Функция преобразования углов ψ_i ($0 < \psi_i < 6,28$ рад).

7. Функция определения текущего направления вектора скорости платформы M .

8. Функция вычисления текущих координат роботов для их последующего отображения на графике.

9. Блоки с параметрами плоскости движения, тела M и параметрами роботов.

Проверим работоспособность модели при следующих условиях. Роботов два; максимальная тяга первого и второго роботов 5 Н; масса платформы M 100 кг; момент инерции платформы M 100 кг · м²; радиус платформы M 1 м; требуемая скорость 0,5 м/с; коэффициенты трения: $w_c = 80$, $w_r = 80$; координаты цели: $x_k = 5$, $y_k = 3$; начальное угловое положение первого и второго роботов 0 и 3,14 рад.

Радиус области, при попадании в которую центра масс платформы M считается, что цель достигнута, равен 0,1 м.

В данном примере имеем гомогенную группу из двух роботов. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

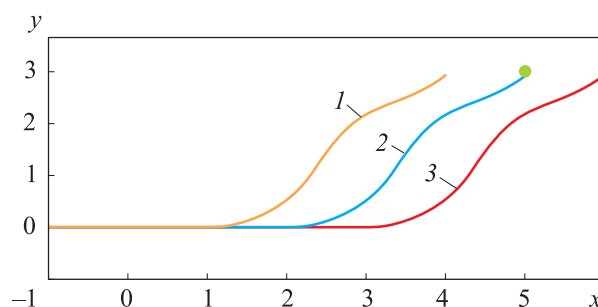


Рис. 4. Результаты моделирования с указанными параметрами

На рис. 4 видно: кривая 1 соответствует траектории движения первого робота, кривая 2 — траектории движения центра масс платформы M , кривая 3 — траектории движения второго робота. В окрестности точки с координатами [5, 3] выделена область, куда роботы должны доставить центр масс платформы M с заданной скоростью. Очевидно, что алгоритм стайного управления является работоспособным и эффективным, однако роботы движутся не по кратчайшему пути, что объясняется в первую очередь тем, что каждый робот принимает решение о следующем действии на основе лишь только той ограниченной информации, которой он обладает, и действия роботов не согласованы.

Очевидно, что роботы справились с поставленной задачей перемещения платформы M , но по условию задачи это было необходимо сделать с постоянной скоростью $V_3 = 0,5$ м/с. Проанализируем график зависимости скорости от времени, чтобы понять, справились ли роботы с этой задачей на основе существующего алгоритма.

Из рис. 5 следует, что роботы так и не добиваются поставленной перед ними цели — разогнать платформу M до 0,5 м/с. Объясняется это просто — сопротивление плоскости движения пропорционально квадрату скорости платформы. В параметрах моделирования были выбраны такие высокие коэффициенты сопротивления среды, что при достижении определенной скорости роботы посредством располагаемой тяги не могут увеличить скорость платформы M . Однако, несмотря на противодействие со стороны плоскости движения, мешающее выполнению роботами поставленной перед ними задачи, роботы делают все возможное для достижения стайной цели. В результате роботы перемещают платформу M в нужную область с максимально возможной в данных конкретных условиях скоростью. Моделирование заканчивается при $t = 19,19$ с (цель достигнута).

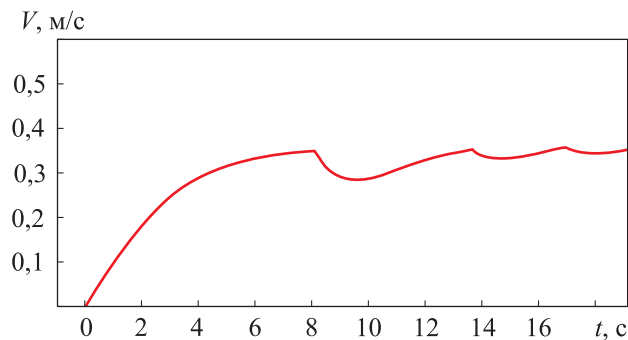


Рис. 5. Зависимость скорости от времени при выбранных параметрах моделирования

Уменьшение скорости после разгона происходит из-за несовершенства алгоритма принятия решения. После разгона тела роботы начинают осуществлять поворот вектора скорости, что неизбежно приводит к падению модуля скорости при таких высоких коэффициентах сопротивления. Роботы не могут моментально компенсировать это падение в рамках располагаемой тяги. Эту проблему можно решить, если модифицировать алгоритм принятия решения.

Разработанный программно-имитационный комплекс является гибким — все параметры тела и роботов можно изменять, таким образом, наблюдая, как изменения какого-то конкретного параметра влияют на результаты моделирования. Также можно менять и алгоритм принятия решения каждым роботом в блоке принятия решений. Дополнив представленную схему (добавив дополнительные блоки) можно увеличить число роботов. Далее рассмотрим ситуацию, где тело M будут перемещать четыре робота.

Параметры моделирования. Число роботов четыре; максимальная тяга каждого робота 5 Н; масса платформы M 100 кг; момент инерции платформы M 100 кг · м²; радиус платформы M 1 м; требуемая скорость 0,5 м/с; коэффициенты трения $w_c = 60$, $w_r = 60$; координаты цели $x_k = 10$, $y_k = 2$; начальные угловые положения первого — четвертого роботов 0, 3,14 рад, 3,8397 рад и 5,9341 рад соответственно.

Радиус области, при попадании в которую центра масс платформы M будем считать, что цель достигнута, равен 0,1 м.

Результаты моделирования приведены на рис. 6 и 7.

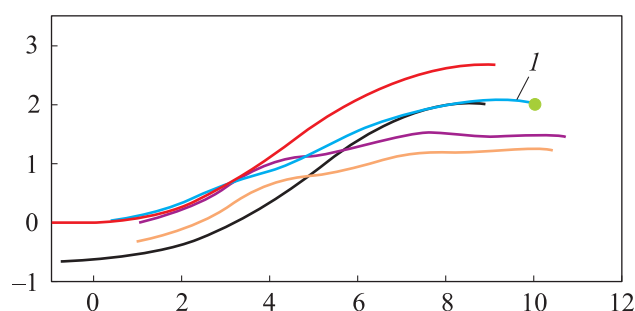


Рис. 6. Траектория движения четырех роботов и центра масс платформы M (кривая 1)

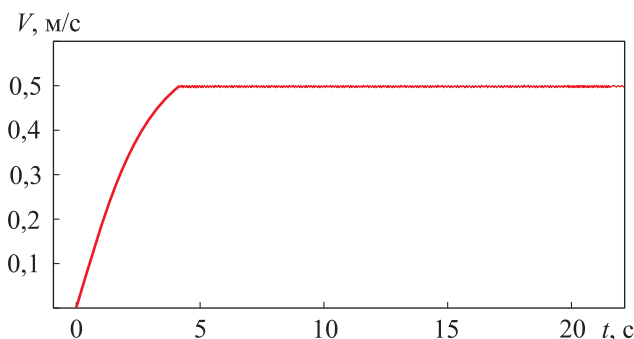


Рис. 7. Зависимость скорости центра масс платформы M от времени в процессе движения

Роботы достигают цели за $t = 22,04$ с. В целом по результатам нескольких моделирований с разными параметрами можно сделать вывод, что чем больше роботов, тем эффективнее они решают общую стайную задачу при всех прочих равных. Это подтверждает и график зависимости модуля скорости от времени (рис. 7). При четырех роботах скорость постоянно поддерживается на необходимом уровне, при этом развороты платформы M осуществляются плавно, скорость при поворотах не теряется.

Выводы. 1. Децентрализованное стайное управление целесообразно использовать в системах, где очень важен высокий показатель живучести системы, где принятие решения каждым членом группы должно осуществляться в масштабе реального времени и как можно быстрее. При этом каждый член группы принимает решение, оптимальное с точки зрения имеющейся у него на данный момент информации, но общий результат, как правило, не является оптимальным (однако он способствует достижению стайной цели) [1–10].

2. При реализации децентрализованного стайного управления группой роботов в условии недетерминированной среды и заранее неизвестного организованного противодействия целесообразно строить систему управления роботом на базе нейронной сети [1, 5, 6]. При этом простые задачи (например, с постоянным или заранее известным противодействием со стороны среды) можно эффективно решать и без применения нейронной сети. Этот подход заметно упрощает техническую реализацию системы, но сказывается на качестве решения задачи, если система не была заранее настроена на функционирование в известных условиях. Система управления роботом будет замкнутой, при этом роль обратной связи будут играть датчики, которые измеряют текущее состояние платформы.

3. При реализации децентрализованного стайного управления группой роботов без использования нейронной сети качество решения сильно зависит от блока принятия решения роботом. В рассматриваемой задаче можно дополнить существующий алгоритм эффективным алгоритмом торможения роботов при приближении к цели. Можно реализовать модифицированный алгоритм, при котором после разгона роботы делятся на две категории в зависимости от своего расположения относительно текущего вектора скорости — одни поддерживают неизменным модуль скорости, другие разворачивают вектор скорости тела M по направлению к цели.

4. Результаты моделирования позволяют заключить, что увеличение числа роботов в группе при всех прочих равных условиях улучшает качество решения и положительно сказывается на эффективности действия всей группы в совокупности.

5. Смоделированная в настоящей работе практическая задача является тестовой, учебной. На базе разработанной программно-имитационной модели в будущих работах планируется реализация децентрализованного стайного управления строем группы малых беспилотных летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М., Физматлит, 2009.
- [2] Каляев И.А. Принципы коллективного принятия решения и управления при групповом взаимодействии роботов. *Мобильные роботы и мехатронные системы. Мат. науч. школы-конф.* М., Изд-во МГУ, 2000, с. 204–221.
- [3] Каляев И.А., Гайдук А.Р. Стайные принципы управления в группе объектов. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2004, № 12, с. 27–38.
- [4] Каляев И.А., Капустян С.Г., Усачев Л.Ж. Основы построения распределенных систем управления коллективами роботов. *Информационные технологии*, 1998, № 5, с. 13–18.
- [5] Васильев В.И., Пантелеев С.В. Нейроуправление — новый раздел теории управления сложными системами. *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*, 2005, № 5, с. 33–45.
- [6] Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М., Горячая линия-Телеком, 2003.
- [7] Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели. *Управление большими системами*, 2010, № 30-1, с. 605–639.
- [8] Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных игровых решений. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
- [9] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Ванин А.В. Оптимизация управления структурно сложными системами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-10-1080
- [10] Воронов Е.М., Семенов С.С., Полтавский А.А. и др. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М., Ленанд, 2016.

Воронов Евгений Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Хубларов Никита Олегович — студент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Воронов Е.М., Хубларов Н.О. Формирование алгоритма стайного управления группой роботов в условиях постоянного возмущения среды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 4, с. 4–17.

DOI: 10.18698/0236-3933-2019-4-4-17

DESIGNING A SWARM CONTROL ALGORITHM FOR A GROUP OF ROBOTS IN A PERSISTENTLY DISTURBED ENVIRONMENT

E.M. Voronov

emvoronov@mail.ru

N.O. Khublarov

nkhublarov@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper describes the development of a software simulation package in the MATLAB 2017b environment for modelling the problem of swarm control of a group of robots moving a platform at a preset velocity to a certain target region of the motion plane when the environment is persistently disturbed. We present simulation results for solving the problem for groups of two and four robots. We plan to use the software package as a basis for implementing more complex swarm control problems, such as target interception by a group of small smart weapons. The main feature of swarm control is minimum amount of information used. This approach improves the survivability of the system as a whole. Group decision-making time virtually does not depend on the number of robots in the swarm. Each robot changes those parameters of the platform that are also affected by the actions of other robots. Each robot in the swarm uses measurements to arrive at optimum control in limited information conditions relative to the system configuration and target requirements, which is what ensures completion of the task posed. Each robot operates independently from others

Keywords

Swarm control, simulation, control algorithms

Received 23.10.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009.
- [2] Kalyaev I.A. [Principles of group decision making and control at group interaction of robots]. *Mobil'nye roboty i mekhatronnyye sistemy. Mat. nauch. shkoly-konf.* [Mobile robots and mechatronic systems. Proc. Sci. School-Conf.]. Moscow, MSU Publ., 2000, pp. 204–221.
- [3] Kalyaev I.A., Gayduk A.R. Group control strategies in groups of objects. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no. 12, pp. 27–38 (in Russ.).

- [4] Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Usachev L.Zh. Fundamentals of engineering distributed control system for groups of robots. *Informatsionnye tekhnologii*, 1998, no. 5, pp. 13–18 (in Russ.).
- [5] Vasil'yev V.I., Panteleev S.V. Neurocontrol — a new part of complex system management theory. *Neyrokomp'yutery: razrabotka i primeneniye* [Neurocomputers], 2005, no. 5, pp. 33–45 (in Russ.).
- [6] Komashinskiy V.I., Smirnov D.A. Neyronnye seti i ikh primeneniye v sistemakh upravleniya i svyazi [Neuron networks and their application in control and communications systems]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2003.
- [7] Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Gayduk A.R. Self-organizing distributed control systems of intellectual robot groups constructed on the basis of network model. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large-Scale Systems Control], 2010, no. 30-1, pp. 605–639 (in Russ.).
- [8] Voronov E.M. Metody optimizatsii upravleniya mnogoob'ektnymi mnogokriterial'nymi sistemami na osnove stabil'no-effektivnykh igrovyykh resheniy [Methods of control optimization on multi-objective multi-criteria systems based on stable effective game solutions]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001.
- [9] Voronov E.M., Karpunin A.A., Vanin A.V. Optimizatsiya upravleniya strukturno slozhnymi sistemami. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 10 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-10-1080
- [10] Voronov E.M., Semenov S.S., Poltavskiy A.A., et al. Control optimization of structurally complex systems. Moscow, Lenand Publ., 2016.

Voronov E.M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Khublarov N.O. — Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Voronov E.M., Khublarov N.O. Designing a swarm control algorithm for a group of robots in a persistently disturbed environment. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 4, pp. 4–17 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-4-4-17