

АНАЛИЗ АГРЕГАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В АЛГОРИТМЕ СТАЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ

А. Ю. Ефремов

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

✉ andre@ipu.ru

Аннотация. Исследована задача агрегации группы мобильных роботов в свободном пространстве в предположении, что робот имеет информацию только о положении и курсе ближайших соседей, дополнительная информация, такая как групповая цель, у него отсутствует. Подобная задача является первым этапом выполнения миссии группой роботов; показано, что ее решение возможно при выполнении некоторых условий. Предложен алгоритм стайного управления, основанный на метрико-топологическом подходе, в предположении, что существуют ограничения на маневрирование. Выбраны размеры и конфигурация арен и заданы требования к относительному расположению роботов в начальный момент времени. На основе имитационного моделирования для выбранных характеристик роботов определены параметры модели, позволяющие достичь заданной согласованности движения стаи по направлению, избежать кластеризации и выдержать безопасное расстояние во время всей миссии.

Ключевые слова: стайная робототехника, агрегация, выравнивание, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Агрегация – одно из наиболее фундаментальных проявлений поведения стай в природе. В естественной стае животным важно держаться вместе, поскольку в противном случае она разделится на несколько частей, уменьшится в размерах и в конечном итоге ее выживание может оказаться под угрозой. Агрегация часто является необходимостью и для многих роботизированных систем, поскольку она является предпосылкой для других совместных действий. Кроме того, разделение стаи на отдельные, несвязанные части (кластеризация или потеря связности стаи) может привести к невозможности выполнения поставленной задачи.

Агрегация возможна либо на основе сигнала, либо на основе самоорганизации. В первом случае стая собирается в местах, которые определяются по сигналам, исходящим от окружающей среды, – например, в самом теплом месте или в самом светлом и т. п. Первым и наиболее популярным алго-

ритмом такого рода для роботов является BEECLUST [1], основанный на поведении молодых медоносных пчел.

Для второго случая наиболее известными примерами в природе являются стаи птиц, косяки рыб и т. п. Классической является работа К. Рейнольдса [2], где он впервые представил распределенную поведенческую модель движения такой стаи для компьютерного моделирования. Предложенная им модель самоорганизованного координированного движения группы автономных мобильных объектов предусматривает три простых правила управления скоростью и курсом, которые описывают маневрирование отдельных объектов на основе положений и скоростей ближайших соседей: отталкивание (избегание столкновений с соседями); выравнивание (движение в том же направлении, что и соседи); притяжение (выдерживание одинакового расстояния между соседями, не допуская разделения стаи). Эти три правила использовались в дальнейших работах в различных комбинациях и вариациях.

Стайная робототехника (*swarm robotics*) возникла как подход, направленный на выполнение задачи с помощью нескольких роботов с ограниченными и простыми возможностями. Такие роботы движутся, принимая решения только самостоятельно, без влияния извне, они взаимодействуют со своей средой и устанавливают локальное взаимодействие друг с другом.

В предлагаемом исследовании задача агрегации рассматривается как первый этап выполнения задания группой мобильных роботов, а алгоритм управления будет построен на основе принципов стайной робототехники.

В стайной робототехнике существует много различных методов и алгоритмов, реализующих самоорганизованное агрегационное поведение.

Из вероятностных подходов обычно применяются метод вероятностных конечных автоматов (англ. *probabilistic finite-state machine*, PFSM). В статье [3] для оптимизации параметров контроллера PFSM применялся метод оптимизации роя частиц (англ. *particle swarm optimization*, PSO). В работе [4] изучался вопрос, как влияет на агрегацию добавление определенной доли информированных роботов и анализируется, сколько из них необходимо, чтобы направить процесс агрегации в заранее определенную область из числа доступных в среде.

В статье [5] предложена микроскопическая модель агрегационного поведения роботов на основе ожидаемого и предполагаемого наблюдаемого размеров кластера. Предлагаемая модель строится на механизме связи, который помогает роботам оценивать размер кластера и направлять их к нужному кластеру. Как только робот обнаруживает желаемый кластер, он старается приблизиться к нему. При этом направление движения определяется с помощью метода среднего прохождения волны.

Часто применяется подход, базирующийся на попарном взаимодействии между роботами на основе искусственных сил. В докладе [6] была рассмотрена модель виртуальных сил притяжения/отталкивания для изучения агрегации на основе локального взаимодействия. В большинстве подобных работ расстояние между роботами является единственным фактором, принимаемым во внимание при агрегации роботов. В тоже время, в некоторых других работах были задействованы дополнительные факторы, такие как плотность роботов в стае. Например, в статье [7] предложен метод самоорганизующейся агрегации, основанный на метрике DM-KNN (*Distance-Minkowski K-Nearest Neighboring*) и дополненный оценкой указанной

плотности. Взвешенная по расстоянию функция, вычисляемая на основе метода интерполяции сглаженной гидродинамики частиц (англ. *smoothed particle hydrodynamics*, SPH), который применяется для оценки плотности роботов в стае, выступает в качестве ключевого фактора для определения k ближайших соседей, учитываемых при агрегировании роботов. Виртуальная физическая связь между соседями достигается с помощью модели близости на основе вязкоупругости.

В статье [8] предложен метод агрегации на основе самоорганизованного движения стаи. Подобное агрегационное поведение – это механизм принятия решений, который оценивает как расстояния между соседними роботами, так и курсы роботов. В предлагаемом методе цель состоит в том, чтобы собрать стаю роботов, случайным образом расположенных на арене, ограниченной препятствиями, образуя единый кластер без какого-либо центрального блока управления. Разработанный алгоритм сравнивался с алгоритмом из работы [9] и показал лучшие по времени результаты для различных размеров арен, количества роботов и радиусов обнаружения.

Алгоритмы движения стай изучались во многих работах, начиная с работы К. Рейнольдса. Для целей данной статьи важно отметить классическую работу Р. Олфати-Сабер [10], где были предложены три алгоритма: два для свободного пространства и один для случая наличия препятствий. Первый алгоритм реализует три правила Рейнольдса, но приводит к регулярной фрагментации. Второй алгоритм дополняет первый путем введения виртуального γ -агента, учитывающего групповую цель. Такая модернизация позволила решить проблему фрагментации. Представленные в публикации [10] алгоритмы направлены на то, чтобы поддерживать одинаковые расстояния между ближайшими соседями. При этом агенты являются точечными и не имеют ограничений по маневрированию. Такой же подход характерен и для большинства других работ, посвященных подобным алгоритмам, хотя в некоторых публикациях (см., например, [11, 12]) и вводятся ограничения на скорость поворота.

Среди отечественных публикаций можно отметить работу [13], где рассматривается поведение группы однотипных роботов (представленных точечными агентами) в среде с препятствиями. Каждый робот должен двигаться в направлении цели и поддерживать минимально допустимое расстояние до других роботов и препятствий. При этом вводится ограничение на максимальную скорость, но нет ограничений на скорость поворота (повороты



происходят мгновенно). Также каждый робот имеет полную информацию о своих соседях и препятствиях в пределах заданной окружности.

Подводя итоги, отметим следующие особенности, присущие работам в данной области:

- традиционно задача агрегации решается в пределах ограниченной арены, т. е. с препятствиями по ее границе;

- начальная связность роботов не предполагается, т. е. в начальный момент времени они образуют множество кластеров различного размера;

- роботы могут останавливаться и вплотную приближаться друг к другу;

- роботы не имеют ограничений по маневрированию и часто представлены точечными агентами.

В предлагаемой статье будет сделана попытка определить условия, необходимые для решения задачи агрегации на неограниченной арене без препятствий и без использования дополнительных средств, таких как групповая цель в работе [10].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задана группа из N однородных мобильных роботов в 2D. Характеристики роботов включают в себя следующие параметры: минимальную и максимальную линейные скорости, максимальное ускорение, максимальную угловую скорость (скорость поворота), габариты робота (диаметр описанной окружности), дальность связи или действия сенсоров. Они могут быть выбраны произвольно для исследовательских целей или заданы точно для конкретных моделей роботов. В данной работе вводится единственное ограничивающее условие: минимальная скорость робота отлична от нуля, т. е. он не может остановиться и начать двигаться в противоположном или любом другом направлении без пространственного маневрирования. Также введено безопасное расстояние между роботами, т. е. дистанция, на которую они могут приближаться друг к другу, не влияя на динамику движения соседнего робота. Предположим также, что безопасное расстояние также отлично от нуля, что удобно при расчетах расстояний между роботами в долях безопасного расстояния. Обмен информацией между роботами или дальность действия их сенсоров ограничены заранее заданным максимальным расстоянием R_{\max} . Задержки и шум не учитываются.

Первоначально роботы располагаются на свободной от препятствий прямоугольной арене без границ, начальная скорость и курс роботов случайны, ускорение и угловая скорость равны нулю.

Начальная скорость выбирается в интервале от минимальной до максимальной.

Поскольку алгоритм управления предполагает использование только информации о положении и курсе ближайших соседей в пределах заданного максимального расстояния и без использования дополнительной информации, такой как групповая цель, требуется начальная связность стаи.

Для этого и по требованиям безопасности на начальное расположение роботов накладываются два ограничения: первое – минимальное расстояние между любыми двумя роботами больше заданного минимального значения и второе – для любого робота существует соседний, расположенный на расстоянии меньше заданного максимального значения. Эти условия объясняются наличием ограничений на маневрирование и дальностью связи (сенсоров).

Поставленную задачу можно сформулировать следующим образом: для заданного размера стаи, выбранных ограничений на начальное расположение роботов и их характеристик выбрать первоначальный размер арены и параметры модели таким образом, чтобы:

- во время всей миссии стая была связной (избегание кластеризации);

- на конец миссии курсы всех роботов были выровнены в достаточной степени, т. е. согласованность движения стаи по направлению была больше некоторого заданного значения, близкого к единице;

- во время миссии выдерживалось безопасное расстояние между всеми роботами в стае.

Требование согласованности курсов всех роботов в стае полностью не решает задачу агрегации, поскольку расстояния между роботами могут отличаться очень существенно. Однако в условиях движения в свободном пространстве переход от достаточно выровненной стаи к сплоченной легко разрешим с выдерживанием безопасного расстояния и поддержанием связности путем изменения параметров модели.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Базовая модель

Как уже отмечалось, модель построена на принципах стайной робототехники. Движение отдельного робота в стае описывается дискретным уравнением первого порядка

$$r_i(k+1) = r_i(k) + u_i(k)\Delta t, \quad (1)$$

где $r_i(k)$ – вектор местоположения i -го робота на шаге k ; $u_i(k)$ – управляющее воздействие на шаге k ; Δt – шаг времени. Далее номер шага k может опускаться, если не потребуется указать другой номер шага, а управляющее воздействие может трактоваться как желаемый вектор скорости.

Определение желаемого вектора скорости основано на попарном влиянии объектов друг на друга. В данной работе рассмотрен алгоритм движения в свободном от препятствий пространстве, поэтому учитывается только взаимное влияние мобильных роботов. Для определения соседства здесь применяется гибридный метрико-топологический подход. Особенности определения соседей будут обсуждаться ниже, а здесь заметим только, что влияние роботов друг на друга ограничено максимальным расстоянием R_{\max} .

Традиционно используются зоны отталкивания, выравнивания и притяжения в соответствии с тремя правилами Рейнольдса. В большинстве работ эти зоны не являются пересекающимися (рис. 1, а). В данном случае используется модель с пересекающимися зонами (как и в работе [14]; рис. 1, б), параметр модели D задает границу между зонами отталкивания и притяжения и часто трактуется как желаемое расстояние между роботами, $\|r_{ij}\|$ – расстояние между i -м и j -м роботами, R_{\max} – дальность взаимного влияния роботов, R_{\min}^{alg} и R_{\max}^{alg} – параметры.

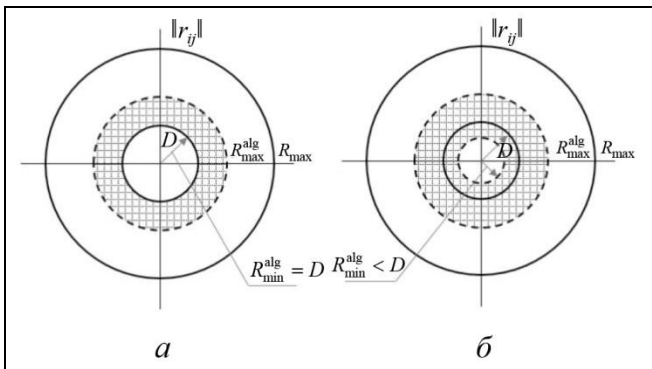


Рис. 1. Зоны отталкивания (внутренний круг радиуса D), выравнивания (заштрихованное кольцо с радиусами R_{\min}^{alg} и R_{\max}^{alg}) и притяжения (кольцо с радиусами D и R_{\max}):

а – непересекающиеся, б – пересекающиеся

Роботы внутри зоны отталкивания стараются отдалиться друг от друга, а роботы внутри зоны притяжения стараются сблизиться. Зона же выравнивания накладывается на другие зоны в окрестности D и служит для согласования курсов роботов. Вне зоны выравнивания присутствует только одна модель поведения: или отталкивание, или

притяжение. В зоне же выравнивания присутствуют две модели поведения со своими весовыми коэффициентами. В общем виде это можно записать следующим образом:

$$\tilde{v}_{ij} = \sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b \tilde{v}_{ij}^b / \sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b,$$

$$\tilde{\mathcal{G}}_{ij} = \arctg \left(\sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b \sin \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^b / \sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b \cos \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^b \right),$$

где \tilde{v}_{ij} , $\tilde{\mathcal{G}}_{ij}$ – модуль и направление желаемой скорости i -го робота относительно j -го; b – множество основных моделей поведения (rep – отталкивание, alg – выравнивание, attr – притяжение); \tilde{v}_{ij}^b , $\tilde{\mathcal{G}}_{ij}^b$, α_{ij}^b – модуль и направление желаемой скорости i -го робота относительно j -го и весовые коэффициенты для данных моделей поведения. Значения коэффициентов α_{ij}^b ($i \neq j$) приведены на рис. 2. Влияние же робота на свое собственное поведение заключается в нежелании менять свою скорость, т. е. $\alpha_{ii}^{\text{alg}} = 1$, $\alpha_{ii}^{\text{rep}} = \alpha_{ii}^{\text{attr}} = 0$.

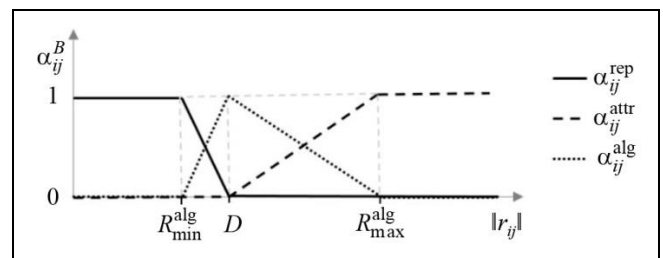


Рис. 2. Коэффициенты α_{ij}^b для разных моделей поведения

Взаимное влияние роботов также зависит от их расположения в динамике, т. е. находятся они впереди или сзади относительно друг друга (как и в работе [14]). В табл. 1 показано, как определяется желаемая скорость i -го робота относительно j -го для разных моделей поведения.

Коэффициенты β_{ij} задают степень влияния j -го робота на i -го ($\beta_{ii} = 1$) в зависимости от расстояния между роботами. В данной работе использовалась кусочно-линейная функция:

$$\beta(x) = \begin{cases} y_{m+1} + \frac{y_m - y_{m+1}}{x_{m+1} - x_m} (x_{m+1} - x), & x_m \leq x < x_{m+1} \\ 0, & x \geq x_4 \end{cases},$$

где x – расстояние между роботами; x_m , y_m , $m = 0, \dots, 3$, – параметры; $\beta(x_m) = y_m$; $x_0 = 0 < x_1 < x_2 < x_3 < x_4 = R_{\max}$. Значение параметра x_4 можно определить как расстояние, при превышении которого влияние роботов прекращается.

Взаимное влияние роботов

Модели поведения (<i>b</i>)	Положение <i>j</i> -го робота относительно <i>i</i> -го	Вектор желаемой скорости <i>i</i> -го робота	
		Модуль	Направление
Отгалкивание	Впереди	Минимум	От <i>j</i> -го робота к <i>i</i> -му
	Сзади	Максимум	
Выравнивание	Любое	Как у <i>j</i> -го робота	Как у <i>j</i> -го робота
Притяжение	Впереди	Максимум	От <i>i</i> -го робота к <i>j</i> -му
	Сзади	Минимум	

Отдельным важным вопросом является определение соседства. В работе [15] при исследовании стай скворцов было показано, что каждая птица взаимодействует в среднем с фиксированным числом соседей (от шести до семи в 3D и от трех до пяти в 2D), а не со всеми соседями в пределах фиксированного метрического расстояния. При этом соседство определяется не по метрическому, а по топологическому расстоянию, т. е. по количеству промежуточных особей, разделяющих двух птиц. Подобный подход отражает характерную особенность стайного поведения, а именно локальность взаимодействия. Для стай роботов одной из возможностей является построение триангуляции Делоне и определение ближайших соседей по ней, что и было реализовано. Определим $\sigma_i(k)$ как множество индексов ближайших соседей робота *i* в смысле триангуляции, включая его самого, на шаге *k*. Заметим, что множество $\sigma_i(k)$ изменяется во времени.

На рис. 3 показан пример определения ближайших соседей в применяемом здесь метрико-топологическом подходе. Для робота 1 ближайшими соседями будут зеленые роботы с номерами от 3 до 6. Робот 2 (зеленый с красной границей) является ближайшим в топологическом смысле, но расположен далеко от робота 1 (расстояние больше R_{max}), поэтому в множество $\sigma_i(k)$ не входит. Остальные роботы не являются ближайшими в топологическом смысле. Таким образом, $\sigma_i(k) = \{1, 3, 4, 5, 6\}$.

В итоге желаемая скорость $\tilde{u}_i(k)$ вычисляется как суммарное воздействие всех роботов из множества $\sigma_i(k)$ с учетом коэффициентов β_{ij} :

$$\tilde{u}_i = \tilde{v}_i \begin{pmatrix} \cos \tilde{\vartheta}_i \\ \sin \tilde{\vartheta}_i \end{pmatrix},$$

$$\tilde{v}_i = \sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij} \tilde{v}_{ij} / \sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij},$$

$$\tilde{\vartheta}_i = \arctg \left(\sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij} \sin \tilde{\vartheta}_{ij} / \sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij} \cos \tilde{\vartheta}_{ij} \right),$$

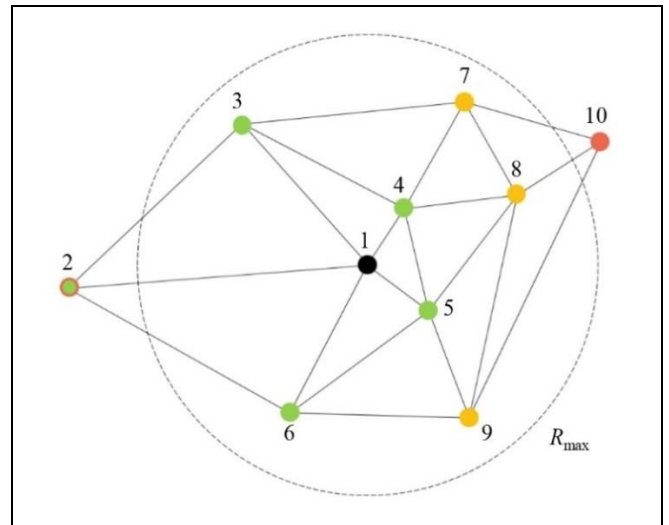


Рис. 3. Определение ближайших соседей (метрико-топологический подход)

где $\tilde{v}_i, \tilde{\vartheta}_i$ – модуль и направление желаемой скорости \tilde{u}_i ; β_{ij} – весовые коэффициенты, $\beta_{ii} = 1$; $\sigma_i(k)$ – множество индексов ближайших соседей *i*-го робота, включая его самого, на шаге *k*.

2.2. Ограничения на маневрирование

В случае точечных объектов и отсутствия ограничений на маневрирование желаемая скорость u_i в модели (1) равна \tilde{u}_i . В данной же работе при расчете расстояний учитываются габариты роботов (диаметр описанной окружности), а при расчете желаемой скорости учитываются ограничения на маневрирование. Кроме того, для многих роботов существует безопасная дистанция, на которую они могут приближаться друг к другу, не влияя на динамику движения соседнего робота. Для оценки этого введено заданное безопасное расстояние D_s .

Желаемая скорость u_i в модели (1) будет определяться с учетом этих ограничений и в общем виде это представлено в выражении (2), где функция *f* преобразует желаемое управляющее воздействие в допустимое:

$$u_i = f(\tilde{u}_i, V_{\min}, V_{\max}, \omega_{\max}, W_{\max}), \quad (2)$$

где V_{\min} , V_{\max} – минимальная и максимальная линейные скорости; W_{\max} – максимальное ускорение; ω_{\max} – максимальная угловая скорость.

Поскольку желаемое управляющее воздействие трактуется как желаемая скорость, реализацию функции f можно свести к вычислению величины

$$v_i(k) = \begin{cases} \tilde{v}_i^*(k), & |\tilde{v}_i^*(k) - v_i(k-1)| \leq W_{\max} \Delta t \\ v_i(k-1) + \text{sign}(\tilde{v}_i^*(k) - v_i(k-1)) W_{\max} \Delta t, & |\tilde{v}_i^*(k) - v_i(k-1)| > W_{\max} \Delta t \end{cases}$$

где

$$\tilde{v}_i^*(k) = \max(\min(\tilde{v}_i(k), V_{\max}), V_{\min})$$

и направления желаемой скорости

$$\vartheta_i(k) = \vartheta_i(k-1) + \begin{cases} \tilde{\vartheta}_i^*, & -\omega_{\max} \Delta t \leq \tilde{\vartheta}_i^* \leq \omega_{\max} \Delta t \\ -\omega_{\max} \Delta t, & \tilde{\vartheta}_i^* < -\omega_{\max} \Delta t \\ \omega_{\max} \Delta t, & \tilde{\vartheta}_i^* > \omega_{\max} \Delta t \end{cases}$$

где

$$\tilde{\vartheta}_i^*(k) = \tilde{\vartheta}_i(k) - \vartheta_i(k-1) + \begin{cases} 0, & -\pi < \tilde{\vartheta}_i(k) - \vartheta_i(k-1) \leq \pi \\ 2\pi, & \tilde{\vartheta}_i(k) - \vartheta_i(k-1) \leq -\pi \\ -2\pi, & \tilde{\vartheta}_i(k) - \vartheta_i(k-1) > \pi \end{cases}$$

где Δt – шаг моделирования.

2.3. Оценка поведения стаи

Для оценки безопасности рассчитывалось минимальное расстояние между роботами в стае на шаге k

$$R_{\min}(k) = \min_{i \neq j} (\|r_i(k) - r_j(k)\| - S),$$

и с начала миссии

$$R_{\min} = \min_k R_{\min}(k) \geq D_s.$$

где S – габариты робота (диаметр описанной окружности).

Согласованность движения стаи по направлению вычислялась так:

$$\psi(t) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N \frac{v_i(k)v_j(k)}{|v_i(k)||v_j(k)|},$$

где $v_i(k)v_j(k)$ – скалярное произведение векторов скорости i -го и j -го роботов на шаге k . В идеальном состоянии, $\psi \approx 1$, в неупорядоченном состоянии $\psi \approx 0$.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1. Требования к начальному расположению роботов и выбор размера арены

Выбор минимального и максимального расстояний между любыми двумя роботами в начальный момент времени обусловлен ограничениями на маневрирование. Как показали исследования, алгоритмы стайной робототехники могут приводить к ситуациям, когда требуется проводить маневр сближения двух роботов, в процессе которого должно быть выдержано безопасное расстояние (рис. 4, а). В связи с этим минимальное начальное расстояние между центрами роботов было выбрано равным

$$D_{\min} = D_s + 4R_t + S = D_s + 4 \frac{V_{\max}}{\omega_{\max}} + S,$$

где R_t – радиус поворота робота при максимальной угловой и линейной скоростях.

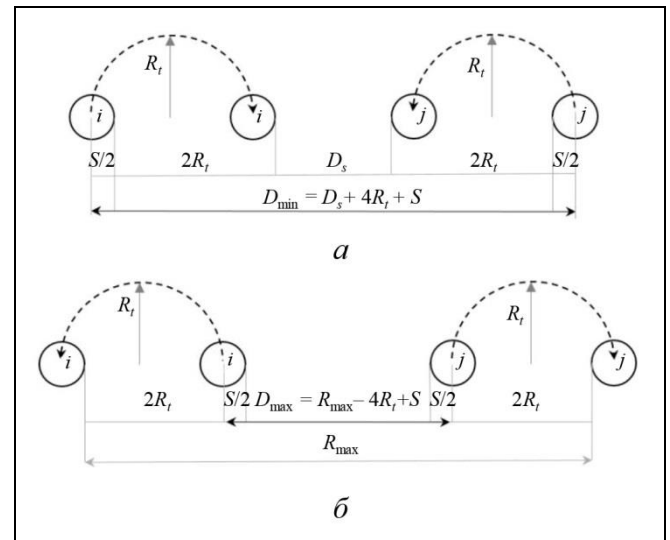


Рис. 4. Маневры: а – сближения, б – расхождения

Аналогично возможен маневр расхождения двух роботов, в процессе которого требуется не потерять связность (рис. 4, б). Максимальное начальное расстояние между центрами роботов было выбрано равным

$$D_{\max} = R_{\max} - 4R_t + S = R_{\max} - 4 \frac{V_{\max}}{\omega_{\max}} + S.$$

Размер арены выбирался в зависимости от количества роботов в стае N и максимального начального расстояния между центрами роботов D_{\max} . При моделировании будет рассмотрена стая из 20 роботов и арена будет формироваться из 20 квадратов с диагональю, равной D_{\max} . Будут рас-

смотрены три возможные конфигурации арен, а именно 5×4 , 10×2 и 20×1 таких квадратов. Также будут рассмотрены два варианта, когда роботы располагаются в заранее заданных местах, а меняется только вектор их начальной скорости.

3.2. Характеристики мобильных роботов

Были выбраны произвольные, не привязанные к конкретным моделям роботов тестовые характеристики, для которых исследовалась возможность решения поставленной задачи в рамках предложенной модели. В табл. 2 приведен список параметров, а также их значения, которые будут использоваться далее при имитационном моделировании. Значение R_{\max} выбрано достаточно большим, чтобы обеспечить маневрирование роботов без потери связности, но не охватывающим всю арену. Для понимания особенностей работы модели часто требовался визуальный контроль переходных процессов, поэтому единицы, в которых измеряются характеристики роботов, задавались в экранных координатах. Разумеется, при построении модели для конкретных роботов единицы измерения должны будут выбираться соответственно.

Таблица 2

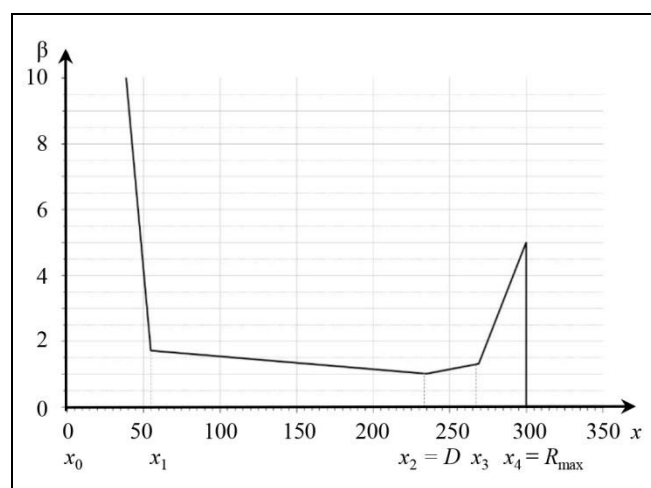
Характеристики мобильных роботов

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Минимальная скорость	V_{\min}	1	ед./с
Максимальная скорость	V_{\max}	4	ед./с
Максимальное ускорение	W_{\max}	1	ед./с ²
Максимальная скорость поворота	ω_{\max}	$\pi/6$	рад/с
Габариты робота	S	12	ед.
Дальность связи (сенсоров)	R_{\max}	300	ед.
Безопасное расстояние	D_s	24	ед.

3.3. Выбор параметров модели

Наиболее существенными параметрами модели являются функция $y = \beta(x)$, задающая степень влияния роботов друг на друга в зависимости от расстояния между роботами, и значение желаемого расстояния D .

Как уже указывалось в п. 3.1, наиболее критичными для обеспечения безопасного расстояния и потере связности являются возможные маневры сближения и расхождения соответственно. Что и определяет форму функции $y = \beta(x)$, представленной на рис. 5. На интервале от $x_0 = 0$ до $x_1 = D_s + 4R_t$ требуется обеспечить крутой наклон для избегания столкновений, а на интервале от $x_3 = R_{\max} - 4R_t$ до $x_4 = R_{\max}$ для избегания кластеризации. Значение же x_2 выбрано равным D , что соответствует желаемому расстоянию между роботами и в этой точке естественно предположить минимум функции $\beta(x)$, равный y_2 . Значение y_2 было выбрано равным единице, что не является критичным. Выбор же конкретных значений $y_m = \beta(x_m)$, $m = 0, 1, 3, 4$, и параметра D проводился на основе имитационного моделирования.

Рис. 5. График функции $y = \beta(x)$, x – расстояние между роботами

Первоначальный выбор параметров осуществлялся для арены 5×4 . Было проведено 1 000 прогонов при различных начальных условиях и выбранных значениях параметров и определялись самые неблагоприятные из них. Прогон заканчивался, когда достигалась заданная согласованность движения стаи по направлению $\psi \geq \psi_z$ (ψ_z была выбрана равной 0,92) или если достигалось заданное заранее максимальное число шагов, что происходит при потере связности. Для тех прогонов, в которых не выдерживалось безопасное расстояние, проводился анализ влияния параметров y_0 и y_1 на этот показатель и выбирались новые значения. Аналогично для тех прогонов, в которых терялась связность, проводился анализ влияния параметров y_3 и y_4 на этот показатель для определения новых значений. В некоторых случаях требовалось также оценить влияние и откорректировать параметр D . Такая итерационная процедура заканчивалась, ко-

гда все 1000 прогонов показывали нужные результаты, и она позволила определить базовые значения y_m , $m = 0, 1, 3, 4$, и D при заданных характеристиках мобильных роботов. Более точно параметры корректировались на большем числе прогонов – 10 000. Аналогичная процедура позволила определить параметры модели для арены 5×4 при выбранных характеристиках мобильных роботов.

Заметим, что число неблагоприятных прогонов при такой итерационной процедуре не превышало 0,05 % от общего числа прогонов (5 из 10 000), что позволяет надеяться на достаточность выбранной статистики.

В дальнейшем подобная процедура была проведена и на аренах 10×2 и 20×1 . В качестве начальных значений параметров в итерационной процедуре были выбраны значения, полученные для арены 5×4 . Оказалось, что фактически для перехода от арены 5×4 к арене 20×1 следует только несколько увеличить значение параметра D для избегания кластеризации. Анализ показал, что задача обеспечения безопасного расстояния была успешно решена, а задача сохранения связности стаи требует дальнейшего исследования. Учитывая особенности модели, а именно определение соседства, были определены два варианта начального расположения роботов на арене 20×1 , наиболее неблагоприятные с точки зрения возможной кластеризации. В первом из них роботы располагаются на арене 20×1 в углах квадратов зигзагом (вариант «Zig»), а во втором роботы расположены на диагонали арены 20×1 на равных расстояниях друг от друга (вариант «Line»). Расстояние до ближайшего робота равно D_{\max} в первом случае и $(\sqrt{(1+N^2)}/2/(N-1))D_{\max} \approx 0,75D_{\max}$ во втором. Число ближайших соседей в этих случаях равно двум, если робот расположен в середине группы, или одному, если робот расположен на краю. При этом случайно изменяется только вектор начальной скорости. Для этих двух вариантов были проведены аналогичные итерационные процедуры (по 10 000 прогонов) для определения значений параметров y_3 , y_4 и D . Исследование показало, что наиболее критичным случаем с точки зрения кластеризации является вариант «Line». Именно он требует довольно существенного увеличения значения параметра D , а именно требуется выбрать его больше ($D = 235$), чем начальное расстояние между роботами (210). При этом значение D выбиралось по возможности наименьшим с целью получения менее разреженной стаи.

Поскольку ставилась задача подобрать одинаковые значения параметров для всех выбранных арен и вариантов начальных условий, то значения

параметров, полученные для варианта «Line», (табл. 3) были проверены и для варианта «Zig», и для всех трех арен. Результаты представлены ниже в п. 3.4.

Таблица 3

Параметры модели

Параметр	Формула	Значение
D	–	235
x_0	–	0
x_1	$D_s + 4R_t$	55
x_2	D	235
x_3	$R_{\max} - 4R_t$	269
x_4	R_{\max}	300
$y_0 = \beta(x_0)$	–	30
$y_1 = \beta(x_1)$	–	1,7
$y_2 = \beta(x_2)$	–	1
$y_3 = \beta(x_3)$	–	1,3
$y_4 = \beta(x_4)$	–	5
R_{\min}^{alg}	–	0,75
R_{\max}^{alg}	–	1,25
Δt	–	0,25 с

3.4. Результаты моделирования

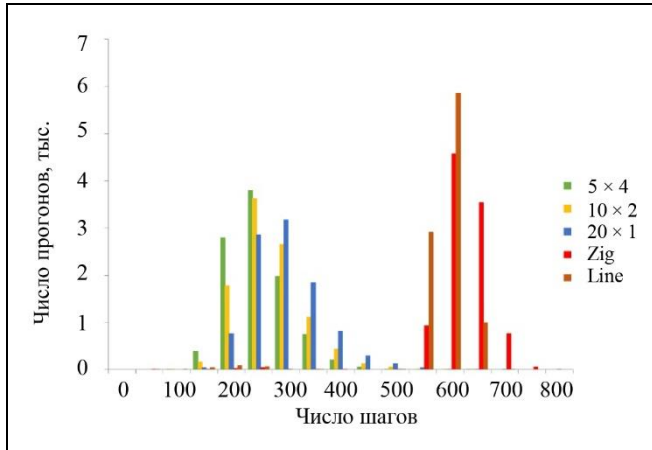
При выбранных значениях параметров модели было проведено по 10 000 прогонов для каждого из пяти вариантов начальных условий. Моделирование показало, что задача достижения заданной согласованности движения стаи по направлению ($\psi_z = 0,92$) успешно выполняется в 100 % случаев и при этом выдерживается безопасное расстояние.

В табл. 4 и на рис. 6 приведены данные, отражающие скорость достижения заданной согласованности стаи по направлению. На рис. 6 представлена гистограмма с шагом 50, показывающая, с какой частотой заданная согласованность достигается за определенное число шагов. Для первых трех вариантов, когда используется случайное начальное расположение роботов «Rand», моделирование показало увеличение требуемого числа шагов при переходе к более вытянутой арене. Два остальных варианта ожидаемо показали существенное увеличение времени. Для них на рис. 6 можно заметить небольшой максимум (в районе 200 шагов для варианта «Line» и 250 шагов для варианта «Zig»), который совпадает с максимумами для первых трех вариантов.

Таблица 4

Число шагов: статистика

Число шагов	Конфигурация арены, вариант расположения роботов				
	5 × 4, Rand	10 × 2, Rand	20 × 1, Rand	20 × 1, Zig	20 × 1, Line
Минимум	96	98	109	31	14
Среднее	230	251	280	593	557
Максимум	632	636	795	747	661

Рис. 6. Гистограмма скорости достижения заданной согласованности стай ($\psi \geq \psi_c$)

В табл. 5 и на рис. 7 приведены данные, характеризующие безопасность, а именно минимальное расстояние между двумя роботами, отмеченное на протяжении всей миссии. На рис. 7 представлена гистограмма с шагом $10/D_s \approx 0,42$, показывающая частоту данного показателя. Ввиду особенности начального расположения в двух последних вариантах безопасное расстояние выдерживается с гарантией. Для первых же трех вариантов графики практически идентичны. Минимальное значение превышает $1,65 D_s$, т. е. безопасное расстояние достигается с запасом.

Таблица 5

Минимальное расстояние (в долях безопасного расстояния): статистика

Число шагов	Конфигурация арены, вариант расположения роботов				
	5 × 4, Rand	10 × 2, Rand	20 × 1, Rand	20 × 1, Zig	20 × 1, Line
Минимум	1,69	1,67	1,69	5,17	5,25
Среднее	2,44	2,4	2,33	7,18	7,63
Максимум	4,15	4,32	3,51	7,65	8,13

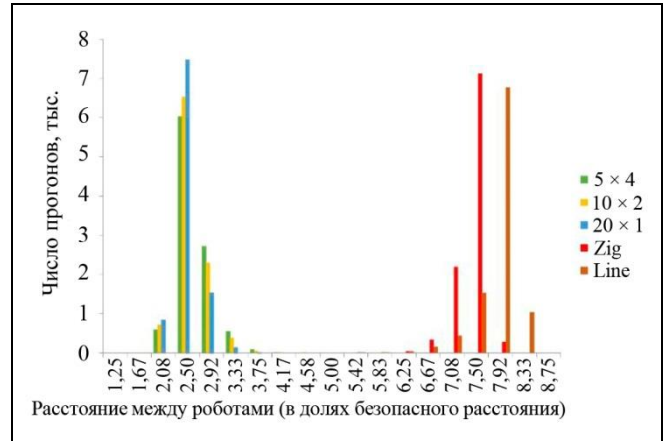


Рис. 7. Гистограмма минимального расстояния между роботами в долях безопасного расстояния

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной особенностью рассмотренной постановки задачи является отказ от использования так называемой групповой цели, наличие которой позволяет решить задачу агрегации достаточно просто. Главной сложностью является сохранение связности стаи в условиях ограничений на маневрирование. Отсутствие групповой цели значительно усложняет решение и приводит к необходимости задавать определенные требования к начальному расположению роботов и размерам арены. Они существенно зависят от дальности связи (сенсоров) и характеристик роботов, а именно максимальной скорости и максимальной скорости поворота. Для более маневренных роботов размер арены увеличивается, поскольку они быстрее реагируют на желаемое изменение курса, что позволяет избежать потери связности.

Предложенная здесь модель стайного управления была апробирована с использованием произвольно выбранных тестовых характеристик роботов. Параметры модели удалось настроить так, чтобы решить поставленную задачу для всех выбранных размеров арен. Результаты основаны на статистическом моделировании при случайных начальных условиях для каждого из трех вариантов арен и еще двух вариантов начального расположения на одной из них (50 000 прогонов, по 10 000 для каждого варианта).

Используемые параметры модели оказывают различное влияние на поведение группы роботов. Часть из них вычисляется аналитически, а часть требуется подбирать на основе имитационного моделирования. Причем существенное влияние оказывают лишь некоторые параметры, а именно же-

лаемое расстояние между роботами и значения, задающие функцию влияния соседних роботов. Наиболее критичным с точки зрения кластеризации является случай узких и протяженных арен, для которых требуется увеличивать желаемое расстояние между роботами.

Подобная особенность влияет на применимость полученного результата в случае использования других значений характеристик мобильных роботов. Если дальность связи (сенсоров) достаточно большая по сравнению расстояниями, необходимыми для маневрирования роботов, то в большинстве случаев потребуется только количественная корректировка параметров модели. Однако следует заметить, что это справедливо, если функция, задающая степень влияния роботов друг на друга, может быть задана как на рис. 5. Нарушение этого условия возможно при узких и протяженных аренах и при плохой маневренности роботов. В этих случаях потребуется задать более жесткие ограничения на размеры арен. Направления дальнейших исследований могут быть связаны с автоматизацией выбора параметров модели.

Таким образом, для группы роботов с заданными характеристиками имеется возможность заранее промоделировать их поведение и определить значения минимального и максимального расстояний, а также выбрать параметры модели, позволяющие избежать кластеризации и обеспечить безопасное расстояние для задачи перехода к согласованному движению, т. е. к образованию стаи. Подобная задача является первым этапом выполнения миссии группой роботов и показано, что ее решение возможно при выполнении некоторых условий. При этом используется только информация о положении и курсе ближайших соседей (в метрико-топологическом смысле) и не вводится никакая дополнительная информация, подобная групповой цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schmickl, T., Hamann, H. BEECLUST: A Swarm Algorithm Derived from Honeybees // In: Bio-Inspired Computing and Communication Networks, ed. by Y. Xiao. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. – P. 95–137.
2. Reynolds, C.W. Flocks, Herds and Schools: a Distributed Behavioral Model // Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21, no. 4. – P. 25–34.
3. Katada, Y. Evolutionary Design Method of Probabilistic Finite State Machine for Swarm Robots Aggregation // Artificial Life Robot. – 2018. – Vol. 23. – P. 600–608.
4. Firat, Z., Ferrante, E., Gillet, Y., Tuci, E. On Self-organised Aggregation Dynamics in Swarms of Robots with Informed Robots // Neural Comput. Appl. – 2020. – Vol. 32. – P. 13825–13841.
5. Gia, Luan, P., Truong Thinh, N. Self-organized Aggregation Behavior Based on Virtual Expectation of Individuals with Wave-Based Communication // Electronics. – 2023. – Vol. 12, no. 10. – Art. no. 2220.
6. Gasparri, A., Priolo, A., Ulivi, G. A Swarm Aggregation Algorithm for Multi-robot Systems Based on Local Interaction // Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications. – Dubrovnik, 2012. – P. 1497–1502.
7. Khaldi, B., Harrou, F., Cherif, F., Sun, Y. Self-Organization in Aggregating Robot Swarms: A DW-KNN Topological Approach // Biosystems. – 2018. – Vol. 165. – P. 106–121.
8. Misir, O., Gökrem, L. Flocking-Based Self-organized Aggregation Behavior Method for Swarm Robotics // Iran J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng. – 2021. – Vol. 45. – P. 1427–1444.
9. Martínez-Clark, R., Cruz-Hernández, C., Pliego-Jimenez, J., Arellano-Delgado, A. Control Algorithms for the Emergence of Self-organized Behaviours in Swarms of Differential-Traction Wheeled Mobile Robots // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2018. – Vol. 15, no. 6. – P. 1–14.
10. Olfati-Saber, R. Flocking for Multi-agent Dynamics Systems: Algorithms and Theory // IEEE Trans. on Automatic Control. – 2006. – Vol. 51, no. 3. – P. 401–420.
11. Couzin, I., Krause, J., James, R., et al. Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups // Journal of Theoretical Biology. – 2002. – Vol. 218, no. 1. – P. 1–11.
12. Costanzo, M., Hemelrijk, C.K. Spontaneous Emergence of Milling (Vortex State) in a Vicsek-like Model // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 51, no. 13. – Art. no. 134004.
13. Кирикова Е.П., Павловский В.Е. Моделирование управляемого адаптивного поведения гомогенной группы роботов // Искусственный интеллект. – 2002. – № 4. – С. 596–605. [Kirikova, E.P., Pavlovskii, V.E. Modelirovanie upravlyаемого adaptivnogo povedeniya gomogennoi gruppy robotov // Iskusstvennyi intellekt. – 2002. – No. 4. – P. 596–605. (In Russian)]
14. Rochefort, Y., Piet-Lahanier, H., Bertrand, S. Guidance of Flocks of Vehicles Using Virtual Signposts // Preprints of the 18th IFAC World Congress. – Milano, 2011. – P. 5999–6004.
15. Ballerini, M., Cabibbo, N., Candelier, R., et al. Interaction Ruling Animal Collective Behavior Depends on Topological Rather Than Metric Distance: Evidence from a Field Study // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2008. – Vol. 105, no. 4. – P. 1232–1237.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
Р.В. Мещеряковым.

Поступила в редакцию 14.08.2023,
после доработки 03.11.2023.
Принята к публикации 29.11.2023.

Ефремов Андрей Юрьевич – науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,
✉ andre@ipu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2968-2837>

© 2024 г. Ефремов А.Ю.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.



AGGREGATION BEHAVIOR OF MOBILE ROBOTS IN A SWARM CONTROL ALGORITHM UNDER NATURAL CONSTRAINTS

A. Yu. Efremov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ andre@ipu.ru

Abstract. For a group of mobile robots in free space, we consider aggregation under the assumption that each robot has information about the position and course of the nearest neighbors only (without any additional information, such as the group target). This problem is the first stage of a mission carried out by a group of robots; it can be solved under certain conditions, see below. We propose a swarm control algorithm based on the metric-topological approach under maneuvering constraints. The sizes and configurations of the arenas are chosen, and initial position requirements are specified for robots. The characteristics of robots are selected, and computer simulations are conducted to evaluate the model parameters for the required directional coordination level of swarm motion without clustering and with a safe distance between robots during the entire mission.

Keywords: swarm robotics, aggregation, alignment, simulation modeling.