

РЕАЛИЗАЦИЯ АГРЕГАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ МЕТРИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Ефремов А.Ю.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
andre@ipu.ru

Аннотация. Исследуется алгоритм стайного управления, основанный на метрико-топологическом подходе, в предположении, что существуют ограничения на маневрирование. Определены условия начального расположения роботов и параметры модели, позволяющие достичь заданной согласованности движения стаи, избежать кластеризации и выдержать безопасное расстояние во время всей миссии.

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

Введение

Коллективное движение давно известно в природе на примерах поведения стай птиц, косяков рыб и т.п. Рейнольдс [1] впервые представил распределенную поведенческую модель движения стаи для компьютерного моделирования. Предложенная им модель флорирования, т. е. 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 друг от друга, не допуская разделения стаи). Таким образом, желаемое коллективное поведение возникает из локальных взаимодействий между соседями и считается ключевой особенностью стаи [2]. Интересно, что в литературе нет явных определений стаи, а есть определение стайного поведения, а именно «агрегация, часто сочетающаяся с коллективным движением», т.е. стая определяется через ее поведение [3]. Применение такого подхода к группам роботов привело к созданию нового направления в робототехнике, а именно, к стайной робототехнике (swarm robotics).

Агрегация - одно из наиболее фундаментальных проявлений поведения стай в природе. Как и в природе, агрегация в стаях роботов возможна либо на основе сигналов окружающей среды, либо на основе самоорганизации. В этой статье внимание будет уделено второму случаю, а именно агрегации на основе самоорганизации роботов с использованием простых правил локального взаимодействия. Агрегация часто является необходимостью для многих роботизированных систем, поскольку она является предпосылкой для других совместных действий. В предлагаемом исследовании задача агрегации рассматривается как первый этап выполнения задания группой мобильных роботов.

Существует много различных методов и алгоритмов, посвященных самоорганизованному агрегационному поведению в стайной робототехнике. Часто используется подход на основе попарного взаимодействия между роботами на основе искусственных сил. В [4] была использована 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 использованы дополнительные факторы, такие как плотность роботов. Например, в [5] предложен метод самоорганизующейся агрегации, основанный на DM-KNN (Distance-Minkowski K-Nearest Neighboring) и дополненный оценкой плотности роботов в стае. Взвешенная по расстоянию функция, основанная на методе интерполяции сглаженной гидродинамики частиц (SPH), который используется для оценки плотности роботов в стае, применяется 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 [6] предложен метод агрегации на основе флорирования. Агрегационное поведение на основе флорирования - это механизм принятия решений, который оценивает, как расстояния между соседними роботами, так и курсы роботов.

В [7] был предложен алгоритм флорирования в котором зоны отталкивания, выравнивания и притяжения уже не являются непересекающимися, как традиционно предполагалось, и влияние агентов зависит от их расположения в динамике, т.е. двигаются они впереди или сзади относительно друг друга. Агенты являются точечными и не имеют ограничений по маневрированию, что характерно

и для большинства других работ, посвященных алгоритмам фlocksирования, хотя некоторые работы и вводят ограничения на скорость поворота. В данной работе будут введены габариты роботов и 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, что, например, характерно для квадрокоптеров. В связи с этим, возникает задача отслеживания динамики движения роботов на протяжении всего переходного процесса с контролем безопасного расстояния.

Отдельным важным вопросом является определение соседства. В [8] 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. Для стай роботов одним из возможных подходов является построение триангуляции и определение ближайших соседей по ней. В данной работе будет применяться гибридный метрико-топологический подход, когда ближайшие соседи выбираются по триангуляции, но с ограничением на максимальное расстояние. Оно может определяться дальностью связи, если соседи обмениваются данными между собой, либо диапазоном датчиков, в пределах которого возможно обнаружение соседнего робота.

1. Математическая модель и постановка задачи

1.1. Модель без ограничений

Рассматривается движение N мобильных роботов на плоскости. 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 трактоваться как желаемый вектор скорости.

Определение желаемого вектора скорости основано на попарном влиянии объектов друг на друга. В данной работе рассмотрен алгоритм свободного фlocksирования, поэтому учитывается только взаимное влияние мобильных роботов. Для определения соседства здесь используется 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, которые, в данном случае, не являются пересекающимися, как и в [7] (рис. 1), параметр модели D задает границу между зонами отталкивания и притяжения, R_{max} задает дальность взаимного влияния роботов.

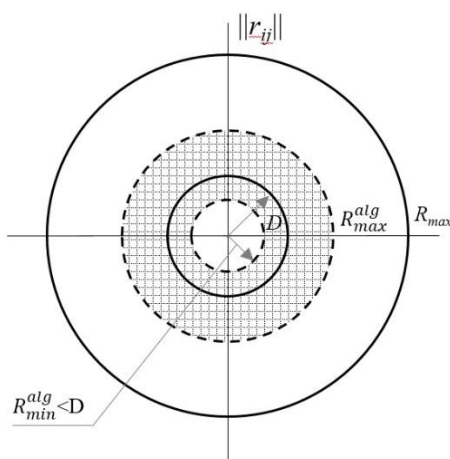


Рис. 1. Зоны отталкивания (внутренний круг радиуса D), выравнивания (заштрихованное кольцо с радиусами R_{min}^{alg} и R_{max}^{alg} и притяжения (кольцо с радиусами D и R_{max}); $\|r_{ij}\|$ – расстояние между роботами, D задает границу между зонами отталкивания и притяжения, R_{max} задает дальность взаимного влияния роботов

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 . Каждой зоне соответствует своя модель поведения: отталкивание, выравнивание и притяжение. 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:

$$\tilde{v}_{ij} = \sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b \tilde{v}_{ij}^b / \sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b, \quad (2)$$

$$\tilde{\vartheta}_{ij} = \arctg \left(\sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b \sin \tilde{\vartheta}_{ij}^b / \sum_{b \in B} \alpha_{ij}^b \cos \tilde{\vartheta}_{ij}^b \right), \quad (3)$$

где $\tilde{v}_{ij}, \tilde{\vartheta}_{ij}$ – модуль и направление желаемой скорости робота i относительно робота j , b – множество основных моделей поведения (*rep* – отталкивание, *alg* – выравнивание, *attr* – притяжение), $\tilde{v}_{ij}^b, \tilde{\vartheta}_{ij}^b, \alpha_{ij}^b$ – модуль и направление желаемой скорости робота i относительно робота j и весовые коэффициенты для данных моделей поведения. Коэффициенты α_{ij}^b ($i \neq j$) приведены на рисунке 2, где $\|r_{ij}\|$ – расстояние между роботами, а D задает границу между зонами отталкивания и притяжения и часто трактуется как желаемое расстояние между роботами, R_{min}^{alg} и R_{max}^{alg} – параметры. Влияние же робота на свое собственное поведение заключается в нежелании менять свою скорость, т.е. $\alpha_{ii}^{alg} = 1$, а $\alpha_{ii}^{rep} = \alpha_{ii}^{attr} = 0$.

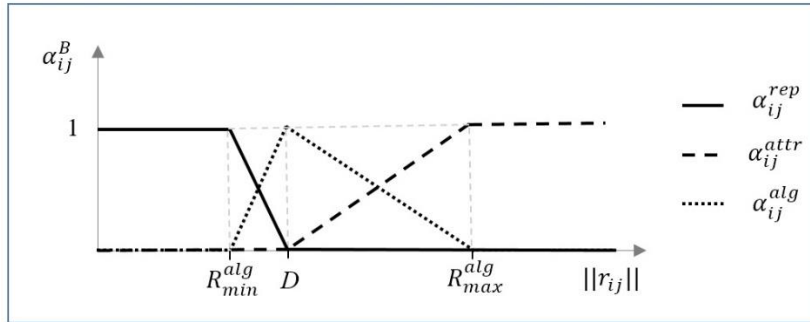


Рис. 2. Коэффициенты α_{ij}^b для разных моделей поведения

Взаимное влияние роботов также зависит от их расположения в динамике, т.е. находятся они впереди или сзади относительно друг друга. В таблице 1 приведено определение желаемой скорости объекта i относительно объекта j для разных моделей поведения.

Таблица 1. Взаимное влияние объектов

Модели поведения (b)	Положение объекта j относительно объекта i	Вектор желаемой скорости объекта i	
		Модуль	Направление
Отталкивание	Впереди	Минимум	От объекта j к объекту i
	Сзади	Максимум	
Выравнивание	Любое	Как у объекта j	Как у объекта j
Притяжение	Впереди	Максимум	От объекта i к объекту j
	Сзади	Минимум	

Кроме коэффициентов α_{ij}^b , задающих зависимость от расположения робота j в различных зонах, вводятся также коэффициенты β_{ij} , задающих степень влияния робота j на робота i ($\beta_{ii} = 1$) и зависящих от расстояния между роботами. В данной работе использовалась кусочно-линейная функция (4):

$$\beta(x) = \begin{cases} y_{m+1} + \frac{y_m - y_{m+1}}{x_{m+1} - x_m} (x_{m+1} - x) & , \quad x_m \leq x < x_{m+1}, m = 0, \dots, 3 \\ 0 & , \quad x \geq x_4 \end{cases}, \quad (4)$$

где x – расстояние между роботами, $x_m, y_m, (m=0, \dots, 4)$, – параметры, $\beta(x_m) = y_m, x_0 = 0 < x_1 < x_2 < x_3 < x_4 = R_{max}$. Значение x_4 можно определить, как расстояние, при превышении которого влияние роботов прекращается.

Отдельно остановимся на определении соседства. В данном подходе соседство определяется не по метрическому, а по топологическому расстоянию, т.е. по количеству промежуточных роботов, разделяющих двух роботов. Одной из возможностей реализации данного подхода является построение триангуляции Делоне и определение ближайших соседей по ней. 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.

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

$$\tilde{u}_i = \tilde{v}_i \begin{pmatrix} \cos \tilde{\vartheta}_i \\ \sin \tilde{\vartheta}_i \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\tilde{v}_i = \sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij} \tilde{v}_{ij} / \sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij}, \quad (6)$$

$$\tilde{\vartheta}_i = \arctg \left(\sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij} \sin \tilde{\vartheta}_{ij} / \sum_{j \in \sigma_i(k)} \beta_{ij} \cos \tilde{\vartheta}_{ij} \right), \quad (7)$$

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

В случае точечных объектов и отсутствия ограничений на маневрирование желаемая скорость u_i в модели (1) равна \tilde{u}_i .

1.2. Модель с ограничениями

В данной работе используются ограничения на маневрирование, также, при расчете расстояний, учитываются габариты роботов (диаметр описанной окружности). 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 . В таблице 2 приведен список этих параметров, а также их значения (в условных единицах), которые будут использоваться в дальнейшем при имитационном моделировании.

Таблица 2. Характеристики мобильных роботов

Параметр	Обозначение	Значение
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}	30 °/с
Габариты робота	S	12 ед.
Дальность связи (сенсоров)	R_{max}	300 ед.
Безопасное расстояние	D_s	24 ед.

Желаемая скорость u_i в модели (1) будет определяться с учетом этих ограничений, и, в общем виде, это можно записать в виде (8), где функция f преобразует желаемое управляющее воздействие в допустимое:

$$u_i = f(\tilde{u}_i, V_{min}, V_{max}, \omega_{max}, W_{max}). \quad (8)$$

1.3. Оценка поведения стаи

Для оценки безопасности рассчитывалось минимальное расстояние между роботами в стае на шаге k (9) и с начала миссии (10):

$$R_{min}(k) = \min_{i \neq j} (||r_i(k) - r_j(k)|| - S), \quad (9)$$

$$R_{min} = \min_k R_{min}(k) \geq D_s. \quad (10)$$

Согласованность движения стаи по направлению вычислялась по формуле (11):

$$\psi(k) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j \neq i} \frac{v_i(k)v_j(k)}{|v_i(k)||v_j(k)|} \right), \quad (11)$$

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

1.4. Постановка задачи

В предлагаемой работе рассматривается задача агрегации на основе самоорганизации роботов с использованием правил локального взаимодействия. Самоорганизация происходит в рамках представленной выше модели.

Задана группа из N однородных мобильных роботов и рассматривается ее движение в квази-двухмерном пространстве. Характеристики роботов представлены в таблице 2, конкретные числовые значения могут быть выбраны и другими, но одинаковыми для всех роботов. Единственным ограничением является то, что минимальная скорость отлична от нуля, т.е. робот не может остановиться и начать двигаться в противоположном или любом другом направлении без пространственного маневрирования.

Предполагается, что робот i на каждом k -ом шаге моделирования имеет информацию о положении и курсе своих ближайших соседей из множества $\sigma_i(k)$, которые расположены не далее, чем на расстояние R_{max} от него. Задержки и шум не учитываются.

Предположим также, что безопасное расстояние D_s также отлично от нуля, что удобно при расчетах расстояний между роботами в долях безопасного расстояния. Значения из таблицы 2 будут использоваться в дальнейшем при выборе параметров модели и имитационном моделировании.

Первоначально роботы располагаются на прямоугольной арене без границ, начальная скорость и курс роботов случайны, ускорение и угловая скорость равны нулю. Начальная скорость выбирается в интервале от V_{min} до V_{max} . На относительное расположение роботов накладывается два ограничения: первое – минимальное расстояние между любыми двумя роботами больше заданного минимального значения D_{min} и второе – для любого робота существует соседний, расположенный на расстоянии меньше заданного максимального значения D_{max} . Конкретные минимальное и максимальное значения, также размер арены будут выбраны позже. Эти условия обусловлены наличием ограничений на маневрирование и дальностью связи (сенсоров). Таким образом обеспечивается связность стаи на начальный момент времени.

Поставленную задачу можно сформулировать следующим образом: для заданного размера стаи, выбранных ограничений на начальное расположение роботов и их характеристик из таблицы 2 выбрать 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 было больше некоторого заданного значения, близкого к единице $\psi \geq \psi_z$;
- во время миссии выдерживалось безопасное расстояние D_s для всех роботов 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 свободного флорирования переход от достаточно выровненной стаи к сплоченной легко разрешим с выдерживанием безопасного расстояния и поддержанием связности путем изменения параметра модели D и функции β .

2. Моделирование

2.1. Требования к начальному расположению роботов и выбор размера арены

Выбор минимального и максимального расстояния между двумя роботами в начальный момент времени обусловлен ограничениями на маневрирование. Как показали исследования, существуют ситуации, когда требуется проводить манёвр сближения двух роботов, в процессе которого должно быть выдержано безопасное расстояние. Минимальное начальное расстояние между центрами роботов было выбрано равным D_{min}

$$D_{min} = D_s + 4R_t + S = D_s + 4 \frac{V_{max}180}{\omega_{max}\pi} + S, \quad (12)$$

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

Аналогично возможен маневр расхождения двух роботов, в процессе которого требуется не потерять связность. Максимальное начальное расстояние между центрами роботов было выбрано равным D_{max}

$$D_{max} = R_{max} - 4R_t + S = R_{max} - 4 \frac{V_{max}180}{\omega_{max}\pi} + S. \quad (13)$$

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} . Будет рассмотрен случай, когда арена имеет размер 5x4 таких квадратов.

2.2. Параметры модели

Выбор параметров модели проводился на основе имитационного моделирования. Шаг времени был выбран равным 0.25 сек, проводилось определенное количество прогонов при различных начальных условиях. Прогон заканчивался, когда достигалась заданная согласованность движения стаи по направлению $\psi \geq \psi_z$, ψ_z была выбрана равной 0.92. При потере связности стаи заданная согласованность не достигается за достаточное большое число шагов. В таком случае, а также если не выдерживается безопасное расстояние параметры модели корректировались. В итоге, для заданных характеристик мобильных роботов были выбраны параметры модели, представленные в таблице 3.

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

График функции $y = \beta(x)$ приведен на рисунке 3, где x расстояние между роботами.

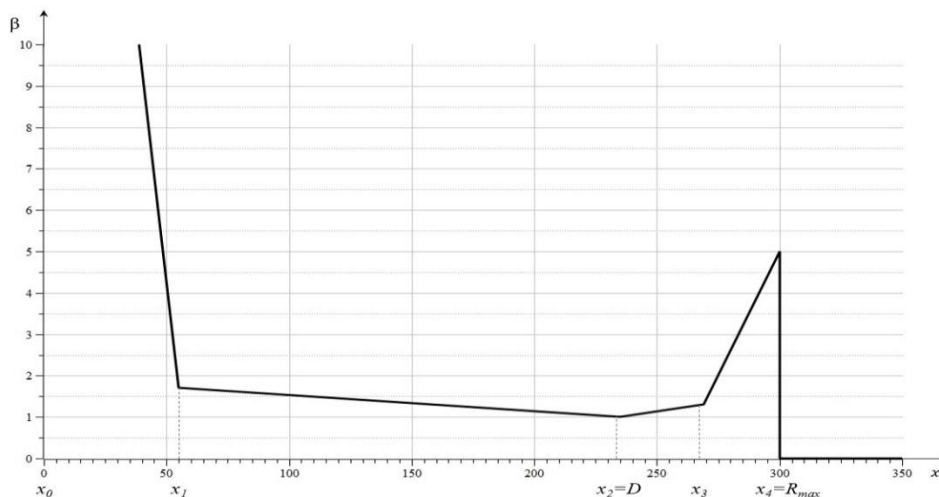


Рис. 3. График функции $y = \beta(x)$

2.3. Результаты моделирования при выбранных параметрах

Для выбранных параметров модели и выбранной арены было проведено 10000 прогонов при случайных начальных условиях. Моделирование показало, что задача достижения заданной согласованности движения стаи по направлению ($\psi_z = 0.92$) успешно выполняется в 100% случаев, при этом выдерживается безопасное расстояние.

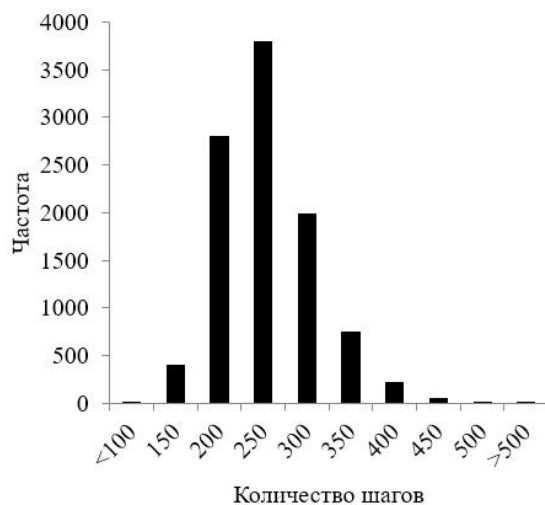


Рис. 4. Гистограмма скорости достижения заданной согласованности стаи ($\psi \geq \psi_z$)

Примерно в 85% случаев (начальных условий) заданная согласованность стаи достигается за 150-300 шагов, среднее значение равно 230 шагам (рисунок 4).

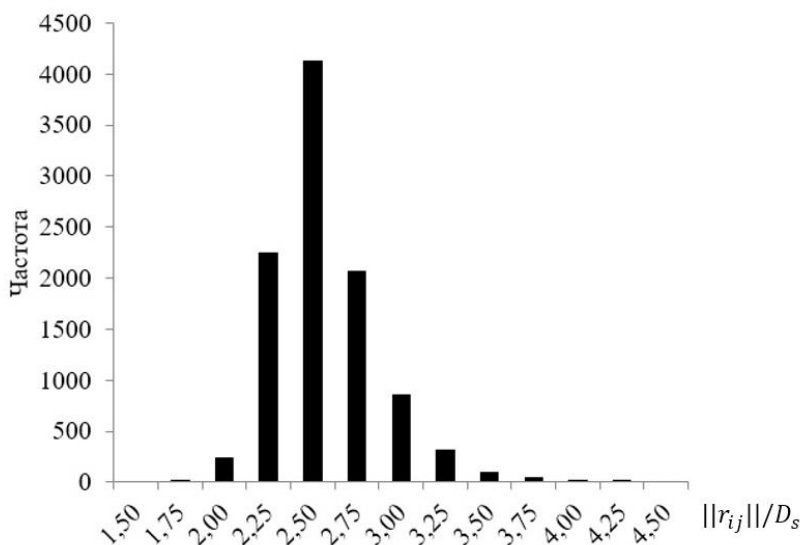


Рис. 5. Гистограмма минимального расстояния между роботами в долях безопасного расстояния

В более чем 92% случаев (начальных условий) минимальное расстояние лежит в интервале от $2D_s$ до $3D_s$, среднее значение равно $2.44D_s$, при этом минимальное значение больше $1.5D_s$, т.е. безопасное расстояние достигается с запасом (рисунок 5).

5. Заключение

Решение задачи агрегации часто требуется в роботизированных системах на первом этапе выполнения миссии. В данной работе была поставлена задача обеспечить достаточную согласованность курсов всех роботов в стае без эффекта кластеризации и с выдерживанием безопасного расстояния. И хотя это не полностью решает задачу агрегации, переход от достаточно выровненной стаи к сплоченной легко разрешим в рамках предложенной модели.

Для большего приближения к реальности введены ограничения на маневрирование и на информацию о других роботах в стае. Каждый робот имеет информацию только о своих ближайших соседях (в топологическом смысле), расположенных не далее заданного диапазона связи (сенсоров). На основе этих условий выбран размер арены и заданы требования к относительному расположению роботов на начальный момент времени. Предполагается, что первоначально стая является связной.

В итоге, для выбранных параметров модели удалось обеспечить связность стаи и выдерживание безопасного расстояния во время всей миссии. В конце миссии достигается заданная согласованность движения стаи по направлению. Результаты подтверждены статистическим моделированием на основе 10000 прогонов при случайных начальных условиях.

Литература

1. *Reynolds C.W.* Flocks, Herds and Schools: a Distributed Behavioral Model // *Computer Graphics*. – 1987. – Vol. 21, N 4. – P. 25–34.
2. *Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M.* Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective // *Swarm Intelligence*. – 2013. – N 7. – P. 1–41.
3. *Hamann H.* *Swarm Robotics: A Formal Approach*. – Springer, 2018. – 210 p.
4. *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.
5. *Khalidi 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.
6. *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.
7. *Rocheffort Y., Piet-Lahanier H., Bertrand S.* Guidance of Flocks of Vehicles Using Virtual Signposts // *Preprints of the 18-th World Congress IFAC*. – Milano, 2011. – P. 5999–6004.
8. *Ballerini M., Cabibbo N., Candelier R., Cavagna A., Cisbani E., Giardina I., Lecomte V., Orlandi A., Parisi G., Procaccini A., Viale M., Zdravkovic V.* 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, N 4. – P. 1232–1237.