

Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях¹

Аннотация. В статье рассматривается следующая задача управления группой мобильных роботов: используя только локальную информацию, получаемую от соседей, автономные агенты, моделирующие мобильных роботов, должны сформировать строй заданной структуры и двигаться к цели, сохраняя эту структуру. Предлагаемый в статье подход отличается способом задания структуры строя: положение агента в структуре строя выбирается динамически. Предлагаемый подход корректно обрабатывает ситуации возможной поломки, присоединения новых агентов к строю и смены положения цели. Работоспособность подхода проверена при помощи компьютерного моделирования. Проанализирована работа алгоритма в условиях введения ошибки измерений и при наличии препятствий.

Ключевые слова: мультиагентная система, формирование строя, движение строем, мобильные роботы.

Введение

Прикладное значение мультиагентных систем и существующие подходы. На данный момент существует множество технологий группового управления, используемых на практике для управления сложными системами [1], мультиагентные системы используются в робототехнике, а также для моделирования природных и социальных процессов [2-4]. Задача формирования строя определенной структуры в мультиагентных системах возникает при управлении движением групп мобильных роботов, при управлении беспилотными летательными аппаратами и с целью покрытия зоны равномерной коммуникационной сетью, съемки территории или транспортировки небольших объектов по воздуху. В литературе есть два основных подхода [5] к решению задач управления строем: подходы, основанные на жесткости графа, отражающего желаемые расстояния между агентами [6-8], и подходы, основанные на задании относительного положения при помощи векторов [9-11]. В обоих подходах положение объектов в структуре строя задается априори и является фиксированным (роботу с

определенным номером предписывается определенное место в структуре строя). Предлагаемый в данной работе подход основывается на ином способе задания структуры строя. Соблюдая одну из заранее заданных структур строя, агенты сами выбирают свое место в данной структуре, избегая коллизий. Основа предлагаемого подхода – это способ задания структуры строя и алгоритм для управления строем с динамическим подбором структуры строя и места объектов в ней.

Постановка задачи. Пусть мир W — ограниченное открытое связное подмножество двумерного вещественного пространства, $W \subset \mathbb{R}^2$, в мире введена прямоугольная система координат OXY . Если не оговорено иное, то везде в данной работе приводятся координаты именно в этой системе. Голономные агенты $A_1, A_2, \dots, A_n$, моделирующие роботов, имеют координаты $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$, то есть являются материальными точками (размерами агентов пренебрегаем). A_i и A_j могут напрямую обмениваться информацией, если $\|p_i - p_j\| \leq r$, где r определяет радиус слышимости. Отношение слышимости полагается транзитивным. Движение предпола-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 12-07-00456, № 12-01-00571) и гранта НШ-4179.2014.9.

гается равномерным, скорость не превышает величины $V_{\max}$. Правило управления задается как $\dot{p}_i = u_i$, то есть, мы считаем, что агент может управлять своей скоростью, и что скорость может измениться мгновенно.

Назовем максимальной по размерам группу роботов, в которой каждый робот может передать информацию любому другому, *группой связности*. Обозначим ее $N_p = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik}\}$, где p – индекс группы связности, а k – количество роботов в группе.

Под *структурой строя* понимается относительное расположение агентов по отношению друг к другу или к их центру масс. Например, целевой структурой строя для трех агентов может служить равносторонний треугольник с заданной стороной, для четырех – структура «квадрат» с заданной стороной.

Для задания желаемой структуры для каждого $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ (возможного размера групп связности) зададим в некоторой системе отсчета набор координат $\{s'(k)_j | j = 1, \dots, k\}$, который назовем *исходной формацией*. Координаты исходных формаций в некоторой системе отсчета известны роботам априори и одинаковы для них.

Набор координат, который можно получить при помощи ортогональных преобразований над исходной формацией, будем называть *изоморфной формацией*. Каждый агент имеет возможность, опираясь на известные ему данные, рассчитать свою изоморфную формацию – «версию» исходной формации в мировой системе координат. Например, если исходная формация задает структуру строя «треугольник» как $\{s'(3)_j\} = \{(-1, 0); (2, 0); (0, 1)\}$ в некоторой известной агенту A_j системе отсчета, то A_j при помощи сдвига и поворота исходного «треугольника» может построить бесконечное множество изоморфных формаций – «треугольников» в мировой системе координат. При этом структура строя, которую задают исходная и изоморфная формации, будет одинаковой (в приведенном примере все «треугольники» равны между собой).

Фактически строим (или просто строим) группы связности из k роботов в момент времени t назовем совокупность $\{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{ik}(t)\}$.

Таким образом, роботы заранее знают исходные формации (а равно и целевые структуры строя) для групп разной численности, но не знают заранее ни число роботов в группе связ-

ности, ни свое предполагаемое положение в структуре строя.

Цель управления. Ставится следующая цель управления мультиагентной системой: при помощи децентрализованного управления за конечное время в каждой группе связности сформировать строй, структура которого с удовлетворительной точностью повторяет структуру, заданную исходной формацией, соответствующей количеству агентов в данной группе связности, и, сохраняя указанную структуру строя с удовлетворительной точностью, посетить все целевые точки в порядке убывания их приоритетов: $T_1^*, T_2^*, \dots, T_q^*$.

Под посещением группой связности N_p целевой точки T^* понимается следующее: в некоторый момент t' для заранее заданного $\varepsilon > 0$

выполняется условие: $|\frac{\sum_{A_i \in N_p} p_i(t')}{k} - T^*| < \varepsilon$;

Под удовлетворительной точностью соблюдения структуры строя, заданной исходной формацией, понимается следующее: существует $0 \leq \delta \leq 1$ такое, что во время движения, начиная с определенного момента $t < t'$, в каждый момент времени t существует изоморфная формация такая, что каждый агент находится на расстоянии меньше чем $\delta \times V_{\max} \Delta t$ от одной из ее точек. Δt – некоторый временной промежуток, выбор которого может быть связан с последующей дискретизацией задачи.

Не ограничивая общности, далее будем говорить о достижении одной целевой точки T^* , которую можно назвать текущей целевой точкой, и об одной группе связности N_p . Количество агентов в группе связности может изменяться по мере движения. Отдельные группы связности движутся независимо друг от друга, группы могут сливаться (если между ними возникает слышимость) или разъединяться (если слышимость пропадает).

1. Децентрализованное управление строем и алгоритм управления

1.1. Расчет изоморфной формации на основе исходной формации

Для обеспечения движения необходимо построить изоморфную формацию. Для этого свяжем с центром масс группы связности N_p отдельную подвижную прямоугольную систему координат $O'X'Y'$, с центром в т. O'

$(OO' = \frac{\sum_{Np} p_i}{k})$ – центре масс группы связности.

Ориентируем систему координат $O'X'Y'$ строго по направлению к цели: $\overrightarrow{O'Y'} \uparrow \uparrow \overrightarrow{O'T^*}$. Будем считать, что исходная формация задана в виде набора координат $\{s'(k)_j\}$ в системе $O'X'Y'$. В каждый момент времени t A_i знает размер своей группы связности, а следовательно, и соответствующую данному размеру исходную формацию $\{s'(k)_j\}$, заданную в системе $O'X'Y'$. Координаты центра масс группы связности, точек исходной формации (в системе $O'X'Y'$) и целевой точки, известные всем элементам группы связности, могут быть использованы каждым i -м агентом для построения своей изоморфной формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$. Введем следующее правило для расчета положения j -й точки изоморфной формации ($j = 1, \dots, k$) для i -го агента в мировой системе координат:

$$s(k)_j^{(i)} = R_\beta s'_j(k) + \frac{\sum_{A_l \in N_p} p_l}{k}.$$

R_β — это матрица поворота на угол $\beta = \arctan\left(\frac{o'T_y^*}{o'T_x^*} - \frac{\pi}{2}\right)$ для ориентации изоморфной формации на целевую точку. При условии получения агентами абсолютно точной и полной информации верно, что $\forall j s(k)_j^{(m)} = s(k)_j^{(n)}$ при $m \neq n$, так как центр масс, исходная формация для группы связности размера k и координаты цели для всех агентов совпадают. Таким образом, каждый агент A_i построил изоморфизм исходной формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$ (который далее будем называть просто i -й формацией), но в отсутствии ошибок измерений и помех эти формации идентичны и можно говорить об общей изоморфной формации $\{s(k)_j\}$, опустив индекс (i) . Однако для ясности изложения сохраним индекс i -й формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$, чтобы подчеркнуть, что ее точки рассчитываются каждым агентом самостоятельно, а также для последующего рассмотрения ситуации с введением ошибок измерений в модель, когда формации $s(k)_j^{(m)}$ и $s(k)_j^{(n)}$ могут не совпадать.

1.2. Правило управления

В рамках излагаемого подхода предлагается следующее децентрализованное управление:

$$\dot{p}_i = \frac{\alpha V_{max}}{\left\| \sum_j c_{ij} (s(k)_j^{(i)} - p_i) \right\|} \left(\sum_j c_{ij} (s(k)_j^{(i)} - p_i) \right),$$

$$s(k)_j^{(i)} = R_\beta s'_j(k) + \frac{\sum_{A_l \in N_p} p_l}{k},$$

$$p_i(0) = p_0.$$

Здесь c_{ij} — приоритет точки j -той формации для A_i ; $\frac{\alpha V_{max}}{\left\| \sum_j c_{ij} (s(k)_j^{(i)} - p_i) \right\|}$ — это нормировочный коэффициент, поскольку предполагается, что скорость постоянна, но не превышает V_{max} . $\alpha \in [0, 1]$ — вещественный коэффициент для понижения скорости, позволяющий варьировать величину скорости от 0 до V_{max} . Выбор α оговаривается далее.

Слагаемые $(s(k)_j^{(i)} - p_i)$ — это вектора, определяющие направление от текущего положения i -го робота A_i до точки j из i -й формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$.

1.3. Достижение целевой точки

Единственное темпоральное ограничение, рассматриваемое в данной работе: время, за которое должно произойти достижение целевой точки и формирование строя, соответствующего по своей структуре заданной формации, должно быть конечным. Сопоставление времени, необходимого для достижения целевых точек, при различных параметрах управления было проведено при моделировании.

В момент достижения целевой точки T_m^* текущая целевая точка заменяется следующей не достигнутой точкой T_{m+1}^* . Если достигнута последняя целевая точка, то движение прекращается. Изменение ориентации i -той формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$, таким образом, происходит немедленно при достижении очередной целевой точки, что влечет за собой возможные перестроения, в ходе которых агенты могут меняться местами, которые они занимают в структуре строя. Например, если исходная формация задавала для трех агентов структуру строя «шеренга», то после смены текущей цели с T_i^* на T_{i+1}^* с поворотом целевого направления $\overrightarrow{O'T^*}$ на тупой угол работы, занимающие крайние положение в шеренге, могут поменяться местами в структуре строя.

1.4. Расчет приоритетов точек из изоморфной формации

Для расчета приоритетов разработан следующий алгоритм. Будем говорить, что ка s_j из i -й формации занята A_i , если расстояние между ними $\|p_i - s_j\| \leq V_{max}\Delta t$, где Δt – временной промежуток, необходимый агенту на выполнение цикла измерений, расчетов, и корректировки скорости и направления. Коэффициенты-приоритеты точек изоморфной формации для агента c_{ij} (i – номер агента, а j – номер точки изоморфной формации) определяют матрицу $C \in \mathbb{R}^{k \times k}$:

$$c_{ij} = \begin{cases} 0, & s_j \text{ занята } A_i, l \neq i; \\ 0, & A_i \text{ ближайший для } s_l, l \neq j; \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Алгоритм управления также был улучшен следующими эвристиками:

- если A_i – ближайший к точке s_j , то c_{ij} должен быть равен 1, а прочие коэффициенты c_{il} , $l \neq j$ должны быть равны нулю, для того чтобы точка занималась ближайшим к ней агентом. При этом если s_j – незанятая точка, то при вычислении ближайшего к ней агента следует исключить из рассмотрения агентов, которые уже занимают некоторые точки;
- если робот является ближайшим к нескольким точкам изоморфной формации, равноудаленным от него, то он должен брать в расчет только одну из этих точек и проигнорировать остальные (соответствующие коэффициенты $c_{ij}=0$);
- если точка строя s_j занята A_i , исключить притяжение других агентов к точке s_j присвоением $c_{ij}=0$ для A_l , $l \neq i$;
- если агент занял точку и расстояние до нее равно d : $0 \leq d < V_{max}\Delta t$, то выбрать коэффициент понижения скорости α следующим образом: $\alpha = \frac{d}{V_{max}\Delta t}$. При $d \geq V_{max}\Delta t$, $\alpha = 1$.

Предложенное правило управление может напоминать преследование роботом A_i точки/точек изоморфной формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$. Однако, в подходе, суть которого в преследовании агента-лидера [12], движение лидера не управляется ведомым агентом и является данностью, на которую лишь реагируют ведомые. В рассматриваемом правиле управления каждый ро-

бот сам рассчитывает точки, которые «преследует», нет необходимости задавать заранее траектории движения преследуемых точек, их количество и т.д. Кроме того, имеет место приоритезация точек, то есть выбор объектов следования, а также изменение структуры строя при изменении количества агентов в группе связности, которые обычно, отсутствует при реализации схемы с лидерством.

2. Компьютерное моделирование и анализ предложенного подхода

2.1. Управляющие параметры алгоритма и границы применимости

Для компьютерного моделирования время было дискретизировано: Δt – шаг алгоритма. После дискретизации задачи, уравнения были переписаны в разностной форме.

Для создания среды моделирования был использован объектно-ориентированный подход. Среда моделирования позволяет варьировать различные параметры, в том числе в ходе моделирования «на лету». В среде есть средства визуализации для наглядной демонстрации результатов моделирования.

Моделирование подтвердило, что главными управляющими параметрами в предложенном принципе управления являются координаты центра масс исходной формации, задаваемой в подвижной системе координат $O'X'Y'$, связанной с центром масс группы связности. Обозначим в подвижной системе координат центр масс точек $\{s'(k)_j\}$ как $S_{cm} = (S_x, S_y)$. Компьютерное моделирование (Табл. 1, Рис. 1) показало, что:

- при $S_x = 0, 0 < S_y \leq V_{max}\Delta t$ агенты с удовлетворительной точностью формируют строй заданной структуры, и движутся к цели, сохраняя эту структуру с удовлетворительной точностью. Движение к цели происходит вдоль прямой, соединяющей центр масс группы связности и текущую целевую точку;
- при $S_x \neq 0, S_y > 0$ агенты формируют строй необходимой структуры, движение к цели происходит с сохранением структуры строя, но не по кратчайшему расстоянию (например, по эллипсоидальной орбите);
- при $S_x = 0, S_y = 0$ агенты формируют заданную структуру строя, и на этом их движение прекращается;

Табл. 1. Зависимость ошибки от контрольных параметров

$k = 8$, $V_{\max} = 0,05$, начальное расположение агентов — случайное равномерное распределение в квадрате с центром в т. (0, 0) и стороной 0,5; $T^* = (3, 3)$. Данные приводятся с усреднением значения ошибки строя по нескольким запускам моделирования. Количество шагов — число шагов моделирования Δt до достижения цели

S_x	S_y	Усредненная ошибка e_f	Кол-во шагов	Предельное значение e_f
0	0,01	0,04	440	0
0	0,03	0,09	158	0
0	0,05	0,14	95	0
0	0,07	0,28	91	0,24
0	0,09	0,54	93	0,44
0	0,1	0,57	92	0,49
0	0,15	1,43	117	Нет предельного значения
0	0,2	1,46	100	Нет предельного значения
0	0,25	1,51	99	Нет предельного значения
0	0,3	1,45	93	Временная не устойчивая стабилизация на значении 1.40
0	0,35	1,57	93	Нет предельного значения
0	0,4	1,63	93	Временная не устойчивая стабилизация на значении 1.56
0,01	0,05	0,26	106	Нет предельного значения
0,02	0,05	0,26	114	Нет предельного значения
0,03	0,05	0,39	134	Нет предельного значения
0,04	0,05	0,47	144	Нет предельного значения
0,05	0,05	0,69	237	Нет предельного значения
0,1	0,05	1,23	2116	Нет предельного значения

• при $S_y < 0$ агенты по мере движения отдаляются от цели, сохраняя заданную структуру строя.

Для исследования того, насколько точно роботы соблюдают структуру строя, введем метрику для измерения ошибки строя e_f следующим образом:

$$e_f = \sum_{N_p} \min_j \|p_i - s^*(k)_j^{(i)}\|,$$

$$\text{где } s^*(k)_j^{(i)} = R_\beta(s'(k)_j - S_{cm}) + \frac{\sum_{A_i \in N_p} p_i}{k}.$$

Эта метрика отражает насколько фактический строй отклонился от изоморфной формации, центр масс которой совпадает с центром масс группы связности, и которая ориентирована к цели точно также, как все i -е формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$.

В таблице представлены результаты моделирования с целью более детального выявления

характера зависимости ошибки от контрольных параметров. Увеличенное количество шагов в первых двух строках при небольших значениях S_y объясняется тем, что агенты движутся не с максимальной скоростью из-за малого расстояния до точек i -й формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$.

Ошибка строя имеет устойчивых характер убывания со временем (кривая подобная кривой функции $\frac{1}{x}$, $x > 0$ (Рис. 1) при $S_x = 0$, $0 < S_y \leq 2V_{\max}\Delta t$, причем приемлемую ошибку строя (т.е. не превышающую максимального передвижения за 1 шаг) обеспечивает только $S_y \leq V_{\max}\Delta t$. Таким образом, устойчивое убывание ошибки достигается, если $\frac{S_y}{V_{\max}\Delta t} \leq 2$, при этом из Табл. 1 видно, что ошибка стабилизируется на приемлемом уровне (с точки зрения точности соответствия заданной структуре строя) при $\frac{S_y}{V_{\max}\Delta t} \leq 1$.

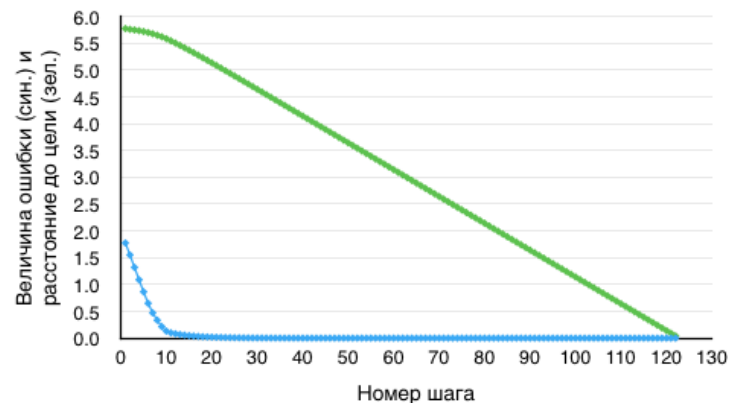


Рис. 1. Убывание ошибки строя (нижняя линия на графике) и расстояния до цели (верхняя линия) для строя из шести агентов при соотношении $\frac{S_y}{V_{\max}\Delta t} = \frac{1}{5}$, $V_{\max} = 0,05$ и $S_x = 0$

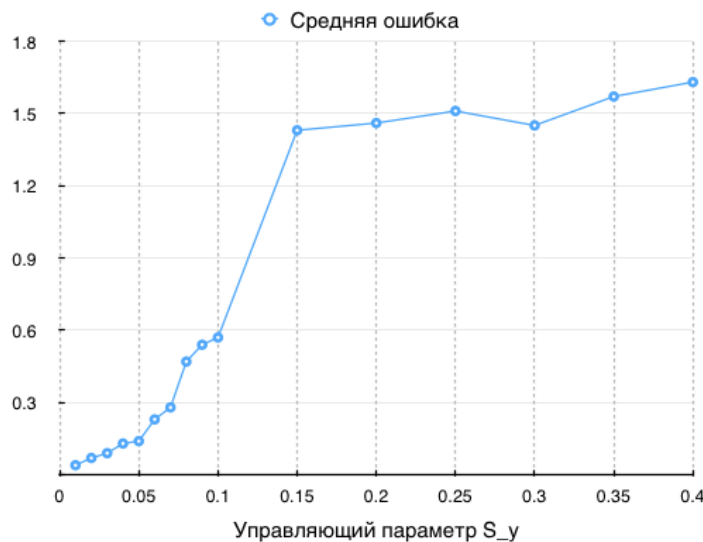


Рис.2. Зависимость средней ошибки строя от управляющего параметра S_y при условии, что $S_x = 0$, $V_{\max} = 0,05$. Присутствует участок «линейного» роста ($0 < S_y \leq 0,05$), «экспоненциального» роста ($0,05 < S_y \leq 0,15$) и «логарифмического» роста ($S_y \geq 0,15$). Данные приводятся с усреднением значения ошибки строя по нескольким запускам моделирования

Зависимость ошибки строя от S_y имеет не простой характер, более детально описанный при помощи графика на Рис. 2.

Параметр S_x обязательно должен быть выставлен в 0, иначе направление движения строя заведомо направлено не вдоль линии, соединяющей центр масс группы связности и цель, что приводит к увеличению числа необходимых шагов.

Таким образом, алгоритм применим в данном виде при определенных значениях сдвига S_{cm} : $S_x = 0, 0 < S_y \leq V_{\max}\Delta t$.

2.2. Динамическое изменение размера группы связности

На практике возможен внезапный выход агента из строя, а также установление связи с новыми агентами. Следовательно, необходимо корректно обрабатывать изменения размера групп связности как в большую, так и в меньшую стороны. Моделирование показало, что изменение количества агентов успешно обрабатывается алгоритмом (Рис. 3). На каждом шаге алгоритма агенты определяют размер своей группы связности и, исходя из этого, подбирают

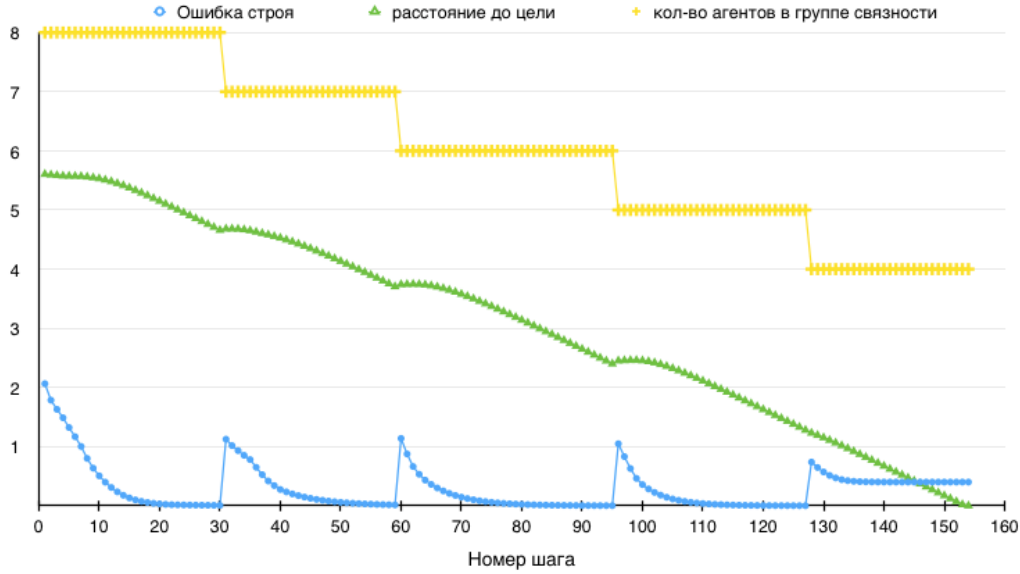


Рис. 3. График динамики ошибки строя, расстояния до цели и размера группы связности на протяжении движения к цели. В некоторые моменты времени случайный агент уничтожался, что влекло за собой перестроение и всплески ошибки строя.

соответствующую структуру строя и исходную формацию для расчета точек изоморфной формации $\{s(k)_j^{(i)}\}$. При смене структуры строя агенты реализуют перестроение.

2.3. Избегание столкновений между агентами и обход препятствий

На практике роботы должны огибать препятствия и не сталкиваться друг с другом в ходе движения. Для этого в правило управления вводится дополнительная компонента, реализующая отталкивание от препятствия или другого робота при сближении на расстояние меньше порогового. Для рассмотрения столкновений необходимо оговорить размеры агентов (прежде они считались безразмерными точками на плоскости) и самих препятствий. Пусть препятствия H_k имеют форму сплошного круга радиуса R_k с центром в точке h_k , а A_i для любого i имеет форму круга радиуса r_A с центром в точке p_i . Текущее расположение и размеры препятствия заранее не известны агентам. Предполагается, что роботы могут при помощи сенсоров различить текущее положение препятствия и его размеры, если препятствие попадает в зону действия сенсоров, т.е. $\|h_k - p_i\| < r$. Обозначим $(\sum_j c_{ij} (s(k)_j^{(i)} - p_i))$ как U_i (отличается от u_i отсутствием нормировочного коэффициента), введем U'_i следующим образом:

$$U'_i = U_i + \sum_{h_k: \left\{ \begin{array}{l} \|h_k - p_i\| \leq R_k + r_A + \partial \\ \|h_k - p_i\| < r \end{array} \right.} \frac{1}{\|h_k - p_i\|} + \sum_{p_j: \left\{ \begin{array}{l} \|p_i - p_j\| \leq 2r_A + \partial, i \neq j \\ \|p_i - p_j\| < r \end{array} \right.} \frac{1}{\|p_i - p_j\|}$$

Первое слагаемое в этой формуле отвечает за огибание препятствий, а второе слагаемое предотвращает столкновения между агентами, ∂ — некая малая величина, гарантирующая, что отдаление начнет происходить до столкновения объектов. Тогда модифицированное правило управления: $\dot{p}_i = \frac{1}{\|U'_i\|} U'_i$.

Моделирование показало, что с учетом приведенной модификации алгоритма реализуется успешное огибание препятствий разных размеров (Рис. 4 и Рис. 5). Однако, выявлено следующее ограничение: если центр препятствия в ходе движения оказывается строго на линии, соединяющей центр масс группы связности и текущую целевую точку, то агент, также находящийся на данной линии и упирающийся в препятствие, заклинивается на месте, так как не определено справа или слева огибать препятствие в симметричных случаях.

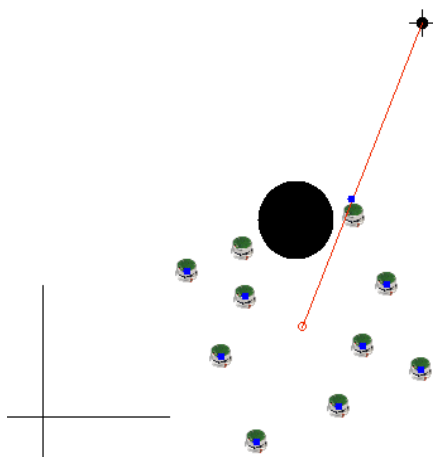


Рис. 4

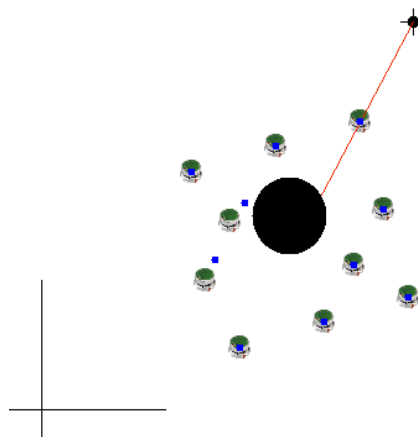


Рис. 5

Снимки с экрана визуализации среды моделирования: огибание препятствия средних размеров. Для отображения агентов использованы фотографии роботов Khepera, точки меньшего размера – точки изоморфной формации (в отсутствии ошибок измерений общей для всех элементов группы связности), препятствие имеет форму круга. Центр масс агентов соединён линией с текущей целевой точкой (точка с крестом), центр координат и оси слева внизу на каждом из снимков.

2.4. Устойчивость по отношению к ошибкам измерений в ф орме случайных помех

В алгоритме используется локальная информация о расположении ближайших соседей. На практике результаты измерений при помощи сенсоров или переданная при помощи радиосвязи информация всегда могут содержать ошибки и шумы [13]. За время, требуемое на обработку или передачу измерений, измеряемый параметр может измениться, поэтому алгоритмы, не устойчивые к вводу в модель ошибок, слабо применимы на практике.

Для исследования устойчивости разработанного алгоритма было введено случайное отклонение результатов измерения расположения соседей. Пусть истинное положение A_j в момент времени t – это p_j , а результатом измерения для агента A_i является $\bar{p}_j^{(i)} = p_j + \alpha_{ij}$. Здесь α_{ij} – случайный вектор, компоненты которого являются случайными величинами с равномерным распределением на отрезке $[-B; B]$. Таким образом, в данном случае центр масс группы связности, точки изоморфных формаций $\{s(k)_j^{(i)}\}$ и центры масс этих формаций, с точки зрения разных агентов, не будут совпадать из-за введенной ошибки. Закладывая разные величины ограничения ошибки в ходе моделирования удалось установить, что алгоритм обладает су-

щественным запасом устойчивости (Рис. 6 и Рис. 7). На точность поддержания заданной структуры строя и скорость достижения текущей целевой точки напрямую влияет соотношение $\frac{B}{V_{max}\Delta t}$. Если оно близко к единице, то ошибка измерений вносит лишь некоторые колебания текущей структуры строя в пределах допустимой ошибки строя. Если оно существенно больше единицы, то ошибка строя начинает превышать максимальное передвижение за один шаг, и движение к цели происходит крайне медленно, так как агенты заняты непрерывным формированием структуры строя.

По графику Рис. 6 видно, что при ошибке измерений, в десятки раз превышающую величины $V_{max}\Delta t$, ошибка строя не стремится к нулю при постоянном размере группы связности, хотя движение к целевой точке, пусть медленно, но происходит.

Заключение

В работе рассмотрена задача управления строем. Основной результат работы — управление и алгоритм, реализующие динамический выбор положения в структуре строя, корректно обрабатывающие ситуации изменения структуры строя из-за потери агентов или наоборот приобретения связи с очередными агентами, устойчивые к введению ошибки измерений и

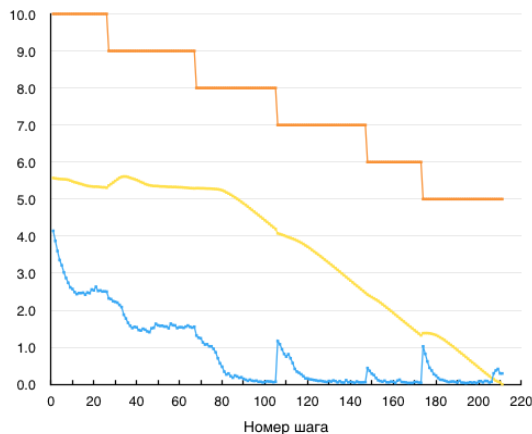


Рис. 6

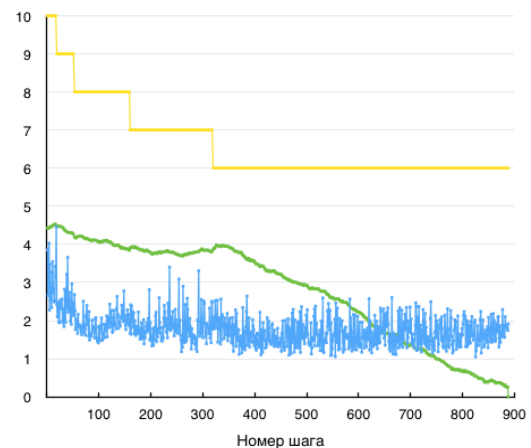


Рис. 7

Графики ошибки строя (нижняя кривая), расстояния до целевой точки (средняя кривая с характерным монотонным убыванием до нуля) и размера группы связности (верхняя ломаная) с учётом случайного шума: слева шум не превосходит величины максимального передвижения агентов за один шаг алгоритма, справа шум не превосходит величины в 30 раз превышающей максимальное передвижение агентов за один шаг алгоритма. Все прочие условия (максимальная скорость агентов, нахождение целевой точки и т.д.) одинаковые.

учитывающие поддержание безопасного расстояния между агентами, а также огибание препятствий. Динамический выбор агентом своего положения в структуре строя возможен благодаря представленному в данной работе принципу задания структуры строя на основании точек исходной формации. Предложенный подход позволяет обеспечивать перестроение и снизить количество передвижений при перестроении. Все указанные преимущества стали возможны благодаря не фиксированному положению агента в структуре строя. Полученное управление проанализировано при помощи моделирования, выявлены зависимости от задаваемых параметров и начальных данных. К наиболее вескому недостатку полученного управления и алгоритма можно отнести то, что не учитываются ограничения на канал связи, который из-за свойства транзитивности используется очень активно. К другим недостаткам текущей версии алгоритма можно отнести довольно сильно упрощенную модель препятствий и предположение о том, что агент может точно идентифицировать препятствие и его размеры, как только препятствие попадает в радиус действия сенсоров агента. Дальнейшим развитием работы может стать усложнение класса препятствий, переход к модели, учитывающей ускорение в ходе движения, а также учет влияния препятствий на область слышимости.

Литература

1. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С. В. Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. №2. 2009. – с. 3–24.
2. Reynolds C. Flocks, birds, and schools: A distributed behavioural model // Comput. Graph. 1987. Vol. 21. P. 25–34.
3. Vicsek T., Czirok A., Jacob E. B., et al. Novel type of phase transitions in system of self-driven particles // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 75. P. 1226–1229.
4. Bosse T., Hoogendoorn M., Klein C.A., et al. Modelling collective decision making in groups and crowds: Integrating social contagion and interacting emotions, beliefs and intentions // Auton Agent Multi-ag. 2013. 27. N 1. P. 52–84.
5. Olfati-Saber R., Fax A., Murray R. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95, No. 95. P. 215–233.
6. Anderson B.D., Belhumeur P.N., Morse A.S., et al: A Framework for Maintaining Formations Based on Rigidity // Proc. of the IFAC World Congress. Barcelona, Spain, 2002.
7. Eren T., Morse A., Belhumeur P. Closing ranks in vehicle formations based on rigidity // Proceedings of the 41st IEEE Conference. Decision and Control. 2002. Vol. 3. P. 2959–2964.
8. Eren T., P. Belhumeur, B. Anderson et al. A framework for maintaining formation based on rigidity. Proceedings of the IFAC World Congress. Barcelona. Spain. 2002.
9. Zhengping W., Zhihong G., Xianrong W., et al. Consensus Based Formation Control and Trajectory Tracing of Multi-Agent Robot Systems // J Intell Robotic Syst. 2007. 48. N 3. P. 397–410.
10. Wang J., Nian X., Wang H. Consensus and formation control of discrete-time multi-agent systems // J Cent South Univ T. 2011. 18. N 4. P. 1161–1168.

11. Xue D., Yao J., and Wang J. H. Formation Control and Obstacle Avoidance for Hybrid Multi-Agent Systems. *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, Article ID 123072, 11 pages, 2013.
12. Rodrigues J., Figueira D., Neves C., et al. Leader-following graph-based distributed formation control // *Robotica*. 2009. N 75, P. 8–14.
13. Cuiqin M., Tao L., Jifeng Z. Consensus control for leader-following multi-agent systems with measurement noises // *J Syst Sci Complex*. 2010. 23. N 1. P. 35–49.

Морозова Наталья Сергеевна. Аспирантка Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Окончила Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова в 2012 году. Автор трех печатных работ. Область научных интересов: управление в мультиагентных системах в приложении к робототехнике, задача управления движением строя из агентов. E-mail: natalia.s.morozova@gmail.com