

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ТОПОЛОГИИ СТРУКТУРЫ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ АГЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ

Ключевые слова: агент, мультиагентная система, самоорганизация, закон управления, потенциальная функция.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время кибернетика наиболее активно внедряется в области создания автономных подвижных объектов (агентов, роботов), способных самостоятельно передвигаться в пространстве и выполнять определенные задачи. Этим объясняется актуальность задачи разработки эффективных механизмов группового управления сообществом агентов, в том числе формирование структуры группы с требуемой топологией. Решение такой задачи может усложняться отсутствием в системе глобального наблюдателя (органа управления) и полного владения агентами всей информацией о действиях соседних агентов.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В качестве базовой методологии построения моделей управления принято использовать аппарат виртуальных потенциальных функций, который заключается в применении отрицательного градиента некоторой комбинированной функции притягивания и отталкивания для обеспечения сходимости и неконфликтности агентов [1].

Функция притягивания предназначена для объединения агентов и формирования из них структуры с необходимой топологией. Но такая функция не устраняет возможность столкновений агентов и поэтому в противовес функции притягивания вводится функция отталкивания, аргументами которой являются расстояния между агентами и которая определяет степень приближения одного агента к другому, достигая максимума (бесконечности), когда агенты находятся в одной точке. Недостаток применения комбинированной функции — появление точек равновесия, которые не всегда желаемые для агентов. Поэтому доказательство глобальной сходимости исходной структуры к структуре с желаемой топологией при любых начальных условиях становится актуальной научной проблемой, поскольку аналитическое определение этого равновесия и траекторий, которые сходятся к необходимой топологии, является достаточно сложным.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросам разработки законов управления формациями групп автономных существ (агентов) посвящено значительное количество публикаций [2–5]. При этом общими для всех моделей являются законы управления, которые базируются на следующих основных предположениях:

- каждый агент знает свою цель, но не знает цели других агентов;
- каждый агент знает расположение лишь некоторого подмножества аналогичных агентов, с которыми может образовывать временную группу.

Модели управления формациями могут быть разделены на две категории. К первой относятся схемы, которые базируются на исследовании поведения групп животных на основе поддержания расстояний между объектами, самоорга-

© А.Ю. Пермяков, В.А. Савченко, И.Д. Варламов, 2012

низации, группирования, модели хищника и жертвы и др. [6]. Такие модели, как правило, не требуют определения специфических позиций для каждого агента, поскольку базируются на универсальных моделях самих агентов.

Вторая группа схем включает поведение агентов, основанное на графовых моделях, которые описываются системами линейных дифференциальных уравнений и применяются для локальных групп агентов [7]. Существуют также и другие подходы (нелинейные модели, генетические алгоритмы, распределенный искусственный интеллект, модели силы притяжения частиц и др.) [8].

Одни авторы [9] рассматривают проблему группового управления без учета возможных столкновений агентов во время движения, другие [10] рассматривают вопросы взаимного влияния, надежности и устойчивости системы, дополняя их стандартными графовыми моделями. Например, модель цепной устойчивости исследует вопрос влияния распространения взаимодействия при формировании определенной структуры системы, модель формации на основе лидера исследует вопрос влияния лидирующего агента на остальных членов группы.

Некоторые неконфликтные стратегии включают реактивные схемы, которые базируются на простых правилах поведения [11], гибридных архитектурах [12], виртуальных притягивающих потенциальных функциях и отталкивающих векторных полях [13]. Суть отталкивающих потенциальных функций заключается в построении таких полей вокруг каждого объекта, которые определяют возможность выявления соседнего объекта лишь тогда, когда тот входит в определенную зону.

В научной литературе описаны разные подходы относительно модификации метода потенциальных функций в целях обеспечения управления и избегания столкновений. Например, в [14] сформирована потенциальная функция, предназначенная для определения точек нежелательного равновесия. В [15] показано, что точки нежелательного равновесия являются неустойчивыми в масштабе полного графа формации. Используя неустойчивость поведения этого равновесия, в некоторых подходах предлагаются методы выхода из таких точек с применением метода виртуальных препятствий [16].

Другие стратегии избегания столкновений, такие как прогнозная модель управления, социальные потенциальные поля, нечеткая логика и нейронные сети, рассматриваются в [17]. В этих схемах предлагается иерархическая схема контроля, где высшие уровни управления координируют процесс избегания столкновений на низших уровнях. В некоторых работах рассматривается оценка влияния нестабильности связи на устойчивость формации.

Однако в целом в большинстве случаев метод виртуальных потенциальных функций требует централизации управления, поскольку необходимо владеть информацией о состоянии всей системы, в то время как во многих реальных системах добиться полного знания каждым агентом всей обстановки проблематично. Практическая реализация таких функций также выдвигает достаточно высокие требования относительно аппаратных возможностей вычислителей, которые не всегда могут быть реализованы на малогабаритных вычислителях агентов.

Цель статьи заключается в разработке такой модели взаимодействия автономных агентов в мультиагентной системе, которая не требовала бы глобального наблюдателя и позволяла реализовать систему управления на основе локальной самоорганизации групп агентов.

ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ТОПОЛОГИИ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ

На основе подхода, изложенного в [7, 17], предлагается следующая постановка задачи управления структурой автономных агентов.

Пусть $N = \{A_1, \dots, A_n\}$ — множество агентов, которые движутся в двумерном пространстве с текущими позициями $z_i(t) = [x_i(t) y_i(t)]$, $i = 1, \dots, n$. Модель движения каждого агента может быть описана уравнениями

$$\dot{z}_i = u_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где $u_i = \begin{bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \end{bmatrix} \in R^2$ — скорость движения i -го агента относительно осей координат.

Пусть $N_i \subseteq \{z_1, \dots, z_n\}$, $N_i \neq \emptyset$, $i = 1, \dots, n$, — подмножество позиций агентов, видимое для агента A_i . Также введем вектор $c_{ij} = \begin{bmatrix} h_{ji} \\ v_{ji} \end{bmatrix} \quad \forall j \in N_i$, который представляет желаемую позицию агента A_i относительно агента A_j в отдельной формации. Таким образом, желаемая относительная позиция каждого агента A_i в формации может быть определена как

$$z_i^* = \varphi_i(N_i) = \frac{1}{n_i} \sum_{j \in N_i} (z_j + c_{ij}), \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где n_i — мощность подмножества N_i . Поэтому желаемая относительная позиция агента A_i может рассматриваться как комбинация желаемых позиций z_i относительно позиций всех элементов N_i . Пусть также $\frac{d}{2}$ — радиус круга вокруг каждого из агентов.

Сформулируем задачу управления: для каждого агента A_i отыскать закон управления $u_i(t) = f_i(N_i(t))$, такой что:

- $\lim_{t \rightarrow \infty} (z_i - z_i^*) = 0$, $i = 1, \dots, n$, — условие сходимости к требуемой топологии;
- $\|z_i(t) - z_j(t)\| \neq 0 \quad \forall t \geq 0, i \neq j$, — условие избегания столкновения агентов.

Как предлагается в [18], желаемые относительные позиции группы агентов в желаемой топологии могут быть поданы с помощью графа структуры, определенного как $G = \{Q, E, C\}$ — тройки, которая состоит из:

- множества вершин $Q = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, которые описывают членов команды;
- множества дуг $E = \{(j, i) \in Q \times Q\}$, $i \neq j$, которые включают пары вершин, определяющие связь между агентами, поэтому $(j, i) \in E$, если $j \in N_i$;
- множества векторов $C = \{c_{ji}\}$, $\forall (j, i) \in E$, которые определяют желаемое относительное положение между агентами i и j , т.е. $z_i - z_j = c_{ji} \in R^2 \quad \forall i \neq j, j \in N_i$, в желаемой топологии формации.

Если $(i, j) \in E$, то вершины i и j называются инцидентными. Степень g_i i -й вершины определяется как число инцидентных ей вершин. Путь от вершины i к вершине j является соединением отдельных вершин, начиная из i и заканчивая вершиной j , так что последовательные вершины инцидентные. Базовым графом графа структуры является граф, у которого $\forall (i, j) \in E$ существует дуга (j, i) , даже если ее не было в начальном графе структуры. Базовый граф всегда является неориентированным графом. Если существует путь между любыми двумя вершинами базового графа, то граф структуры называется связным. Граф структуры называется хорошо определенным, если он удовлетворяет следующим условиям:

- граф является связным;
- отсутствие конфликтов в необходимых векторах позиций, т.е. если $c_{ij}, c_{ji} \in C$, то $c_{ij} \neq c_{ji}$;
- векторы желаемых позиций определяют замкнутую структуру, например, если существуют векторы $c_{jm_1}, c_{m_1m_2}, c_{mm}, \dots, c_{m_rj} \in C$, то они должны удовлет-

ворять условию

$$c_{jm_1} + c_{m_1m_2} + c_{mm} + \dots + c_{m_rj} = 0. \quad (3)$$

Последнее условие определяет, что отдельные векторы позиций должны образовывать замкнутый полигон. Для описания основных топологических свойств графа структуры применяется матрица Кирхгофа.

Матрица Кирхгофа графа структуры G является матрицей

$$L(G) = \Delta - A_d, \quad (4)$$

где $\Delta = \begin{bmatrix} g_1 & \dots & 0 \\ \dots & \ddots & \dots \\ 0 & \dots & g_n \end{bmatrix}$, g_i — степень вершины i ; $A_d = [a_{ij}]_{n \times n}$ — матрица инцидентности, где

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (j, i) \in E, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Для связного графа структуры матрица Кирхгофа имеет единственное нулевое собственное значение, а $[1, \dots, 1]^T \in R^n$ — ее собственный вектор. На рис. 1 приведен пример графа структуры. Агенты находятся в вершинах графа, а дуги определяют векторы c_{ji} . Выделенными элементами матрицы Кирхгофа является степень вершин g_i , $i=1, \dots, n$.

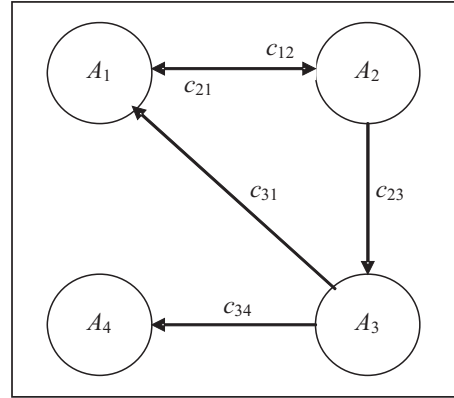


Рис. 1

Для структуры, изображенной на рис. 1, множества N_i имеют вид $N_1 = \{z_2, z_3\}$, $N_2 = \{z_1\}$, $N_3 = \{z_2\}$, $N_4 = \{z_3\}$. Матрицу Кирхгофа запишем как

$$L(G) = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \text{ векторы требуемых позиций — } c_{21} = [-1, 0], c_{12} = [1, 0],$$

$c_{31} = [-1, 1]$, $c_{23} = [0, -1]$, $c_{34} = [-1, 0]$ при условии замкнутости структуры: $c_{21} = -c_{12}$, $c_{12} + c_{23} + c_{31} = 0$.

Граф структуры называется ориентированным, если $\forall i, j (j, i) \in E \rightarrow (i, j) \notin E$ или $j \in N_i$ предусматривает $i \notin N_j$. Граф структуры называется неориентированным, если $\forall i, j (j, i) \in E \rightarrow (i, j) \in E$ или $j \in N_i$ предусматривает $i \in N_j$, и смешанным в других случаях. Для неориентированных графов структуры матрица Кирхгофа всегда будет симметричной полуопределенной положительной матрицей. Кроме того, важным есть понятие центроида.

Определение. Центроидом расположения $z(t)$ является срединное положение всех агентов группы, т.е.

$$z(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i(t). \quad (6)$$

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Для системы (1) виртуальная потенциальная функция притягивания может быть определена как

$$\gamma_i = \sum_{j \in N_i} \|z_i - z_j - c_{ji}\|^2 \quad \forall j \in N_i, i=1, \dots, n. \quad (7)$$

Функция (7) является положительно-определенной и достигает своего минимума, когда $z_i - z_j = c_{ji}$, $j \in N_i$, $i = 1, \dots, n$. Тогда закон управления на основе введенной функции притягивания можно определить как

$$u_i = -\frac{1}{2}k \left(\frac{\partial \gamma_i}{\partial z_i} \right)^T, \quad i = 1, \dots, n, \quad k > 0. \quad (8)$$

Замкнутая циклическая система (1)–(8) имеет форму

$$\dot{z} = -k((L(G) \otimes I_2)z - c), \quad (9)$$

где $L(G)$ — матрица Кирхгофа графа структуры, \otimes — символ произведения

Кронекера [19], I_2 — единичная матрица (2x2), $z = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_2 \end{bmatrix}$ — вектор позиций

агентов, $c = \begin{bmatrix} \sum_{j \in N_1} c_{j1} \\ \vdots \\ \sum_{j \in N_n} c_{jn} \end{bmatrix}$ — вектор взаимных направлений расположения агентов.

В [20] показано, что в замкнуто-циклических системах типа (1)–(8) агенты сходятся к желаемой топологии экспоненциально (т.е. $\lim_{t \rightarrow \infty} (z_i - z_i^*) = 0$, $i = 1, \dots, n$), если желаемая топология базируется на хорошо определенном графе структуры. Доказательство этого факта базируется на свойствах матрицы Кирхгофа и теореме Гершгорина о циклах [21].

Управление на основе функции притягивания гарантирует сходимость к желаемой топологии, однако, не гарантирует от столкновений отдельных агентов. Идея применения функции отталкивания заключается в том, что каждый агент расценивает других агентов, как подвижные препятствия. Квадрат расстояния между двумя агентами определяется по $\beta_{ij} = \|z_i - z_j\|^2 \forall i, j \in N, i \neq j$. Тогда агент A_j , который потенциально может столкнуться с A_i , будет принадлежать множеству

$$M_i = \{A_j \in N \mid \beta_{ij} \leq d^2\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

где d — диаметр зоны влияния.

Из-за движения агентов множество M_i будет изменяться. Следовательно, закон управления структурой с избеганием столкновений на основе функций притягивания и отталкивания будет иметь вид

$$u_i = -\frac{1}{2}k \frac{\partial \gamma_i}{\partial z_i} - \sum_{j \in M_i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

где γ_i — функция притягивания, определенная в (7), $V_{ij}(\beta_{ij})$ — функция отталкивания между агентами A_i и A_j , которая удовлетворяет следующим свойствам:

- 1) V_{ij} монотонно возрастает при $\beta_{ij} \rightarrow 0$, когда $\beta_{ij} \leq d^2$;
- 2) $\lim_{\beta_{ij} \rightarrow 0} V_{ij} = \infty$;
- 3) $V_{ij} = 0$ для $\beta_{ij} \geq d^2$, $\frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i} = 0$ для $\beta_{ij} = d^2$. Это значит, что каждая V_{ij} появляется плавно лишь в пределах зоны влияния агента A_i . Также можно пока-

зять, что

$$\sum_{j \in M_i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i} = \sum_{j \neq i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i}. \quad (12)$$

Общая функция, которая удовлетворяет описанным свойствам, предложена в [22]:

$$V_{ij} = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\beta_{ij}} - \frac{1}{d^2} \right)^2, & \text{если } \beta_{ij} \leq d^2, \\ 0, & \text{если } \beta_{ij} > d^2, \end{cases} \quad (13)$$

где $\eta > 0$. Такая функция также согласовывается со свойствами функции отталкивания:

$$V_{ij} = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\beta_{ij}} - \frac{1}{d^2} \right)^r, & \text{если } \beta_{ij} \leq d^2, \\ 0, & \text{если } \beta_{ij} > d^2, \end{cases} \quad r=2,3,4, \dots \quad (14)$$

Для моделирования комбинированной потенциальной функции одного агента в точке с координатами $[0,0]$ на основе составляющих (7) и (14) получим функцию

$$f(x, y) = \left(-\sqrt{x^2 + y^2} \right)^r + \eta \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{1}{d^2} \right)^r.$$

Результаты моделирования при значениях $c=0$, $d=5$, $\eta=10$, $r=2$ показаны на рис. 2.

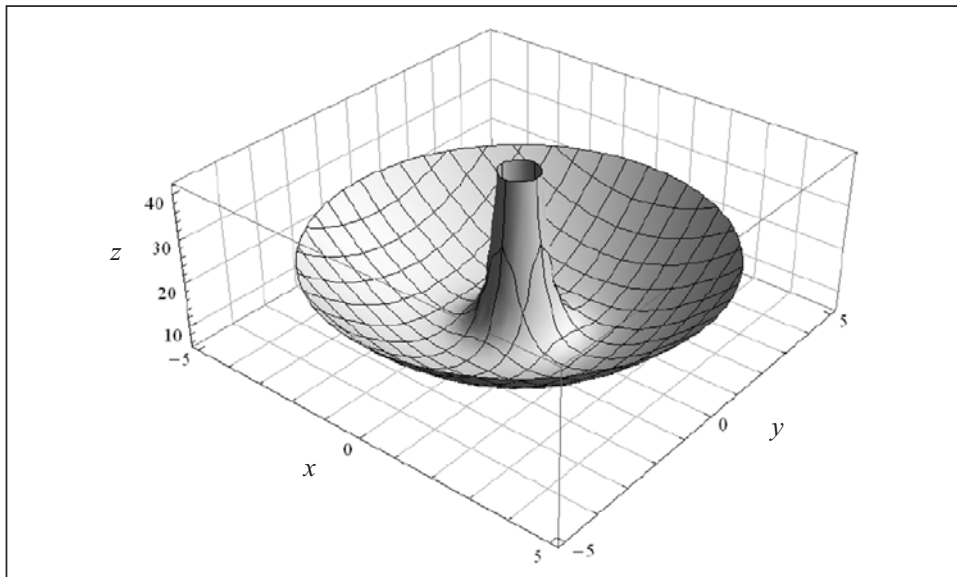


Рис. 2

Также можно записать $\frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i} = 2 \frac{\partial V_{ij}}{\partial \beta_{ij}} (z_i - z_j)$. Поскольку $\beta_{ij} = \beta_{ji}$, то

$V_{ij} = V_{ji}$ и $\frac{\partial V_{ij}}{\partial \beta_{ij}} = \frac{\partial V_{ji}}{\partial \beta_{ji}} \quad \forall i \neq j$. Это подтверждает, что функция отталкивания согласовывается со следующим свойством асимметричности:

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial \beta_{ij}} = -\frac{\partial V_{ji}}{\partial \beta_{ji}} \quad \forall i \neq j. \quad (15)$$

Как уже отмечалось, основным недостатком сочетания функций притягивания и отталкивания является то, что агенты могут попадать к нежелательным точкам равновесия функций. В [19] предлагается способ определения этих точек для случая любых неориентированных графов структуры путем решения уравнения

$$(kL(G) + 2R) \otimes I_2 z = kc, \quad (16)$$

где $L(G)$ — матрица Кирхгофа неориентированного графа структуры;

$$c = \begin{bmatrix} \sum_{j \in N_1} c_{j1} \\ \vdots \\ \sum_{j \in N_n} c_{jn} \end{bmatrix} \text{ и } (R)_{ij} = \begin{cases} \sum_{j \neq i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial \beta_{ij}}, & \text{если } i = j, \\ -\frac{\partial V_{ij}}{\partial \beta_{ij}}, & \text{если } i \neq j. \end{cases}$$

Например, анализируя самый простой случай топологии с двумя агентами: A_1 и A_2 , где $N_1 = \{z_2\}$ и $N_2 = \{z_1\}$, уравнение (16) запишем

$$\left(k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{12}}{\partial \beta_{12}} & -\frac{\partial V_{12}}{\partial \beta_{12}} \\ -\frac{\partial V_{21}}{\partial \beta_{21}} & \frac{\partial V_{21}}{\partial \beta_{21}} \end{bmatrix} \right) \otimes I_2 \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} c_{21} \\ c_{12} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

С учетом (13) уравнение (17) перепишем в виде следующей системы нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} k(z_1 - z_2) - \delta \frac{4\eta}{\|z_1 - z_2\|^4} \left(\frac{1}{\|z_1 - z_2\|^2} - \frac{1}{d^2} \right) (z_1 - z_2) &= kc_{21}, \\ k(z_2 - z_1) - \delta \frac{4\eta}{\|z_1 - z_2\|^4} \left(\frac{1}{\|z_1 - z_2\|^2} - \frac{1}{d^2} \right) (z_2 - z_1) &= kc_{12}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\delta = \begin{cases} 1, & \text{если } \beta_{12} \leq d^2, \\ 0, & \text{если } \beta_{12} > d^2. \end{cases}$

В примере с двумя агентами упрощение составляющей $\delta \frac{4\eta}{\beta_{12}} \left(\frac{1}{\beta_{12}} - \frac{1}{d^2} \right)$

приводит к таким зависимостям:

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_1 - y_2 - v_{21}}{x_1 - x_2 - h_{21}} = \frac{y_2 - y_1 - v_{12}}{x_2 - x_1 - h_{12}}. \quad (19)$$

Такие нежелательные точки равновесия образуются в связи с тем, что оба агента взаимно отрицают движение друг друга, когда пытаются двигаться навстречу друг другу.

Рассмотрим также поведение центра тяжести позиций. Для этого воспользуемся системой (1) и законом управления (11). Допустим, что $k > 0$ и желаемая топология описывается хорошо определенным графом структуры. На основании изложенного можно сформулировать теорему.

Теорема. В замкнуто-циклической структуре (1)–(11) центр тяжести позиций агентов остается постоянным, т.е. $z(t) = z(0) \forall t \geq 0$, если топология удовлетворяет условию $[1, \dots, 1]L(G) = [0, \dots, 0]$.

Доказательство. Движение каждого агента A_i в замкнуто-циклической системе (1)–(11) описывается уравнениями

$$\dot{z}_i = -k \left(g_i z_i - \sum_{j \in N_i} z_j - \sum_{j \in N_i} c_{ji} \right) - \sum_{j \in M_i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i}, \quad i=1, \dots, n. \quad (20)$$

Используя свойство (12), запишем

$$\dot{z}_i = -k \left(g_i z_i - \sum_{j \in N_i} z_j - \sum_{j \in N_i} c_{ji} \right) - \sum_{j \neq i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i}, \quad i=1, \dots, n. \quad (21)$$

Тогда движение центра тяжести позиций можно представить как

$$\dot{z}_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{z}_i = -\frac{k}{n} \left(\sum_{i=1}^n g_i z_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} z_j - \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} c_{ji} \right) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i}. \quad (22)$$

Благодаря тому, что граф структуры удовлетворяет условию замкнутости (3) ($\sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} c_{ji} = 0$), и используя свойство асимметричности (16), имеем

$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} \frac{\partial V_{ij}}{\partial z_i} = 0$. Тогда уравнение (22) может быть приведено к виду

$$\dot{z}_i(t) = -\frac{k}{n} \left(\sum_{i=1}^n g_i z_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} z_j \right) = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(g_i z_i - \sum_{j \in N_i} z_j \right). \quad (23)$$

Множитель $\left(g_i z_i - \sum_{j \in N_i} z_j \right)$, $i=1, \dots, n$, отно-

сится к i -му элементу колонки вектора $(L(G) \otimes I_2)z$. Тогда уравнение (23) является суммой элементов $(L(G) \otimes I_2)z$, умноженной на $-\frac{k}{n}$.

Поэтому уравнение (23) будет эквивалентным:

$$\dot{z}(t) = -\frac{k}{n} ([1, \dots, 1](L(G) \otimes I_2)z). \quad (24)$$

Отсюда ясно, что $\dot{z}(t) = 0 \quad \forall t \geq 0$, если соблюдено условие теоремы. Согласно этим условиям центр тяжести позиций, который определен начальными позициями агентов $\bar{z}(t) = \bar{z}(0)$, будет оставаться постоянным $\forall t \geq 0$. \square

Для проверки разработанной модели рассмотрим, например, систему из шести агентов, произвольно расположенных в двумерном пространстве, задача которых — формирование топологии «змейка» (рис. 3). При этом векторами желаемых позиций будут $c_{21} = [2, 1]$, $c_{32} = [-2, 1]$, $c_{43} = [2, 1]$, $c_{54} = [-2, 1]$, $c_{65} = [2, 1]$, $c_{16} = [-2, -5]$, $d = 5$, $\eta = 1$. Результаты моделирования движения агентов без использования функции отталкивания и с использованием функции отталкивания приведены на рис. 4, а, б соответственно.

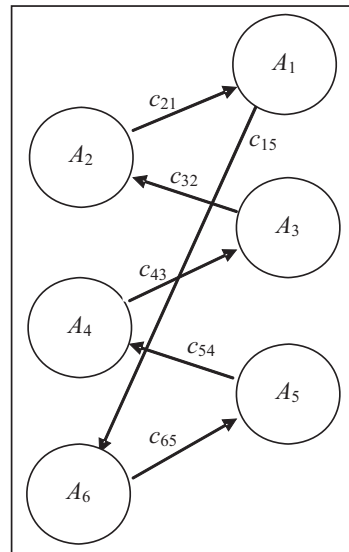


Рис. 3

Как видно из рис. 4, б, траектории агентов могут значительно искривляться в случае возможных столкновений с другими агентами в отличие от гладких траекторий на основе применения лишь функций притягивания (рис. 4, а). Центроид позиций, как и было определено ранее, остается постоянным: точка [5, 5]. Интересен вопрос о положении центраида системы и траекториях движения агентов при наличии неподвижных препятствий. Для этого сначала поставим препятствие на пути движения агентов A_5 и A_6 в точке [8, 5]. На рис. 5 показано формирование заданной топологии при наличии препятствия: а — на пути следования агентов; б — на месте желаемой позиции агента A_6 .

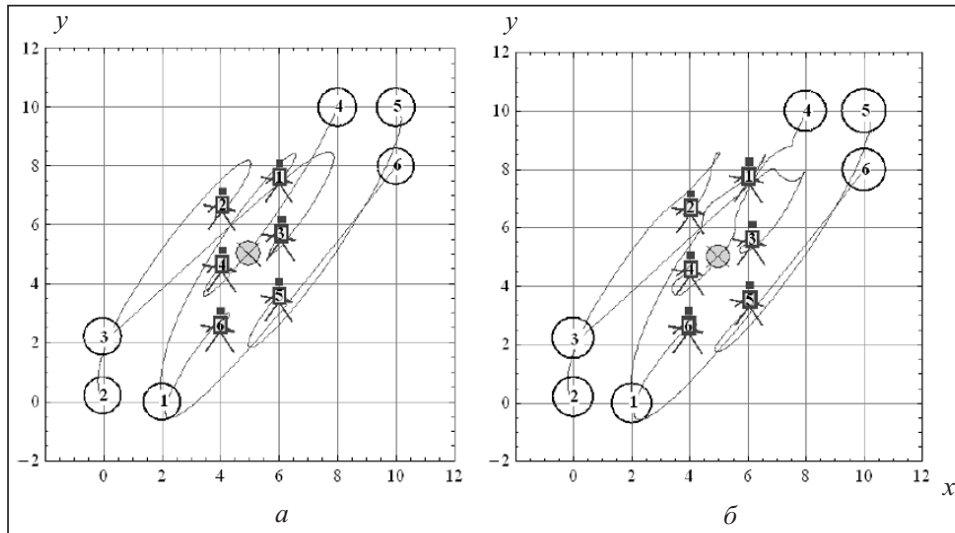


Рис. 4

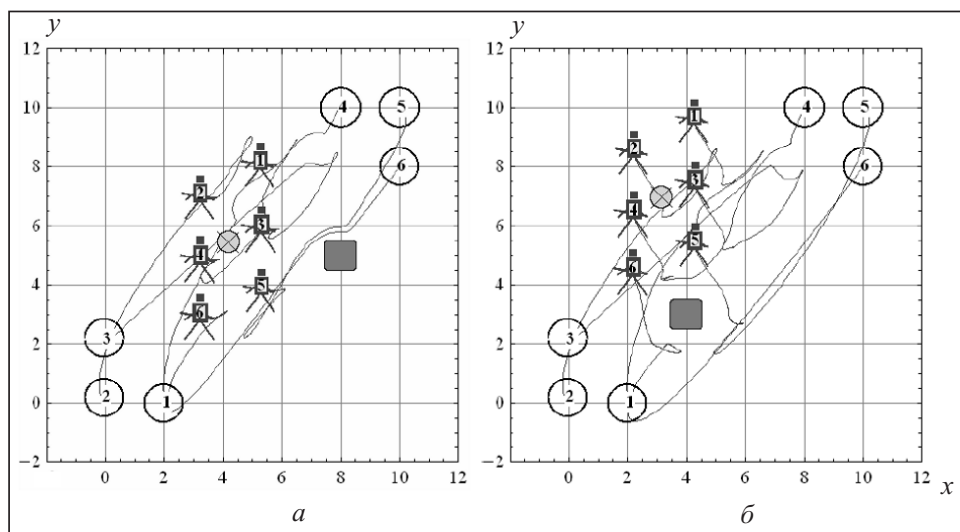


Рис. 5

Как видно из рис. 5, а, агенты A_5 и A_6 обходят препятствие, а вся формация собирается в заданную топологию несколько левее с центроидом в точке [4,5]. Усложним задачу, поставив препятствие на место, в которое должен прибыть агент A_6 (в точке [4,3]). Тем самым не позволим группе собраться в требуемую формацию в стандартном месте (без смещения центраида), что приведет к необходимости «ухода» всей группы в новое место с центроидом в точке [3,7] (рис. 5, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная модель взаимодействия автономных агентов на основе локальной самоорганизации позволяет решить задачу формирования формации системы с заданной топологией при отсутствии глобального наблюдателя в системе. При этом агенты не имеют полной информации о местоположении других агентов, а ориентируются лишь по перемещению определенных (ими видимых) агентов формации, уменьшая тем самым общее количество информационного обмена в системе и реализуя принцип локальной самоорганизации. Использование для анализа таких систем аппарата потенциальных функций и графов формации дает возможность описывать взаимодействия между агентами и аналитически определять траектории движения агентов.

Направлением дальнейших исследований в этой области может быть широкий круг вопросов моделирования поведения отдельных агентов с учетом особенностей среды применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leonard N. E., Fiorelli E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups // Conf. on Decision and Control, IEEE. — Orlando, USA, 2001. — P. 2968–2973.
2. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. — М.: Физматлит, 2009. — 280 с.
3. Новиков Д.А. Математические модели организации и функционирования команд. — М.: Физматлит, 2008. — 184 с.
4. От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. — М.: Ком-Книга, 2006. — 456 с.
5. Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Принципы построения интегрированных систем мультиагентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами // Inform. Technologies & Knowledge. — 2011. — 5, N 3. — С. 237–244.
6. Spears W., Spears D., Hamann J., Heil R. Distributed, physics-based control of swarms of vehicles // Autonomous Robots. — 2004. — 17, N 2. — P. 137–162.
7. Hernandez-Martinez E.G., Aranda-Bricaire E. Convergence and collision avoidance in formation control: A survey of artificial potential function control // Multiagent Systems — Modelling, Control, Programming, Simulations and Applications. — Rieca, Croatia: InTech, 2011. — P. 103–126.
8. Chen Y.Q., Wang Z. Formation control: A review and a new consideration // Intern. Conf. on Intel. Robots and Systems, IEEE/RSJ. — Edmonton, Canada, 2005. — P. 3181–3186.
9. Dimarogonas D., Kyriakopoulos K. On the state agreement problem for multiple unicycles with varying communication links // Conf. on Decision and Control, IEEE. — San Diego, USA, 2006. — P. 4283–4288.
10. Baillieul J., McCoy L. The combinatorial graph theory of structured formations // Ibid. — New Orleans, USA, 2007. — P. 3609–3615.
11. Ando H., Oasa Y., Suzuki I., Yamashita M. Distributed memoryless point convergence algorithm for mobile robots with limited visibility // IEEE Trans. on Robotics and Automat. — 1999. — 15, N 5. — P. 818–828.
12. Das A., Fierro R. Hybrid control of reconfigurable robot formations // Amer. Contr. Conf., IEEE. — Denver. — USA, 2003. — P. 4607–4612.
13. Ogren P., Leonard N. Obstacle avoidance in formation // Intern. Conf. on Robotics and Automat., IEEE. — Taipei, Taiwan, 2003. — P. 687–699.
14. Dimarogonas D., Loizou S., Kyriakopoulos K., Zavlanos M. A feedback stabilization and collision avoidance scheme for multiple independent non-point agents // Automatica. — 2006. — 42, N 2. — P. 229–243.
15. Do K. Formation control of mobile agents using local potential functions // American Contr. Conf., IEEE. — Minneapolis, USA, 2006. — P. 2148–2153.
16. Lee M., Park M. Real-time path planning in unknown environment and a virtual hill concept to escape local minima // Annual Conf. of Industrial Electronics Society, IEEE. — Busan, Korea, 2004. — P. 2223–2228.
17. Balch T., Arkin R. Behavior-based formation control for multirobot teams // IEEE Trans. on Robotics and Automat. — 1998. — 14, N 3. — P. 926–939.
18. Desai J. A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations // J. Robotic Systems. — 2002. — 19, N 11. — P. 511–525.

19. Dimarogonas D., Kyriakopoulos K. Distributed cooperative control and collision avoidance for multiple kinematic agents // Conf. on Decision and Control, IEEE. — San Diego, USA, 2006. — P. 721–726.
20. Hernandez-Martinez E., Aranda-Bricaire E. Non-collision conditions in multi-agent robots formation using local potential functions // Intern. Conf. on Robotics and Automat., IEEE. — Pasadena, USA, 2008. — P. 3776–3781.
21. Прасолов В.В. Задачи и теоремы линейной алгебры. — М.: Наука, 1996. — 304 с.
22. Rimon E., Koditschek D. Exact robot navigation using artificial potential functions // IEEE Trans. on Robotics and Automat. — 1992. — 5, N 8. — P. 501–518.

Поступила 22.12.2011