

Применение методов самоорганизации для группового взаимодействия интеллектуальных агентов

А. В. Кочетков
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
gaidn@yandex.ru

М. С. Куприянов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
mskupriyanov@mail.ru

Н. М. Куприянов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
nikita.kupriyanov79@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются принципы построения и архитектура системы взаимодействия группы интеллектуальных агентов, основанных на принципах самоорганизации. Особое внимание уделено использованию метода градиентных функций для решения задачи группового перемещения агентов, приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: методы самоорганизации; групповое взаимодействие агентов; градиентные функции

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема управления группами интеллектуальных агентов является особо актуальной на сегодняшний день в связи с необходимостью повышения уровня автономности, надежности и масштабирования роев беспилотных летательных аппаратов, групп автономных подводных роботов и систем мобильных роботов. Для решения этих задач такие системы должны быть построены на основе принципов самоорганизации. В статье будет рассмотрено применение принципов самоорганизации для решения задачи скоординированного и безопасного перемещения группы агентов с одного места на другое.

В управлении построением групп интеллектуальных агентов на сегодняшний день в литературе можно выделить четыре типа архитектур: централизованная, децентрализованная, распределенная и иерархическая. В централизованной архитектуре все агенты в построении управляются одним центральным контроллером, где выполняются все вычисления и обработка. Такая архитектура управления, как правило, предлагает наиболее надежные и оптимальные решения для планирования траекторий перемещения агентов, но, с другой стороны, обладает низкой устойчивостью к сбоям центрального процессора.

В децентрализованной системе управления система управляется несколькими независимыми контроллерами. Поскольку контроллер управления в такой архитектуре не имеет информации о состояниях других контроллеров, такая архитектура не может быть применена для автономного управления построением.

Распределенная архитектура управления происходит из децентрализованной, добавляя в неё обмен локальной информацией от агентов-соседей. Стратегии распределенного управления легко масштабируемы, однако возможны сбои и задержки в коммуникациях [1].

Наконец, в иерархической архитектуре управления разным агентам присваиваются разные уровни автономии и полномочий в принятии решений. Задачи распределяются между агентами в зависимости от уровня автономии. В сравнении иерархические контроллеры менее масштабируемы, более оптимальны и требуют больше коммуникационных связей, чем децентрализованные и распределенные контроллеры. Однако они более масштабируемы, менее оптимальны и требуют меньше коммуникационных связей, чем централизованные [2].

В данной статье будет использована распределенная архитектура построения из-за необходимости обмена данными и коммуникациями между агентами построения для реализации принципов самоорганизации многоагентных систем. Кроме того, такая архитектура формирования является наиболее используемой и успешной для автономного управления взаимодействием группы агентов.

В настоящее время существуют четыре основные типа структур или конфигураций для управления группой агентов: структура ведущий-ведомый, виртуальная, основанная на поведении и на основе градиентных функций. В структуре ведущий-ведомый один агент назначается лидером, а остальные считаются ведомыми. Цель миссии группы агентов загружается в агента-лидера, а ведомые агенты должны отслеживать ее для достижения и поддержания построения. Такая структура является желательной и привлекательной из-за своей простоты и широкого применения в построении многоагентных систем, однако она слабо устойчива к отказу лидера [3].

В виртуальной структуре построение агентов рассматривается как единое геометрическое образование. Каждый агент в построении имеет свою собственную траекторию, по которой он должен следовать, а совокупность всех траекторий формирует желаемое построение. Такая структура решает проблемы надежности и распространения ошибок, присущие структуре лидер-ведомый, однако вычислительные и коммуникационные затраты при управлении построением возрастают [4].

В структуре, основанной на поведении, задача управления построением разбивается на более мелкие задачи, называемые поведением. Затем этим поведением присваиваются веса в зависимости от уровня приоритета и усредняются для генерации управляющих воздействий построения. Такая структура легко

самоорганизуется и масштабируется, однако трудно гарантировать, что построение сойдется к желаемой конфигурации [5].

Однако, на сегодняшний день, наиболее мощной и универсальной структурой является структура, основанная на градиентных (потенциальных) функциях, которая легко масштабируется на произвольное количество агентов, обладает надежностью и способностью к реконфигурации группы агентов, хотя имеет высокие вычислительные затраты. Использование простых математических функций в данном методе существенно упрощает взаимодействие агентов, как будет показано ниже.

II. МЕТОД ГРАДИЕНТНЫХ ФУНКЦИЙ

Метод градиентных функций черпает биологическое вдохновение из явления морфогенеза и физических полей, таких как гравитационные и электромагнитные. Морфогенез управляет ростом клеток в живом организме посредством восприятия каждой клеткой градиента (концентрации) специальной химической субстанции, называемой морфогеном, и выделяемой отдельным органом организма. Благодаря восприятию изменения концентрации морфогена от соседей, каждая клетка определяет, в какой части эмбриона она находится, что управляет её дальнейшим развитием.

В этой статье мы рассматриваем децентрализованный подход к формированию траектории движения группы интеллектуальных агентов на плоскости с помощью метода градиентных функций. Задача заключается в маневрировании агентами для достижения целевой области, избегая при этом возможных препятствий и угроз. В каждый момент времени отдельный агент оценивает свой градиентный функциональный профиль и определяет вектор скорости (величину и направление движения), используя метод градиентного спуска. Итоговая градиентная функция состоит из нескольких составляющих, отражающих текущий контекст. Эта функция построена таким образом, что используется только информация о соседних агентах, локальная информация о динамических угрозах и заранее известная статическая информация о неподвижных препятствиях. Результаты моделирования показали, что такой децентрализованный подход приводит к интересному эмерджентному поведению, и это поведение можно варьировать, регулируя весовые коэффициенты различных членов потенциальной функции.

В математической постановке рассмотрим задачу группового планирования движения N интеллектуальных агентов, движущихся на двумерной плоскости. Целью группы агентов является достижение определенной целевой области $A \subset \mathbb{R}^2$. Агенты должны избегать столкновений с препятствиями, расположенными на пути их следования. Существуют также угрозы, как стационарные, так и движущиеся, которые представляют опасность для агентов, если они находятся близко. Предполагается, что каждый агент знает о местоположении стационарных угроз, и способен обнаружить движущуюся угрозу, если она находится на расстоянии R_d от неё, например, с помощью средств технического зрения. Агенты могут взаимодействовать друг с другом и обмениваться информацией о своем местоположении, если они находятся на расстоянии не больше R_c . Для поддержания желаемого

геометрического построения агентов, будем предполагать, что задано желаемое минимальное расстояние между ними - r_0 ($r_0 < R_c$). Очевидным требованием является то, что при движении агентов они не должны сталкиваться со своими соседями.

Каждый агент рассматривается как точка в двумерном пространстве. Обозначим положение агента i в пространстве в момент времени t как

$$p_i(t) = (x_i(t), y_i(t)).$$

Пусть $V(t)$ – множество агентов группы, которые активны в момент t , а $N_i(t)$ – множество соседей агента i , определяемое как

$$N_i(t) = \{j \in V(t) : j \neq i, \|p_i(t) - p_j(t)\| < R_c\}.$$

Из предыдущих обсуждений следует, что при принятии агентом решения о перемещении существует множество целей и ограничений. Для этого для каждого агента группы строится своя градиентная функция, состоящая из нескольких составляющих, каждая из которых отражает цель или ограничение. Ниже будут представлены все составляющие итоговой градиентной функции и их конкретные математические модели.

A. Градиентная функция для движения к цели

Обозначим функцию для движения к цели как J^g . Тогда градиентная функция агента в текущем положении p_i может быть записана как

$$J^g(p_i) = f_g(p(p_i, A)),$$

где $p(p_i, A) = \inf_{a \in A} \|p_i - a\|$, т.е. минимальному расстоянию от p_i до целевой области A .

Функция $f_g(\cdot)$ является строго возрастающей функцией, а $f_g(0) = 0$. Это гарантирует, что в отсутствие других объектов на пути следования агент будет двигаться строго к цели. Для анализа и моделирования в этой статье мы выбираем

$$f_g(r) = r^2.$$

Заметим, что вектор градиента этой функции точно укажет направление на цель, а его модуль – силу «притяжения» к ней.

B. Градиентная функция отталкивания от соседей

Функция для избегания столкновений агента со своими соседями может быть выражена как

$$J_{i,t}^n(p_i) = \sum_{j \in N_i(t)} f_n(\|p_i - p_j(t)\|),$$

где n – число соседей агента i , $f_n: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$, дифференцируемая функция, обладающая следующими свойствами:

- $f_n(r)$ стремится к ∞ при $r \rightarrow 0$
- строго уменьшается на промежутке $[0, r_0]$;
- строго увеличивается на промежутке $[r_0, R_c]$ и $\frac{\partial f_n}{\partial r} = 0$ на $[R_c, \infty)$.

Эти свойства позволяют двум агентам сохранять оптимальную заданную дистанцию (r_0) при отсутствии других объектов и обеспечивают плавный переход динамики движения при изменении расположения

соседних агентов. В моделировании для функции f_n используется соответствующая комбинация из функций $\frac{1}{r^2}$, $(r - r_0)^2$ и $-(r - R_c)^2$.

С. Градиентная функция обхода стационарных препятствий

Будем считать препятствием связанную замкнутую область (возможно состоящую из одной точки), в которую агент не имеет права попасть при движении. Предположим, что существует конечное число препятствий $\{O_j\}_{j=1}^{N_o}$.

Определим градиентную функцию для обхода препятствий следующим образом:

$$J^o(p_i) = \sum_{j=1}^{N_o} f_o(\rho(p_i, O_j)),$$

где $\rho(p_i, O_j)$ – расстояние от текущего положения p_i до множества O_j , и $f_o(\cdot): \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ – строго убывающая функция, которая удовлетворяет условию $f_o(r) \rightarrow \infty$ при $r \rightarrow 0$. В этой статье в качестве функции f_o выбрана $f_o = \frac{1}{r^2}$. Информация о препятствиях может быть получена заранее или может быть доступна онлайн, например, средствами технического зрения агента. Отметим, что данная функция отталкивает агента от препятствия в противоположном направлении с силой, пропорциональной расстоянию до него.

Д. Градиентная функция обхода движущихся угроз

Движущаяся угроза моделируется как движущаяся точка. Пусть $M_i(t)$ – набор движущихся угроз, которые находятся в пределах диапазона обнаружения агента i , а q_j – текущее местоположение угрозы j . Тогда определим градиентную функцию

$$J_i^m(p_i) = \sum_{j \in M_i(t)} f_m(\|p_i - q_j\|),$$

где функция $f_m: (\mathbb{R}_e, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ дифференцируема, строго убывает на (\mathbb{R}_e, R_d) , постоянна на (R_d, ∞) , и $f_m(r) \rightarrow \infty$ при $r \rightarrow \mathbb{R}_e$. С помощью этой градиентной функции все агенты стремятся держаться по меньшей мере на заданном расстоянии \mathbb{R}_e от движущихся угроз, и его векторное поле остается непрерывным, когда движущиеся угрозы входят в зону его обнаружения или покидают ее пределы. Простым примером такой функции $f_m(\cdot)$ является

$$f_m(r) = \frac{1}{(r - R_e)^2}, \text{ если } R_e < r \leq 0.5a_2;$$

$$f_m(r) = \frac{16(r - R_d)^2}{a_1^3 a_2} - \frac{8R_e}{a_1^3}, \text{ если } 0.5a_2 \leq r \leq R_d;$$

$$f_m(r) = -\frac{8R_e}{a_1^3}, \text{ если } r > R_d,$$

где $a_1 = R_d - R_e$, а $a_2 = R_d + R_e$.

Е. Итоговая градиентная функция управления движением агента

На основании вышеизложенных компонент функции, итоговая градиентная функция для агента i в момент времени t может быть выражена следующим образом:

$$J_{i,t}(p_i) = \lambda_g J^g(p_i(t)) + \lambda_n J_{i,t}^n(p_i) + \lambda_o J^o(p_i) + \lambda_m J_i^m(p_i),$$

где J^g , $J_{i,t}^n$, J^o , J_i^m – компоненты градиентной функции, относящиеся к движению к цели, соседним транспортным средствам, препятствиям, и движущимся угрозам, соответственно, а $\lambda_g, \lambda_n, \lambda_o, \lambda_m$ – соответствующие весовые коэффициенты. Тогда

скорость $p_i(t)$ задается формулой

$$p_i(t) = -\frac{\partial J_{i,t}(p_i)}{\partial p_i}.$$

К числу выявленных недостатков метода градиентных функций можно отнести возможность попадания агента в точку локальных минимумов, когда результирующий потенциал перемещения оказывается равным нулю: градиент движения к цели становится равным градиенту отталкивания от других агентов и/или препятствий или угроз. Однако такая ситуация легко распознается и разрешается методом добавления так называемой «вращательной» градиентной функции, которая выталкивает агента из точки минимума, заставляя агента двигаться по небольшой дуге окружности около точки минимума. [6]

Ф. Результаты моделирования

На рис. 1 показан сценарий моделирования. В момент времени $t = 0$ в левом нижнем углу случайным образом расположены десять агентов (обозначенных пятиугольниками). Два круглых препятствия (с радиусами 3 и 5 соответственно) расположены между агентами и целью (радиуса 1,5). Восемь движущихся объектов (обозначенных крестиками), равномерно распределенных вокруг цели, защищают цель от проникновения агентов. Каждая угроза перемещается с угловой скоростью 0,03 рад/сек и радиусом 3, в то время как максимальная скорость каждого агента составляет 0,006 в сек. В зоне полета стационарных угроз нет. Оптимальное расстояние между агентами $r_0 = 0.5$, дальность связи $R_c = 2$, дальность обнаружения R_d движущихся угроз равна 3, а дальность поражения $R_e = 0.5$. Если агент находится внутри целевой области, угрозы и препятствия не влияют на его движение. Моделирование проводилось в среде MATLAB/SIMULINK.

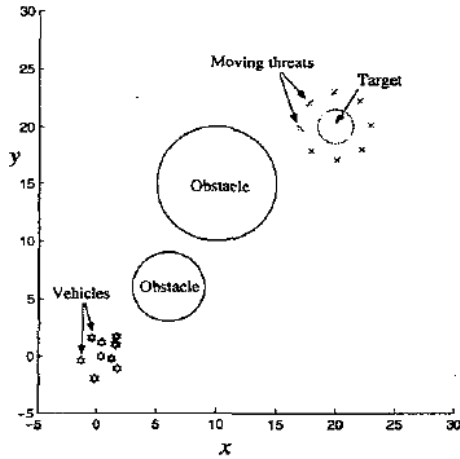


Рис. 1. Сценарий моделирования

На рис. 2 показано влияние весовой константы λ_m на градиент для движущихся угроз. Для рис. 2a-d другие веса установлены такими: $\lambda_g = 1000$, $\lambda_o = 200$ и $\lambda_n = 1000$. Когда $\lambda_m = 10$ (очень мало), агенты обращают меньшее внимание на угрозы, и четыре из них были уничтожены из-за слишком близкого приближения к угрозам (рис. 2a); когда $\lambda_m = 50$, только один агент был уничтожен, в то время как остальные приблизились к цели (рис. 2b); когда $\lambda_m = 200$, все агенты достигли цели успешно и своевременно (рис. 2c); когда $\lambda_m = 2000$, некоторые агенты не смогли приблизиться к цели, поскольку больше внимания уделялось уклонению от угроз (рис. 2d).

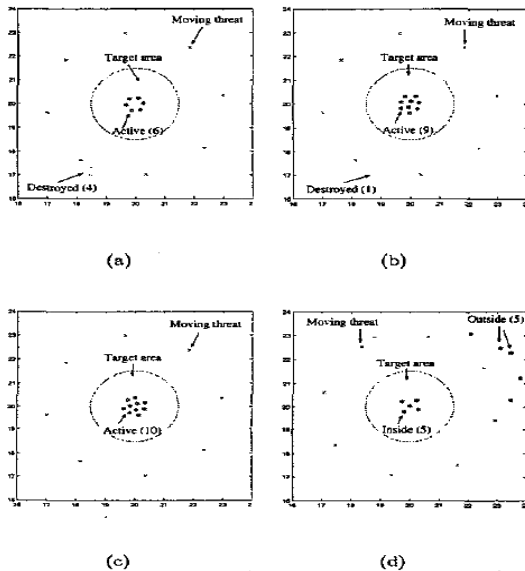


Рис. 2. Влияние весового коэффициента λ_m на градиент угрозы

Отметим, что во всех случаях группа агентов внутри целевой зоны демонстрировала определенные построения.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены принципы построения и архитектура системы взаимодействия группы интеллектуальных агентов, основанных на принципах самоорганизации. Особое внимание уделено использованию метода градиентных функций для решения задачи группового перемещения агентов. В качестве направления дальнейших исследований планируется совершенствование конкретных законов управления каждым интеллектуальным агентом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Z. Hou, W. Wang, G. Zhang, C. Han. A survey on the formation control of multiple quadrotors 14th Int. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, South Korea, 2017.
- [2] J.R.T. Lawton, R.W. Beard, B.J. Young. A decentralized approach to formation maneuvers. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19(6):933-941, 2003.
- [3] M. A. Guney, M. Unel. Formation Control of a Group of Micro Aerial Vehicles (MAVs). IEEE Int. Conf. on Sys., Man, and Cyb., UK, 2014.
- [4] Z. Hou, Isabelle Fantoni. Leader-follower formation saturated control for multiple quadrotors with switching topology. Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems, Mexico, 2015.
- [5] E. Semsar-Kazerooni, K. Khorasani. Switching control of a modified leader-follower team of agents under the leader and network topological changes. Control Theory Applications, IET, 5(12): 1369-1377, 2011.
- [6] Ahmadvand, Reza & Sharifi, Safura & Banad, Yaser. (2024). Swarm Intelligence in Collision-free Formation Control for Multi-UAV Systems with 3D Obstacle Avoidance Maneuvers. 10.48550/arXiv.2412.12437.