

Разработка алгоритма децентрализованного управления группой беспилотных автомобилей на основе метода роя частиц

А.С. Павлов

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: losde5530@gmail.com

С.С. Рябцев

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: nalfartorn@yandex.ru

С.Р. Ахмедов

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: Saahmedov@gmail.com

О.И. Трофимюк

Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: tro.lo.lo.lya@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматривается возможность применения технологий мультиагентных систем к задаче группового управления техническими объектами. Приводится описание ключевых особенностей группы беспилотных автомобилей и ограничений, учитываемых при разработке стратегии управления в условиях динамически изменяющегося окружения в режиме реального времени. Предлагается алгоритм управления группой беспилотных автомобилей на основе метода роя частиц и псевдокод его реализации.

1. Введение

Суть задачи группового управления заключается в отыскании и реализации таких действий каждого отдельного агента группы, которые приводят к оптимальному, с точки зрения некоторого критерия, достижению общей групповой цели. Применительно к группе беспилотных автомобилей к таким целям можно отнести следующие:

- безопасность дорожного движения;
- сокращение времени и затрат, необходимых для достижения цели;

Труды Шестой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-31 мая, Уфа-Ставрополь, Россия, 2018

- повышение эффективности функционирования транспортной системы в целом.

Метод роя частиц (particle swarm optimization) – метод численной оптимизации, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции [1]. Данный метод относится к группе алгоритмов роевого интеллекта (swarm intelligence), которые описывают коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы. Системы роевого интеллекта, как правило, состоят из множества агентов локально взаимодействующих между собой и с окружающей средой. Сами агенты обычно довольно просты, но все вместе, локально взаимодействуя, создают так называемый роевой интеллект.

2. Метод роя частиц

Классический метод роя частиц (МРЧ) впервые был предложен в работе Рассела Эберхарта и Джеймса Кеннеди в 1995 году [2]. Основная идея заключается в том, что между агентами группы происходит непрерывный информационный обмен, а характеристикой состояния каждого агента группы являются их текущее пространственное положение и скорость передвижения. Помимо этого, каждый агент группы подчиняется следующим правилам поведения:

1. Каждый агент должен избегать столкновения с соседними агентами.

2. Каждый агент должен корректировать свою скорость в соответствии со скоростями агентов группы.
3. Каждый агент должен стараться сохранять достаточно малое расстояние между собой и окружающими его агентами.

Такие системы состоят из множества простых агентов, локально взаимодействующих друг с другом и с внешней средой для достижения predetermined цели. Взаимодействие агентов позволяет достичь синергического эффекта и успешно решать очень сложные задачи. В качестве примера таких систем из природы можно привести колонию муравьев, пчелиный рой, стаю птиц, косяк рыб. Каждая из перечисленных систем характеризуется относительно простым поведением отдельных элементов и возникающим сложным интеллектуальным общим поведением. Модель, описывающая принятие решений частицами оказалась простым и эффективным способом оптимизации. Положение каждой частицы в рое задает возможное решение оптимизационной задачи. Решение о перемещении частица принимает на основе трех факторов: ее текущей скорости, которая тянет частицу продолжить движение и исследовать новые регионы в области поиска; знания о собственном лучшем состоянии и о лучшем состоянии всего роя или ближайшей окрестности частицы.

Схематично метод роя частиц проиллюстрирован на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема работы метода роя частиц

Как видно на рисунке 2, алгоритм роя частиц – это итеративный процесс, постоянно находящийся в изменении. Для того, чтобы понять, как функционирует алгоритм МРЧ, можно рассмотреть область поиска в виде многомерного пространства с агентами нашего алгоритма. Изначально все агенты находятся в случайных местах пространства и со случайным вектором скорости. В каждой из точек, которую частица посещает, она рассчитывает заданную функцию и фиксирует наилучшее значение искомой функции. Так же все частицы знают местоположение наилучшего результата поиска во всём рое и с каждой итерацией агенты корректируют вектора своих скоростей и их направления, стараясь приблизиться к наилучшей точке роя и при этом быть поближе к своему индивидуальному максимуму. При этом постоянно происходит расчёт искомой функции и поиск наилучшего значения. На рисунке 2 приведен пример работы МРЧ [1].

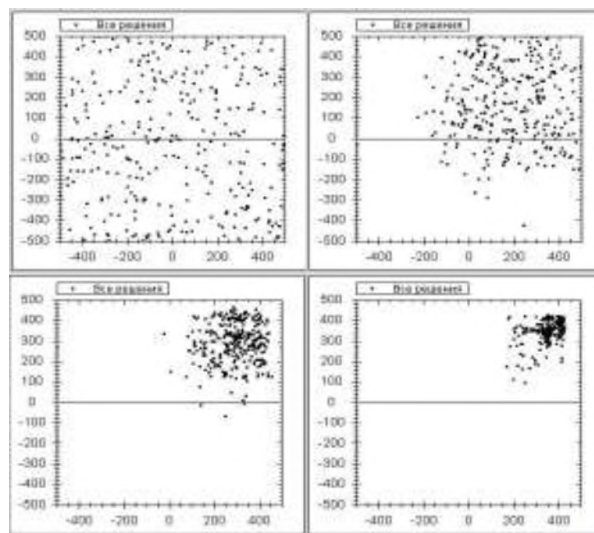


Рисунок 2. Пример работы метода роя частиц

Основная идея метода заключается в перемещении частиц в пространстве решений. Пусть решается задача нахождения минимума (максимума) функции вида $f(X)$, где X – вектор варьируемых параметров, которые могут принимать значения из некоторой области D . Тогда каждая частица в каждый момент времени характеризуется значением параметров X из области D (координатами точки в пространстве решений) и значением оптимизируемой функции $f(X)$. При этом частица сохраняет в памяти наилучшую точку в пространстве решений, в которой была, и стремится в нее вернуться. В качестве связи между частицами используется так называемая общая память. Это значит, что каждая частица знает координаты наилучшей точки среди всех, в которых была любая частица роя. Кроме того, на движение частицы влияют инерционность и случайные отклонения.

Предположим, что в группе собрано N агентов. Для нахождения наилучшего положения группе отводится некоторый отрезок дискретного времени, разбитый на N_{iter} моментов. Пусть $x_i(k)$ – положение i -ого агента группы ($i = 1, 2, \dots, N$) в k -й момент времени $k = 1, 2, \dots, N_{iter}$). Решение о том, какое положение занять, агент принимает на основе своего положения в прошлый момент времени и текущей скорости,

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1). \quad (1)$$

Основа метода роя частиц – это выражение для скорости агента. Она задается как

$$v_i(k+1) = c_{in} v_i(k) + c_{cog} U(0,1)[r_i(k) - x_i(k)] + c_{soc} U(0,1)[p_i(k) - x_i(k)] \quad (2)$$

где v_i – вектор скорости агента, r_i – лучшее найденное агентом положение, p_i – лучшее положение из найденных всеми агентами группы, x_i – текущее положение агента, а функция U возвращает случайное число от 0 до 1 включительно, коэффициенты c_{cog} и c_{soc} определяют значимость для агента своего лучшего положения и лучшего среди всей группы положения, коэффициент c_{in} характеризует инерционные свойства агентов.

Три слагаемых в (2) – инерционная (агент стремится продолжить движение в том же направлении), когнитивная (стремление к собственному лучшему положению) и социальная (стремление к лучшему положению, найденному окружением агента) компоненты [3].

Первое слагаемое в (2) – инерционная компонента, показывающая влияние скорости агента на прошлом шаге и увлекающая ее в том же направлении. Инерционный коэффициент c_{in} позволяет настроить вклад этой компоненты.

Большая величина c_{in} ускоряет исследование зоны видимости агентом на предмет оптимального положения. Хотя скорость изменяется из-за стремления агента к своему или общему лучшему положению, большое значение c_{in} не позволяет ему прекратить поиски нового оптимального положения и перейти к улучшению уже найденного в его окрестностях. Для каждой задачи коэффициент c_{in} следует задавать индивидуально, как правило из диапазона (0, 1) [3]. Это обусловлено тем, что при $c_{in} > 1$ скорость агента неограниченно возрастает и он оказывается неспособен достичь оптимального положения. При $c_{in} < 0$, напротив, скорость уменьшается и поиск останавливается (переходит в исследование уже найденного лучшего решения) раньше, чем удастся найти оптимальное положение.

Второе слагаемое в (2) – когнитивная компонента, отвечающая памяти агента о собственном лучшем к моменту времени $k+1$ положению $r_i(k)$.

Аналогично третье слагаемое – социальная компонента, отвечающая стремлению агента к

лучшему найденному его окружением положению $p_i(k)$. Коэффициенты c_{cog} и c_{soc} обычно принимаются постоянными и равными 1.49445. Оба коэффициента желательно выбирать близкими, так как именно такой выбор позволяет соблюсти баланс между собственными знаниями агента и знаниями всей группы [3]. Однако, в некоторых задачах оказываются эффективными модификации метода роя частиц, использующие сильно отличающиеся когнитивный и социальный коэффициенты. Более того, возможно использование только одной – социальной или когнитивной компонент скорости в (2).

3. Ограничение скорости при групповом управлении

Управление группой беспилотных автомобилей накладывает следующие ограничения:

- габариты - необходимо учитывать размеры автомобиля, массу, скорость, ускорение, максимальный угол поворота колес;
- радиус действия - одиночный беспилотный автомобиль способен самостоятельно собирать информацию об окружающей среде на относительно небольшом расстоянии;
- динамические препятствия - другие участники дорожного движения, пешеходы и др.;
- особенности окружающей среды - следует учитывать характер движения как в городских условиях, так и вне населенных пунктов, а также метеорологические условия.

В данной статье для повышения эффективности метода роя частиц предлагается ввести ограничение максимальной скорости движения посредством использования уравнения изменения скорости. Это уравнение состоит из трех слагаемых, которые, как было упомянуто ранее, регулируют величину и направление изменения скорости агента. Также скорость агентов может резко увеличиваться, что является характерным для агентов, далеких от лучших глобальных и локальных позиций. В результате этого агенты выходят за интересующую границу поиска, то есть расходятся. Во избежание таких ситуаций и вводится ограничение скорости.

v_i^{max} – максимально допустимая скорость i -ого агента. Следующим образом можно осуществлять управление скоростью агента:

$$v_i(k+1) = \begin{cases} v_i(k+1), & \text{если } v_i(k+1) < v_i^{max} \\ v_i^{max}, & \text{если } v_i(k+1) \geq v_i^{max} \end{cases} \quad (3)$$

Преимущество описанного подхода состоит в том, что введенное ограничение позволяет плавно увеличивать или уменьшать скорость, избегая резких изменений [4]. Ограничение скорости оказывает влияние не только на градицию изменения, но и на направление движения агента.

В предложенном подходе можно отметить следующее. Позиция агента не ограничивается при изменении скорости в определенном интервале, из чего следует, что изменяется только скорость.

Если рассматривать v_i как мгновенную скорость неравномерно движущегося тела, а инерциальному параметру установить значение $c_{in} = 0$, тогда можно записать (2) следующим образом:

$$v_i(k+1) = v_i(k) + c_{cog} U(0,1)[r_i(k) - x_i(k)] + c_{soc} U(0,1)[p_i(k) - x_i(k)] \quad (4)$$

При перенесении $v_i(k)$ в левую часть получится следующее:

$$v_i(k+1) - v_i(k) = c_{cog} U(0,1)[r_i(k) - x_i(k)] + c_{soc} U(0,1)[p_i(k) - x_i(k)] \quad (5)$$

Левую часть можно интерпретировать как разностную аппроксимацию первой производной, то есть:

$$\frac{dv_i}{dk} = \frac{v_i(k+1) - v_i(k)}{T} \quad (6)$$

где $T=1$.

Подставив (6) в выражение (5), получится следующее уравнение:

$$\frac{dv_i}{dk} = c_{cog} U(0,1)[r_i(k) - x_i(k)] + c_{soc} U(0,1)[p_i(k) - x_i(k)] + (c_{in} - 1)v_i(k) \quad (7)$$

Ввиду нелинейности функции c_{cog} и c_{soc} можно допускать самоорганизацию, задачей которой является осуществление целей агентов группы, взаимодействующих между собой на низком уровне. Отсюда следует вывод, о том, что формулам (4) и (5) присуще свойство нелокальности.

Нелокальность – это понятие, которое можно определить как наличие полной информации обо всей системе и её элементах в каждой отдельной точке системы, либо как саму возможность того, что любая точка системы может иметь в себе полную информацию обо всей системе [5].

Правая часть выражения (6) содержит v_i , которую можно интерпретировать как память частицы о ее предыдущем состоянии.

Построение схемы, учитывающей информацию о предыдущих значениях координат частиц x_i и скоростей v_i может способствовать повышению качества оптимизации целевой функции и улучшению сходимости алгоритма роя частиц.

4. Алгоритм управления группой беспилотных автомобилей

Предложенный подход к подбору параметров уравнения скорости агента ведет к следующему. В начале поиска агенты передвигаются по допустимому пространству за счет преобладания инерционного параметра, на который практически не влияет

информация о лучшем положении, найденном соседними агентами. При этом у каждого агента некоторое значение собственного лучшего положения установлено предварительно. Таким образом, сначала агенты группы исследуют окружение независимо друг от друга. По мере проведения исследований пространства и анализа полученных сведений от соседей, агенты начинают изучать границы зоны видимости собственного лучшего положения и положений соседних агентов. По завершению итерации агенты переходят к исследованию окрестностей общего лучшего положения.

При определении положения агента $x_i(k+1)$ с помощью формулы (2) на каждом шаге необходимо проверить, находится ли она в допустимой области решений. Если j -я компонента вектора $x_i^j(k+1)$ выходит за допустимые рамки, ее значение принимается равным граничному, а компонента скорости $v_i^j(k+1)$ обнуляется. Аналогично при расчете скорости (2) проверяется, не превышает ли какая-либо ее j -я компонента по величине $b_{up}^j - b_{low}^j$. В этом случае положение агента заведомо выйдет за пределы области решений и скорость поэтому принимается максимально допустимой $b_{up}^j - b_{low}^j$. На первом шаге агенты x_i равномерно распределяются по области решений с нулевыми скоростями, что позволяет начать изучение всего доступного пространства.

Максимально допустимое ограничение скорости агента v_i^{max} представляет собой константу только на первой итерации алгоритма. Это обусловлено тем, что движение автомобиля происходит как в городских условиях, так и вне населенного пункта. В соответствии с этим на каждой итерации необходимо сравнивать текущее значение с предыдущим, а также корректировать скорость в случае необходимости.

Социальный параметр скорости использует сведения о лучшем положении, найденном соседними агентами. Для определения окружения агента есть несколько подходов, но в подавляющем большинстве случаев соседями i -ого агента считаются агенты с номерами $i \pm N_{neigh}$ [6]. При этом зона видимости агента N_{neigh} может увеличиваться с ростом числа пройденных итераций (например, раз в n_{neigh} итераций). Так, после успешного определения лучших положений агентов, группа приступает к их более глубокому изучению. Агенты группы от поиска новых лучших положений переходят к улучшению уже обнаруженных вариантов.

Предлагается использовать обобщенный алгоритм управления группой беспилотных автомобилей на основе метода роя частиц, который приведен ниже.

- Каждый автомобиль формирует цель.
- Задаются основные параметры.

- Начальные положения агентов x_i равномерно распределяются в области допустимых решений.
- Скорости v_i приравниваются нулю.
- Для каждого агента задается матрица лучших положений η_i размера $D \times N$. Инициализация матрицы положениями агентов x_i (2), заданными изначально.
- Для каждого агента задается матрица лучших положений соседей p_i размера $D \times N$. Инициализация матрицы положениями агентов x_i (2), заданными изначально.
- Для каждого агента устанавливается вектор лучших найденных значений J_i^b , его элементы задаются заведомо большими.
- Найденное группой агентов лучшее значение функционала J^b устанавливается заведомо большим.
- Найденное соседями агента лучшее значение функционала J_i^b устанавливается заведомо большим.
- В соответствии с лучшим значением функционала устанавливается лучшее положение x^b .

Так как роевое управление построено на принципах самоорганизации, достаточно привести алгоритм управления только отдельным агентом группы (алгоритм 1).

Алгоритм 1. Управление группой беспилотных автомобилей на основе метода роя частиц

```

#ограничение максимальной скорости движения агента
 $v_i^{max} = const$ 
for  $k = 1: N_{iter}$ 
  for  $i = 1: N$ 
    #вычисление величины значения функционала для агента  $x_i$ 
    #обновление лучшего значения функционала и соответствующего положения для  $i$ -ого агента:
    if  $f < J_i^b$ 
       $J_i^b = f$ ,
       $\eta_i = x_i$ 
    end if
    #обновление лучшего значения функционала и соответствующего положения для всей группы:
    if  $f < J^b$ 
       $J^b = f$ ,
       $x^b = x_i$ 

```

```

end if
#увеличение зоны видимости агента
if  $mod(k, n_{neigh}) = 0$ 
   $N_{neigh} ++$ 
end if
#обнуление лучшего значения функционала и соответствующих положений в зоне видимости  $i$ -ого агента:
 $p_i = x_i$ ,
 $J_i^b = J_i^b$ ,
#обновление лучшего значения функционала, найденного в зоне видимости агента:
for  $j = (i - N_{neigh}) : (i + N_{neigh})$ 
  if  $J_j^b < J_i^b$ 
     $p_i = x_j$ ,
     $J_i^b = J_j^b$ 
  end if
end for
#определение скорости согласно (2)
#проверка параметров скорости на превышение
 $b_{\omega}^j = b_{\omega}^j$ 
#проверка изменения ограничения максимальной скорости агента
if  $v_i^{max} \neq v_i^{max}$ 
   $v_i^{max} = v_i^{max}$ 
end if
#коррекция скорости согласно (3)
#обновление положения агента согласно (1)
#проверка на принадлежность положения области U
end for
#проверка условий прекращения поиска
end for

```

5. Заключение

Таким образом, в статье получены следующие результаты:

- рассмотрена возможность применения технологий мультиагентных систем к задаче группового управления техническими объектами;
- приведено описание ключевых особенностей группы беспилотных автомобилей и ограничений, учитываемых при разработке стратегии управления в условиях динамически

изменяющегося окружения в режиме реального времени;

- предложен алгоритм управления группой беспилотных автомобилей на основе метода роя частиц и псевдокод его реализации.

Дальнейшие исследования будут направлены на подбор параметров уравнения скорости агента группы, а также на практическую реализацию предложенного алгоритма.

Список используемых источников

1. Водолазский И. А., Егоров А. С., Краснов А. В. Роевой интеллект и его наиболее распространённые методы реализации // Молодой ученый. — 2017. — №4. — С. 147-153.
2. Kennedy J. Particle Swarm Optimization / J. Kennedy, R. C. Eberhart // In Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Networks, Australia, Perth: IEEE Service Center, 1995, P. 12-13.
3. Wang G., Han D. Particle Swarm Optimization Based on Self-adaptive Acceleration Factors // 3rd Int. Conf. Genet. Evol. Comput. IEEE, 2009. P.637–640.
4. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / А. П. Карпенко. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446с.
5. Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2012. – 431с.
6. Hu X., Eberhart R. Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization // 6th World Multiconference Syst. Cybern. Informatics. Orlando, Florida, USA, 2002. P. 203–206.