

## К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СТАЙНЫХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ ГРУППОВОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ ЦЕЛИ

*Филимонов А.Б.<sup>1</sup>, Филимонов Н.Б.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*МИРЭА – Российский технологический университет,*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г.Москва*

**Ключевые слова:** групповое преследование цели, механизмы стайного поведения, принципы самоорганизации, метод виртуальных силовых полей.

**Аннотация.** Обсуждаются вопросы разработки стайных алгоритмов для задач группового преследования цели. Используются принципы самоорганизации движения виртуальных динамических объектов К. Рейнольдса. Обсуждаются механизмы стайного поведения. Предлагается метод виртуальных силовых полей для организации взаимодействия членов стаи и направления стаи на цель.

## ON THE ISSUE OF THE DEVELOPMENT OF FLOCK ALGORITHMS IN TASKS OF GROUP PURSUIT OF A GOAL

*Filimonov A.B.<sup>1</sup>, Filimonov N.B.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*MIREA - Russian Technological University,*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow*

**Keywords:** group pursuit of a goal, mechanisms of pack behavior, principles of self-organization, method of virtual force fields.

**Abstract.** We discuss the development of flock algorithms for group pursuit tasks. The principles of self-organization of the movement of virtual dynamic objects by K. Reynolds are used. The mechanisms of flock behavior are discussed. The method of virtual force fields is proposed for organizing the interaction of pack members and directing the pack to the target is supposed.

Роевой интеллект (РИ, англ. Swarm intelligence) является активно развивающейся областью исследований в многоагентных системах и искусственном интеллекте, методы которого должны получить широкое применение в групповой робототехнике. Задача РИ – изучение и описание коллективного поведения децентрализованной самоорганизующейся системы, состоящей из множества агентов.

Согласно парадигме РИ, агенты имеют простые модели поведения, локально взаимодействуют между собой и с окружающей средой, в результате чего создается эффект возникновения интеллектуального глобального поведения всей системы. Одно из развиваемых направлений РИ – моделирование и анализ моделей стайного поведения мобильных агентов – «боидов», т.е. виртуальных динамических объектов. Следует различать понятия роевого и стайного поведения. Роевое поведение предполагает, что члены группы не имеют информационной связи друг с другом, могут не знать состава и характеристик членов группы. В случае стайного поведения члены группы имеют возможность обмениваться друг с другом информацией, так что они знают об общей цели и индивидуальных задачах каждого, имеют сведения о составе группы.

Некоторые исследования модель стайного поведения выдвигают на высший уровень развития перспективных технологий группового применения авиационных роботов военного и специального назначения. Особенно это актуально для беспилотной авиации: в ближайшем будущем ожидается появление «интеллектуальных» БПЛА, которые будут действовать в составе «стаи» и решать поставленные задачи на основе «коллективного» разума.

В настоящей статье обсуждаются вопросы разработки стайных алгоритмов для задач группового преследования цели.

Производя наблюдения за птицами Рейнольдс (X. Reynolds) в 1986 году создал компьютерную модель, имитирующую поведение стаи птиц, которую он назвал Voids [1] (термин «Void» расшифровывается как «bird-like object», т.е. объект, подобный птице). В данной модели было запрограммировано поведение каждой из птиц в отдельности, а также их взаимодействие. При этом использовались три элементарных правила (принципа) поведения, которых должна придерживаться каждая птица в стае:

1) стремится избежать столкновений с другими птицами стаи, т.е. старается не приближаться к другим птицам (или другим объектам, например, препятствиям) на расстояние меньше некоторой величины;

2) старается двигаться в том же направлении, что и находящиеся неподалеку птицы, т.е. старается выбрать вектор скорости наиболее близким к среднему вектору скорости среди всех птиц в своей локальной окрестности;

3) стремятся двигаться на равном расстоянии друг от друга и располагаться в геометрическом центре масс своей локальной окрестности.

Первое правило предназначено для предотвращения столкновений птиц, второе координирует скорость и направление их полета, третье заставляет каждую птицу не отрываться от стаи. Эти правила именуют также соответственно правилами разделения, выравнивания и сплоченности.

Выполненная Рейнольдсом компьютерная симуляция динамики стаи птиц продемонстрировала весьма реалистичную картину. В его программе птицы образовывали группы, пытались уйти от столкновений и хаотично бросались в разные стороны, повторяя поведение реальной стаи птиц. При этом отмечалось, что разработанная модель поведения стаи птиц может быть дополнена введением дополнительных факторов, например, таких, как поиск пищи, уклонение от препятствия или боязнь хищников. Один из возможных вариантов математической формализации модели Рейнольдса изложен в работе [2].

Для задач групповой робототехники представляют интерес именно механизмы стайного поведения. В их основе должны лежать простые принципы согласованных действий членов группы. Однако, сформулированных рейнольдсовских принципов явно недостаточно для технической реализации сложных форм стайного поведения мобильных роботов и, в частности, решения практических задач группового поиска или преследования одиночных или групповых целей. Для решения данных задач предлагается применять концепции и методы кибернетической физики: метод виртуальных силовых полей для организации взаимодействия членов стаи и направления стаи на цель, принципа

обратной связи для координации скоростей и понятие псевдотемпературы для оценки хаотизации движения членов стаи.

Пусть стая состоит из  $N$  боидов, причем каждый боид представляется материальной точкой. Движение стаи в соответствии с законом Ньютона описывается системой дифференциальных уравнений:

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}^{(i)} = \mathbf{F}^{(i)} \quad (i=0:N),$$

где  $\mathbf{r}^{(i)}$  - радиус-вектор  $i$ -й точки,  $m_i$  - ее масса, а  $\mathbf{F}^{(i)}$  - приложенная к ней управляющая сила.

Подчиним движение боидов действию виртуального поля сил. Силы разложим на составляющие:

$$\mathbf{F}^{(i)} = \mathbf{F}_{pot}^{(i)} + \mathbf{F}_{crd}^{(i)} + \mathbf{F}_{dis}^{(i)} + \mathbf{F}_{rnd}^{(i)}.$$

Здесь  $\mathbf{F}_{pot}^{(i)}$  - потенциальная сила, описывающая взаимодействие боидов и их целенаправленное движение,  $\mathbf{F}_{crd}^{(i)}$  осуществляет координирующее регулирующее воздействие,  $\mathbf{F}_{dis}^{(i)}$  обеспечивает диссипацию избыточной кинетической энергии,  $\mathbf{F}_{rnd}^{(i)}$  - стохастическая составляющая, обеспечивающая хаотизацию движения боидов.

Сила  $\mathbf{F}_{pot}^{(i)}$  в свою очередь является суммой четырех слагаемых:

$$\mathbf{F}_{pot}^{(i)} = \mathbf{F}_{pot,1}^{(i)}(\mathbf{r}^{(i)}) + \mathbf{F}_{pot,2}^{(i)}(\mathbf{r}^{(i)}) + \mathbf{F}_{pot,3}^{(i)}(\mathbf{r}^{(i)}) + \mathbf{F}_{pot,4}^{(i)}(\mathbf{r}^{(i)}),$$

где слагаемое  $\mathbf{F}_{pot,1}^{(i)}$  создает эффект взаимного притяжения боидов;  $\mathbf{F}_{pot,2}^{(i)}$  обеспечивает взаимное отталкивание боидов, предотвращая их критическое сближение;  $\mathbf{F}_{pot,3}^{(i)}$  - притягивает боиды к цели;  $\mathbf{F}_{pot,4}^{(i)}$  - отталкивает боиды от препятствий, возникающих на пути следования стаи.

Каждая из сил  $\mathbf{F}_{pot,k}^{(i)}(\mathbf{r})$  ( $i=1:N, k=1:4$ ) является потенциальной и находится как антиградиент соответствующего потенциала  $U_k^{(i)}(\mathbf{r})$ :

$$\mathbf{F}_{pot,k}^{(i)}(\mathbf{r}) = -\nabla U_k^{(i)}(\mathbf{r}).$$

Потенциальные поля конструируются исходя из требований дальнего действия и ближнего действия. На каждый боид действуют дальнедействующие силы притяжения со стороны других боидов и преследуемой ими цели. Силы отталкивания являются ближнедействующими, т.е. проявляются в непосредственной близости от боидов и препятствий.

Отметим, что метод виртуальных потенциальных полей применительно к задачам группового управления подвижными объектами изложен в [4]. В работах авторов [5-6] исследуются вопросы конструирования притягивающего и отталкивающего потенциалов в задачах управления отдельным и группой подвижных объектов, причем результаты данных работ могут быть применены также и при разработке стайных алгоритмов группового преследования цели.

Диссипативные и стохастическая силы действуют индивидуально для каждого бойда (условно можно считать, что они порождаются внешней средой). Для реализации механизма координации движения близких бойдов предлагается использовать идеи и методы многосвязного регулирования с реализацией координирующих воздействий сепаратными регулирующими обратными связями.

В молекулярной физике температура определяется как мера средней кинетической энергии колебаний молекул. По аналогии с этим интенсивность хаотической составляющей движения бойдов предлагается оценивать псевдотемпературой  $T$ . Прототипом данного параметра может служить понятие псевдотемпературы в алгоритмах имитации отжига (машинах Больца [6]).

У изложенного подхода к построению стайных алгоритмов имеется весьма важный аспект – возможность применения аппарата лагранжевой механики для динамического анализа стайного поведения. В частности, открываются возможности исследования временных характеристик процесса формирования стаи и решения вопросов устойчивости движений стаи в целом.

#### Список литературы

1. Reynolds X., Flocks C.W. Herds, and Schools: a Distributed Behavioural Model // Computer Graphics. 1987. Vol. 21, No. 4. P. 25-34.
2. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений // Всероссийская научно-техническая конференция «Научно-техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана». – Новосибирск, 2010. – С. 141-149.
3. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. М.: Физматлит. 2015. - 305 с.
4. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Задача формирования строя в группе подвижных объектов // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2018. Т. 2, № 1. С. 123-127.
5. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Formation Shaping in Group of Moving Objects on the Basis of the Method of Virtual Force Fields // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2018. Issue 9-1. P. 67-72.
6. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Барашков А.А. Вопросы построение потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 677-685.
7. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 65-70.
8. Ackley D.H., Hinton G.E., Sejnowski T.J. A Learning Algorithm for Boltzmann Machines // Cognitive Science. 1985. Vol. 9 (1). P. 147-169.

#### Сведения об авторах:

*Филимонов Александр Борисович* – д.т.н., профессор, МИРЭА – РТУ, г.Москва;  
*Филимонов Николай Борисович* – д.т.н., профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва.