

# Математическая модель двумерной гомогенной стаи роботов<sup>1</sup>

**Аннотация.** В работе представлено моделирование поведения гомогенной (однородной) группы роботов в окружающей среде с препятствиями. Рассматриваются задачи 2D полета роботов к различным целевым объектам. Исследуются проблемы взаимозависимости между локальными правилами управления и глобальным адаптивным поведением группы, синтез контроля группы, анализ управляемости целой группы в окружающей среде с препятствиями. Представлены результаты моделирования, продемонстрированы примеры функционирования программы моделирования.

**Ключевые слова:** стая роботов, коллектив, группа, моделирование поведения роботов.

## Введение

К настоящему времени определились различные варианты систем управления группами робототехнических устройств. С одной стороны это задачи типа управления роботами-футболистами, где число роботов – членов команд невелико, но каждый является сложным объектом и наделен сложным и в некоторых случаях даже уникальным поведением и управлением. С другой стороны – это задачи управления большой группой в значительной степени однотипных объектов, поведение каждого из которых можно считать простым, в то время как весь коллектив таких объектов демонстрирует достаточно сложное поведение, тем самым в такой группе возникает эффект, называемый эмерджентностью. В работе рассматриваются модели, относящиеся ко второму типу.

## 1. Гомогенная двумерная стая. Модель

Одним из простых коллективных эффектов является совместное движение. В предлагаемой модели рассматривается двумерное движение

группы одинаковых объектов в среде с препятствиями и достижение этой группой нескольких целей.

Введем геометрические и кинематические свойства объектов управления и их локальные правила поведения. Рассмотрим двумерное движение объектов группы в горизонтальной плоскости, т.е. полет стаи объектов параллельно горизонтальной плоскости в среде с препятствиями. Будем считать, что группа объектов должна достичь целей, заданных их координатами.

Рассмотрим группу, состоящую из одинаковых по своим характеристикам объектов. В дальнейшем в связи со сложившейся в моделировании группового поведения одинаковых объектов терминологией будем вслед за [1-7] называть такие объекты *boi*d'ами (известно, что термин *boi*d возникал и преобразовывался следующим образом: *bird object* – *birdoid* – *boi*d).

Каждый *boi*d -объект описывается следующими характеристиками:

- положением в двумерном пространстве, т.е. координатами  $(x, y)$ .
- параметром  $R_{nbh}$ , который задает зону видимости каждого *boi*d'a,

<sup>1</sup>Работа выполнялась при частичной поддержке грантов РФФИ 10-07-00409-а, 10-01-00160-а, 13-01-00184-а, 14-01-00817-а, 15-01-07900-а.

– параметром  $R_{MinDist}$ , который определяет минимальное расстояние, допустимое между двумя *boi*d'ами или *boi*d'ом и препятствием;

– параметром  $V_{MaxSpeed}$ , который является ограничением на величину смещения *boi*d'а за каждый шаг времени (модельного).

Центральный момент – правила движения объектов. Определим следующий набор локальных правил для построения движения каждого из объектов стаи, эти правила используются различными авторами [3-7], и признаны минимально необходимыми для описания движения стаи:

1. Движение в направлении целевой точки.  
 2. Стремление занять определенное среднее положение, которое в дальнейшем будем называть *центром масс*, относительно своих соседей. (1)

3. Отталкивание от ближайших соседей.

Важно подчеркнуть, что так введенные локальные правила обеспечивают общее согласованное движение всей стаи (Правило 1) и сохранение (поддержание) стаи как единого динамического организма (Правила 2 и 3). Опишем их подробно.

Проведем моделирование движения стаи *boi*d'ов в следующих условиях.

– Рассмотрим *boi*d как материальную точку без массы.

– Пренебрежем ориентацией *boi*d'а, т.е. считаем, что *boi*d имеет две степени свободы.

В этом случае можно считать, что повороты *boi*d'а происходят мгновенно и объект всегда ориентирован в нужном нам направлении.

– Считаем, что каждый из *boi*d'ов в любой момент времени обладает следующей информацией: знает свое местоположение, координаты других членов стаи в пределах окружности радиуса  $R_{nbh}$ , а также координаты цели (или всех целевых точек).

– Определим препятствие как область, ограниченную окружностью.

Кроме того, предположим, что значение параметра  $R_{nbh}$  как минимум в 2 раза больше значения параметра  $R_{MinDist}$ :

$$R_{nbh} \geq 2R_{MinDist}$$

Задачу будем рассматривать как определение смещения для каждого из членов группы в каждый момент дискретного времени. При

этом общая схема моделирования аналогична численному интегрированию некоторой силовой модели, описывающей поведение объектов - *boi*d'ов.

Построение движения каждого *boi*d'а проведем в два этапа. На первом этапе вычислим смещение *boi*d'а, вызванное правилами поведения (1), общими для всех объектов "стаи". На втором этапе смещения будем обрабатывать возможные столкновения *boi*d'а с препятствиями и другими членами "стаи" и при необходимости корректировать полученные на первом этапе координаты смещения.

## 2. Первый этап построения движения

Первый этап построения движения *boi*d'а включает в себя построения вектора смещения без учета столкновений с препятствиями.

Как уже говорилось ранее, в каждый момент дискретного времени движение *boi*d'а складывается из трех составляющих, соответствующих правилам движения *boi*d'ов: а) движения к целевой точке  $\vec{r}_1$ ; б) движения в точку, соответствующую "центру масс" соседей  $\vec{r}_2$ ; в) отталкивания от ближайших соседей  $\vec{r}_3$ . Таким образом, чтобы определить вектор смещения *boi*d'а в каждый момент движения, необходимо вычислить:

$$\vec{r}_{1-выйтман} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3.$$

*Расчет компоненты смещения на цель.*

В настоящей модели считается, что все *boi*d'ы знают координаты целевой точки (или всех целевых точек, если их несколько), а также свое местоположение в настоящий момент времени.

Введем в модель параметр  $K_1$ , определяющий стремление *boi*d'а к цели:

– при  $K_1 > 0$  компонента  $\vec{r}_1$  направлена в сторону целевой точки;

– при  $K_1 = 0$  составляющая движения в направлении целевой точки отсутствует;

– при  $K_1 < 0$  компонента  $\vec{r}_1$  направлена в сторону, противоположную цели.

Рассмотрим сначала случай одной целевой точки. Обозначим за  $\vec{r}_y$  радиус-вектор целевой точки. Тогда силу, действующую на *boi*d  $r_{мех.}$ , можно выразить следующей формулой:

$$\bar{F}_1 = K_1 \frac{\bar{r}_{ц.} - \bar{r}_{мек.}}{\|\bar{r}_{ц.} - \bar{r}_{мек.}\|}$$

Таким образом, в случае одной целевой точки определение компоненты  $\bar{r}_1$  движения *boi*d'a, ответственной за смещение на цель, строится следующим образом:

$$\bar{r}_1 = K_1 \frac{\bar{r}_1^0}{\|\bar{r}_1^0\|}, \quad \bar{r}_1^0 = \begin{pmatrix} x_{ц.} - x_{мек.} \\ y_{ц.} - y_{мек.} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $(x_{ц.}, y_{ц.})$  – координаты целевой точки,  $(x_{мек.}, y_{мек.})$  – местоположение *boi*d'a в настоящий момент времени.

В том случае, если целевых точек несколько, то расчет компоненты  $\bar{r}_1$  разбивается на два этапа и зависит от местоположения *boi*d'a.

Пусть в задаче движения "стаи"  $K$  целевых точек  $\bar{r}_{ц.}^i$  и их координаты  $(x_{ц.}^i, y_{ц.}^i)$ ,  $i=1..K$ . Тогда построение компоненты  $\bar{r}_1$  смещения на целевые точки происходит следующим образом:

По координатам целевых точек  $(x_{ц.}^i, y_{ц.}^i)$  вычисляется промежуточная цель  $\bar{r}_{ц.}^{пром.}$  с координатами  $(x_{ц.}^{пром.}, y_{ц.}^{пром.})$ , и первоначально движение каждого *boi*d'a "стаи" строится в направлении этой промежуточной цели.

Координаты промежуточной цели  $(x_{ц.}^{пром.}, y_{ц.}^{пром.})$  определяются следующим образом:

$$x_{ц.}^{пром.} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_{ц.}^i; \quad y_{ц.}^{пром.} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_{ц.}^i.$$

На данном этапе компонента  $\bar{r}_1$  движения *boi*d'a вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{r}_1 = K_1 \frac{\bar{r}_1^0}{\|\bar{r}_1^0\|}, \quad \bar{r}_1^0 = \begin{pmatrix} x_{ц.}^{пром.} - x_{мек.} \\ y_{ц.}^{пром.} - y_{мек.} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_{ц.}^i - x_{мек.} \\ \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_{ц.}^i - y_{мек.} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

По достижении *boi*d'ом промежуточной цели  $(x_{ц.}, y_{ц.})$  для него случайным образом выбирается конечная целевая точка, и все дальнейшее движение *boi*d'a строится в направлении выбранной цели по формуле (2). Выбор целевой точки строится с таким учетом, чтобы на каж-

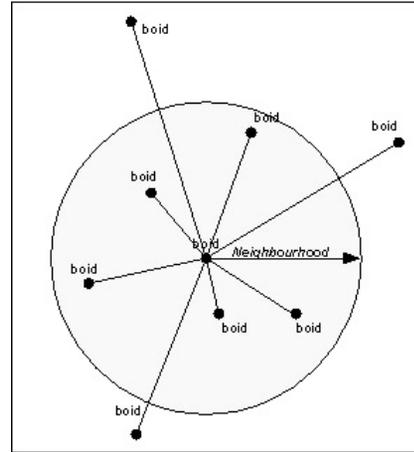


Рис.1. Определение соседей

дую из  $K$  исходных целей пришлось примерно одинаковое число *boi*d'ов (так будет при равномерном случайном выборе целей).

*Расчет компоненты смещения в "центр масс" соседей.*

Каждый *boi*d в любой момент времени знает координаты тех членов стаи, которые попадают в его окрестность радиуса соседства  $Neighbourhood = R_{nbh}$  (здесь и далее будем считать, что зона видимости совпадает с зоной соседства *boi*d'a). Последнее предположение фактически означает, что поле зрения *boi*d'a ограничено окружностью постоянного радиуса, которая задается с помощью параметра  $Neighbourhood$ , и в пределах этой окружности *boi*d обладает полной информацией.

На Рис. 1 пять *boi*d'ов попадают в окружность заданного радиуса и будут считаться соседями *boi*d'a, расположенного в центре этой окружности. Координаты этих *boi*d'ов будут использоваться для нахождения *центра масс соседей*.

Пусть  $M$  – количество *boi*d'ов, попавших в окрестность радиуса  $Neighbourhood$ , т.е. тех членов стаи, для координат  $(x^i, y^i)$  которых верно следующее неравенство:

$$(x_{мек.} - x^i)^2 + (y_{мек.} - y^i)^2 \leq Neighbourhood^2. \quad (4)$$

Тогда за центр масс соседей примем точку с координатами  $(x_{ц.м.}, y_{ц.м.})$ , где:

$$x_{ц.м.} = \frac{1}{M} \sum_i x^i; \\ y_{ц.м.} = \frac{1}{M} \sum_i y^i,$$

а суммирование идет по тем *boi*d'ам, для которых выполняется неравенство (4).

Введем в модель параметр  $K_2$ , отвечающий за притяжение *boi*d'а к центру масс соседей:

- при  $K_2 > 0$  компонента  $\bar{r}_2$  направлена в сторону центра масс соседей;
- при  $K_2 = 0$  составляющая движения в направлении центра масс соседей отсутствует;
- при  $K_2 < 0$  компонента  $\bar{r}_2$  направлена в сторону, противоположную центру масс.

Обозначим за  $\bar{r}_{ц.м.}$  радиус-вектор точки, соответствующей центру масс соседей. Тогда силу, действующую на *boi*d  $r_{мек.}$ , можно выразить следующей формулой:

$$\bar{F}_2 = K_2 \frac{\bar{r}_{ц.м.} - \bar{r}_{мек.}}{\|\bar{r}_{ц.м.} - \bar{r}_{мек.}\|}.$$

Таким образом, компонента  $\bar{r}_2$  движения *boi*d'а в направлении "центра масс" своих соседей строится по следующей формуле:

$$\bar{r}_2 = K_2 \frac{\bar{r}_2^0}{\|\bar{r}_2^0\|}, \quad \bar{r}_2^0 = \begin{pmatrix} x_{ц.м.} - x_{мек.} \\ y_{ц.м.} - y_{мек.} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{M} \sum_i x^i - x_{мек.} \\ \frac{1}{M} \sum_i y^i - y_{мек.} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где сумма рассчитывается по тем *boi*d'ам, для которых выполняется неравенство (4).

*Расчет компоненты отталкивания.*

Анализ системы, в которой реализованы лишь первые два правила построения вектора смещения, показал, что в случае касания двух *boi*d'ов возможна такая ситуация, при которой они будут тормозить дальнейшее продвижение друг друга. Будем называть такую ситуацию *зацеплением*.

Зацепление двух или более *boi*d'ов приводит к таким вариантам, когда небольшое количество объектов затормаживается и перестает двигаться. Схема возникновения "зацепления" приведена на Рис. 2.

Пунктиром на рисунке изображены окрестности *boi*d'ов. Анализ приведенной схемы показывает, что вектор желаемого движения каждого из *boi*d'ов проходит внутри окрестности соседнего, и поэтому он будет укорочен до нулевого. В такой конфигурации ни один из *boi*d'ов не сможет сдвинуться с места.

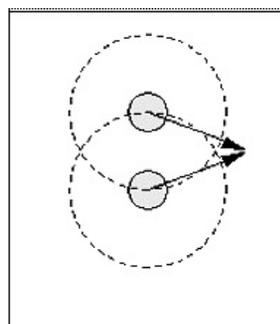


Рис.2. Зацепление двух *boi*d'ов

Для решения этой проблемы в модель и была введена сила отталкивания *boi*d'ов.

Добавим в систему параметр  $K_3$  – коэффициент отталкивания *boi*d'а:

- при  $K_3 > 0$  между *boi*d'ами действует сила отталкивания;
- при  $K_3 = 0$  силы отталкивания между *boi*d'ами нет;
- при  $K_3 < 0$  *boi*d'ы притягиваются друг к другу.

Тогда силу отталкивания *boi*d'ов определим по следующей формуле:

$$\bar{F}_3 = -f \frac{\bar{r}^i - \bar{r}_{мек.}}{\|\bar{r}^i - \bar{r}_{мек.}\|}, \quad (6)$$

где  $f = K_3 \cdot \left( 2 - \frac{\|\bar{r}^i - \bar{r}_{мек.}\|}{R_{MinDist}} \right)^2$ .

Эта формула выражает силу, с которой *boi*d  $r^i$  с координатами  $(x^i, y^i)$  действует на *boi*d  $r_{мек.}$  с координатами  $(x_{мек.}, y_{мек.})$ , для которого в настоящий момент происходит расчет движения. Сила возникает, если расстояние между *boi*d'ами становится меньше  $2MinDist$  и квадратично увеличивается.

Таким образом, эта сила является достаточно "близкодействующей" и не влияет на общее поведение стаи. В то же время она "расталкивает" отдельные слишком сильно сближающиеся *boi*d'ы, предотвращая их касания, а потому и взаимные блокировки.

Приведем расчет компоненты отталкивания в координатном виде.

Определим величину  $d^i$  как расстояние между *boi*d'ом  $r^i$  и *boi*d'ом, для которого в настоящий момент строится движение:

$$d^i = \|\bar{r}^i - \bar{r}_{mek.}\| = \sqrt{(x^i - x_{mek.})^2 + (y^i - y_{mek.})^2}.$$

Область, в которой возникает сила отталкивания, можно записать в виде следующего неравенства:

$$\frac{R_{MinDist}}{2} \leq d^i \leq 2R_{MinDist}. \quad (7)$$

Тогда смещение *boi*d'a  $r_{mek.}$ , вызванное *boi*d'ом  $r^i$ , чьи координаты удовлетворяют неравенству (7), определяется следующей формулой:

$$\bar{r}_3^i = \begin{pmatrix} x_3^i \\ y_3^i \end{pmatrix},$$

где  $x_3^i = D^i \cdot (x^i - x_{mek.})$ ,  $y_3^i = D^i \cdot (y^i - y_{mek.})$ ,

$$D^i = -K_3 \cdot \frac{\left( \frac{2R_{MinDist} - d^i}{R_{MinDist}} \right)^2}{d^i}.$$

Таким образом, компонента  $\bar{r}_3$ , отвечающая за отталкивание *boi*d'ов друг от друга, строится по следующей формуле:

$$\bar{r}_3 = \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i D^i \cdot (x^i - x_{mek.}) \\ \sum_i D^i \cdot (y^i - y_{mek.}) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где сумма берется по тем *boi*d'ам, координаты которых удовлетворяют неравенству (7).

*Расчет сдвига без учета столкновений с препятствиями.*

После того как рассчитаны все три компонента  $\bar{r}_1$ ,  $\bar{r}_2$  и  $\bar{r}_3$ , которые определяют смещение *boi*d'a на первом этапе построения движения, можно вычислить вектор, задающий сдвиг *boi*d'a без учета его столкновения с препятствиями.

Для начала определим вектор  $\bar{r}_0$  следующим образом:

$$\bar{r}_0 = \bar{r}_1 + \bar{r}_2 + \bar{r}_3,$$

где  $\bar{r}_1$  задается формулой (2) или (3),  $\bar{r}_2$  рассчитывается по формуле (5), а  $\bar{r}_3$  – по формуле (8).

Тогда вектор  $\bar{r}_{1-выт\ddot{a}ман}$  смещения *boi*d'a без учета столкновений с препятствиями можно задать по следующей формуле:

$$\bar{r}_{1-выт\ddot{a}ман} = V_{MaxSpeed} \cdot \bar{r}, \quad \text{где } \bar{r} = \begin{cases} \bar{r}_0, & \text{если } \|\bar{r}_0\| \leq 1; \\ \frac{\bar{r}_0}{\|\bar{r}_0\|}, & \text{если } \|\bar{r}_0\| > 1. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, в координатном виде смещение *boi*d'a до обработки столкновения с препятствиями выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{нов.} &= x_{mek.} + V_{MaxSpeed} \cdot x \cdot dt, \\ y_{нов.} &= y_{mek.} + V_{MaxSpeed} \cdot y \cdot dt, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты вектора  $\bar{r}_0$  из (9), а  $dt$  – шаг времени.

### 3. Второй этап построения движения

После того как построен вектор  $\bar{r}_{1-выт\ddot{a}ман}$  смещения *boi*d'a под действием правил движения (1), необходимо:

1. Проверить, не происходит ли столкновение *boi*d'a с препятствиями или другими членами "стаи", и в случае необходимости скорректировать полученные на первом этапе новые координаты *boi*d'a ( $x_{нов.}, y_{нов.}$ ).

2. Переместить *boi*d в полученные на втором этапе координаты ( $x_{фин.}, y_{фин.}$ ).

Как уже отмечалось ранее, каждый объект не располагает полной информацией о всех препятствиях – его зрение ограничено окружностью с центром в его местоположении и радиусом, равным константе *Neighborhood*.

Будем предполагать, что каждый *boi*d, помимо своей навигационной системы, обладает неким механизмом, который сообщает ему, в какую точку пространства он перемещается – свободную (разрешенную к перемещению в нее) или занятую (препятствием или другим *boi*d'ом). Дальнейшие расчеты скорректированных координат объекта проводятся с такой целью, чтобы в данный конкретный момент движения обогнуть препятствие, если *boi*d встретил его на своем пути, и избежать столкновения с другими *boi*d'ами.

Введем два алгоритма обхода препятствий, которые принадлежат классу *выт\ddot{a}лкивающих* алгоритмов. Отличаются они моделью *выт\ddot{a}лкивания*. Пример выт\ddot{a}лкивающего алгоритма приведен на Рис. 3.

Первая модель обхода препятствия (Рис. 4) реализована следующим образом: выт\ddot{a}лкивание происходит по направлению радиуса, проведенного из центра препятствия в точку встречи *boi*d'a с препятствием, на расстояние, равное минимальному допустимому между любыми двумя

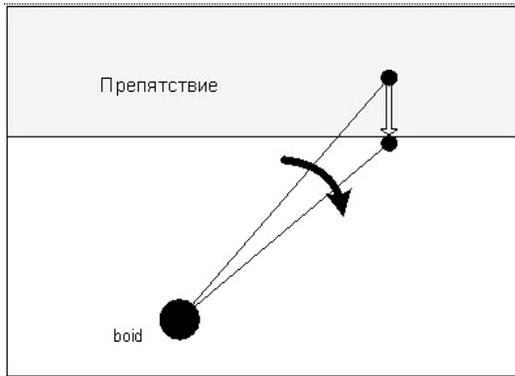


Рис. 3. Коррекция точки смещения (выталкивание)

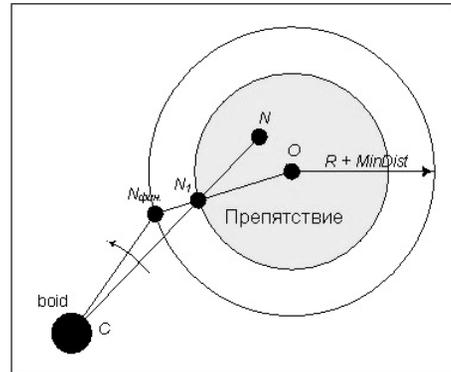


Рис. 4. Первая модель обхода препятствий

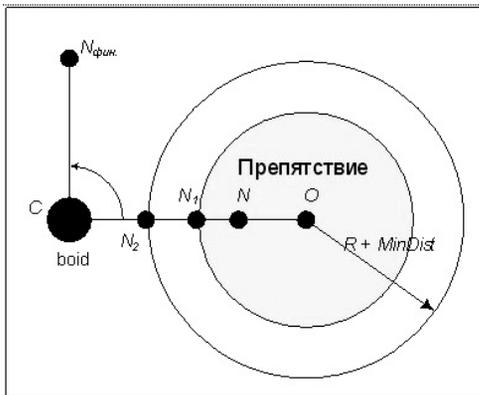


Рис. 5. Случай торможения в первой модели обхода препятствий

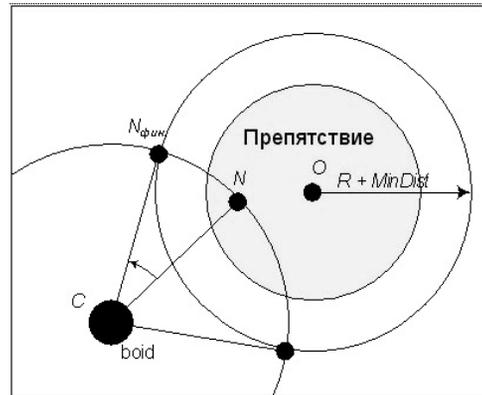


Рис. 6. Вторая модель обхода препятствий

объектами (в модели это расстояние задается характеристической константой  $R_{MinDist}$ ).

На Рис. 4. точка  $C$  – текущее положение  $boi$ 'а,  $N$  – полученное в результате описанных расчетов положение  $boi$ 'а на следующем временном шаге,  $O$  – центр препятствия,  $R$  – радиус препятствия,  $N_1$  – точка встречи  $boi$ 'а с препятствием,  $N_{нов.}$  – новая точка, в которую  $boi$  будет смещаться.

У этой модели, однако, имеется критический случай торможения объекта (Рис. 5). Если точки  $C$ ,  $N$  и  $O$  лежат на одной прямой, то возможна ситуация, когда  $boi$  не сможет обогнуть препятствие и продолжить движение. Для того чтобы избежать этого, в качестве новых координат  $boi$ 'а берутся координаты, получаемые смещением на вектор, перпендикулярный вектору  $\vec{r}_{1-вытман}$  и равный ему по модулю. Так на Рис. 5 выбрана точка  $N_{фин.}$  (в верхней левой части рисунка).

Вторая модель обхода препятствий отличается от первой способом нахождения новых координат точки смещения: если новые координаты  $boi$ 'а попадают в область, занятую препятствием, то  $boi$  смещается на расстояние, равное первоначальному смещению, в точку, лежащую на границе препятствия, фактически выполняя поворот вектора базового смещения. Поворот вектора смещения выполняется в сторону, соответствующую наименьшему углу с вектором  $\vec{r}_{1-вытман}$ . Иллюстрация построения вектора смещения по второй модели приведена на Рис. 6.

По аналогичной схеме построены правила обхода соседних объектов- $boi$ 'ов для избежания столкновения с ними. При этом различаются правило одиночного уклонения (уклонения от отдельного  $boi$ 'а) и правило множественных уклонений.

Схемы этих правил приведены на Рис.7 и Рис. 8.

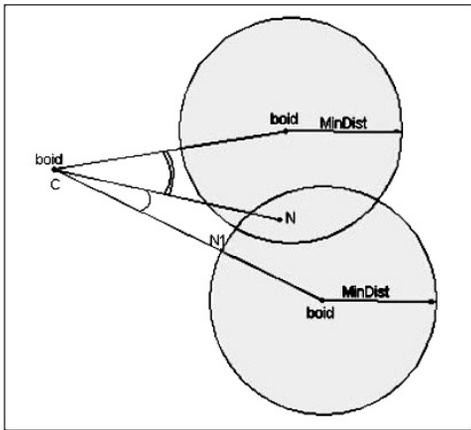


Рис.7. Схема одиночного уклонения

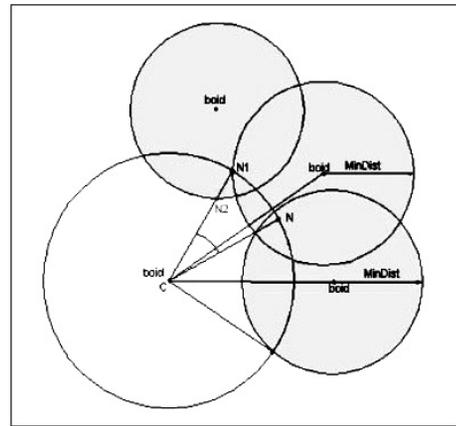


Рис 8. Схема множественного уклонения

#### 4. Программа моделирования

Для реализации описанных алгоритмов моделирования движения гомогенной группы объектов была разработана система моделирования, позволяющая изучать характер поведения рассматриваемой модели в зависимости от значений начальных условий и параметров. Она реализована программным приложением, стартовый интерфейс (интерфейс блока запуска и настройки) базовой версии которого приведен на Рис. 9.

Как показано на Рис. 9, интерфейс имеет несколько окон и полей: окно рабочего поля (сцены моделирования), где показаны препятствия и стая, поле меню и органов оперативного управления (слева сверху) и окно инспектора настроек (справа), которое может вызываться на экран и убираться с экрана.

Настройка модели движения *boid*'ов определяется рядом параметров процесса моделирования и геометрией "сцены" – положением всех объектов.

Система позволяет задавать и изменять все параметры модели:

- количество *boid*'ов и генерировать их начальные координаты;
- количество и координаты препятствий;
- местоположение целевой точки (точек);
- константы настройки модели  $R_{nbh}$ ,  $R_{MinDist}$ ,

$V_{MaxSpeed}$ ,  $dt$ ;

- $K_1$  (параметр притяжения *boid*'а к целевой точке);

- $K_2$  (параметр притяжения *boid*'а к центру масс соседей);
- $K_3$  (параметр отталкивания *boid*'а от ближайших соседей);
- модель обхода препятствий.

Отметим, что для *boid*'ов задается начальное положение, а не положение на некотором шаге моделирования (последнее определяется эволюцией модели).

Описанное приложение позволяет полностью управлять движением группы объектов (запуск моделирования, режим непрерывного моделирования, пошаговое управление, скорость моделирования и т.д.). Кроме того, программа моделирования допускает переопределение (перемещение) целевой точки (точек) непосредственно в процессе движения *boid*'ов.

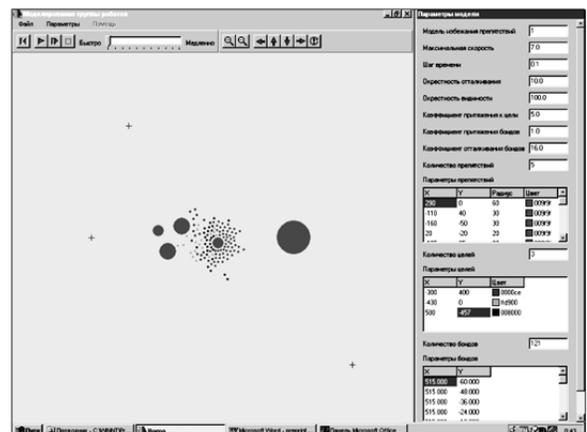


Рис.9. Стартовый интерфейс программы моделирования

Поскольку обычно модель подразумевает большое количество *boi*d'ов, ручной ввод их координат затруднителен. Поэтому для редактирования начальный параметров *boi*d'ов предусмотрена дополнительная возможность – генератор конфигураций.

С помощью созданной системы моделирования проведен ряд экспериментов по изучению особенностей движения группы (стаи) и исследованию ее управляемости. Эксперименты ряда серий сохраняли неизменным число *boi*d'ов, но отличались друг от друга значениями параметров  $K_1$  (параметр притяжения *boi*d'a к целевой точке),  $K_2$  (параметр притяжения *boi*d'a к центру масс соседей),  $K_3$  (параметр отталкивания *boi*d'a от ближайших соседей),  $R_{nbh}$  и  $R_{MinDist}$ . Были проведены также эксперименты по изменению числа *boi*d'ов в группе.

Эти эксперименты показали эффективность принятых правил управления для достижения цели управления стаей малым числом управляющих параметров, и позволили оценить взаимовлияние параметров задачи, которые существенно определяют поведение *boi*d'ов в стае.

Прежде всего, укажем параметры  $K_1$  и  $K_2$ , которые участвуют в вычислении вектора смещения *boi*d'a на первом этапе. Они определяют "приоритетность" направления для каждого члена группы. Так, из одинаковых начальных условий при постоянных значениях констант  $R_{MinDist} = 10$  и  $R_{nbh} = 40$  были выполнены тестовые серии, во время которых менялось значение  $K_1$  от  $K_1 = 0$  до  $K_1 = 150$  (параметры  $K_1$  и  $K_2$  не нормировались). При  $K_1 = 0$  движение на целевую точку отсутствовало. При  $K_1 \gg K_2$

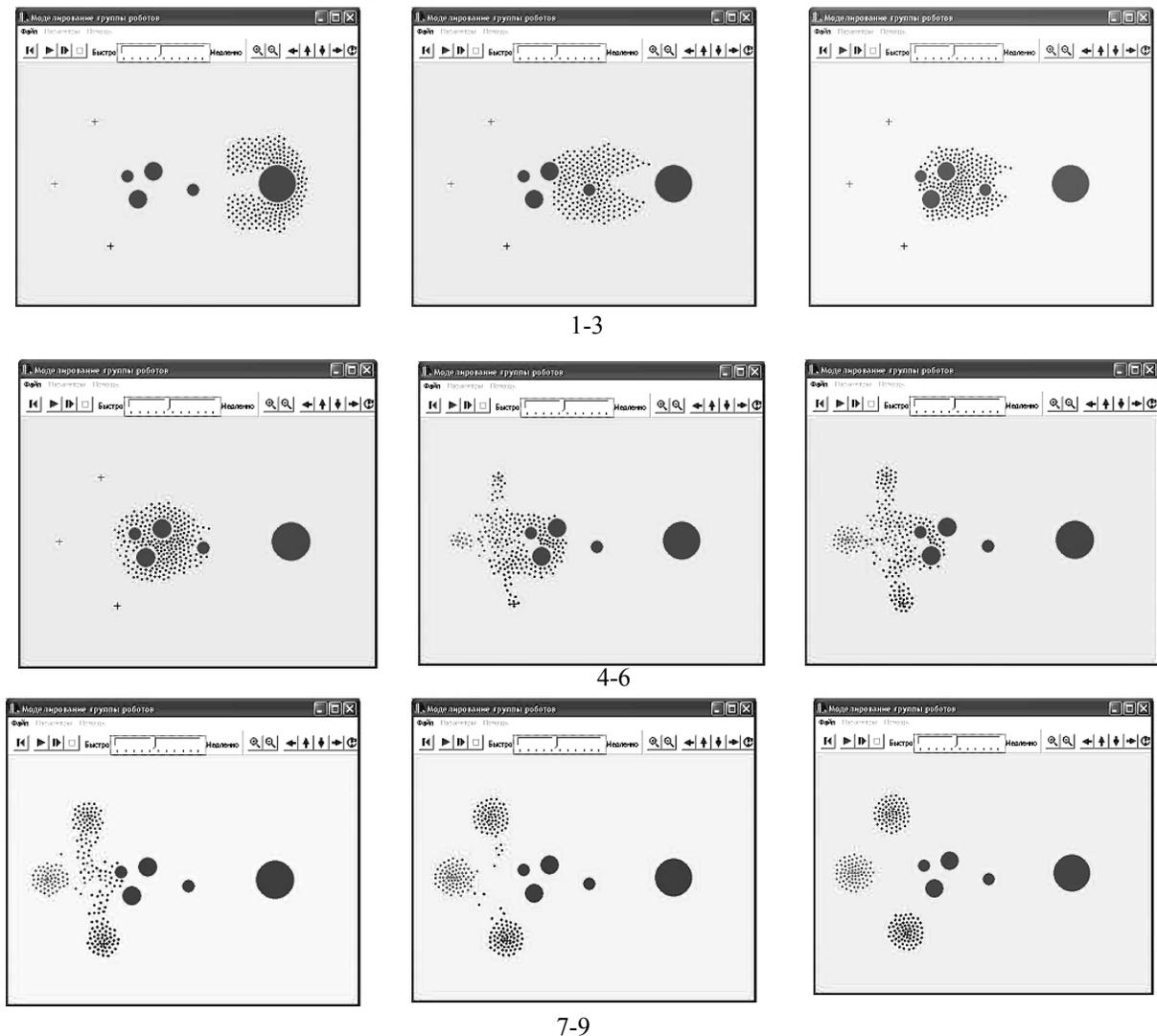


Рис. 10. Рабочие моменты моделирования

групповой характер движения терялся, и преобладало лишь движение на цель.

Таким образом, в проведенных экспериментах оказалось, что на групповой характер движения объектов существенным образом влияют параметры  $K_2$  и  $R_{nbh}$  – весовой коэффициент группового смещения и радиус области соседства.

На Рис. 10 показаны кинограммы рабочих моментов моделирования. Они демонстрируют движение стаи от начальной фазы до достижения конечной цели.

В эксперименте было 3 цели и 225 *boid*'ов.

## Заключение

Важно указать, что моделирование показало достаточную эффективность принятых схем управления. Эксперименты показали, что:

- управляемым является характер движения, т.е. поведение группы. При этом в зависимости от значений управляющих констант-параметров группа ("стая") может вести себя как единый коллектив особей (по определенной мере) или как набор обособленных объектов, система моделирования реализует механизм оценки и выбора соответствующих пороговых значений указанных констант.

- управляемым является также сам процесс движения (траектория движения стаи), путем введения последовательности подцелей или прямым заданием глобального вектора управления можно обеспечить движение стаи через заданные точки на карте.

- для управления стаей как объектом, число степеней свободы которого равно  $2n$ , где  $n$  – число *boid*'ов в стае, достаточно управления всего двумя координатами, а именно координатами целевой точки, или координатами вектора целевого смещения.

По количеству управляющих функций последнее равносильно модели движения "стая с лидером": положение цели знает только лидер ("вожак стаи"), а все остальные члены группы следуют за ним. Управление стаей в таком случае тоже ограничивается двумя функциями. Однако случай лидера при аппаратной реализации подобных моделей имеет тот недостаток, что лидер группы может выйти из строя. Тогда все остальные особи теряют ориентир в своем движении, и дальнейшее выполнение задачи становится невозможным. В то же время группа объектов, где

движение каждого зависит от других лишь в той мере, в какой это оговорено выше сформулированными правилами, обладает большей независимостью от внешних условий.

Наконец, моделирование наглядно показало возникновение эффекта эмерджентности в стае – локальные правила поведения типа (1) очевидно переходят в целенаправленное коллективное поведение.

В планах развития работы – расширение средств параметрической адаптации/автонастройки модели (частично они уже реализованы), поддержка принятия решений стаей. При этом важная характеристика – возникновение структур в изначально однородной стае (по аналогии с [8-10]), планируется их исследование при расширении модели.

Авторы выражают глубокую благодарность Евгении Павловне Кириковой, которая внесла большой вклад в работу на начальном этапе.

## Литература

1. A. Guillot and J.A. Meyer. Computer Simulations of Adaptive Behavior in Animats. Computer Animation'94, IEEE Computer Society Press, 1994.
2. J.A. Meyer and A. Guillot. Simulation of Adaptive Behavior in Animats: Review and Prospect. In Meyer, J.A. and Wilson, S.F. (Eds.) From animals to animats: Proceedings of the First Int. Conference on Simulation of Adaptive Behavior, The MIT Press, 1991.
3. M. Mataric. Behavior-Based Control: Examples from Navigation, Learning, and Group Behavior, 1995. <http://www-robotics.usc.edu/~maja/>.
4. M. Mataric. Designing and Understanding Adaptive Group Behavior, 1995. Adaptive Behavior 4(1). <http://www-robotics.usc.edu/~maja/>.
5. C. Reynolds. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. Proceedings of SIGGRAPH'87, in Computer Graphics vol.21, number 4, July 1987.
6. C. Reynolds. Steering Behaviors for Autonomous Characters, 1995. <http://www.red.com/cwr/>.
7. C. Reynolds. Not Bumping Into Things. Notes for the course on Physically Based Modeling at SIGGRAPH'88. <http://www.red.com/cwr/>.
8. Карпов В. Э. Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // Тр. XIII национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012. т. 3. Белгород: БелГТУ, 2012. с. 275-283.
9. Карпов В.Э. Процедура голосования в однородных коллективах роботов // Тр. XIV национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014. т.2. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014, с. 159-167.

10. Кулинич А.А. Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности. // Искусственный интеллект и принятие решений. (ИииПР). № 2, 2012, стр. 95-106.

**Павловский Владимир Евгеньевич.** Главный научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1972 году. Доктор физико-математических наук, профессор. Автор 317 печатных работ и одной монографии. Область научных интересов: робототехника, методы управления роботами. E-mail: vlpavl@mail.ru

**Павловский Владимир Владимирович.** Старший преподаватель РЭУ им. Г.В. Плеханова. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 2000 году. Автор 12 печатных работ. Область научных интересов: робототехника, алгебраические модели. E-mail: vlpavl2000@mail.ru