

УДК 59.009+308

## КОНТРОЛЛЕР РЕАЛИСТИЧНОГО ПОВЕДЕНИЯ СТАЙ/СТАД ЖИВОТНЫХ

В.В. Кугуракова<sup>1</sup>, А.М. Степанов<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет

<sup>1</sup>vlada.kugurakova@gmail.com, <sup>2</sup>stepanovaleksandrm@gmail.com

### **Аннотация**

Работа посвящена рассмотрению процесса моделирования реалистичного контроллера поведения групп объектов. Проведено исследование основных приемов и принципов, используемых при создании реалистичного контроллера поведения автономных агентов, объединенных в связанные группы. На основе этих данных создан контроллер поведения.

Исследована эффективность поведения групп автономных агентов, рассмотрены возможности использования системы локальных скалярных полей с целью построения максимально точной математической модели, проведён анализ возможности создания иерархической системы мультиагентных подгрупп в рамках группы, проведены эксперименты для оценки корректности разработанного контроллера.

**Ключевые слова:** контроллер, группа, модель поведения.

### **1. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ЖИВОТНЫХ В РЕАЛЬНОМ МИРЕ**

#### ***Как возникают скопления животных***

При скоплении определенных животных часто образуется стадо. Основным фактором в данном случае являются схожие потребности членов стада. Так, например, если на территории в изобилии присутствует пища, то вероятность объединения животных в стадо возрастает.

В качестве примера рассмотрим птичий «базар». Обычно он образуется в местах активной циркуляции морских вод, в результате чего в изобилии присутствуют как кислород, так и минеральные соли, поднимаемые течениями. Благодаря этому развивается планктон, которым питается рыба. А она является пищей для птиц.

Аналогичная ситуация и с животными. При хорошем урожае шишек в кедровых лесах животные более активно собираются в местах непосредственного расположения кедра.

В качестве другого фактора объединения животных в стада и стаи может выступать период размножения. Происходит встреча самцов и самок, животные активно разыскивают друг друга, устраивают специфические брачные игры [1].

Представители многих видов животных активно образуют группы. Индивидуальные особенности животных, а именно, окраска, особенности пахучих желез и свойства органов чувств, помогают животным общаться между собой и проще находить друг друга. Данные свойства указывают на эволюционное закрепление всего того, что облегчает образование групп животных.

### ***Размеры скоплений, стай и стад у людей и животных***

При ориентировочном анализе количества беспозвоночных особей установлено, что оно может достигать нескольких миллиардов (например, стая мигрирующей саранчи). Скопления птиц на упомянутых ранее птичьих «базарах» исчисляются сотнями тысяч особей. Стада копытных животных, при миграции с одного места на другое, могут достигать численности в несколько десятков тысяч животных [2–4].

Скопления людей в одном месте также могут достигать огромных цифр. Обычно это характерно для таких массовых мероприятий, как парады, паломничества, крупные спортивные мероприятия и праздники [5]. Например, на крупном музыкальном фестивале «Парад Любви» в Германии собралось более миллиона человек.

Скопление людей более 6 человек может перерасти из простого собрания в толпу с характерными целями и признаками. При достижении скоплением людей «критической массы» между ними возникает взаимная связь, что в конечном итоге может привести к активным действиям со стороны этого скопления (в том числе буйным, мятежным, преследующим цели, о которых собиравшиеся не помышляли) [6].

Толпа – это бесструктурное скопление людей, которые не обладают какой-либо общей целью, но связаны между собой определенным сходством эмоционального состояния и общим объектом внимания. Сходство между эмоциональными состояниями людей возникает в процессе превращения скопления людей

в толпу. Введение этого признака суживает разнообразие явлений, которыми можно характеризовать толпу.

### **Координация движения в стадах и стаях**

В отличие от групп мигрирующих животных, в стадах и стаях наблюдается координация поведения особей (например, общее направление движения). При наблюдении небольшой стаи рыб (15–20 особей) становится очевидным, что в рамках самой стаи рыбы постоянно изменяют свое положение. Так, например, голодные особи немного выбиваются вперед, хватают корм и затем постепенно отплывают назад [7, 8].

Стадам парнокопытных животных присущи более простые закономерности, связанные с расположением внутри стада: одна часть животных постоянно стремится быть впереди, другие предпочитают быть боковыми, третьи – центральными. Например, в стаде коров 27% животных предпочитают быть впереди, 10% – сзади, 33% – в гуще стада (центральная часть) [9]. Кроме того, некоторые животные предпочитают находиться на правой стороне, другие, аналогично, на левой (рис. 1). Однако, несмотря на это, значительное число коров встречается то тут, то там, не имея особых предпочтений.

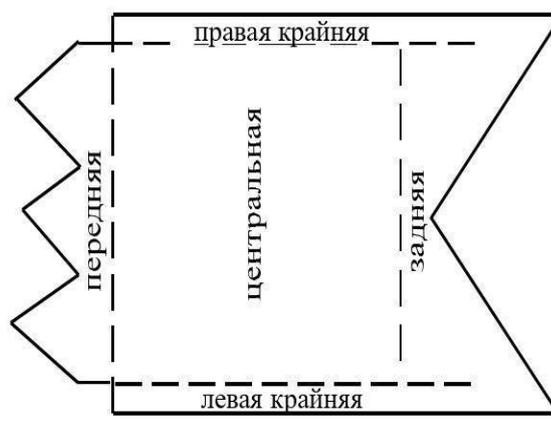


Рис. 1. Предпочтение места в стаде (И.А. Жесткова)

### **Процесс превращения группы в стадо или стаю**

Одной из основных целей пастуха является поддержание животных в форме стада. Так, например, если он видит, что животные разбрелись, то первое, что предпримет пастух, – это сгонит их в плотную группу. Это делается для того, чтобы обрести контроль и власть над животными.

Животные, которые разбрелись по пастбищу, не будут подпускать к себе пастуха на близкое расстояние. Собрав животных воедино, пастух может к ним приблизиться или, например, заставить их двигаться в требуемом направлении. Животные, находясь в стаде, чувствуют безопасность и теряют самостоятельность. Стадо ведет себя как единый организм.

Для возникновения стада в обычных условиях требуется несколько минут. Например, олени, пасущиеся на склонах гор, в обычной ситуации разобщены. Стоит нам вспугнуть одного из них – реакции от других не последует. Однако если мы решим повторить этот эксперимент на равнине, где животные видят друг друга, последует ответная реакция от многих особей. В считанные минуты будет сформировано стадо, и животные будут перемешаться в его рамках, поскольку, находясь в стаде, они чувствуют себя более защищенными. В данном случае некогда свободные в выборе особи ожидают решения вожака стаи и следуют за ним.

Стадо (стая) остается единым до тех пор, пока сохраняются условия, при которых животные образовали группу и сблизилась ближе, чем на индивидуальную дистанцию, – испуг, например, от близости человека или при нападении хищников, при прохождении через узкий проход или пребывании в опасной ситуации вроде переправы через реку. Как только животные успокаиваются, начинают кормиться или отдыхать, так стадо рассыпается, поведение обособленных особей вновь становится индивидуальным.

### ***Цели и задачи моделирования толпы***

Одной из основных целей моделирования толпы является описание поведения множества агентов в определенных условиях. Наиболее часто в качестве агента выступает именно человек. Аналогичным образом моделируется поведение косяков рыб, стай птиц и стад животных.

В наши дни моделирование толпы является развивающейся областью науки. Оно активно применяется в компьютерной графике, кинематографе, архитектурном и ландшафтном планировании. Необходимость расчета пассажирского и транспортного потоков породила особый класс геоинформационных систем: симуляторов толпы, предоставляющих возможность измерения, оптимизации и визуализации подобных потоков.

В крупных городах наблюдается тенденция увеличения населения [10]. Однако многие городские объекты, магистрали и места массового пользования были спроектированы без учета значительного разрастания. Это приводит к образованию пробок и других транспортных проблем, мешающих корректному функционированию. Кроме того, в случае чрезвычайной ситуации данная проблема может привести к непоправимым последствиям [11].

Благодаря своевременному использованию реалистичной модели поведения толпы можно внести изменения в существующую систему. Благодаря моделированию можно получить следующие данные:

- нахождение областей с высокой плотностью движения;
- подбор оптимального проекта с целью улучшения пропускной способности потока;
- моделирование возможных сценариев поведения толпы при проведении общественных мероприятий (в том числе, в случае ЧП).

## **2. СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМА ПОВЕДЕНИЯ**

### ***Поиск объекта***

Поиск объекта является базовым элементом алгоритма поведения. В качестве целевой координаты в данном случае выступает определенная точка (либо область) в пространстве. При этом направление движения агента соответствует кратчайшему направлению к целевой точке [12].

При достижении целевой точки (либо области) агент может вызвать какое-либо действие. В этом случае он перейдет к следующей части алгоритма.

Если же никакое действие не будет вызвано, агент сохранит целевое направление и пройдет сквозь цель. После следующей корректировки направления агент развернется и вновь пройдет сквозь цель (рис. 2).

Данный метод алгоритма может быть использован для поиска агентом чего-либо. В рамках стада данный метод должен применяться вкупе с другими методами во избежание разрозненного поведения [13]. Однако в том случае, если животное окончательно отбилась от стада, оно может применять этот метод алгоритма в чистом виде (так как влияние со стороны стада отсутствует).

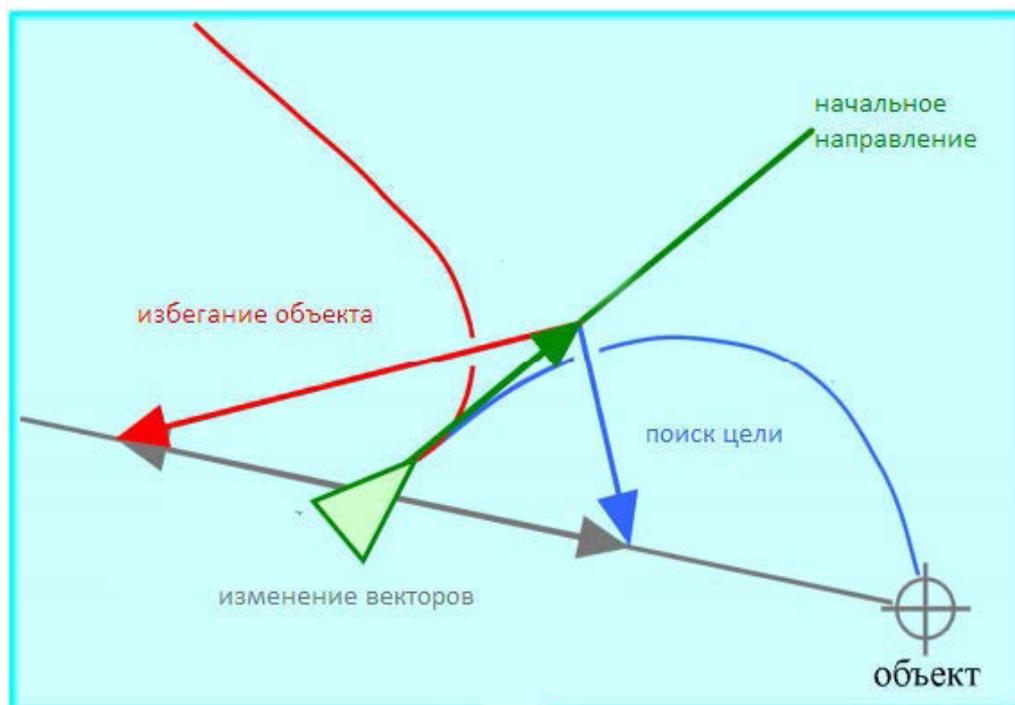


Рис. 2. Поиск и избегание объекта

### ***Избегание объекта***

Избегание объекта является элементом алгоритма, противоположным поиску цели. В данном случае агент выбирает направление, противоположное объекту, который он избегает. Действие в данном случае можно вызывать после достаточного отдаления от объекта, который агент старается избежать, либо, например, по прошествии определенного времени, в течение которого агент осуществлял движение в противоположную сторону (время бегства).

Аналогично поиску данный метод должен быть комбинирован с другими методами группового поведения [14]. Например, несколько членов стада приблизились к какому-либо объекту, и он начал издавать отпугивающий звук. В данном случае находящиеся рядом агенты испугаются и начнут движение в противоположную сторону. Далее, при приближении к стаду их движение будет замечено остальными участниками. В зависимости от количества бегущих произойдет лавинообразный эффект: либо бегство заразит все стадо, и оно начнет движение в сторону (если бегущих много); либо бегство постепенно угаснет, частично сдвинув агентов вблизи избегаемого объекта (бегущих мало).

### ***Преследование движущегося объекта***

Данный элемент алгоритма имеет черты, похожие на метод поиска объекта. Отличием является то, что в данном случае целевой объект движется. Для более реалистичного поведения мы должны прогнозировать дальнейшее движение нашей цели.

При прогнозировании будем предполагать, что объект сохранит прямолинейное движение. На практике же прогноз не всегда является верным, поскольку движущийся объект может совершать самые разнообразные маневры. Исходя из этого, прогноз должен регулярно проходить корректировки [15].

Поскольку объект находится в стаде, влияние на него будет оказывать как целевой объект, так и окружающие его агенты (стадо). Агенты будут сохранять комфортные для преследования боковой интервал и дистанцию. Основное влияние на вектор движения будет оказывать преследуемый объект, второстепенное влияние окажут окружающие агенты.

### ***Избегание движущегося объекта***

Метод алгоритма аналогичен преследованию объекта, за исключением того, что вместо движения за объектом используется бегство от него. Таким же образом производятся прогноз движения и корректировка собственного курса агента [15] (рис. 3). Более того, в данном случае вступают в дело стадные чувства. При возникновении опасности агенты сокращают дистанцию между собой, образуя более плотное скопление. Поскольку агенты находятся на небольшом расстоянии, если объект опасности окажется достаточно близко, стадо начнет синхронное бегство от него (в зависимости от размера стада это могут быть как его часть, так и все оно).

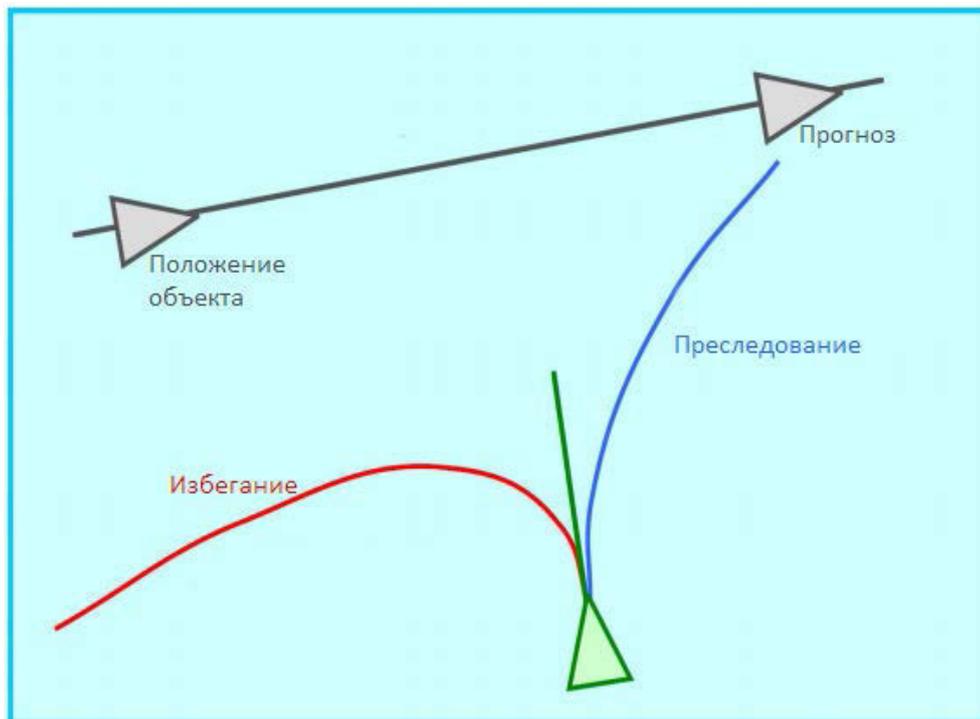


Рис. 3. Поиск и избегание с прогнозом

### ***Бегство от преследователя***

Следует упомянуть частный случай избегания динамического объекта, когда бегство осуществляется от преследователя. В данном случае помимо движения в противоположную сторону агент может выполнять разнообразные маневры и уклонения, тем самым усложняя свою поимку [16]. Кроме того, стадный инстинкт призывает агента двигаться к стаду, тем самым вызывая его лавинообразное движение (агенты, к которым приближается преследователь, аналогично обращаются в бегство, затем это бегство наблюдают остальные и присоединяются) [8]. При всем этом агенты осознают состояние окружающей опасности и стараются держаться ближе друг к другу (рис. 4).

### ***Случайное движение***

Метод случайного движения моделирует процесс блуждания объекта. Однако нельзя использовать случайное изменение вектора на каждом шагу, поскольку в таком случае движение будет нереалистичным и дерганым. Для достижения большей реалистичности можно с некоторой периодичностью суммировать вектор текущего направления и случайный сгенерированный вектор.

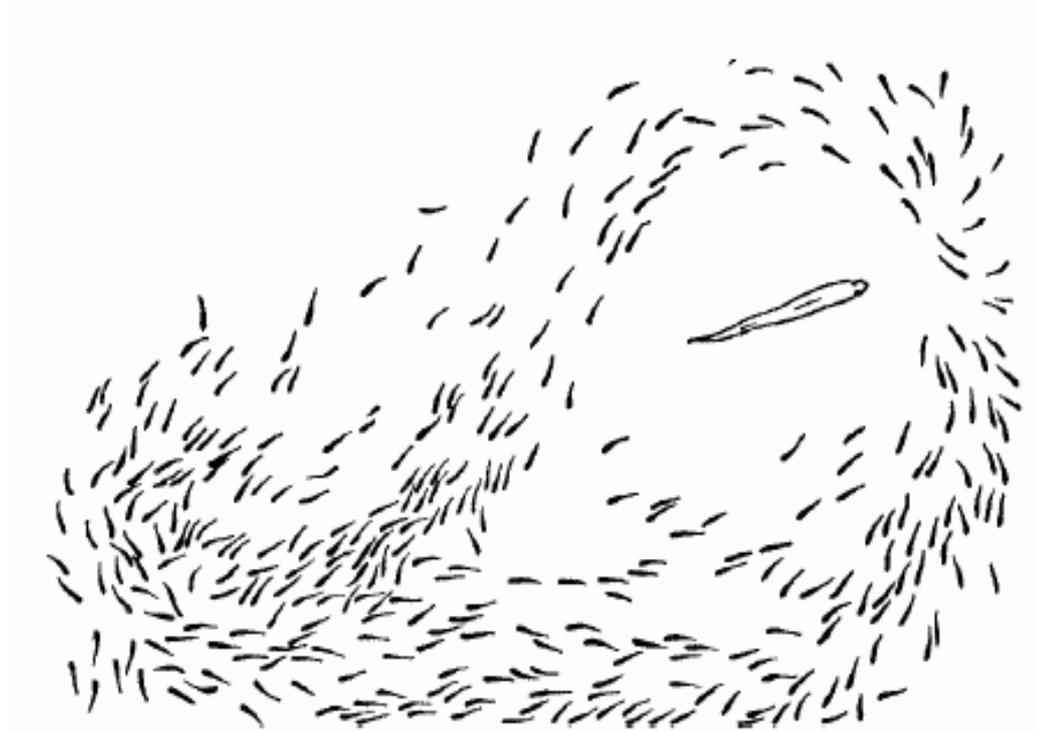


Рис. 4. Пример бегства от хищника в косяке рыб [8]

Для упрощения генерации вектора корректировки движения в качестве области его генерации можно использовать окружность [17]. Благодаря этому можно добиться плавности изменения направления движения, плавности изменения скорости и масштабируемости максимального отклонения. Таким образом, при каждой корректировке посредством текущего вектора движения и сгенерированного вектора изменяются и направление, и скорость движения (рис. 5). Данный метод также рекомендуется комбинировать с методами группового поведения.

#### ***Избежание столкновений в толпе***

Благодаря этому методу алгоритма агентам в группе удастся двигаться в разных направлениях и при этом не сталкиваться. Для лучшего понимания представим толпу людей во время какого-либо массового праздника. Один из агентов (в данном случае человек) движется к своим знакомым (цель) через толпу. При этом он анализирует направления движения окружающих его агентов и соответствующим образом корректирует свой курс. Для проведения корректировки могут использоваться изменение направления движения, ускорение или замедление.



Рис. 5. Пример случайного движения

Когда в поле зрения движущегося агента попадает другой движущийся агент, происходит прогнозирование его движения. Агент корректирует свой курс для избегания столкновения. Аналогично поступает и другой агент. В результате курсу движения обоих агентов изменяются [18, 19].

Если корректировка прошла неуспешно и после повторного прогнозирования движения может возникнуть столкновение, метод запускается повторно и снова вносит корректировки (рис. 6).

### ***Поддержание группового состояния***

Целью данного метода является поддержание стада в сплоченном групповом состоянии. Для этого агент анализирует окружающую его область и вычисляет наиболее предпочтительное для него местоположение. Для того чтобы получить это местоположение, нужно вычислить усредненную позицию агентов, находящихся в наблюдаемой области. После успешного вычисления целевой точки агент начинает движение к ней, тем самым корректируя среднюю позицию для других агентов. Благодаря этому члены стада находятся на расстоянии друг от друга, при этом сохраняя целостность группы (рис. 7).

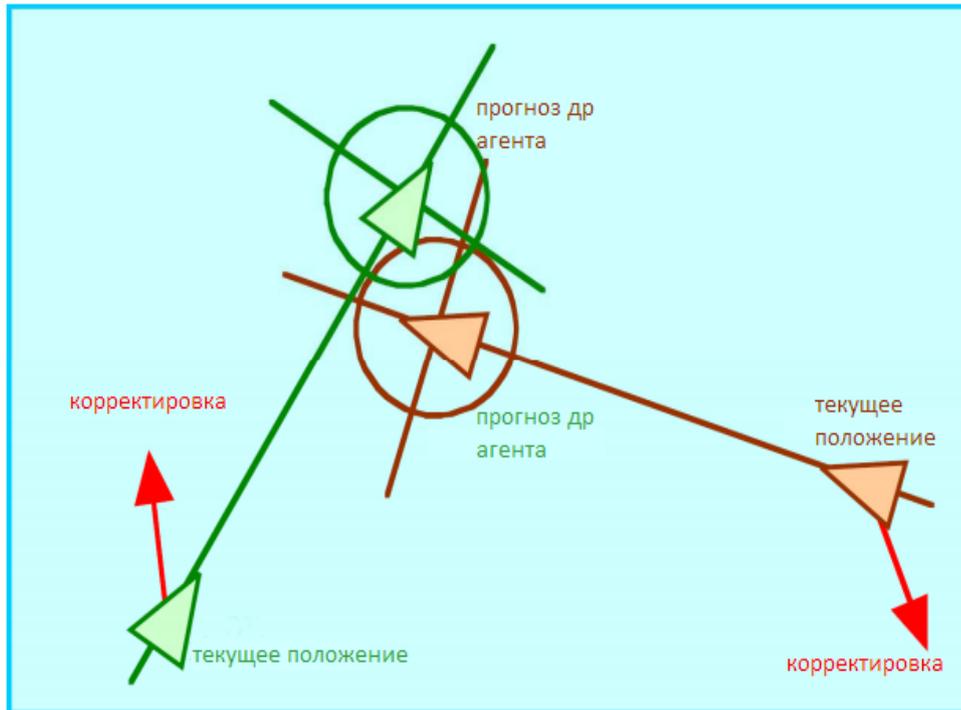


Рис. 6. Избегание столкновений двух объектов

Однако, если агенты будут повсеместно корректировать собственные целевые точки, стадо потеряет общее направление движения. А это неприменимо, когда группа должна осуществлять движение в определенном направлении. Во избежание этого данный метод может применяться совместно с методом сохранения общего направления группы.



Рис. 7. Корректировка положения агента в группе

### Сохранение общего направления группы

Этот метод направлен на поддержание общего направления внутри группы, а также сглаживания отклонений. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда стадо коров идет на пастбище. Коровы, анализируя поведение окружающих собратьев, двигаются в одном направлении. Если вдруг корова пойдет без веской причины в обратном направлении, поведение будет считаться отклоняющимся (рис. 8).

В зависимости от того, насколько жестко происходит корректировка направления, могут быть достигнуты разные результаты. Например, для стада коров не требуется чрезмерно точной корректировки, поскольку коровы находятся на достаточном расстоянии и их скорость невелика. Если рассмотреть бегущий табун лошадей, корректировка должна быть достаточно точной, чтобы сохранить структуру табуна, схожую с реальной. Корректировка должна быть подобрана таким образом, чтобы модель имела наибольшее сходство с реальным миром. Немаловажную роль играет скорость движения группы: чем она выше, тем точнее должна быть корректировка (поскольку на высокой скорости достаточно небольшого промежутка времени, чтобы агент с неверным направлением покинул группу).

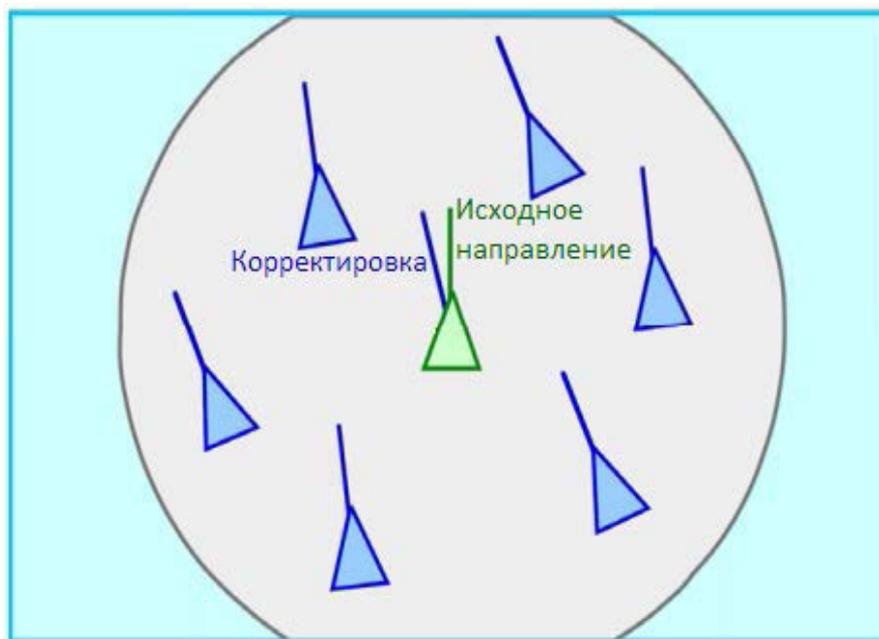


Рис. 8. Корректировка агента в группе

### **Отделение от стада**

В некоторых случаях животные в стаде могут расходиться на большие расстояния. При этом, когда будет достигнуто достаточно большое отдаление от других агентов, они перестанут оказывать на него влияние. В этом случае животное с большой вероятностью устремится обратно к сородичам. И иногда агент может окончательно отделиться от стада и вести себя индивидуально до тех пор, пока в его поле зрения не попадет кто-либо (рис. 9).

Данный метод алгоритма поведения имеет место в реальной жизни. Так, например, коровы, находясь на пастбище, расходятся по нему, однако сохраняют зрительный контакт с сородичами. Стоит одной из коров отойти достаточно далеко и отвлечься на время, как она может отделиться от стада. В этом случае, если зрительный контакт сохранился, корова поспешит вернуться в стадо. Если же корова не увидит стада, скорее всего, она просто продолжит пастись в одиночестве.

Данный метод, при комбинировании с методом группирования, может показывать отличный результат поведения, динамически изменяя расстояние между агентами в зависимости от условий. В чистом виде данный метод алгоритма решает задачу моделирования отбивающихся от стада особей (что регулярно происходит с некоторой вероятностью).

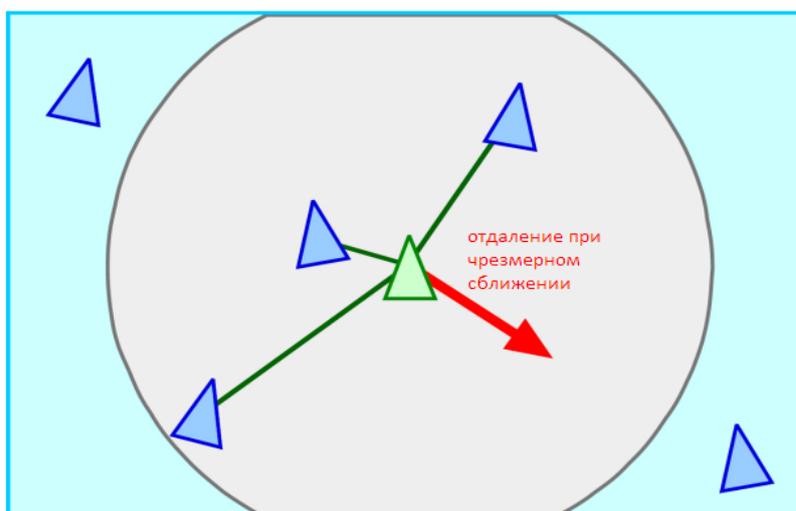


Рис. 9. Пример отдаления агента при чрезмерном сближении

### **Следование за вожакom**

В некоторых группах животных, например, в волчьих стаях или стадах павианов, существует определенная иерархия, которая оказывает влияние на положение животных внутри группы.

В качестве примера рассмотрим стадо павианов. На рисунке 10 представлены два вида расположения животных: походный строй и позиции в случае нападения хищника. Буквам В соответствуют вожаки, С – самки, М – молодняк, Н – самцы низшего ранга [20].

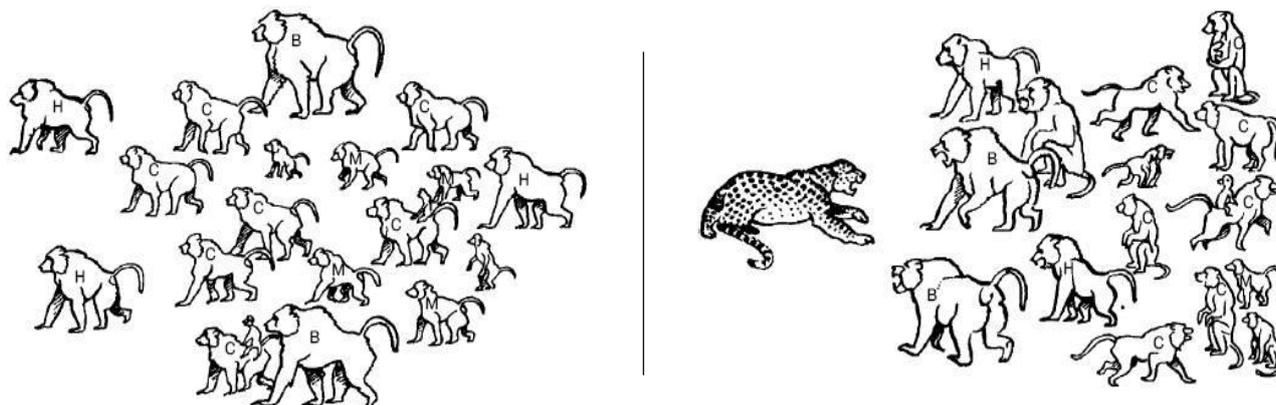


Рис. 10. Расположение животных в стаде павианов

В случае опасности самки с молодняком отходят назад, пропуская вперед самцов. Вожак занимает передовые позиции как самый сильный представитель. За ними следуют остальные самцы.

Таким образом, некоторым животным характерна определенная иерархия, влияющая на положение внутри стада (рис. 11).

В качестве упрощенной классической схемы представим модель следования за вожаком. В данном случае вожак выступает в роли основного координатора стаи и является целью. Остальные члены стада стремятся в область, находящуюся позади вожака (область преследования). Животные, оказавшиеся на пути вожака, стремятся уйти в сторону и присоединиться к следованию.

Таким образом, животные, находящиеся вблизи вожака, будут стремиться занять положение позади него. Кроме того, будет использован модифицированный метод отделения от стада (в качестве фактора, не позволяющего сталкиваться животным). Остальные животные, замечая движение большой группы (возможно даже не наблюдая вожака) будут присоединяться к общей группе и поддерживать движение.

В зависимости от конкретного типа животных данный метод при необходимости должен быть соответствующим образом модифицирован. Так, напри-

мер, могут быть изменены количество вожаков, целевая точка для животных, дистанция, скорость и т. д. [21].

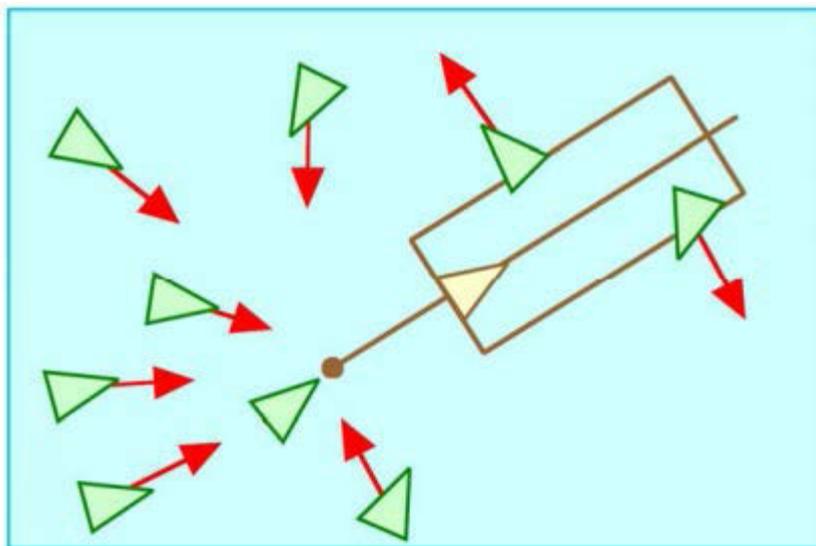


Рис. 11. Следование за вожаком

### 3. РЕАЛИЗАЦИЯ

#### *Использование модульного подхода*

Для того чтобы контроллер поведения был универсальными и легко масштабируемым, был применен модульный подход к реализации. При этом использовалась древовидная иерархия.

В качестве примера рассмотрим контроллер реалистичного поведения, адаптированный под коров. Животное в данном случае выступает в качестве вершины дерева. Следующий уровень – сценарий. В качестве упрощенного примера возьмем два следующих сценария: движение стада на пастбище (с пастбища) и сам процесс нахождения на пастбище. Следующий уровень отвечает за действия агентов для конкретного сценария, то есть что именно будет делать животное. Для сценария движения на пастбище предложены следующие действия: движение в стаде, остановка, отделение от стада (с небольшой вероятностью). Когда животные находятся на пастбище, применимы следующие действия: остановка (как пример – остановка для поедания травы), блуждание, корректировка расстояния до других животных, отделение от стада (с небольшой вероятностью). Далее следует самый последний уровень – методы моделирова-

ния действия. На этом уровне реализуется само действие при помощи комбинации описанных выше методов.

Благодаря такой иерархии и модульному подходу, в случае появления необходимости реализации нового действия мы просто добавляем требуемые модули и реализуем их при помощи методов.

### **Структура агента**

В качестве агента используется заготовка персонажа, prefab (сборная часть). Агенты могут быть расположены на сцене как вручную, так и в автоматическом режиме на уровне генерации при запуске приложения. Вторым методом является более предпочтительным, поскольку можно гибко настраивать область генерации животных и их количество.

Агент имеет структуру, схожую с реальным миром, но в некоторой степени упрощенную. На рисунке 12 изображена схема агента.

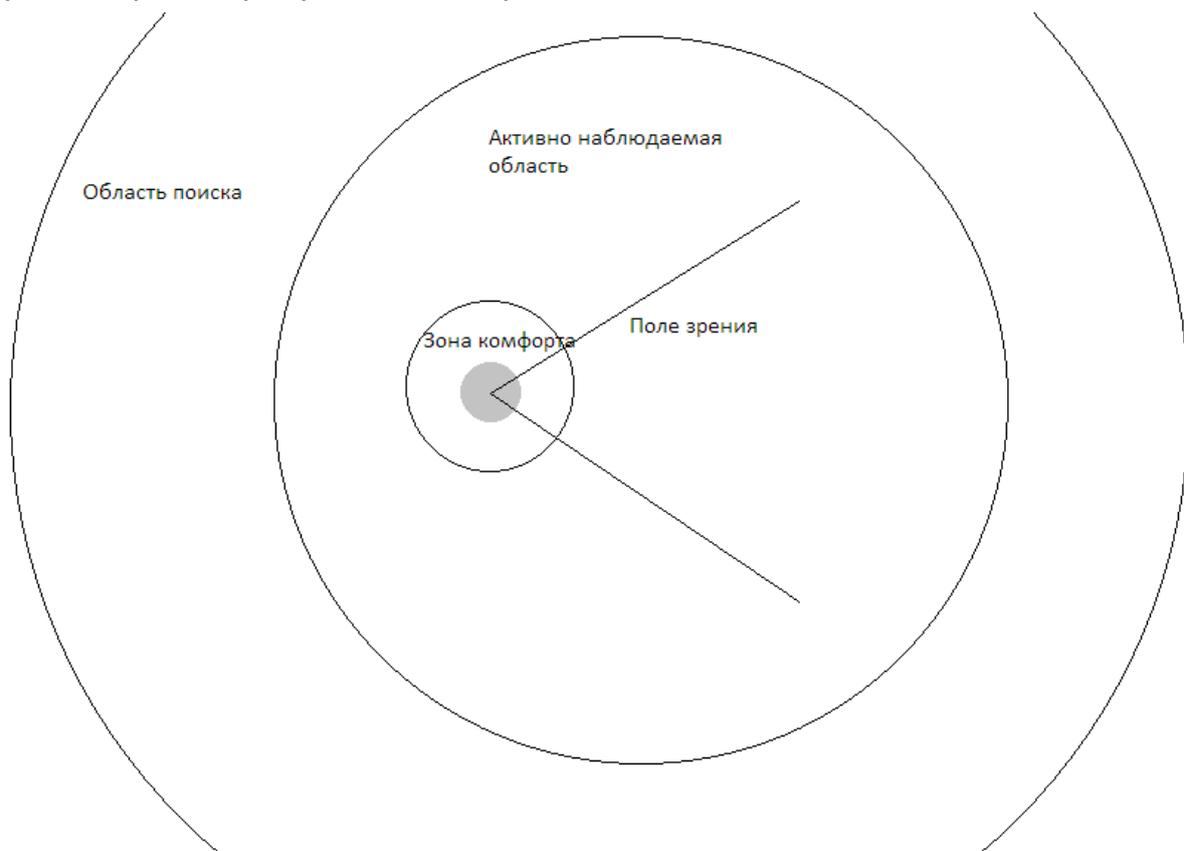


Рис. 12. Структурная схема агента

Зона комфорта является личной зоной агента, и без веской на то причины в реальном мире он старается не подпускать в нее других [22]. В случае опасности или чрезвычайной ситуации это правило может нарушаться, однако, как и

прежде, агент старается этого избежать, и в связи с этим могут возникать коллизии и столкновения (давка) [23].

Поле зрения – это область, наблюдаемая агентом в текущий момент времени. В зависимости от типа животного угол зрения может меняться. У некоторых птиц угол зрения достигает 360 градусов (например, 340 градусов – у голубя) (рис. 13).

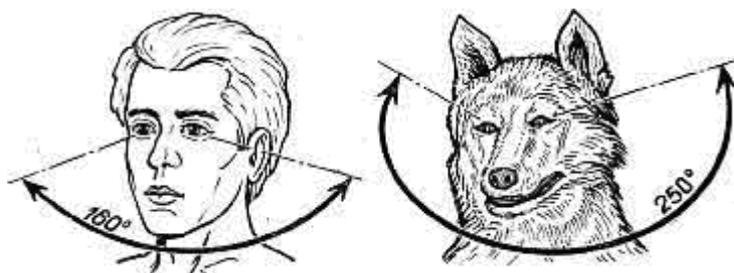


Рис. 13. Сравнение угла зрения человека и волка

Активно наблюдаемая область – это область агента, за которой он активно следит. При этом, в отличие от поля зрения, которое наблюдается в каждый момент времени, данная область обновляется с некоторой периодичностью. Агенты, находясь в данной области, оказывают активное воздействие друг на друга за счет стадных инстинктов. Данная область имеет небольшое смещение в сторону поля зрения (кроме тех случаев, когда поле зрения круговое или близко к нему).

В том случае, если агент в ходе блуждания отдалился от стада, он обращается к следующей по размеру зоне – области поиска. Обнаружив в этой области других животных, агент воспользуется методом поддержания группового состояния (вычислит усредненное значение целевой точки и отправится в нее). Таким образом стадо, как и в реальной жизни, будет сохранять свою целостность. Кроме того, в некоторых случаях животные будут отбиваться от стада (с небольшой вероятностью). Так, например, если животное отошло достаточно далеко, а за время следующего обращения к зоне поиска все животные покинули его.

### **Область навигации**

Игровой движок Unreal Engine 4 поддерживает функцию автоматической постройки карты навигации персонажей. Для этого используется служебный объект «Nav Mesh Bounds Volume». Чтобы построить карту навигации, мы перемещаем данный объект на рабочую область и устанавливаем размеры в соответствии с предполагаемой игровой областью, после чего осуществляем по-

стройку карты. После постройки карты навигации ее можно настроить при помощи служебного объекта «Recast Nav Mesh» (рис. 14).

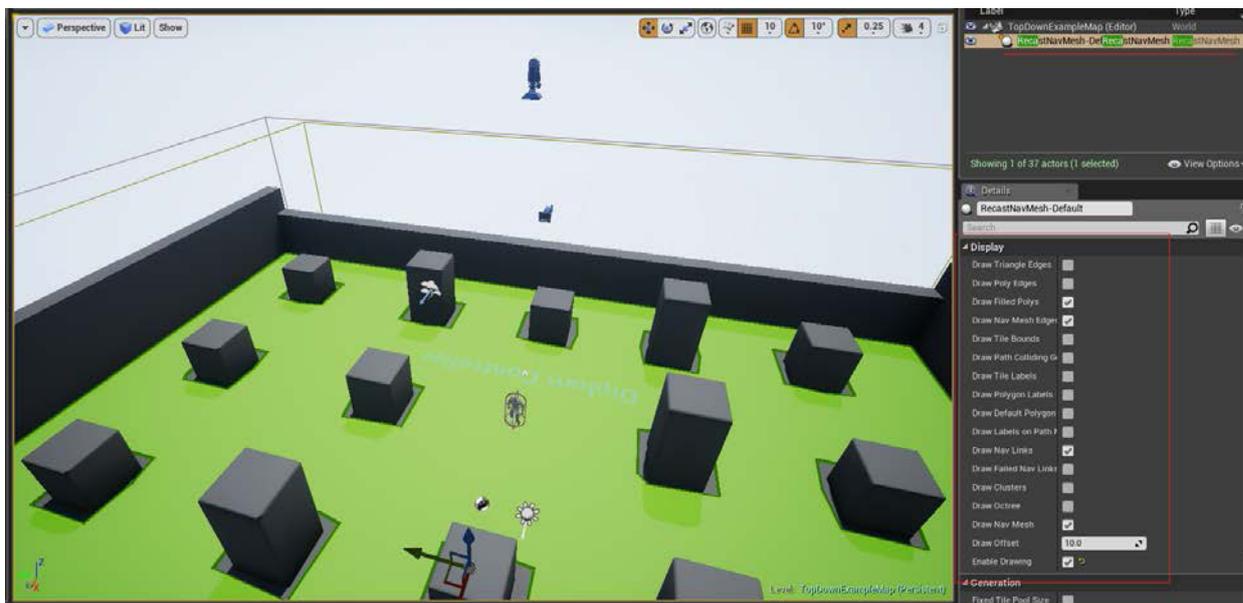


Рис. 14. Построенная карта навигации

Благодаря использованию карт навигации отпадает необходимость обучать персонажей избегать непроходимые области. Кроме того, присутствует возможность динамически обновлять карту навигации.

### **Реализация агента**

Агент реализуется в качестве дочернего объекта для служебного класса Character. После создания блюпринта для персонажа (Agent) нужно его соответствующим образом настроить.

Поскольку дизайнерская часть не входит в рамки данной работы, для контроллера будут применены стандартная модель персонажа и соответствующая анимация. При дальнейшей реализации и проведении экспериментов такое решение не окажет никакого влияния на результаты (поскольку модель персонажа и анимация не влияют на скрипты).

Следующим этапом является настройка параметров агента. В зависимости от объекта, поведение которого мы моделируем, параметры могут кардинально меняться (скорость, поле зрения, реакция и т. д.). Исходя из этого, на данном этапе будут внесены первоначальные изменения для запуска агента, а сами параметры будут задаваться в дальнейшем при генерации самих агентов при помощи класса GameMode, описанного ниже. Также на данном этапе необходимо

выбрать контроллер, который будет реализовывать поведение агента. Для этого был создан класс *AgentController*, унаследованный от класса *AiController*.

На данном этапе реализуется описанная ранее структура агента. Для этого к заготовке агента добавляются коллайдеры (*Collision*), которые будут отслеживать находящиеся в них агентов.

Структура создания подразумевает следующий подход: класс, отвечающий за логику игры (*GameController*), генерирует в соответствующей области (*SpawnArea*) агентов (*Agent*). При этом параметры агентов подбираются случайным образом в определенном промежутке. Благодаря этому агенты обладают некоторыми отличиями. Далее вступает в дело непосредственно контроллер (*AgentController*) (рис. 15).

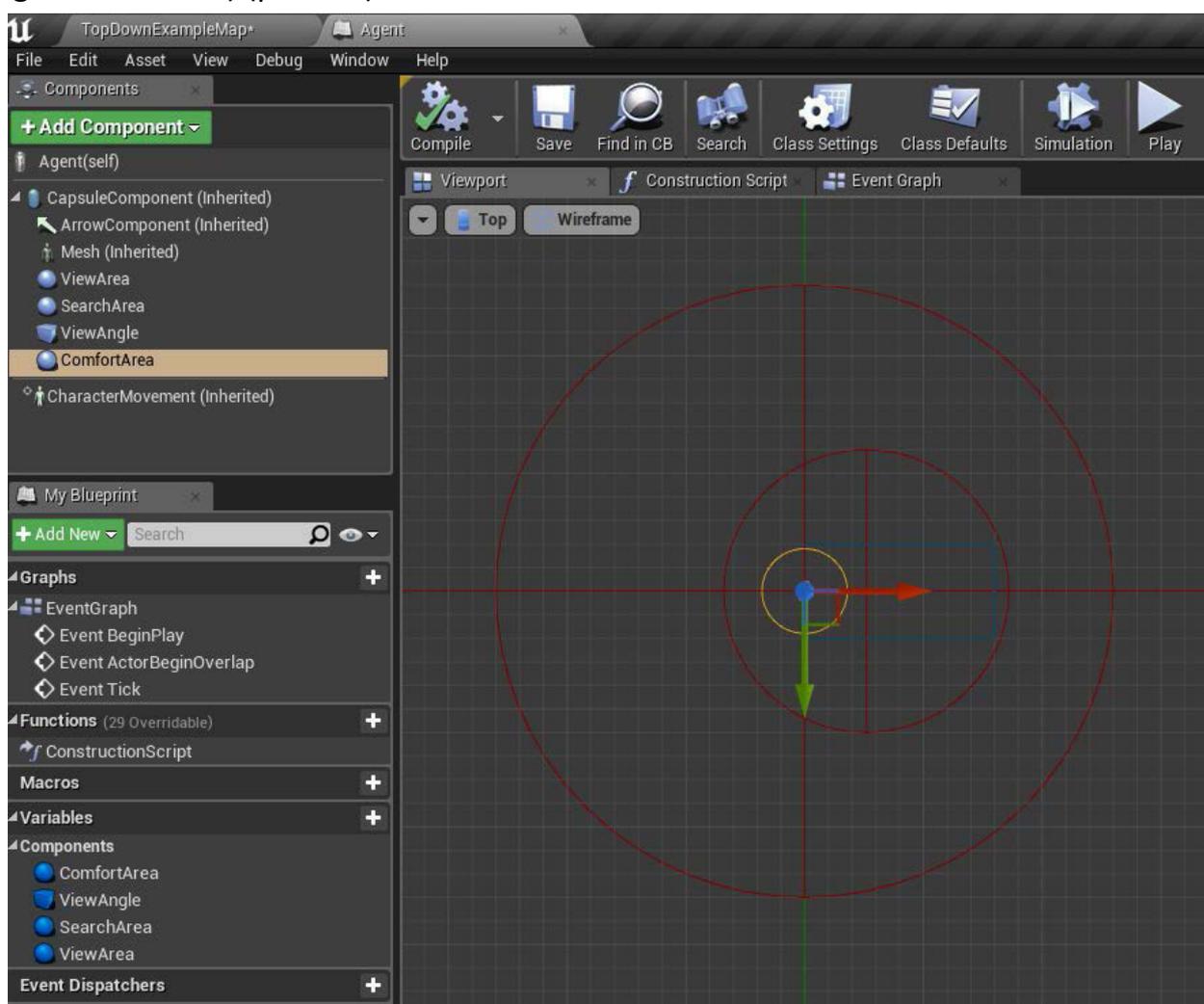


Рис. 15. Игровая структура агента (вид сверху)

### **Сценарий и дерево поведения**

Для хранения ключевой информации, используемой контроллером для принятия того или иного решения, используется класс AgentBlackboard.

Информация анализируется агентом, принимается решение, какое действие должно быть выполнено, затем данная информация передается в ключи класса AgentBlackboard. После обновления ключа вызывается один из методов алгоритма, рассмотренных ранее, о в соответствии со структурой дерева поведения ActionTree. Методы алгоритма также обращаются к классу AgentBlackboard, тем самым завершая выполнение одного метода и переход к другому. Общая структура рассмотрена на рисунке 16.

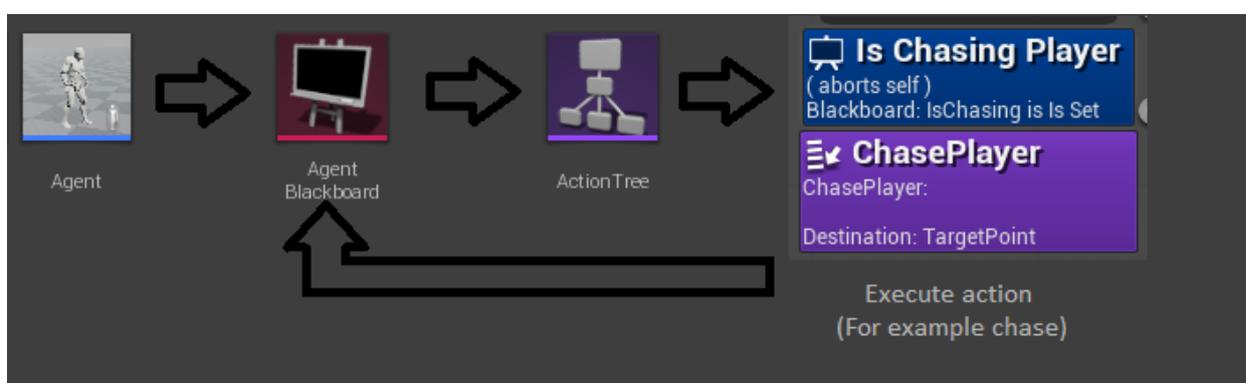


Рис. 16. Структура вызова методов алгоритма

Игровой контроллер агента (AgentController) в данной реализации отвечает за обращение к дереву поведения (ActionTree) и блекборду (Agent Blackboard).

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

##### *Реакция агентов на отдаление*

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда один из агентов начнет отдаляться от общей группы. На данном примере мы управляем агентом с зеленой стрелкой, окружности представляют собой отслеживаемую область, красные стрелки – направления агентов (рис. 17). Для получения более выраженного эффекта было решено использовать небольшое количество агентов (так как, согласно методу, вычисляется усредненная позиция).

Когда мы начинаем отдаляться от других агентов, усредненные позиции смещаются, и в определенный момент агенты начинают корректировать свой курс, тем самым поддерживая связь (рис. 18).

Если продолжить движение в сторону, агенты будут повторять корректировку и изменять курс. Однако если удаляться достаточно быстро, корректировка не будет успевать за движением, и агент может покинуть отслеживаемую область и переместиться в область поиска.

Если вместо этого остановиться, агенты высчитают новые усредненные положения и, приблизившись к ним, перейдут к другому действию (в данном примере – к блужданию) (рис. 19).

Поскольку для более выраженной реакции мы используем всего 4 агента, они достаточно быстро распределяются. Когда агент достаточно сильно отдалится от других, он обратится к области поиска и вернется ближе к группе.

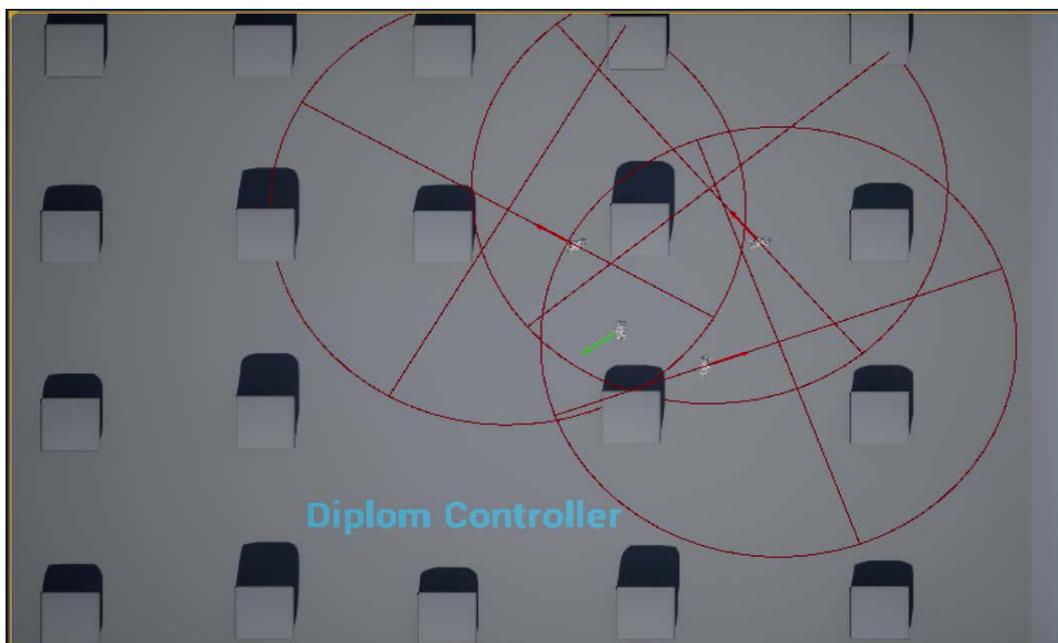


Рис. 17. Эксперимент на отдаление, начальная ситуация

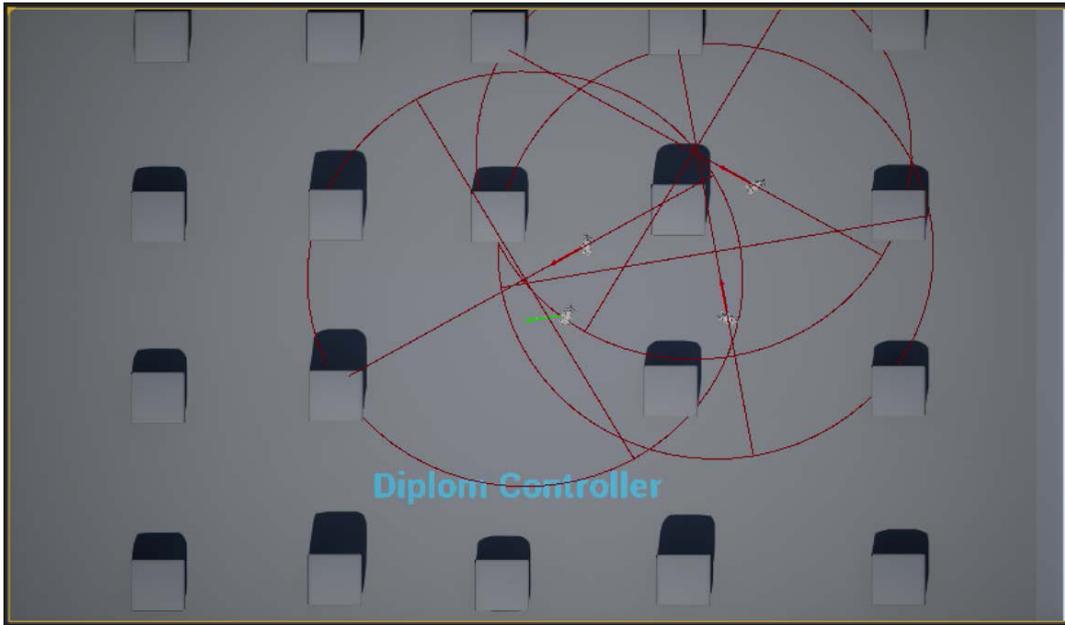


Рис. 18. Эксперимент на отдаление, корректировка

При использовании групп большего размера структура сохраняется лучше, поскольку в области действия находится больше агентов (по этой же причине корректировка происходит незначительно). В больших группах данный метод имеет место на окраинах, не давая расходиться агентам далеко.

После остановки нашего агента остальные персонажи скорректировали курс, однако из-за препятствий они пошли в обход. После сближения агенты вновь перейдут на блуждание.

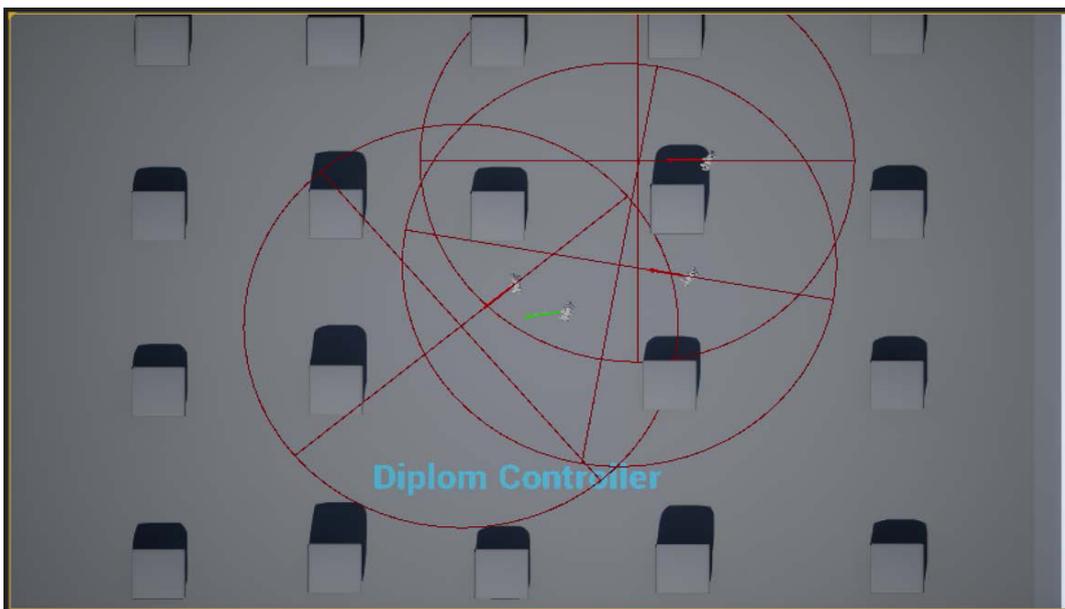


Рис. 19. Эксперимент на отдаление, переход агентов на блуждание

Крайне левый агент, благодаря отсутствию препятствий, после корректировки почти сразу оказался рядом и продолжил движение. В связи с этим он стал отдаляться от других агентов. Через некоторое время он вновь скорректирует свой курс по наблюдаемой области либо по области поиска (если успеет отдалиться достаточно далеко).

Данный эксперимент подтверждает правильность реакции агентов на ситуацию и качественную реализацию метода корректировки. Реакция агентов сравнивалась с описанием поведения по работам [24].

### ***Реакция агентов на попадание в зону комфорта***

Рассмотрим ситуацию, когда агент попадает в зону комфорта другого агента (может произойти как взаимная коллизия, так и нет, поскольку при генерации агентов зона комфорта также варьируется). В данном случае агент вычисляет вектор корректировки, направленный в противоположную от коллизии сторону, и объединяет с текущим вектором движения. Таким образом происходят корректировка курса и отдаление от коллизии. В программной реализации это выглядит аналогичным образом (рис. 20).

Управляемый агент изначально стоит неподвижно, и в тот момент, когда рядом проходит агент, наш персонаж пересекает зону комфорта. В ответ на попадание другого агента в коллайдер зоны комфорта вызывается действие и происходит корректировка согласно описанному ранее методу. Агент корректирует курс и начинает движение в соответствии с полученным направлением. Через некоторое время осуществляется повторная проверка, и, если все хорошо, агент переходит к другому действию (рис. 21).

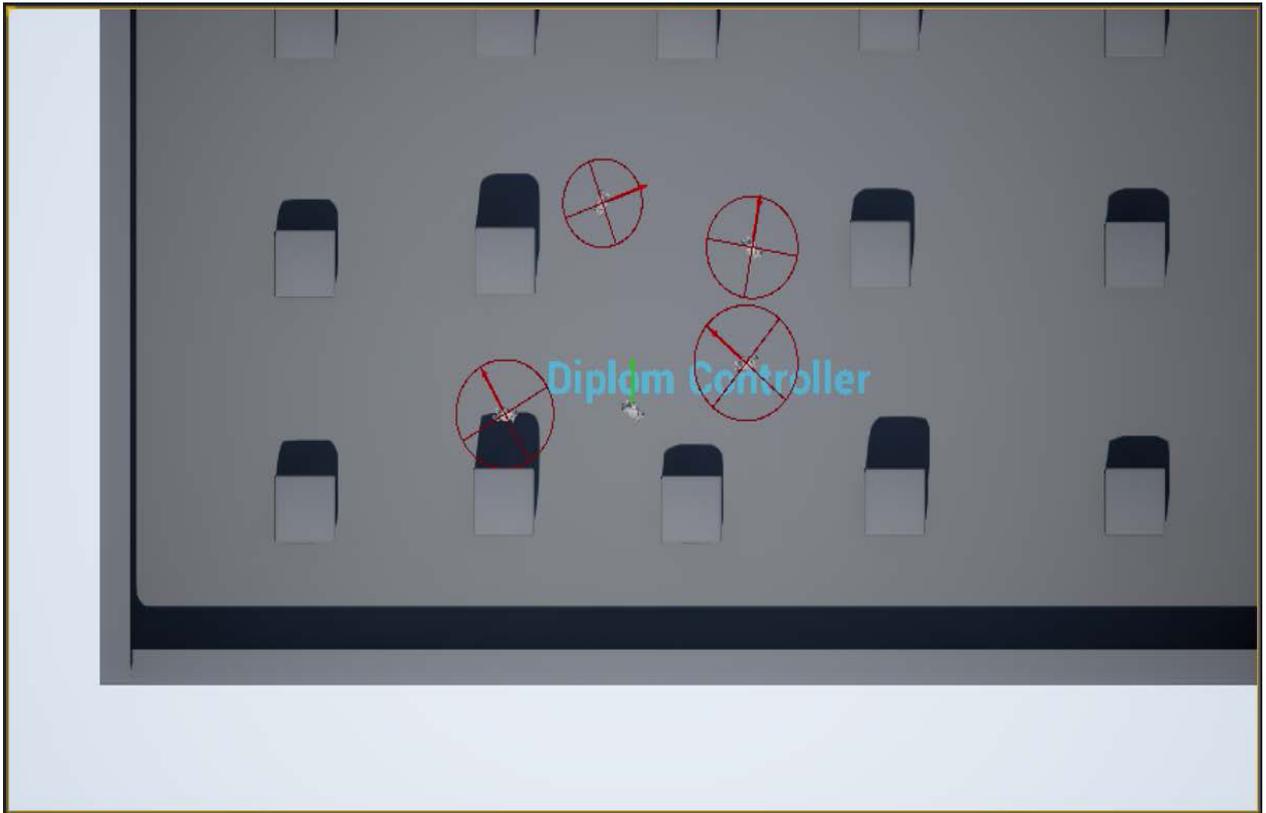


Рис. 20. Эксперимент с зоной комфорта, начальная ситуация

На рисунке 22 изображен процесс корректировки, агент изменяет направление в ответ на попадание в зону комфорта.



Рис. 21. Эксперимент с зоной комфорта, коллизия

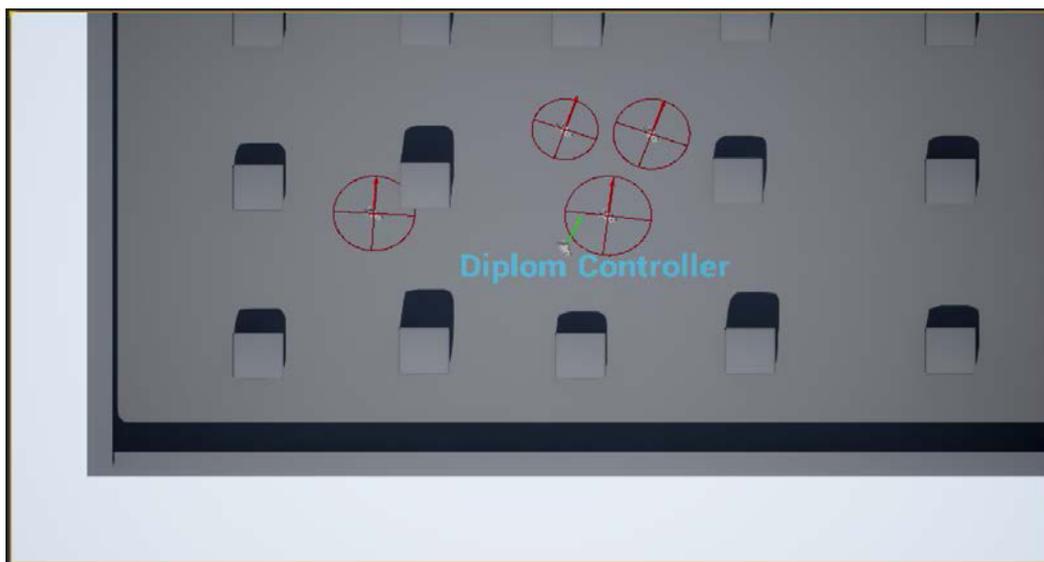


Рис. 22. Эксперимент с зоной комфорта, корректировка

Данный эксперимент также подтвердил правильность реакции на попадание объекта в зону комфорта [24].

### ***Эксперимент на избежание столкновений***

Смоделируем ситуацию, когда пути двух агентов будут пересекаться. В ответ на это контроллер, проведя анализ направления, скорректирует курс агента. Спустя небольшой промежуток времени  $T$  (используется для изменения направления) будет проведен повторный анализ, и в случае необходимости курс будет повторно корректироваться. Если после нескольких неудачных корректировок агенты окажутся на расстоянии, меньшем, чем агент пройдет за это время  $T$ , то он остановится во избежание столкновения, после чего агент обратится к методу, который используется при попадании в зону комфорта. Поскольку в этот момент времени агент неподвижен, он сразу развернется в противоположную сторону.

На рисунке 23 изображена начальная ситуация: агент, которым мы управляем, изменил направление движения таким образом, что его путь по прогнозу пересекается с другим агентом. В ответ на это искомый агент изменяет свое направление. Для эксперимента мы будем специально ускорять нашего агента таким образом, чтобы он вновь шел пересекающимся курсом.

После корректировки курса агент изменил направление и продолжил движение вниз карты (рис. 24). Если в данный момент повторно изменить

направление нашего агента, наблюдаемый агент не успеет сманеврировать, остановится и развернется (рис. 25).

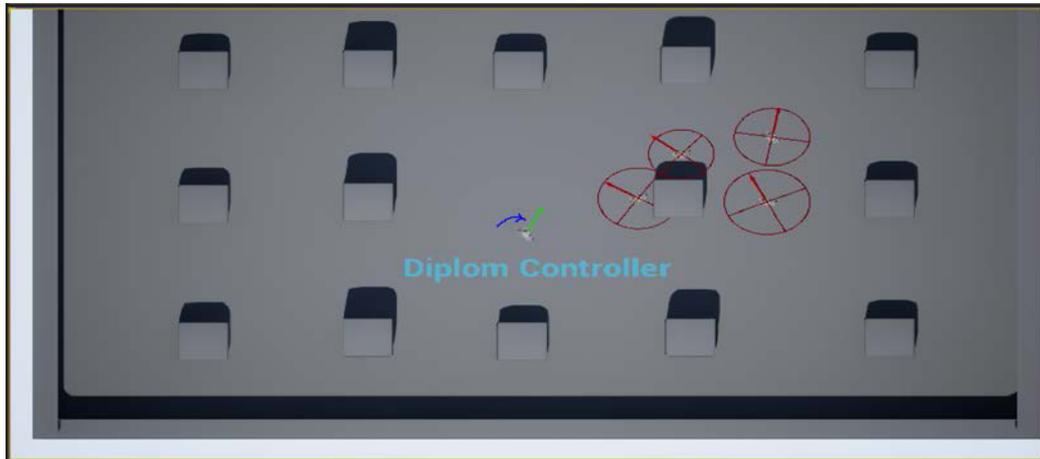


Рис. 23. Эксперимент на избежание столкновений, начальная ситуация

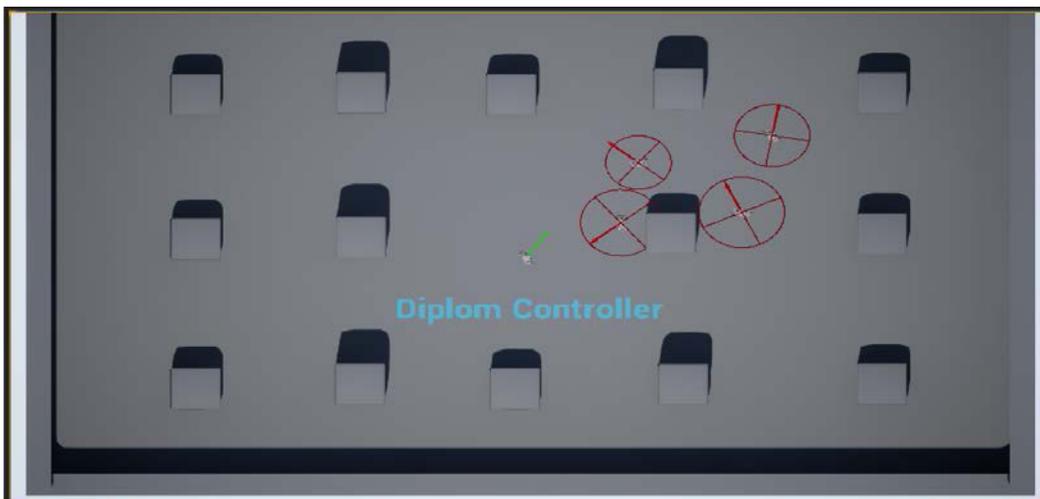


Рис. 24. Эксперимент на избежание столкновений, после корректировки

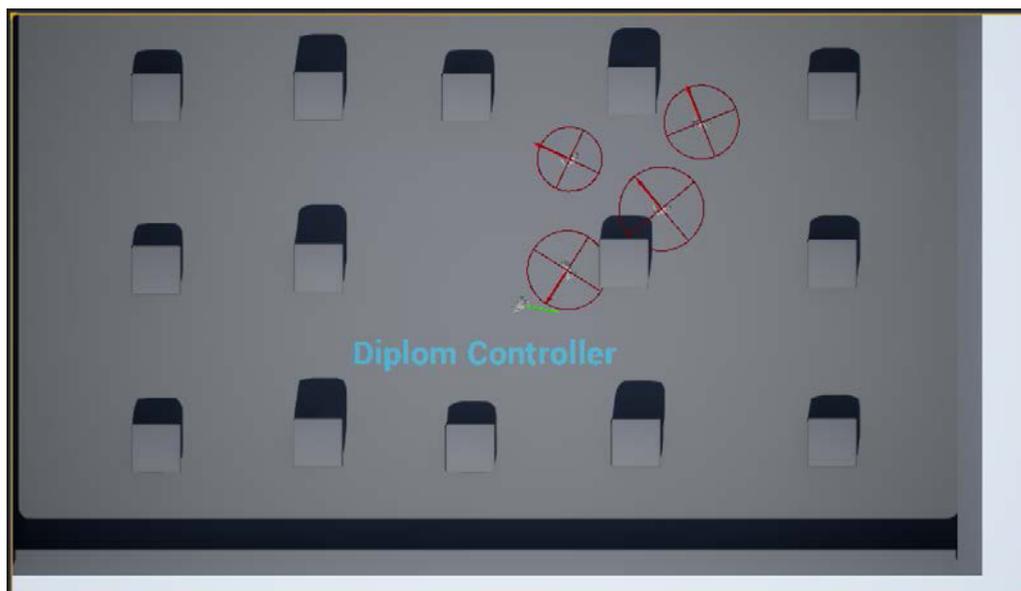


Рис. 25. Эксперимент на избежание столкновений, агент вынужден остановиться и развернуться

### **Сравнение с другими реализациями поведения толпы**

Помимо описанных выше экспериментов был проведён сравнительный анализ полученного контроллера с другими методами реализации, предложенными в рамках следующих научных работ:

- Апробация различных методов поведения толпы Р.В. Гребенникова; при проведении анализа было выявлено, что предложенный метод во многих случаях демонстрирует схожее поведение как для толпы, так и для группы [24].
- Метод Р.В. Гребенникова имитационного моделирования групповой динамики толпы. Данная работа был представлена на международном научном форуме Ломоносов 2010 и зарекомендовала себя как эффективная система моделирования и оценки групповой динамики [25]. При сравнении с динамикой стада, полученной в результате работы контроллера, мы пришли к выводу, что предложенная модель частично схожа с методом Гребенникова. Отличия связаны в первую очередь с тем, что в предложенном контроллере поведения стада используется меньшее количество отслеживаемых параметров (данное решение позволяет моделировать большие группы объектов, не прибегая к большим вычислительным ресурсам).
- Обзор и анализ существующих математических моделей поведения толпы с точки зрения социальной психологии [26, 27], проведена оценка эффективности предложенного контроллера с рассматриваемыми моделями. При сравне-

нии с определенными методами возникали некоторые отличия, связанные с разными подходами как социальной психологии. Однако в общем и целом методы показали реалистичное поведение, хотя и обладали некоторыми отличиями.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Были проведены исследования в области поведения животных, выявлены основополагающие факторы, влияющие на формирование и поддержание групп животных, проведена декомпозиция поведения до базовых методов и указаны способы комбинации этих методов для достижения реалистичных результатов.

В качестве платформы реализации применен игровой движок Unreal Engine 4 в связке с BlueprintVS. Полученный в результате контроллер реалистичного поведения обладает большой практической значимостью и может быть применен во множестве областей: моделирование групп динамических объектов для кинематографа, моделирование поведения толпы в экстренных ситуациях, моделирование объектов как части транспортно-логистической системы, моделирование поведения животных для лесной промышленности или при пожарах [28] и наводнениях [29], моделирование безопасных мест массового пользования, создание реалистичной симуляции поведения домашних животных в виртуальных исторических реконструкциях, например [30], или при разработке компьютерных игр.

В дальнейшем данный контроллер может быть дополнен методами, реализующими поведение животных в частных случаях. Кроме того, можно спроектировать несколько контроллеров с разными уровнями проработки этих случаев и предоставить несколько готовых решений в данной области.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Богомолова Е.М., Курочкин Ю.Л., Минаев А.Н. Системная организация брачного поведения лосей // 111 съезд Всесоюз. териол. об-ва: Тез. докл. М.: Наука, 1982. Т. 2, С. 115–116.
2. Zhao D.L., Yang L.Z., Li J. Exit Dynamics of Occupant Evacuation in Anemergency// Physica A 363. 2006. P. 501–512.

3. Якушкин Г.Д., Мичурин Л.Н., Павлов Б.М., Зырянов В.А. Численность и миграции диких северных оленей на Таймыре // Труды IX Межд. конгресса биологов-охотоведов, 1970. С. 335–338.
4. Estes R. Behavioural Study of East African Ungulates. 1963–1965 // Nat. Geol. Soc. Res. Repts, Projects. 1969. P. 45–47; Estes R.D. Social Organization of the African Bovids // IUCN Publ. 1974, V. 1, No 24. P. 165–205.
5. Smith R.A. Engineering for Crowd Safety. Amsterdam: Elsevier, 1993. 442 p.
6. Sullivan T.J. The “Critical Mass” in Crowd Behavior: Crowd Size, Contagion and the Evolution of Riots // Humboldt J. of Social Relations. 1977. V. 4, No 2. P. 46–59.
7. Breder Jr. C.M., Halpern F. Innate and Acquired Behavior Affecting the Aggregation of Fishes // Physiological Zoology. 1946. V. 19, No 2. P. 154–190.
8. Павлов Д.С., Касумян А.О. Стайное поведение рыб. М.: Московский университет, 2003. 74 с.
9. Баскин Л.М., Бальчаускас Л., Жесткова И.А. Пространственная структура стада коров // Докл. ВАСХНИЛ, 1989. Вып. 3. С. 36–38.
10. Капица С. Модель роста населения земли и экономического развития человечества // Вопросы экономики. 2000. №12.
11. Копылов В.А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации. Дисс. канд. техн. наук. М., 1974.
12. Reynolds C.W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model// Computer Graphics. 1987. V. 21, No 4. P. 25–34 (ACM SIGGRAPH'87 Conf. Proc., Anaheim, California, July 1987).
13. Reynolds C.W. Not Bumping Into Things// The Notes for the SIGGRAPH 88 Course Developments in Physically-Based Modeling, P. G1–G13, published by ACM SIGGRAPH.
14. Isaacs Rufus. Differential Games: A Mathematical Theory with Application to Warfare and Pursuit// Control and Optimization, John Wiley and Sons, New York.
15. Isaacs Rufus. Differential Games: A Mathematical Theory with Application to Warfare and Pursuit// Control and Optimization, John Wiley and Sons, New York.
16. Cliff Dave, Miller Geoffrey. Co-Evolution of Pursuit and Evasion II: Simulation Methods and Results, from Animals to Animats 4// Proc. of the Fourth Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior (SAB96), Maes, Mataric, Meyer, Pollack, and Wilson editors, ISBN 0-262-63178-4, MIT Press.

17. *Алексеев П.Г.* Разработка модели поведения персонажей // Квалификационная работа бакалавра, 2011. С. 23–28.

18. *Гребенников Р.В.* Модель поведения толпы на основе локальных потенциальных полей // Вестник Воронежского гос. ун-та. Системный анализ и информационные технологии. 2009. Т. 1. С. 46–50.

19. *Гребенников Р.В.* Модель поведения толпы на основе локального планирования пути // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2009. Т. 5, Часть 9. С. 77–81.

20. *Дерягина М.А.* Манипуляционная активность приматов. М.: Изд-во «Наука», 1986. 110 с.

21. *Хайнд Р.* Поведение животных. М.: Изд-во «Мир», 1975. С. 245–286.

22. *Аптуков А.М., Брацун Д.А.* Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика, 2009. №3. С. 18–23.

23. *Богданов К.Ю.* Динамика паникующей толпы // Квант, 2005. №5. С. 2–7.

24. *Гребенников Р.В., Тюкачев Н.А.* Апробация различных методов поведения толпы // Сборник работ участников конференции «ИТ-2010». Н. Новгород, 2010. С. 10–12.

25. *Гребенников Р.В.* Метод имитационного моделирования групповой динамики толпы // Материалы Межд. молодежного науч. форума «ЛОМОНОСОВ-2010», Вычислительная математика и кибернетика. М.: МГУ, 2010. С. 47–48.

26. *Гребенников Р.В.* Обзор и анализ существующих математических моделей поведения толпы с точки зрения социальной психологии // Сб. работ участников конференции «Гибридный Интеллект 2010». Воронеж: МИКТ, 2010. С. 13–19.

27. *Гребенников Р.В.* Обзор классических методов моделирования поведения толпы // Межвузовский сб. науч. трудов. Серия: Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. Воронеж: ВГТУ, 2010. С. 50–53.

28. *Гиниятов А.А., Кугуракова В.В., Якушев Р.С.* Разработка симуляционного приложения для моделирования лесных пожаров с учётом погодных условий и формы ландшафта // Электронные библиотеки. 2016. Т. 19, №3. С. 180–192.

29. *Римова Л.З., Кугуракова В.В., Якушев Р.С.* Разработка симуляционного приложения для моделирования разрушений от наводнений с многофакторным учётом // Электронные библиотеки. 2016. Т. 19, №3. С. 238–250.

30. Хафизов А.Р., Баранов В.С., Сергеев А.С., Кузураква В.В., Ситдинов А.Г. Археологические объекты болгарского городища X–XV вв., как материал для создания виртуальной культурно-исторической реконструкции// Электронные библиотеки. 2015. Т. 18, №5. С. 269–282.

---

## **CONTROLLER OF REALISTIC BEHAVIOR STAY AND STAGE OF ANIMALS**

**V.V. Kugurakova<sup>1</sup>, A.M. Stepanov<sup>2</sup>**

<sup>1-2</sup>*Higher School ITIS. Kazan Federal University*

<sup>1</sup>vlada.kugurakova@gmail.com, <sup>2</sup>stepanovaleksandrm@gmail.com

### **Abstract**

The work is aimed at considering the process of modeling a realistic controller of the behavior of groups of objects. The main techniques and principles used to create a realistic controller of the behavior of autonomous agents, united in related groups, are investigated. Based on this data, a behavior controller has been created.

The following works were performed: on the calculation of the effectiveness of the behavior of groups of autonomous agents; on the possibility of using a system of local scalar fields with the aim of constructing the most accurate mathematical model; on the analysis of the possibility of creating a hierarchical system of multi-agent subgroups within the group, with the aim of realizing the movement of these same groups, as an integral part; to use a structured approach to create an efficient controller architecture; on conducting practical experiments to evaluate the correctness of the data obtained.

To achieve the goals set, the computational methods of optimization theory, mathematical statistics, and analytical methods of the mathematical modeling apparatus are involved.

**Keywords:** *controller, group, behavior model.*

### **REFERENCES**

1. Bogomolova E.M., Kurochkin YU.L., Minaev A.N. Sistemnaya organizaciya brachnogo povedeniya losej // 111 s"ezd Vsesoyuz. teriol. ob-va: Tez. dokl. M.: Nauka, 1982. Т. 2, S. 115–116.

2. *Zhao D.L., Yang L.Z., Li J.* Exit Dynamics of Occupant Evacuation in Anemergency// *Physica A* 363. 2006. P. 501–512.
3. *Yakushkin G.D., Michurin L.N., Pavlov B.M., Zyryanov V.A.* CHislennost' i migracii dikih severnyh olenej na Tajmyre // *Trudy IX Mezhd. kongressa bio-logovohotovedov*, 1970. S. 335–338.
4. *Estes R.* Behavioural Study of East African Ungulates. 1963–1965 // *Nat. Geol. Soc. Res. Repts, Projects*. 1969. P. 45–47; *Estes R.D.* Social Organization of the African Bovids // *IUCN Publ.* 1974, V. 1, No 24. P. 165–205.
5. *Smith R.A.* Engineering for Crowd Safety. Amsterdam: Elsevier, 1993. 442 p.
6. *Sullivan T.J.* The “Critical Mass” in Crowd Behavior: Crowd Size, Contagion and the Evolution of Riots // *Humboldt J. of Social Relations*. 1977. V. 4, No 2. P. 46–59.
7. *Breder Jr. C.M., Halpern F.* Innate and Acquired Behavior Affecting the Aggregation of Fishes // *Physiological Zoology*. 1946. V. 19, No 2. P. 154–190.
8. *Pavlov D.S., Kasumyan A.O.* Stajnoe povedenie ryb. M.: Moskovskij universitet, 2003. 74 s.
9. *Baskin L.M., Bal'chauskas L., Zhestkova I.A.* Prostranstvennaya struktura stada korov // *Dokl. VASKHNIL*, 1989. Vyp. 3. S. 36–38.
10. *Kapica S.* Model' rosta naseleniya zemli i ehkonomicheskogo razvitiya chelovechestva // *Voprosy ehkonomiki*. 2000. №12.
11. *Kopylov V.A.* Issledovanie parametrov dvizheniya lyudej pri vynuzhdennoj ehvakuacii. Diss. kand. tekhn. nauk. M., 1974.
12. *Reynolds C.W.* Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model// *Computer Graphics*. 1987. V. 21, No 4. P. 25–34 (ACM SIGGRAPH'87 Conf. Proc., Anaheim, California, July 1987).
13. *Reynolds C.W.* Not Bumping Into Things// *The Notes for the SIGGRAPH 88 Course Developments in Physically-Based Modeling*, P. G1–G13, published by ACM SIGGRAPH.
14. *Isaacs Rufus.* Differential Games: A Mathematical Theory with Application to Warfare and Pursuit// *Control and Optimization*, John Wiley and Sons, New York.
15. *Isaacs Rufus.* Differential Games: A Mathematical Theory with Application to Warfare and Pursuit// *Control and Optimization*, John Wiley and Sons, New York.
16. *Cliff Dave, Miller Geoffrey.* Co-Evolution of Pursuit and Evasion II: Simulation Methods and Results, from Animals to Animats 4// *Proc. of the Fourth Int. Conf.*

on Simulation of Adaptive Behavior (SAB96), Maes, Mataric, Meyer, Pollack, and Wilson editors, ISBN 0-262-63178-4, MIT Press.

17. *Alekseev P.G.* Razrabotka modeli povedeniya personazhej // Kvalifikacionnaya rabota bakalavra, 2011. S. 23–28.

18. *Grebennikov R.V.* Model' povedeniya tolpy na osnove lokal'nyh potencial'nyh polej // Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii. 2009. T. 1. S. 46–50.

19. *Grebennikov R.V.* Model' povedeniya tolpy na osnove lokal'nogo planirovaniya puti // Vestnik Voronezhskogo gos. tekhn. un-ta. 2009. T. 5, Chast' 9. S. 77–81.

20. *Deryagina M.A.* Manipulyacionnaya aktivnost' primatov. M.: Izd-vo «Nauka», 1986. 110 s.

21. *Hajnd R.* Povedenie zhivotnyh. M.: Izd-vo «Mir», 1975. S. 245–286.

22. *Aptukov A.M., Bracun D.A.* Modelirovanie gruppovoj dinamiki tolpy, panikuyushchej v ogranichenom prostranstve// Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika, 2009. №3. S. 18–23.

23. *Bogdanov K.Yu.* Dinamika panikuyushchej tolpy // Kvant, 2005. №5. S. 2–7.

24. *Grebennikov R.V., Tyukachev N.A.* Aprobaciya razlichnyh metodov povedeniya tolpy// Sbornik rabot uchastnikov konferencii «IT-2010». N. Novgorod, 2010. S. 10–12.

25. *Grebennikov R.V.* Metod imitacionnogo modelirovaniya gruppovoj dinamiki tolpy // Materialy Mezhd. molodezhnogo nauch. foruma «LOMONOSOV-2010», Vychislitel'naya matematika i kibernetika. M.: MGU, 2010. S. 47–48.

26. *Grebennikov R.V.* Obzor i analiz sushchestvuyushchih matematicheskikh modelej povedeniya tolpy s tochki zreniya social'noj psihologii // Sb. rabot uchastnikov konferencii «Gibridnyj Intellect 2010». Voronezh: MIKT, 2010. S. 13–19.

27. *Grebennikov R.V.* Obzor klassicheskikh metodov modelirovaniya povedeniya tolpy // Mezhvuzovskij sb. nauch. trudov. Seriya: Optimizaciya i modelirovanie v avtomatizirovannyh sistemah. Voronezh: VGTU, 2010. S. 50–53.

28. *Giniyatov A.A., Kugurakova V.V., Yakushev R.S.* Razrabotka simulyacionnogo prilozheniya dlya modelirovaniya lesnyh pozharov s uchyotom pogodnyh uslovij i formy landshafta // Elektronnye biblioteki. 2016. T. 19, №3. S. 180–192.

29. Rimova L.Z., Kugurakova V.V., Yakushev R.S. Razrabotka simulyacionnogo prilozheniya dlya modelirovaniya razrushenij ot navodnenij s mnogofaktornym uchyotom // Elektronnye biblioteki. 2016. T. 19, №3. С. 238–250.

30. Hafizov A.R., Baranov V.S., Sergeev A.S., Kugurakova V.V., Sitdikov A.G. Arheologicheskie ob"ekty bolgarskogo gorodishcha X–XV vv., kak material dlya sozdaniya virtual'noj kul'turno-istoricheskoy rekonstrukcii// Elektronnye biblioteki. 2015. T. 18, №5. S. 269–282.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**КУГУРАКОВА Влада Владимировна** – старший преподаватель Высшей школы информационных технологий и информационных систем, руководитель лаборатории «Виртуальные и симуляционные технологии в биомедицине». Сфера научных интересов – реалистичность визуализации и симуляций, иммерсивность VR.

**Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA**, Senior Lecturer of Higher School of Information Technology and Information Systems, Head of Laboratory "Virtual and simulation technologies in biomedicine". Research interests include realism of visualization and simulation, immersion VR.

email: vlada.kugurakova@gmail.com.



**СТЕПАНОВ Александр Михайлович** – бакалавр Высшей школы ИТИС Казанского (Приволжского) Федерального университета. Сфера интересов: разработка игр.

**Alexander Mikhailovich STEPANOV** – bachelor of the Higher School of ITIS Kazan (Privolzhsky) Federal University. Research interests game development.

email: stepanovaleksandrm@gmail.com

Материал поступил в редакцию 4 июня 2017 года