

Имитационное моделирование потока объектов с учетом поля предпочтительных направлений

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»

Введение

Многие физические, социологические, биологические и иные системы представляют собой коллективы однотипных объектов. Примерами являются газ, состоящий из молекул; селевой поток, содержащий включения из камней; рой пчел; толпа, расходящаяся после матча со стадиона; зрители в кинотеатре; пассажиры метро; покупатели в большом магазине; поток машин на дорогах и т.п. При математическом описании таких систем в некоторых случаях удобно моделировать совокупность большого количества однотипных объектов в виде сплошной среды, к которой применимы методы математического анализа. Это позволяет сформулировать законы поведения в виде систем дифференциальных уравнений. Однако часто такая замена неправомерна, и математическое моделирование сводится к изучению поведения каждого объекта в отдельности с учетом их взаимодействия. Характер такого взаимодействия может быть самым различным. Для описания взаимодействия в последнее время используют теорию мультиагентов. Понятие «агент» близко понятию «автомат» [1–3]. Имеется также сходство агента с представлением о роботах. В некоторых работах эти понятия отождествляются [2]. В рамках данной статьи под агентом будем понимать автомат с памятью, внутреннее состояние которого является функцией времени.

Формулирование проблематики

Рассмотрим задачу моделирования направленного движения большой группы агентов (или роботов) в прямоугольной области. Область содержит препятствия, а также несколько истоков и сток. Каждый агент между столкновениями перемещается при отсутствии внешних полей прямолинейно и равномерно. Закон взаимодействия агентов постулируется так: в момент столкновения изменяются только направления векторов скоростей; угол падения принимается равным углу отражения. Таким образом, рассматриваемые объекты в момент столкновения проявляют свойства автомата Мура, однако координаты как часть внутреннего состояния с течением времени изменяются.

В качестве иллюстрации исследуем движение пассажиров на станции метро, хотя эта же задача может рассматриваться, например, как задача перемещения потока воды с включениями в виде камней. Станция метро представляет собой прямоугольную область, с двух сторон которой находятся по 20 источников (двери вагонов поезда) шириной по 1,5 м. Одной из сторон (правая) является сток (выход из станции). Внутри этой области расположены препятствия в виде колонн.

Для решения этой задачи используют большую группу мобильных имитационных роботов [2]. Предполагают, что роботы, находясь возле границ

области или препятствий, могут их обнаруживать. Все роботы чувствуют глобальное направление, в котором им необходимо двигаться. Это значит, что в каждой точке рабочей области перемещение происходит с учетом предпочтительного направления. Например, частицы с большой массой, движущиеся с потоком жидкости, могут увлекаться жидкостью в направлении потока, и это направление является предпочтительным. Область обнаружения роботом другого робота считается ограниченной. На первом этапе некоторое количество роботов выходит из источников, находящихся на верхней грани области. После окончания выхода этих роботов через некоторое время начинают своё движение роботы, выходящие из источников на нижней грани области. При достижении границы стока робот выходит из рабочей области. Локальные свойства агентов могут оказаться такими, что выход из рабочей области при заданном их количестве оказывается невозможным. Это явление может рассматриваться как запираение тракта в целом.

Сформулируем возникающие задачи:

- выбрать или создать алгоритм для описания поведения рассмотренной мультиагентной системы;
- смоделировать поле векторов предпочтительных направлений;
- оценить степень давления в потоке;
- определить зависимость момента запираения от локальных свойств агентов и их количества в системе.

Решение поставленных задач

Для описания совместного поведения агентов используем дискретно-событийный алгоритм, рассмотренный подробно в [4 – 6]. Этот алгоритм, являясь оптимальным по затратам времени расчетов на ЭВМ, показал свою эффективность в применении к изучению модельного газа [7]. Каждое столкновение агентов представляет собой событие, однозначно связанное с некоторым числом — моментом времени наступления события. Набор этих моментов заполняет числовую ось времени. Сами столкновения реализуются в определённой последовательности, получаемой упорядочением моментов столкновений в порядке возрастания. Упорядочение эквивалентно построению очереди. Используют очередь, построенную на базе хипа [6, 8]. После некоторого события следующим будет то, для которого время наступления минимально. После столкновения пары агентов требуется рассчитать время наступления очередного события для каждого агента рассматриваемой пары и поставить вычисленные моменты времени в очередь. Систему в целом предлагается разбить на подсистемы, так что для каждого из агентов, участвующих в столкновении, требуется последовательно рассмотреть агенты только в его подсистеме и соседних с ней подсистемах. При этом вводятся новые события, связанные с переходом из одной подсистемы в другую. Существенным элементом алгоритма является то, что перемещаются только те из агентов, которые участвуют в событии. В рассматриваемой модели нет необходимости следить за сохранением энергии, импульса и момента импульса в отдельном событии. Этим данная модель отличается от модели газа как мультиагентной системы.

Мощность множества агентов при использовании ЭВМ с тактовой частотой 666 МГц...4 ГГц может достигать 100000...500000. Эти числа на порядки превышают аналогичные, приведенные в работе [2], в которой применяется стандартный медленный дискретно-временной алгоритм «дельта t», не позволяющий на обычных компьютерах эффективно моделировать системы, состоящие более чем из 3000 агентов.

Поле предпочтительных направлений предлагается реализовать как векторное поле антиградиента некоторого скалярного поля типа электростатического. Предпочтительное направление учитывается только в дискретные моменты времени, соответствующие переходу агента из одной подсистемы в другую.

Роботы (или агенты) должны обходить препятствия и удаляться от них, обнаружив границы области [2]. Для описания такого поведения разместим в вершинах ячеек, которые лежат на границах области и на границах препятствий, положительные (отталкивающие) заряды. Потенциал в текущей точке вычисляют по следующей формуле:

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N \varphi_i(\vec{r}),$$

$$\text{где } \varphi_i(\vec{r}) = \frac{q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} = \frac{q_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}},$$

q_i — i -й заряд,

N — количество зарядов зоны,

$\vec{r}(x, y)$ — радиус-вектор текущей точки рабочей области.

Поле предпочтительных направлений вычисляется после этого как нормированный антиградиент потенциала. Каждой грани подобласти как структуре присваивают координаты модельной силы f_x , f_y .

Чтобы достичь стока, роботам необходимо пройти между препятствиями, а затем направиться к стоку. Поэтому отрицательные (притягивающие) заряды размещены на стоке и между препятствиями. Рабочая область разбита на пять зон, в каждой из которых строится своё модельное поле. Поле предпочтительных направлений после указанных вычислений показано на рис. 1.

Конкретный вид потенциала определен неоднозначно. Например, зависимость потенциала от расстояния может быть обратной квадрату расстояния, а не первой степени. Возможен выбор и иных зависимостей. Важно соблюдение естественного требования убывания потенциала при возрастании расстояния.

Каждый агент представляется при программировании структурой, среди полей которой необходимыми являются физические свойства (радиус, масса), координаты центра агента, координаты вектора скорости, локальное время, момент времени наступления ближайшего события, тип ближайшего события, номер объекта, с которым должно произойти ближайшее по времени событие, а также мультииндекс той ячейки, в которой данный агент находится.

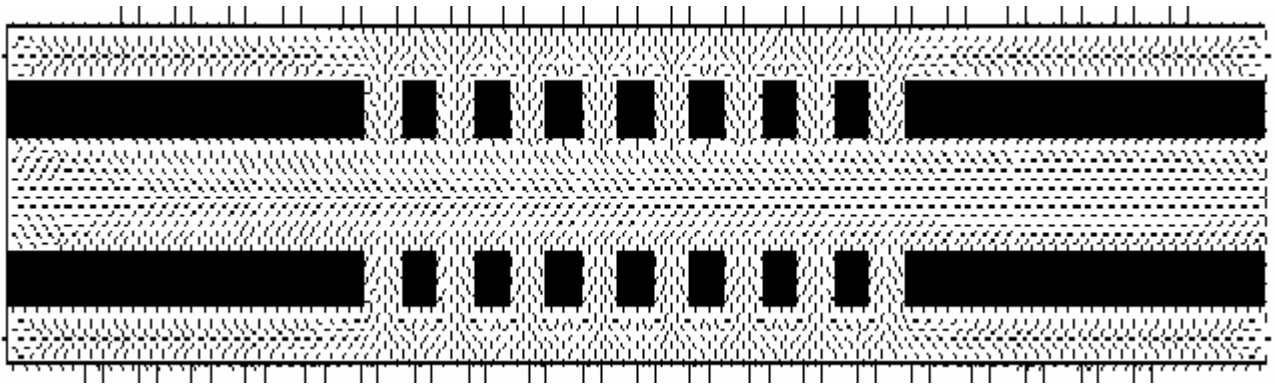


Рис 1. Поле предпочтительных направлений

Рассмотрим реакцию агента на событие, связанное с пересечением проницаемой границы. Должны быть выполнены следующие действия:

- из списка агентов, принадлежащих ячейке с мультииндексом (i, j) , в которой находился агент до столкновения, вычеркивается номер данного агента;
- после нахождения мультииндекса ячейки, в которую переходит агент, список агентов этой ячейки должен быть дополнен номером данного агента;
- для обеспечения направленности движения агентов к стоку переход через проницаемую границу сопровождается добавлением к вектору скорости агента нормированного вектора силы поля, вычисленного для грани ячейки, которую он пересек: $v_x \rightarrow v_x + f_x$, $v_y \rightarrow v_y + f_y$, – после чего вектор скорости нормируется.

Столкновение агента с непроницаемой границей считается абсолютно упругим.

Если под агентами подразумеваются пассажиры или роботы, то довольно важным фактором является ощущение тесноты в толпе. В рамках рассматриваемой модели этот фактор измеряется как количество столкновений в единицу времени в данной подсистеме; обоснованием служит то, что абсолютные значения скоростей агентов считаются одинаковыми. В предельном случае давление (или теснота) может достичь таких величин, что движение агентов становится невозможным, т.е. возникает явление запирания тракта.

Результаты расчетов

На рис.2 показана типичная конфигурация при прохождении рабочей области коллективом агентов.

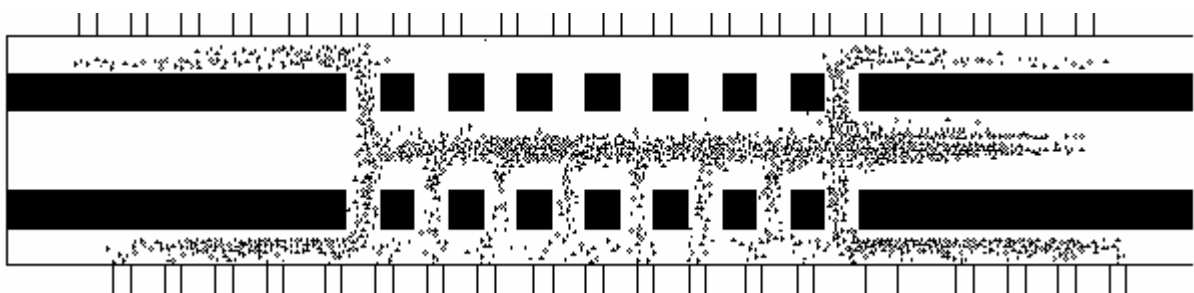


Рис.2. Прохождение коллективом агентов рабочей области

Она является фрагментом последовательности таких конфигураций, образующих фильм.

С помощью рассмотренной модели путем проведения машинных экспериментов была найдена зависимость момента наступления записывания тракта f от количества агентов x . Дополнительным параметром является одно из локальных свойств, а именно радиус. Результаты приведены на рис. 3, 4.

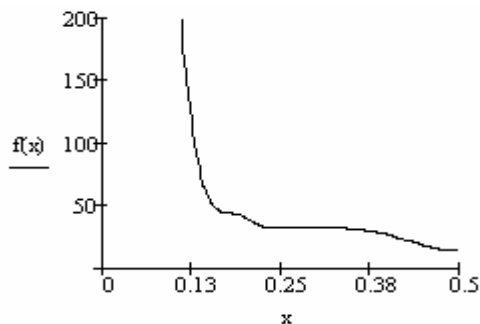


Рис. 3. Зависимость максимального количества агентов от модельного радиуса (в метрах)

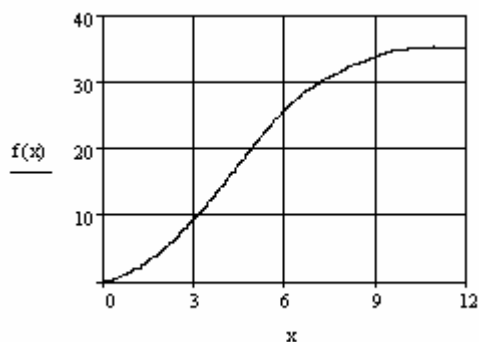


Рис. 4. Зависимость максимального количества агентов от ширины стока (в метрах)

При модельном радиусе, равном 0,5 м, количество пассажиров, выходящих из одной двери вагона, не должно в среднем превышать 21 – 25. Реальное количество в час пик составляет 15 – 18 человек. Если убрать колонны или уменьшить их размеры, то проходная способность резко увеличивается. Зависимость проходной способности от ширины стока оказывается нелинейной, как это следует из графика, изображенного на рис. 4. В то же время имеется критическая максимальная ширина. Если ширина стока превышает это критическое значение, равное в данном случае 9...10 м, то максимально допустимый пассажиропоток перестает зависеть от ширины.

Одним из достоинств рассматриваемого метода имитационного моделирования является то, что эволюция системы в целом прослеживается в реальном масштабе времени. На каждом шаге алгоритма время совпадает с глобальным ведущим параметром, который наращивается дискретно от события к событию с интервалами, равными временной длительности между последовательными событиями.

Выводы и заключение

При большом количестве объектов для обеспечения эффективности мультиагентного подхода следует применять современные дискретно-событийные алгоритмы, так как использование дискретно-временных алгоритмов приводит к резкому возрастанию времени расчетов.

Введение в рассмотрение поля предпочтительных направлений перемещения позволяет учесть сложность формы рабочей области. В данной работе приведен пример использования кулоновского потенциала для построения векторного поля перемещений. Возможны и иные способы реализации такого поля. Например, при решении гидродинамических задач поле направлений может быть получено путем предварительного построения поля скоростей течения

сплошной среды в рабочей области. После построения поля можно приступать к расчетам, связанным с перемещением агентов, используя найденное поле для определения предпочтительных направлений.

В рассмотренном примере не учитывалось наличие пассажиров, которые движутся в направлении от эскалатора к поездам. Если предположить существование встречного потока, то необходимо ввести еще одно поле предпочтительных направлений. В этом случае среди свойств граней появляются еще два, аналогичные координатам силы, рассмотренным выше. Это сводится к построению еще одного потенциала и последующему вычислению антиградиента. Для каждого агента дополнительно должен быть задан его тип. При расчете новой скорости в момент перехода между подсистемами учитывается поле одного из имеющихся полей в зависимости от типа агента.

Физические параметры, соответствующие геометрическим размерам, массе и абсолютной величине скорости агентов, для простоты считаются в рассмотренном примере постоянными, что соответствует усреднению по всему коллективу.

Структура агента может быть приближена к реальной, если для физических параметров постулировать случайное задание по некоторому закону вероятностного распределения. Однако это требует предварительной статистической обработки распределения размеров, массы и подвижности.

Список литературы

1. Карпов Ю.Г. Теория автоматов. М.: Питер, 2003. – 206 с.
2. Kerr W., Spears D., Spears W., Thayer D. Multi-agent Sweeping and Obstacle Avoidance / Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 3228. – [2004 // wkerr@cs.uwyo.edu](http://wkerr@cs.uwyo.edu).
3. Соколов А.Ю., Угрюмов М.Л., Чернышев Ю.К. Математические методы, модели и технологии исследования сложных систем // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 7(23). – Харків, ХАІ. – 2005 – С. 327-337.
4. Чернышев Ю.К. Прямое моделирование течения газа в каналах сложной формы при малых числах Кнудсена // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». – Х.: Ин-т проблем машиностроения НАН Украины. – 1997. – С. 238 – 240.
5. Чернышев Ю.К. Применение теории систем для алгоритмизации прямого математического моделирования течения газа // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 2. – С. 44–47.
6. Чернышев Ю.К. Решение задач имитационного моделирования поведения большого количества модельных частиц // Х.: ХАИ. – 2006. – 58 с.
7. Левин С.С., Лоян А.В., Чернышев Ю.К. Трехмерное имитационное моделирование газодинамических процессов в стационарном плазменном двигателе в предпусковом состоянии // Открытые информационные и компьютерные технологии. – 2006. – Вып. 31. – С. 82 – 94.
8. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2000. – 956 с.