КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 681.3.06

С.В. ЕРШОВ

# МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ, ОСНОВАННАЯ НА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ ВЫСШЕГО ТИПА

*Рассматривается модель поведения интеллектуальных агентов, функционирующих на основе нечеткой логики высшего типа. Разработана структура нечетких правил для достижения таких аспектов поведения группы агентов, как поддержка дистанции между агентами, согласования скоростей и обхода препятствий. Построены критерии позволяющие оценить эффективность поведения группы агентов по согласованию дистанций и скоростей.*



В настоящее время большое внимание уделяется методам представления знаний с помощью нечеткой логики высшего типа. Согласно таким методам, степень принадлежности нечеткому множеству уже не выражается одним вещественным числом, а имеет нечеткий характер. Понятие нечеткого множества высшего типа (типа 2) ввел Заде в [1]. Основные понятия, характеризующие нечеткую логику высшего типа, то есть функции и степени принадлежности второго типа, а также понятие следа неопределенности предложил Мендель [2]. Совершенно новую структуру интервальной нечеткой логики типа 2 первыми разработали Карник, Мендель и Лианг [3]. Однако, создание интеллектуальных агентов, использующих преимущества такого типа нечеткой логики требует разработки моделей коллективного поведения группы агентов и методов оценивания ее эффективности. Особенно актуальна данная задача при исследовании эффективности процессов эвакуации людей в чрезвычайных ситуациях, поведения транспортных средств в условиях неопределенности (неполной информации) и ряда других процессов.

Цель настоящей работы – исследование и обоснование модели интеллектуальных агентов с использованием нечеткой логики высшего типа, что позволит правильно учесть повышенную степень неопределенности фактов и представлений (убеждений) при моделировании структуры и группового поведения интеллектуальных агентов в нечеткой среде. Перечисленные проблемы тематически вписываются в дальнейшее развитие исследований в направлении становления моделе-ориентированных архитектур мультиагентных систем в нечетком представлении [4–6].

Рассмотрим группу, состоящую из $n$ агентов, поведение которой в $m$-мерном пространстве может быть задано следующими уравнениями движения:

$$p_i(t) = f\left(v_i(t), p_i(t-1)\right),$$
$$v_i(t) = g\left(u_i(t), v_i(t-1)\right), \qquad (1)$$

где $p_i(t), v_i(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор положения и скорости агента $i$, соответственно, а $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ – рассматриваемый далее вектор воздействия на агент $i$. Предполагается, что все агенты полностью задействованы и могут взаимодействовать друг с другом. Состояния всех $n$ агентов можно объединить в три вектора: $p = [p_1, ..., p_n] \in \mathbb{R}^{nm}$, $v = [v_1, ..., v_n] \in \mathbb{R}^{nm}$ и $u = [u_1, ..., u_n] \in \mathbb{R}^{nm}$.

Обозначим $\tilde{p}(t)$ и $\tilde{v}(t)$ требуемое положение и скорость для центра группы агентов. Для дальнейшего определения нужного положения и скорости ко всем агентам в группе применяется следующее выражение:

$$\tilde{u}_i = -c_1(p_i - \tilde{p}) - c_2(v_i - \tilde{v}), \qquad (2)$$

где $c_1$ и $c_2$ – коэффициенты обратной связи, которые можно представить в виде $n$-мерных диагональных матриц. При использовании воздействия $\tilde{u}(t)$, все агенты принадлежащие к одной и той же группе следуют требуемой траектории. Центр группы может быть представлен средним значением всех состояний, т. е.

$$p_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i(t)}{n}, \quad v_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i(t)}{n}. \qquad (3)$$

Из уравнений (1)–(3) следует, что управляющее воздействие для центра группы имеет следующий вид:

$$\tilde{u}_c = -c_1(p_c - \tilde{p}) - c_2(v_c - \tilde{v}).$$

Тогда поведение центра группы может быть представлено как:

$$p_c(t) = f\left(v_c(t), p_c(t-1)\right),$$
$$v_c(t) = g\left(\tilde{u}_c(t), v_c(t-1)\right).$$

Рейнольдсом [7] была предложена модель для характеризации коллективного поведения группы агентов, действующих по принципу «держаться вместе». Такая модель состоит из трех следующих эвристических правил: правила сплочения (cohesion), определения степени разделения (separation) и согласования скоростей.

В данной работе разработаны не только три правила Рейнольдса, но и поведение для обхода препятствий посредством трех интервальных систем нечетких правил (СНП) 2-го типа для достижения поведения по принципу «держаться вместе» в среде с препятствиями. Два эвристических правила Рейнольдса, а именно правила сплочения и определения степени разделения можно представить в виде одной СНП для согласования интервалов. При этом для представления всех трех СНП (для согласования интервалов, согласования скоростей и, соответственно, обхода препятствий) используются трапециевидные интервальные нечеткие множества типа-2.

Для моделирования поведения по принципу «держаться вместе» разработаны три СНП, соответствующие каждому из типов составного поведения. Каждая СНП получает четкий вход и затем вырабатывает управляющие воздействия ${u^1}_i$, ${u^2}_i$ и ${u^3}_i$. Для определения перемещения каждого агента на следующем шаге в качестве $u_i$ в (1) используется сумма векторов управляющих воздействий, в том числе $\tilde{u}_i$, задаваемый выражением (2). Таким образом, окончательно функция воздействия $u_i$ определяется как ${u^1}_i + {u^2}_i + {u^3}_i + \tilde{u}_i$.

СНП для поддержания интервала заставляет агентов собираться вокруг центра группы при сохранении постоянного расстояния между агентами, чтобы избежать столкновений с близлежащими агентами.

Для представления отклонения дистанции между агентами от необходимой разработано восемь трапециевидных нечетких множеств 2-го типа, след неопределенности каждого из которых задает неопределенностью данных от датчиков: НБ (негативное большое), Н (негативное), НН (негативное небольшое), О (отсутствует), ПН (позитивное небольшое), П (позитивное), ПБ (позитивное большое) и ОБ (очень большое). Восемь нечетких правил для такого типа поведения можно представить следующим образом:

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = НБ, ТО $k_{ij} =$ Большая СО

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = Н, ТО $k_{ij} =$ Средняя СО

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = НН, ТО $k_{ij} =$ Небольшая СО

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = О, ТО $k_{ij} =$ Отсутствует

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = ПН, ТО $k_{ij} =$ Небольшая СП

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = П, ТО $k_{ij} =$ Средняя СП

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = ПБ, ТО $k_{ij} =$ Большая СП

ЕСЛИ ($r_{ij}^2 - d^2$) = ОБ, ТО $k_{ij} =$ Очень Большая СП

где $r_{ij}$ – текущее расстояние между агентами $i$ и $j$, а $d$ – необходимое (безопасное) расстояние между двумя агентами. Функция воздействия на агент $i$, которая учитывает взаимодействия со всеми агентами в группе задается следующим образом:

$$u_i^1(t) = -\sum_i^n k_{ij}(p_i - p_j), \tag{4}$$

где $k_i^s = [k_{i1}, ..., k_{in}] \in \mathbb{R}^n$ – вектор, вырабатываемый системой нечетких правил. Функция воздействия применяется ко всем агентам в группе, т. е., если нечеткий вход $r_{ij}^2 - d^2$ принимает отрицательное значение, то на агенты действует сила отталкивания (СО); наоборот, если значение входа становится положительным, то на агенты действует сила притяжения (СП). Таким образом, агенты в группе могут собираться вместе без столкновений друг с другом.

Для оценивания степени, в которой поведение агентов соответствует принципу поддержания интервала, введем следующую функцию для группы агентов:

$$P(p) = \sum_i^n \sum_{j=1}^n \psi(\left|p_i - p_j\right| - d), \tag{5}$$

где $\psi(x) = x^2$, $\left|p_i - p_j\right|$ – модуль вектора разницы положения агентов $i$ и $j$ в пространстве. Чем меньше значение функции (5), тем стабильнее становится группа агентов.

СНП для согласования скоростей предназначена для выравнивания скорости каждого агента по отношению к остальным. Для определения выходного значение $k_{ij}^v$ СНП использует только одно четкое входное значение $\left|v_i - v_j\right|$ модуля вектора разницы скоростей агентов $i$ и $j$. Для этой СНП, входные и выходные функций принадлежности (след нечеткости которых показан на рис. 1) принимают значения Отсутствует, Средняя, Большая. Три простых нечетких правила представлены следующим образом:

ЕСЛИ $\left|v_i - v_j\right|$ = Отсутствует, ТО $k_{ij}$ = Отсутствует

ЕСЛИ $\left|v_i - v_j\right|$ = Средняя, ТО $k_{ij}$ = Средняя

ЕСЛИ $\left|v_i - v_j\right|$ = Большая, ТО $k_{ij}$ = Большая.

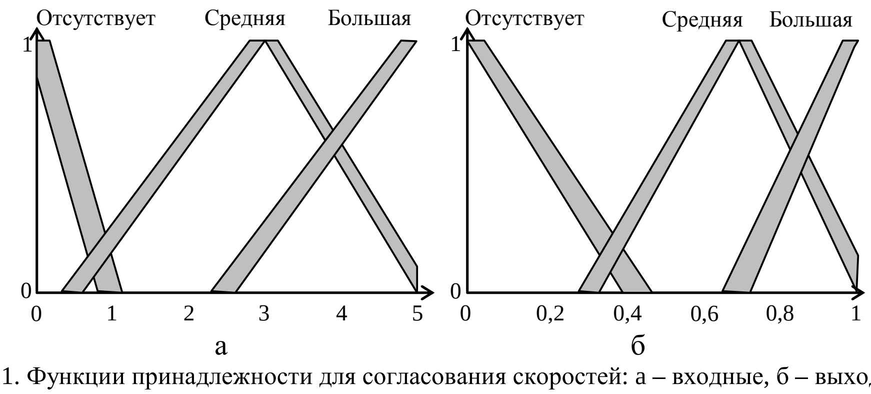


РИС. 1. Функции принадлежности для согласования скоростей: а – входные, б – выходные

Функция управления агента $i$ для согласования скоростей следующая:

$$u_i^2(t) = -\sum_i^n k_{ij}^v (v_i - v_j), \tag{6}$$

где $k_i^v = [k_{i1}, ..., k_{in}] \in \mathbb{R}^n$ – вектор, вырабатываемый системой нечетких правил. С помощью этой функции управления агент стремится выравнять свою скорость по отношению к другим агентам, имеющим с ним большую разницу скоростей.

Для измерения степени выравнивания скорости используется следующая функция отклонения скоростей:

$$V(v) = \sum_i^n \sum_{j=1}^n \psi\left(\left|v_i - v_j\right|\right).$$

Если скорость $v_i(t)$ достигает средней скорости всех агентов в группе, направление их движения и модуль вектора скорости будет примерно одинаковы и функция отклонения скоростей $V(p)$ обращается в нуль.

Поведение обхода препятствий необходимо для безопасной навигации в среде с препятствиями. При разработке СНП 2-го типа предполагается, что препятствия являются неподвижными и каждый агент может определить расстояние от агента до препятствия, когда препятствие находится в пределах максимального определяемого расстояния $d_{\max}$. При этом предположении, диапазон значений датчика представлен тремя интервального нечеткими множествами типа-2: Отсутствует, Близко и Далеко. Консеквенты правил включают три нечетких множества: Отсутствует СО (сила отталкивания), Малая СО, Большая СО. Три простых нечетких правила представлены следующим образом:

ЕСЛИ $d_i$ = Отсутствует, ТО $k_{ij}$ = Отсутствует СО

ЕСЛИ $d_i$ = Близко, ТО $k_{ij}$ = Малая СО

ЕСЛИ $d_i$ = Далеко, ТО $k_{ij}$ = Большая СО.

Функция управления $i$-го агента для обхода препятствий $u_i^3$ вычисляется аналогично (4) и (6). Если расстояние между агентом и препятствием становится меньше, то на агент воздействует большая сила отталкивания от препятствия. Таким образом, СНП типа-2 приводит к избеганию препятствий агентом.

При моделировании использовалась группа из 12 агентов, перемещающихся на плоскости (т. е. $m = 2$). Позиции и вектора скоростей всех агентов доступны любому агенту, принадлежащему группе для согласования интервалов (4), согласования скоростей (6) и обхода препятствий. Позиции и скорости агентов изначально заданы в ограниченном диапазоне случайных чисел. Следующие параметры оставались неизменными при моделировании: $d = 0{,}3$ для интервалов, $d_{\max} = 1$ для обхода препятствий, $c_1$, $c_2 = 1$ для отслеживания заданной траектории. Такая траектория, которой должен следовать центр группы, представлена следующей прямой:

$$\tilde{p}(t) = [0{,}5t,\ 0].$$

Поведение группы агентов, задаваемое с помощью СНП типа-2 сравнивалось с аналогичным поведением агентов, порождаемых на основе обычных нечетких правил (типа-1). При использовании СНП 2-го типа агенты выполняют обход препятствий более плавно, чем при использовании обычных правил, с меньшим средним отклонением от центра группы. Что касается функции поддержания интервала (5), ее значения для СНП типа 2 в среднем меньше, чем для СНП 1-го типа. Кроме того, значение степени отклонения скоростей агентов, управляемых тремя СНП типа 2 меньше чем для соответствующих им обычных нечетких правил.

**Выводы**. Таким образом, предложена модель интеллектуальных агентов, функционирующих на основе нечеткой логики высшего типа. Разработана структура нечетких правил для достижения таких аспектов поведения группы агентов, как поддержание дистанции между агентами, согласования скоростей и, соответственно, обхода препятствий. Поведение группы агентов, задаваемое с помощью нечеткой логики высшего типа более адекватно по отношению к критериям согласования дистанции и скоростей чем поведение, порождаемое на основе обычных нечетких правил.

*С.В. Єршов*

МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ,
ЩО ГРУНТУЮТЬСЯ НА НЕЧІТКІЙ ЛОГІЦІ ВИЩОГО ТИПУ

Розглядається модель поведінки інтелектуальних агентів, що функціонують на основі нечіткої логіки вищого типу (типу 2). Розроблено структуру нечітких правил для досягнення таких аспектів поведінки групи агентів, як підтримка дистанції між агентами, узгодження швидкостей і обходу перешкод. Побудовано критерії, які дозволяють оцінити ефективність поведінки групи агентів стосовно погодження дистанцій та швидкостей.

*S.V. Yershov*

MODEL OF INTELLIGENT AGENTS BASED ON A FUZZY LOGIC OF HIGHER TYPE

A model of behavior of intelligent agents, operating on the basis of higher type (type 2) fuzzy logic, is considered. To describe such aspects of behavior of agent group as a distance between them, velocity matching, and obstacle avoidance, a structure of fuzzy rules is developed. Criteria for estimating efficiency of the behavior of the group of agents with respect to distances and velocities are created.

1. *Zadeh L.A.* The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // Information Sciences. – 1975. – Vol. 8, N 8. – P. 199 –249.
2. *Mendel J.M.*, *John R.I.* Type-2 sets made simple // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 2002. – Vol. 10, N 2. – P. 117–127.
3. *Karnik N.N.*, *Mendel J.M.*, *Liang Q*. Type-2 fuzzy logic system // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 1999. – Vol. 7, N 6. – P. 643–658.
4. *Парасюк И.Н.*, *Ершов С.В*. Нечеткие модели мультиагентных систем в распределенной среде // Проблеми програмування. – 2010. – № 2–3. – С. 330 – 339.
5. *Парасюк И.Н., Ершов С.В*. Моделе-ориентированная архитектура нечетких мультиагентных систем // Компьютерная математика. – 2010. – № 2. – С. 139 – 149.
6. *Ершов С.В*. Принципы построения нечетких мультиагентных систем в распределенной среде // Там же. – 2009. – № 2. – С. 54 – 61.
7. *Reynolds C.W.* Flocks, herds and schools: a distributed behavioural model Automating model transformations in agent-oriented modeling // Comput. Graph. – 1987. – Vol. 21, N 4. – P. 25 – 34.

Получено 17.12.2011

***Об авторе:***

*Ершов Сергей Владимирович*,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины.
sershv@ukr.net