

УДК 681.5:303.093.7

ПРИМЕНЕНИЕ УНИМОДАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ В НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ,
канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК, Т.М. ГЛУХОВА
(Полоцкий государственный университет)*

В условиях комплексной автоматизации современного производства возникает острая потребность в совершенствовании механизмов регулирования и управления сложным динамическим объектом в условиях неполноты информации (технологическим процессом, технической системой и др.). Описана новая форма реализации нечеткой логики, заключающаяся в применении унимодалных функций принадлежности и соответствующих функциональных реализаций логических операций конъюнкции и дизъюнкции. Изложены основные результаты исследований продукционных систем на базе предложенной реализации нечеткой логики. Проиллюстрирован интересный процесс самоорганизации системы агентов, функционирующих в игровой среде с применением нового класса нечетких логических систем, а именно иерархических систем продукционных правил.

Введение

В условиях отсутствия полного динамического описания объекта управления требуется построение эффективного управления на основе лингвистического описания объекта. К классу сложных динамических объектов с неполной информацией можно отнести:

- системы, описываемые очень сложными математическими моделями, неприменимыми на практике, существует возможность использовать свойство нечетких систем служить качественным лингвистическим аппроксиматором многомерных зависимостей;
- процессы, для описания которых недостаточно единственно математических моделей;
- процессы с высокой степенью нелинейности;
- лингвистическую формулировку (если для объекта выполнена экспертиза).

В последние годы разработчики промышленных и промышленных систем обратились к использованию моделей, основанных на интеллектуальных вычислениях (ИВ), для описания динамических законов изучаемых систем, специфика которых в отсутствии точного, полного описания. ИВ-модели включают нечеткие системы, предложенные Л. Заде [1] в 1965 году, нейронные сети Вербоса [2], генетические алгоритмы.

Историческая справка

Нечеткие системы успешно применялись как парадигма, демонстрирующая использование лингвистической информации при проектировании систем. Промышленное и производственное проектирование вовлечено в процесс мониторинга и улучшения продукции, для этих целей используется прогнозирование и анализ временных рядов. Нечеткие системы могут рассматриваться как парадигма, решающая проблему нелинейного управления. В производственном контроле и планировании нечеткие системы являются темой научных исследований и внедрений. Например, приложения нечеткого снятия ограничений при планировании [3], нечеткий подход к правилам диспетчеризации в расписаниях [4], создание систем массового обслуживания с использованием нечетких чисел [5]. Другие аспекты производственной, промышленной инженерии, такие как размещение средств [6], обеспечение средствами [7] и др., выигрывают при использовании нечетких систем.

Множество исследовательских групп (IFSA, SOFT, BISC, NAFIPS, EUSFLAT, ERUDIT, COST-MVL) в различных странах мира работали над стандартизацией нечеткой логики. Эта деятельность уже дала результаты в виде международного стандарта Международной Электротехнической Комиссии (International Electrotechnical Commission) как расширение существующего IEC 1131 стандарта. Этот стандарт распространяется на устройства, используемые для промышленной автоматизации от механических параметров до программирования и документации. Третья секция (IEC 1131-3) определяет 5 языков программирования для промышленных устройств автоматизации. Первоначально разработанные как стандарт для Программируемых Логических Контроллеров (PLC), 5 языков программирования стали широко применяться как языки программирования для любого типа промышленной автоматизации и управления производственным процессом. В июле 1993 года Industrial-Process Measurement и Control Sub-Committee № 65B IEC сообщила о работе над новым пунктом, связанным с нечеткой логикой, как расширение существующего стандарта IEC 1131. Новая секция этого стандарта, IEC 1131-7 [8], опубликованная в январе 1997 года, определяет нечеткие логические компоненты для промышленной автоматизации и управления производственным процессом.

Нечеткому управлению посвящено значительное число публикаций, что подтверждает актуальность проблемы. Основная доля исследований связана с изучением нечеткого логического вывода. Здесь следует отметить основополагающие работы как отечественных (И.З. Батыршин, В.М. Казупеев, Ву Тхань Нгуен, К.Б. Соколов, Е.И. Ефимов и др.), так и зарубежных (Такемото Ясутоши, А. Каролло, С. Хенандес, А. Проссос Костас, Е. Мамдами, Р. Круз, Г. Макакис, М. Балазински, Э. Клогда и др.) ученых.

Однако в связи с недостаточностью априорной информации при формализации задачи управления сложным объектом в настоящее время особую актуальность приобретают задачи управления, в основе которых лежат алгоритмы, использующие обучение. Различные решения этих задач и способы возможных модификаций базы знаний в процессе нечеткого обучения рассматривались в работах А. Гегер-Скулза, Е. Мамдани, О. Кордан, Ф. Херрара, М. Лозано и других ученых.

Если рассматривать неизвестный параметр как непрерывный, то можно провести параллель между выводом о значении неизвестного параметра и приближением функции и говорить о свойстве нечеткой системы выступать в роли лингвистического аппроксиматора [9].

Нестандартные представления исследовались как различные варианты математического описания, не нарушающего аксиоматики нечеткой логики.

Область исследований

Из анализа классификации нечетких систем выделена область нечетких производственных систем, широко используемых для промышленной автоматизации. Механизмы нечеткого логического вывода, вошедшие в стандарт, хорошо изучены и исследованы на качество реализуемого управления, в частности, исследование методов дефазификации на линейных функциях принадлежности, проведенное Won-Kyung Song и Jong-Pil Lee.

Следовательно, широко распространены и хорошо изучены производственные системы с линейным базисом, функционирование которых отвечает условиям, а следовательно, является кусочно-функциональной многомерной интерполяцией. Однако в случае информационной неопределенности было бы логично предположить, что введение нелинейного базиса и переход к сглаживающей аппроксимации может значительно повышать качество нечеткого управления.

Накопленный мировой опыт построения интеллектуальных систем составляет основу методологии их создания и эксплуатации.

На основании анализа рассмотренной классификации методов приобретения знаний можно очертить область научных исследований, с которой непосредственно пересекаются описываемые исследования. С одной стороны, это методы приобретения знаний из примеров, с другой, связанная с первой задачей, а именно существующая в рамках выбранной модели представления знаний, задача обучения по примерам.

В рамках рассмотренной классификации наша задача решается в условиях приобретения знаний на уровне формализованного языка; тип знаний – общие и специализированные правила.

Как было указано выше, мы рассматриваем только непрерывные. Именно непрерывность позволяет сформулировать два основных требования к представлению знаний в системе:

- 1) представление знаний должно обеспечивать устойчивость системы, т.е. небольшие изменения мира должны отражаться небольшими изменениями в системе;
- 2) представление знаний должно обеспечивать монотонность, т.е. увеличение объема знаний должно улучшать качество работы системы.

Предлагаемый метод реализации нечеткой логики

Особенностью разработанного метода является переход только к унимодальным функциям принадлежности, и отказ от описания областей, которые вызывают у нас сомнения и подозрения даже на стадии формализации. Корректность такого подхода вытекает из рассмотрения нечеткой системы управления как лингвистического аппроксиматора, что разрешает проблему существенных понятийных искажений и, как оказывается впоследствии, позволяет с заданной точностью описать все промежуточные состояния.

В отличие от приводимого стандарта, как уже было сказано, предлагается для представления нечеткости использовать автоматически генерируемые, симметричные унимодальные функции принадлежности, ненулевые на всей области определения. Наиболее удобной параметрической формой в рамках проведенных исследований из множества разработанных форм выбрана степенная функция вида:

$$\mu_x = \left(1 - \frac{|x - x_0|}{h} \right)^n.$$

Благодаря очевидности физического смысла параметров она легко настраиваема, помимо обеспечения высокой (выше, чем для альтернативных форм) точности, является трансформацией треугольной формы и может при определенных условиях сводиться к последней.

Реализации t -нормы и t -конормы соответственно

$$T(x, y) = \min(x, y); S(x, y) = \max(x, y)$$

образуют дистрибутивную решетку. Не выполняется только закон комплиментарности, или

$$T(x, y) = x \cdot y, S(x, y) = 1 - 1 - x - 1 - y$$

образуют дистрибутивную решетку. Не выполняется только закон комплиментарности и идемпотентности.

Независимо от используемого метода дефазификации, мы получаем выражение для результата вывода в виде некоторой линейной комбинации непрерывных функций, что обеспечивает непрерывность поверхности вывода и непрерывность производных любой степени. Следовательно, появляется возможность накладывать на решающую процедуру дополнительные ограничения в виде требования монотонности результата, или производных, если предполагается, что данные обладают такими свойствами.

Например, для синглетонов имеем:

$$Y(x) = \frac{\sum_i \mu_i(x) \cdot y_i}{\sum_i \mu_i(x)} \quad \text{вывод второго порядка} \quad \delta(x) = \frac{\sum_i \mu_i(x) \cdot y_i - Y(x)}{\sum_i \mu_i(x)}$$

Непрерывность результирующих выражений позволяет оценивать отклонение результата выводом о значении отклонения по отклонениям на узлах аппроксимации, что названо в работе выводом второго порядка. Вывод второго порядка корректирует результаты вывода первого порядка, повышая точность, однако не устраняет граничных искажений и значительно увеличивает число вычислительных операций.

Формализация задачи управления

Для решения задачи повышения эффективности систем управления по накопленной базе знаний, обеспечивающей достаточную достоверность результатов, возможен переход к обобщенным правилам, выражаемым в нечетких отношениях. Такие нечеткие отношения могут быть представлены многомерными интерполянтами (полиномами, кусочно-линейными интерполянтами, эрмитовыми кусочно-кубическими интерполянтами, сплайнами, кривыми Безье) или многомерной аппроксимацией (метод наименьших квадратов).

С целью оптимизации структуры и учета временных изменений базы знаний разработан мониторинг базы знаний. Такой мониторинг позволяет масштабировать характеристики системы в целом, не нарушая пропорции между временными характеристиками отдельных объектов.

Для решения задачи обучения нечеткой продукционной системы мы должны быть уверены в том, что нечеткая модель описывает обследуемый объект с заданной степенью достоверности. При этом разработан удовлетворительный механизм повышения достоверности модели за счет целенаправленного добавления правил в базу знаний. Нами разработан алгоритм обучения по минимуму достоверности, основанный на поиске точки с минимальной достоверностью информации и получении знаний об этой точке [10].

Если нечеткую систему формально описать четверкой:

$$НЭС = \langle \Psi, S, P, Y \rangle,$$

где $\Psi = \psi_1, \dots, \psi_k, \dots, \psi_n$ – множество свойств объектов предметной области; $\psi_i = \phi_1^i, \dots, \phi_{m_i}^i$ – множество оттенков i -го свойства; $S = s_1, \dots, s_l, \dots, s_e$ – множество связей для выбора по текущей стратегии модификации; $s_j = \phi_1^j, \dots, \phi_n^j$ – условная связь (точка предпочтения); $P = p_1, \dots, p_t, \dots, p_z$ – множество правил вывода (База знаний); $p_t = \phi_1^t, \dots, \phi_n^t \rightarrow \phi_{k+1}^t, \dots, \phi_n^t$ – правило вывода фактов вторичных свойств.

Один из вариантов этой записи – вывод одного вторичного свойства по сопоставлению базы фактов с указанными значениями (оттенками) свойств. Релевантность правил определяется по превышению уровня чувствительности достоверности вывода по правилу, определяемому сопоставлением с базой фактов, а также тем, определены ли свойства, участвующие в сопоставлении:

$Y = y_1, \dots, y_k, \dots, y_r, \dots, y_n$ – база фактов;

$$y_r(y_1, \dots, y_k) = \frac{\sum_j \prod_j \phi_j^t \cdot y_j \cdot \phi_r^t}{\sum_j \prod_j \phi_j^t \cdot y_j}, \phi^t \in P, y_r \in Y \text{ – вывод факта по вторичному свойству;}$$

$$\varphi_j^t(y_j) = \left(1 - \frac{|y_j - y_j^t|}{h_j}\right)^p$$

– вид функции принадлежности для оттенка j -го свойства в t -м правиле.

Здесь h – ширина экспертной области; p – характер.

$\neg x = 1 - x$ – отрицание;

$x_1 \wedge x_2 = x_1 \cdot x_2$ – t -норма, конъюнкция;

$x_1 \vee x_2 = 1 - (1 - x_1) \cdot (1 - x_2)$ – s -норма, дизъюнкция.

В случае использования в базе знаний дизъюнктивных правил такие правила можно разбить на два или более, в зависимости от числа операций дизъюнкции, конъюнктивные правила. При этом возрастает влияние таких правил на вывод:

$$Validity_r(y_1, \dots, y_k) = 1 - \prod_i \left(1 - \prod_j Validity_j \cdot \varphi_j^i(y_j)\right), \forall p \in \varphi_r$$

– достоверность логического вывода факта по вторичному свойству.

Тогда поиск точки с минимальным значением достоверности сводится к поиску точки с минимальной плотностью определенных на многомерном пространстве входных переменных правил [11].

Пример построения игровой модели

С целью иллюстрации свойств нечеткой продукционной системы на унимодальных функциях принадлежности была разработана игровая система продукционных правил (искусственный интеллект агента в игре про бой между «своими» и «чужими»), формализующая знания о тактике и стратегии ведения боя для агентов противодействующих сторон.

В отличие от систем, основанных на реализациях нечеткой логики с треугольными функциями принадлежности и минимаксным принципом логического вывода, система с унимодальными функциями принадлежности позволила обеспечить монотонность и гладкость функций управления.

В игровой системе правил было сформировано два уровня правил: уровень стратегии и уровень тактики. При этом поведение системы при согласованности характеристик сторон становилось устойчивым. Формировались циклы наступательных и оборонительных действий, устойчивые траектории наступательных операций. Система в результате самоорганизации приходила в устойчивое состояние равновесия (рис. 1). Наблюдалось формирование группового поведения агентов. Фрагмент игры представлен на рисунке 2 (агенты принимают решение на уровне тактических правил в рамках поставленных задач, вырабатываемых глобальными правилами уровня стратегии).

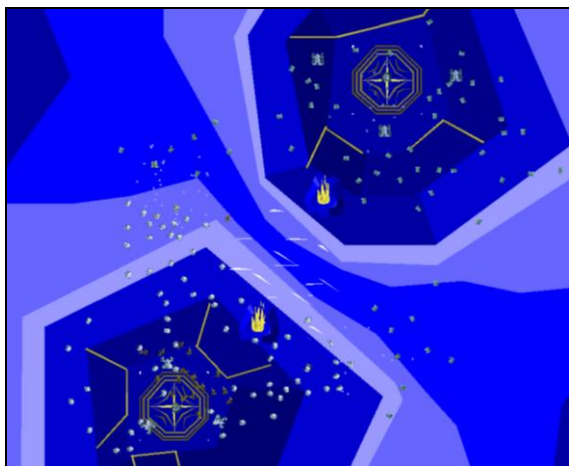


Рис. 1. Иллюстрация устойчивого состояния системы

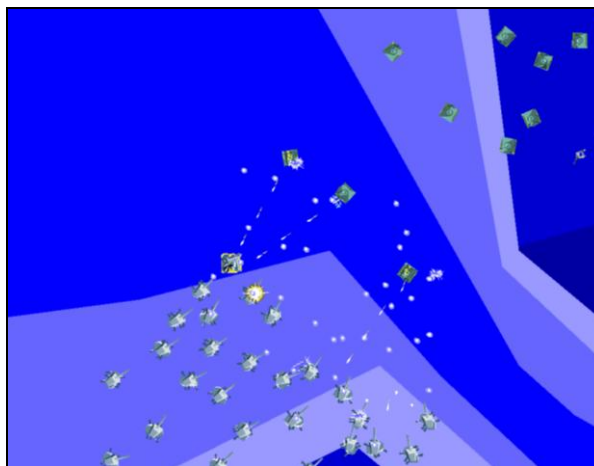


Рис. 2. Фрагмент игры

Игровая модель показала, что для эффективного описания сложного динамического процесса недостаточно одноуровневой системы правил. Именно переход к иерархиям в продукционных системах дает возможность лингвистического описания нелинейных процессов. Иерархические продукционные системы – направление наших дальнейших исследований.

Заключение. Проанализировав результаты расчетов [11 – 13], сделан вывод о том, что степень функции принадлежности предпосылок, обеспечивающая минимум ошибки, не зависит от вида функции, характера процесса, а определяется для пространства одной переменной из числа переменных посылки. Являясь свойством пространства, эта степень зависит от числа правил, а точнее от числа термов, заданных в этом

пространстве, и их взаимного расположения. Установлена прямая зависимость: чем выше плотность определенных термов, тем выше степень. Повышая степень функции принадлежности, мы снижаем влияние соседних правил друг на друга и влияние отдаленных правил в окрестности рассматриваемого терма, что приводит к повышению точности в его окрестности, с другой стороны мы постепенно утрачиваем плавный переход между соседними термами и теряем точность в неопределенной области. Эти две зависимости работают одновременно, и мы можем найти оптимальное решение. Введение степени нелинейности, а именно концентрированности, функции принадлежности посылки или заключения, кроме отмеченного, приводит к изменению детализации функции при дискретизации аргумента. Чем выше степень, тем больше различие в детальности описания окрестности точки, охватываемой правилом, и отдаленной области, изменяется динамика перемещения масс при изменении входных переменных, что существенно сказывается на выводе методом центра тяжести (COG) и центра сумм (COS).

Возможно, наилучших результатов можно добиться, настраивая каждую отдельную функцию принадлежности на соответствующее ей окружение отдельно и введя асимметрию в описание принадлежности, однако это также вопрос отдельного исследования. В нашем случае калибровка правил может выполняться, используя различные механизмы обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zadeh, Lotfi A. Fuzzy Sets / Lotfi A. Zadeh // *Information & Control*. – 1965. – Vol. 8. – P. 338 – 353.
2. Werbos, P.J. The Roots of Backpropagation: From Ordered Derivatives to Neural Networks and Political Forecasting / P.J. Werbos // John Wiley & Sons, Inc., 1994.
3. Slany, W. Fuzzy Constraint Relaxation Techniques for Knowledge-Based Scheduling / W. Slany // *Proceedings of the First European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies*; Hans-Jürgen Zimmerman (ed.), Sept. – Aachen, Germany, 1993. – P. 1124 – 1127.
4. Grabot, B. Dispatching Rules in Scheduling: A Fuzzy Approach / B. Grabot and L. Geneste // *International Journal of Production Research*. – 1994. – Vol. 32, № 4. – P. 903 – 915.
5. Tsujimura, Yasuhiro, Seung Hun Park, In Seong Chang and Mitsuo Gen. An Effective Method for Solving Flow Shop Scheduling Problems with Fuzzy Processing Times // *Computers and Industrial Engineering*. – 1993. – Vol. 25(1 – 4). – P. 239 – 242.
6. Gen, Mitsuo, Kenichi Ida, and Chunhui Cheng. Multirow machine layout problem in fuzzy environment using genetic algorithms // *Proceedings of the 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 1995. – P. 519 – 523.
7. Kashiwagi, Dean T. Application of backward chaining, fuzzy logic, and the management of information to procurement of facility systems/services / Dean T. Kashiwagi, C. Moor William. – *Proceedings of the 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 1995. – P. 399 – 403.
8. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION AND TECHNICAL COMMITTEE No. 65: INDUSTRIAL PROCESS MEASUREMENT AND CONTROL SUB - COMMITTEE 65 B: DEVICES. – 1131 - PROGRAMMABLE CONTROLLERS. – Part 7: Fuzzy Control Programming, 1997. – 53 p.
9. Driankov, Hellendoorn, Reinfrank, An introduction to fuzzy control. – Springer-verlag, 1993.
10. Trofimov, V. Algorithm of ecological monitoring by fuzzy production rules / V. Trofimov, A. Gloukhov, D. Gloukhov // *2-nd International Conference Ecology and Society's Development Abstracts*. – St.P.: МАНЭБ, 1997. – P. 166.
11. Глухов, Д.О. Экспертная система на нечетких продукционных правилах для обследования сложного объекта / Д.О. Глухов // *Сб. докл. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям*. – СПб., 1998. – Т. 2. – С. 174 – 176.
12. Glukhov, D.O. Dynamic expert system by fuzzy inference rules to automations an examination of complex objects / D.O. Glukhov // *Budownictwo i Inzynieria Srodowiska*. – Zielonogorsk: Politechnika Zielonogorska, 1998. – P. 105 – 109.
13. Глухов, Д.О. Мониторинг по нечетким продукционным правилам в сложных динамических системах с изменяющейся структурой / Д.О. Глухов, А.О. Глухов, В.В. Трофимов // *Вестн. фак. менеджмента СПбГУ – СПб.: СПбГУ*, 1998. – 5 с.

Поступила 12.02.2009