

СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО *LP*-ВЫВОДА¹

А.Н. Шмарин (*tim-shr@mail.ru*)

Воронежский государственный университет, Воронеж

Представлена программная реализация системы нечеткого *LP*-вывода. Рассмотрены вопросы реализации соответствующих компонентов. Полученные результаты могут быть использованы для создания интеллектуальных программных систем, минимизирующих количество ресурсоемких запросов о состоянии предметной области.

Ключевые слова: *LP*-вывод, бинарное отношение, нечеткая логика, большие данные, алгоритмы, программная реализация.

Введение

С увеличением объемов и сложности обрабатываемой информации все более актуальным становится использование систем искусственного интеллекта. При этом одной из наиболее распространенных моделей представления знаний является продукционная [Джарратано и др., 2007]. Алгоритмы поиска решений в таких системах основаны на механизме логического вывода. На практике существует большое число задач принятия решений в условиях неопределенности, для которых получение информации о состоянии предметной области является ресурсоемкой операцией. Такие задачи возникают, например, когда робот исследует поверхность другой планеты. Если цель робота состоит в том, чтобы добраться до определенной скалы, но будущий маршрут является наблюдаемым лишь отчасти, то робот должен попытаться выработать оптимальное решение, касающееся того, как достичь цели с учетом ограниченности ресурсов, доступных для дополнительной разведки местности. Другим примером, в котором стоимость получения новой информации может быть высокой, является коммерческая медицина. Для минимизации издержек, необходимо находить приемлемый способ лечения с помощью минимального количества анализов, выполненных за минимальное время. Задержка в предоставлении лечения, в целях проведения дополнительных анализов,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-05341).

приводит к увеличению затрат; между тем пациент, не дождавшись помощи, может умереть. Стоимость дополнительных исследований является существенной и в сфере разведки полезных ископаемых. Может оказаться, что более выгодное решение состоит в том, чтобы приступить к бурению скважины, если уверенность в успехе составляет 95%, чем потратить еще сотни тысяч долларов, чтобы добиться 98% уверенности.

С фактором ресурсоемкости операций получения данных, необходимых для принятия решения, связана задача минимизации числа запросов о состоянии предметной области в ходе логического вывода. Данная задача является *NP*-трудной [Махортов и др., 2013]. Для достижения глобальной минимизации числа внешних запросов, предложен общий метод *LP*-вывода [Махортов, 2009а]. К сожалению, он обладает экспоненциальной вычислительной сложностью относительно числа атомарных фактов в базе знаний. Идея кластерно-релевантного *LP*-вывода [Махортов, 2009b], основана на вычислении специфических оценок (показателей релевантности) для ограниченного подмножества продуктов и на обобщении полученных оценок на все множество продуктов. Исследования и эксперименты показывают [Болотова и др., 2011], что при использовании метода *LP*-вывода, по сравнению с обычным обратным выводом, снижение числа внешних запросов составляет в среднем 15–20%.

Ранее [Шмарин и др., 2015] были рассмотрены структурные свойства разбиения бинарного отношения, на основании которых можно выбирать для анализа такое подмножество продуктов, которое наиболее существенно влияет на показатель релевантности.

В настоящей работе представлена программная реализация системы нечеткого *LP*-вывода – обратного логического вывода на основе нечетких *LP*-структур, которая осуществляет поиск решения, обладающего наибольшей степенью истинности, и минимизирует (в ходе вывода) число запросов о неизвестных состояниях предметной области. Представленный метод может быть использован для создания инструментов поддержки принятия решений в условиях неопределенности и высокой стоимости получения дополнительной информации.

1. О методе нечеткого *LP*-вывода

Пусть задано конечное множество $F = \{f\}$. На его основе определим атомно-порожденную ограниченную алгебраическую решетку $L = \lambda(F)$, где λ – функция-булеан [Салий и др., 1997]. На решетке зададим дополнительное бинарное отношение $R = \{r = (\tau, f) : \tau \in L, f \in F\}$, являющееся каноническим [Болотова и др., 2011].

Применительно к продукционным системам, такое отношение R соответствует множеству productions, F (множество атомов решетки) соответствует элементарным фактам продукционной системы, а сама решетка L соответствует множеству предпосылок и заключений productions.

Атом x решетки L называется начальным при отношении R , если в R нет ни одной такой пары (τ, f) , что $\sim(x \in \tau)$ и $x = f$.

Обозначим множество всех начальных атомов решетки как F_{init} :
 $F_{init} = \{f \in F : \nexists (\tau, f) \in R, \tau \in L\}$. Также обозначим множество всех атомов решетки, не являющихся начальными:
 $F_{notinit} = \{f \in F : \exists (\tau, f) \in R, \tau \in L\}$.

Упорядоченная пара $(\alpha, \beta), \alpha \in L, \beta \in L$ называется дистрибутивно связанной отношением R , если существует такое множество $\{(\alpha_1, \beta_1), \dots, (\alpha_p, \beta_p)\}$, что $\forall i = \overline{1, p}$ выполняется следующее условие:
 $\alpha_i \subseteq \alpha \wedge \beta \subseteq \beta_i \wedge ((\alpha_i = \beta_i \in L) \vee ((\alpha_i, \beta_i) \in R))$.

Упорядоченная пара $(\alpha, \beta), \alpha \in L, \beta \in L$ называется логически связанной отношением R , если она дистрибутивно связана отношением R , либо существует упорядоченный набор $(\alpha, \gamma_1, \dots, \gamma_l, \beta), \gamma_i \in L, i = \overline{1, l}$ такой, что каждая пара в последовательности $(\alpha, \gamma_1), (\gamma_1, \gamma_2), \dots, (\gamma_{l-1}, \gamma_l), (\gamma_l, \beta)$ дистрибутивно связана отношением R . Если пара (α, β) логически связана отношением R , то β будем называть образом α при отношении R , а α – прообразом β при отношении R . Прообраз в атомно-порожденной решетке называется начальным, если все его атомы являются начальными (при отношении R).

Введем отображение $M_R : R \rightarrow [0, 1]$, которое каждому элементу отношения R ставит в соответствие степень истинности:
 $M_R = \{(\alpha, \mu) : \alpha \in R, \mu \in [0, 1]\}$.

Обозначим также $M_{init} : F_{init} \rightarrow [0, 1]$ – отображение, сопоставляющее каждому начальному атому решетки некоторую степень истинности.

Применение отображения M_{init} соответствует выполнению запроса о неизвестном состоянии предметной области и может оказаться ресурсоемкой операцией. Таким образом, задача нечеткого LP -вывода заключается в том, чтобы в некотором подмножестве $X \subseteq F_{notinit}$ не начальных атомов решетки, найти элемент, обладающий наибольшей степенью истинности $M_R(X)$, применив при этом отображение M_{init} как можно меньшее

число раз. Данный элемент будет соответствовать решению, имеющему наибольшую степень истинности.

Процесс поиска состоит из нескольких шагов. В первую очередь, для каждого атома решетки, принадлежащего множеству $X \subseteq F_{notinit}$, выполняется поиск начальных прообразов при отношении R (то есть поиск логически связанных отношением R подмножеств начальных атомов решетки). Затем, на основе результатов поиска, вычисляются степени истинности соответствующих атомов решетки. В заключение, выбирается атом с наибольшей степенью истинности.

Предположим, что заданы некоторые бинарные операции T и S такие, что T является операцией t -нормы, а S – соответствующей ей операцией t -конормы [Пегат, 2013]. Вычисление степеней истинности выполняется для всевозможных атомов $x \in X$ и соответствующих им начальных прообразов $\alpha \in L$. Для вычисления используются отображения M_R , M_{init} , операции t -нормы и t -конормы, а также обобщенное правило вывода *modus ponens*.

По каждому атому $x \in X$, формируется либо восстанавливается из кэша, подмножество $R_1 : R_1 \subseteq R$ элементов отношения R , которое логически связывает выбранный атом x и начальный прообраз α . Нахождение степени истинности некоторого не начального атома f , участвующего в логической связи α и x , начинается с выбора подмножества элементов, содержащих атом f в своей правой части: $R_f = \{(\tau, f) \in R_1, \tau \in L\}$. Обозначим мощность данного подмножества символом $n = |R_f|$. Тогда, $R_f = \{r_1, \dots, r_n\} = \{(\tau_1, f), \dots, (\tau_n, f)\}$, где $\tau_i \in L$, $1 \leq i \leq n$. По определению, элементы τ_i решетки L состоят из ее атомов. То есть, $\tau_i = \{g_{i,1}, \dots, g_{i,m_i}\}$, где $g_{i,j} \in F$ – атомы решетки, m_i – число таких атомов в τ_i , $1 \leq j \leq m_i$, $1 \leq i \leq n$.

Используя введенные обозначения, можно выразить формулы для вычисления $\mu(f)$ – степени истинности некоторого атома f . Если $f \in F_{notinit}$, то атом является не начальным и его степень истинности задается рекурсивно:

$$\mu(f) = S\left(T\left(T\left(\mu(g_{1,1}), \dots, \mu(g_{1,m_1})\right) \cdot M_R(r_1)\right), \dots, T\left(T\left(\mu(g_{n,1}), \dots, \mu(g_{n,m_n})\right) \cdot M_R(r_n)\right)\right),$$

где $r_i = (\tau_i, f) \in R_f$, $\tau_i = \{g_{i,1}, \dots, g_{i,m_i}\}$, $g_{i,j} \in F$, $1 \leq j \leq m_i$, $1 \leq i \leq n$, T и S – операции t -нормы и t -конормы соответственно.

Если же $f \in F_{init}$, то есть атом является начальным, то $\mu(f) = M_{init}(f)$. Применение отображения M_{init} к некоторому начальному атому, означает нахождение для этого атома соответствующей степени истинности. Поскольку атом является начальным, его степень истинности невозможно вывести на основе отношения R или степеней истинности других атомов решетки.

Нахождение такой степени истинности эквивалентно внешнему запросу о неизвестном состоянии предметной области. Минимизация количества подобных запросов может быть достигнута за счет специального порядка применения отображения M_{init} к начальным атомам решетки. В первую очередь данное отображение следует применять к тем начальным атомам, которые входят в наибольшее число найденных прообразов. Кроме того, соответствующие прообразы должны содержать как можно меньшее число элементов.

2. Реализация системы нечеткого LP-вывода

Разработанная программная система нечеткого LP-вывода является развитием пакета *LPExpert* [Махортов, 2009а]. Она содержит следующие компоненты: ядро логического вывода, модуль работы с нечеткими LP-структурами. Архитектура системы представлена на рис. 1.

Графический интерфейс пользователя реализован на C++ и основан на фреймворке Qt4 [Бланшет и др., 2008]. Компилятор базы знаний реализован с помощью GNU Flex (генератора лексических анализаторов) и GNU Bison (генератора синтаксических анализаторов). Для построения нечеткой LP-структуры реализована классовая иерархия, основанная на базовом классе *LPStructure*. Процесс вычисления показателей релевантности, а также выбор очередного вопроса, выполняется в отдельном потоке, который синхронизируется с основным потоком графического интерфейса пользователя.

На рис. 2 показан алгоритм главного рабочего процесса системы – проведение экспертизы. Вначале, выполняется загрузка модели знаний, которая компилируется в промежуточное представление LP-структуры. Затем на ее основе выполняется поиск прообразов и вычисление их показателей релевантности. Следующий этап – нахождение решения целевой проблемы, которое имеет наибольшую степень истинности. В ходе данного этапа, пользователю задаются вопросы о необходимых, но неизвестных, состояниях предметной области. Порядок задания вопросов определяется с использованием ранее найденных показателей релевантности прообразов: чем выше показатели релевантности, тем раньше будет задан вопрос. В первую очередь задаются вопросы, наиболее существенно влияющие на процесс поиска решения. Этот подход позволяет максимизиро-

вать число неизвестных состояний предметной области, которые перестают влиять на процесс поиска. Таким образом, выполняется статистическая минимизация количества вопросов, задаваемых пользователю в ходе экспертизы.

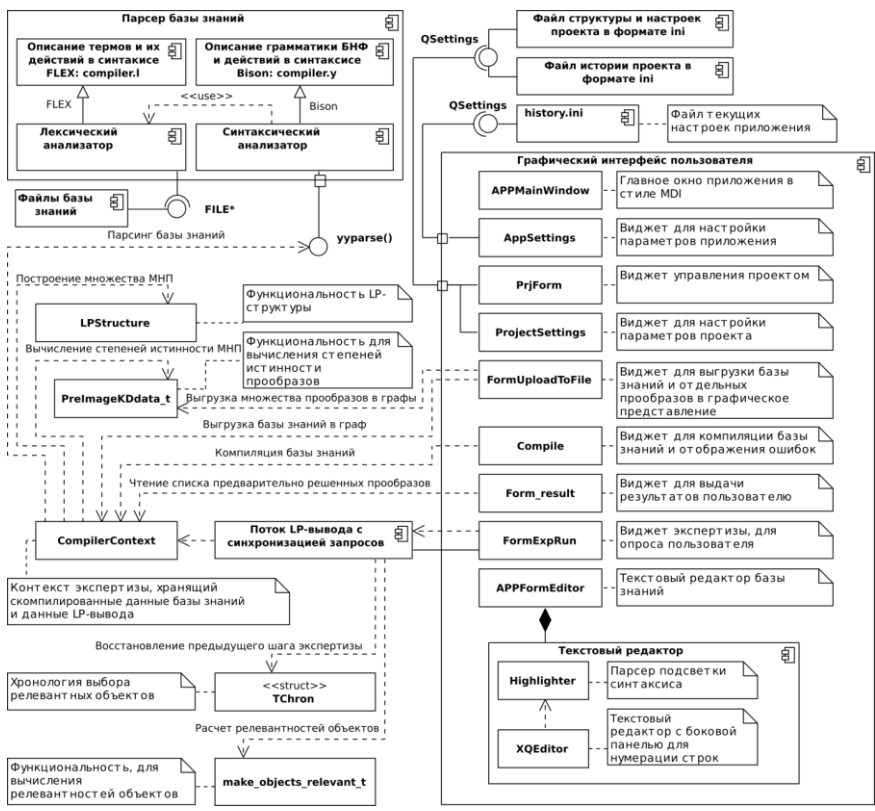


Рис.1. Архитектура системы нечеткого LP-вывода

Заключение

Рассмотрена компьютерная реализация системы нечеткого *LP*-вывода. Она позволяет минимизировать число выполняемых в ходе экспертизы запросов о неизвестных состояниях предметной области, а также находить решение целевой проблемы, имеющее наибольшую степень истинности. На основе данной системы и последних теоретических результатов могут быть созданы более совершенные инструменты для эффективной работы экспертных систем, оперирующих данными большого объема.

Представленный подход может быть применен для ускорения обратного вывода в интеллектуальных системах продукционного типа.

Список литературы

- [Бланшет и др., 2008] Бланшет Ж., Саммерфилд М. Qt 4. Программирование GUI на C++. – М.: КУДИЦ-Пресс, 2007.
- [Болотова и др., 2011] Болотова С.Ю., С.Д. Махортов Алгоритмы релевантного обратного вывода, основанные на решении продукционно-логических уравнений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. №2.
- [Джарратано и др., 2007] Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. – М.: Вильямс, 2007.
- [Махортов и др., 2013] Махортов С.Д., Шмарин А.Н. Оптимизация метода *LP*-вывода // Нейрокомпьютеры. Разработка, применение. 2013. № 9.
- [Махортов, 2009а] Махортов С.Д. Основанный на решетках подход к исследованию и оптимизации множества правил условной системы переписывания термов // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2009. Т. 13.
- [Махортов, 2009b] Махортов С.Д. Интегрированная среда логического программирования *LPExpert* // Информационные технологии. 2009. Т. 12.
- [Пегат, 2013] Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.
- [Салий и др., 1997] Салий В.Н., Богомолов В.А. Алгебраические основы теории дискретных систем. – М.: Физматлит, 1997.
- [Шмарин и др., 2015] Шмарин А.Н. Махортов С.Д. О приближенных оценках количества слоев без циклов в задаче нечеткого *LP*-вывода // Нейрокомпьютеры. Разработка, применение. 2015, № 12.