

УДК 519.7+510.635+004.8(063)

ДЕДУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

С.Н. Васильев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: vassilyev_sn@mail.ru

Ключевые слова: логические уравнения, интеллектуализация цифровых систем, модельные аналогии, планирование действий.

Аннотация: Разработан метод дедуктивного решения одного класса логических уравнений. К рассматриваемому классу уравнений сводится ряд задач автоматизации синтеза теорем о модельных аналогиях и планирования действий автономных мобильных объектов.

1. Введение

Разработан дедуктивный метод решения логических уравнений вида
(1) $X \rightarrow (A \rightarrow B)$,

где A и B – известные члены уравнения, X подлежит отысканию, а импликация $A \rightarrow B$ может пониматься, например, как утверждение о следовании из свойства A одной математической модели аналогичного свойства B другой модели или как утверждение о разрешимости задачи B средствами A .

Метод основан на дедукции в сочетании с гипотезированием и отличается от известных методов (см., например, [1-3]) типом уравнений и тем, что для формирования решения X применяется логическое исчисление. Применяются исчисление J в языке L позитивно-образованных формул [4], а также его расширение J^* . Исчисление J содержит единственное правило вывода (далее – правило В) и является полным относительно выводимости [4]. Правило В является одноместным логически эквивалентным преобразованием (первопорядковых или пропозициональных формул языка L).

В исчислении J^* , помимо правила В, используется второе одноместное правило – правило гипотезирования (далее – правило Г). Правило Г применяется для формирования дополнительных посылок доказываемого утверждения, например, в ситуации исчерпания применимости правила В.

В литературе популярным методом автоматизации дедукции является метод резолюций [5] с представлением знаний в клаузальной форме (Clausal Form). Метод резолюций является вполне машинно-ориентированным, но из-за такой формы представления знаний естественная эвристическая структура знания разрушается.

Нерезолюционные методы, не нуждающиеся в клаузальной форме представления знаний, известны. Таковыми являются, например, методы, основанные на так называемых

мых исчислениях связи (Connection Calculi). Однако они используют сразу несколько и к тому же многоместных правил вывода. Так, метод NanoCoP [6] применяет 4 трехместных правила дедукции, что повышает размерность пространства поиска выводов. Помимо одноместности, правила обработки знаний в исчислениях J и J^* являются крупноблочными и не используют клаузуальной формы представления знаний, что существенно повышает совместимость языка L и исчислений с эвристическими и другими нелогическими средствами.

2. Задачи синтеза теорем о модельных аналогиях

Автоматизация синтеза текстов содержательных теорем известна как проблема более трудная, чем их автоматическое доказательство. Разработан метод автоматизации синтеза теорем путем решения так называемых уравнений переноса в классе логических равенний (1). К уравнениям переноса сводимы задачи вывода широкого класса теорем о модельных аналогиях.

Примерами теорем о модельных аналогиях являются теоремы сохранения, т.е. теоремы о следовании из свойства A некоторой модели аналогичного свойства B другой модели. Сохранение свойств обеспечивается благодаря тем или иным межмодельным связям, например, с помощью преобразований переменных одной модели в переменные другой. Эти связи и сами модели должны удовлетворять искомому условию X как решению уравнения (1). Направления действия преобразований могут быть разными и не совпадать с направлением сохранения свойств.

Свойства A, B в теоремах сохранения являются однотипными, т.е. определение одного из этих свойств получается из определения другого заменой всех объектов одной модели соответствующими объектами другой в предположении, что модели однотипны, т.е. принадлежат одному классу. В алгебре такие свойства именуются свойствами одной сигнатуры [7]. В отличие от известных в искусственном интеллекте постановок задач автоматизации правдоподобных рассуждений на основе прецедентов (Case-based Reasoning), требуется строгая доказуемость синтезированной теоремы.

В динамике систем примерами теорем о модельных аналогиях, помимо теорем сохранения, являются теоремы сравнения [1]. В них направление преобразования противоположно направлению переноса свойств и это преобразование, именуемое вектор-функцией сравнения [1], на процессах изучаемой системы мажорируется соответствующими процессами вспомогательной системы. В теоремах сравнения при однотипности моделей в части уравнений движения определения их свойств A, B могут отличаться типами оценок решений. Например, если B – свойство устойчивости по Ляпунову изучаемой системы, то свойство A может отличаться от него, будучи свойством полуустойчивости сверху вспомогательной системы (оценка состояния по норме, используемая в определении B , меняется на прямую оценку вектора состояния сверху в определении A).

Мы рассматриваем более широкий класс теорем о модельных аналогиях – теоремы о переносе. В отличие от теорем сохранения и сравнения, не предполагается, что рассматриваемые модели одного типа, а свойства A и B тоже не обязательно однотипны и, хотя структуры формул A и B языка L предполагаются одинаковыми, при переходе от A к B не обязательно наследование структурных связей конъюнкции и универсального смысла структурных типовых кванторов. Такие уравнения (1) называем урав-

нениями переноса, а свойства – УП-допустимыми (допустимыми в Уравнении Переноса).

Рассматривается представление утверждения $\neg(X \rightarrow (A \rightarrow B))$ в языке L и строится опровержение этого утверждения с помощью правила В. Многошаговый синтез члена X ведется применениями правила Г к базам фактов формулы языка L . Рассматриваемая на очередном шаге база наращивается дополнительной закономерностью

$$(2) \quad \forall x(C(x) \rightarrow (\exists y_1 D_1(x, y_1) \Phi_1 \vee \dots \vee \exists y_n D_n(x, y_n) \Phi_n)),$$

где $C(x)$ – содержимое базы к моменту очередного применения правила Г, а $\exists y_i D_i(x, y_i)$ – вопросы к ней (понятия «база», «вопросы к базе» и др. см. в [4]). Формула X синтезируется в классе формул языка L , наследующих структуру рассматриваемых свойств.

Эта эвристика структурной аналогии X с УП-допустимыми свойствами A, B позволяет упрощать гипотезы (2) до более легко выполнимых с одноэлементной дизъюнкцией. Подформулы Φ_i доопределяются на следующих шагах применения правил В и Г. В частности, они могут оказаться пустыми выражениями, если вывод может быть завершен применениями только правила В. Синтезированное решение X уравнения переноса допускает расщепление в набор более простых условий, в совокупности достаточных для выполнимости X (см., например, [3]).

По сравнению с теоремами сохранения и сравнения, в классе теорем переноса, помимо отказа от однотипности моделей и свойств, существенно расширен и класс межмодельных связей, в терминах которых условия переноса формулируются. Модельные связи могут задаваться и нефункциональными отношениями, не имея направления действия. Вариативность условий синтезируемых теорем о переносе расширяется и благодаря отказу от наследования всех структурных связей и смысла всех структурных типовых кванторов при переходе от A к B .

Пусть, например, в изучаемой динамической системе требуется локальная достижимость целевого множества, т.е. достижимость из фиксированного начального состояния (свойство B), а в другой однотипной системе, связанной с первой преобразованиями состояний, обнаружено свойство A глобальной достижимости (т.е. достижимость из любых начальных состояний). Тогда очевидно в условиях теоремы переноса будет возможно требование глобального траекторного гомоморфизма заменить условием локального гомоморфизма.

Хотя синтезируемые тексты теорем о переносе заведомо корректны, их прямое доказательство может быть более востребованным конечным пользователем в сравнении с общим обоснованием корректности решения уравнения переноса. Предлагаемое пользователю доказательство в отличие от [3] извлекается непосредственно из опровержения утверждения $X \& (A \& \neg B)$ по ходу многошагового синтеза посылки X .

3. Задачи планирования действий

Вычислительная сложность планирования действий, например, в проблематике маршрутизации мобильных средств, возрастает вместе с размерностью задачи и, как правило, мотивирует использование как эвристических и приближенных, так и логических методов [8].

Один из известных классов логических методов планирования поведения автономных объектов основан на подходе Model Checking [9], в котором ищется дискретная

модель, удовлетворяющая некоторому набору ограничений, накладываемых на поведение объекта логических спецификаций. С использованием графовых структур переходов в множестве состояний объекта строится такая (например, автоматная) модель функционирования объекта, на которой упомянутые логические спецификации были бы выполнены (истинны).

В нашем случае интеллектуальное поведение автономного объекта формируется не способом построения интерпретации, в которой был бы выполнен набор логических формул, задающих требования к поведению объекта, а путем автоматического доказательства теорем. Рассматриваются теоремы $A \rightarrow B$ о выводимости спецификации B целевого состояния объекта управления из спецификаций A «вычислительной обстановки». Помимо декларативных знаний о предметной области, спецификация A включает процедурные знания о функциональных возможностях конструктивных средств, доступных для достижения цели управления [10]. Если в отличие от A , разнообразие спецификаций B ограничено формулами, аналогичными (2), но с пустыми подформулами Φ_i , то вывод в интуиционистской семантике [11] теоремы $A \rightarrow B$ можно заменить опровержением этой теоремы в исчислении J и обеспечивается извлекаемость из этого опровержения плана достижения цели [4]. При этом использование исчисления J^* позволяет планировать действия объекта управления в условиях неполноты средств решения целевой задачи путем привлечения дополнительных средств.

В итоге набор X синтезированных гипотез суть не только декларативные посылки, дополнительно задействуемые для вывода утверждения $A \rightarrow B$, но и спецификации дополнительных конструктивных средств достижения цели B из начальной обстановки A . Это особенно важно в задачах с неопределенностью и/или конфликтностью среды функционирования, в т.ч. в проблематике группового патрулирования роботами зоны возможного проникновения нарушителя, при планировании действий по их безопасному переходу в оперативный район, по групповому преследованию ими мобильных объектов противника, уклонению от них и т.п. [12, 13].

Рассмотрены примеры планирования поведения мобильных объектов. В отличие от задач вывода теорем об аналогиях, где для гипотезирования была применима эффективная и довольно универсальная многошаговая эвристика структурной аналогии решения X УП-свойствам A, B , в задачах планирования действий набор методов "разбора" случаев из (2) существенно более разнообразен, но подформулы Φ_i в формулах (2), возникающих при применении правила Γ (не путать с пустыми подформулами из B) обычно пустые.

В ходе доказательства теорем $A \rightarrow B$ о достижимости цели управления потребность в синтезе спецификаций функциональных возможностей дополнительных средств может возникать не только в ситуации невыводимости целевой спецификации B (при недостаточности посылок A), но и из-за истощения временных и других ресурсов, а также прочих затруднений. В случае невыводимости B из A гипотеза (2) является необходимым условием продолжимости вывода, т.е. необходимым условием достижимости цели управления.

Разбор в (2) условий продолжения дедукции на приемлемость и/или предпочтительность может выполняться логико-эвристическими, оптимизационными и другими методами с привлечением бортовых и внешних средств, включая взаимодействие с другими агентами в автоматически синтезируемой системой целенаправленном диалоге с опциями (2). Могут учитываться не только данные от агентов-сенсоров, но и информация агентов об их готовности к тем или иным действиям, задания «директивных» агентов (приказы, разрешения) и т.п. Полезны и непрерывные модели, в частности, с

постановками задач оптимального управления, характеризующихся приемлемой вычислительной сложностью [14].

Таким образом, численно-аналитические и другие методы формирования управления автономными объектами интегрируются путем логического планирования их использования. В качестве управления верхнего уровня (в логико-лингвистической форме) выступает план задействования разных средств достижения цели управления в процессе последовательного решения «краевых задач» нижнего (исполнительного) уровня.

4. Заключение

Разработан дедуктивный метод решения уравнений (1). К области применения метода в классе уравнений переноса относятся задачи автоматизации вывода и обоснования теорем о модельных аналогиях. Автоматизация синтеза самих текстов содержательных теорем известна как проблема более трудная, чем их автоматическое доказательство. Метод позволяет синтезировать теоремы о модельных аналогиях и получать их прямое доказательство на языке конечного пользователя. Получены новые теоремы о межмодельном переносе свойств дискретных и непрерывных математических моделей, вполне сопоставимые с известными, получаемыми чисто творчески.

Другие применения метода относятся к задачам планирования действий автономных мобильных объектов. Из доказательства достижимости цели управления извлекается план действий, в том числе с синтезом спецификаций дополнительных средств, недостававших или повышающих качество достижения цели в постановках задач индивидуального и группового управления.

Метод решения уравнений (1) использует логическое исчисление J из [4] и его расширение. Правила обработки знаний в этих исчислениях являются крупноблочными, одноместными и не используют клаузальной формы представления знаний, что снижает комбинаторность пространства поиска выводов и существенно повышает совместимость языка и исчислений с эвристическими и другими нелогическими средствами.

Представляется перспективным исследование возможностей метода в других задачах интеллектуализации цифровых систем, в частности, в задачах персонализации дистанционного обучения с учетом текущей модели обучаемого [15].

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-29-04415).

Список литературы

1. Matrosov V.M. Comparison Method in System's Dynamics // *Equat. Différent. et Fonctionnelles Non Linéaires*. Paris: Herman, 1973. P. 407-445.
2. Mints G., Hoshi T. Logical Equation in Monadic Logic // *J. of Math. Sciences*. 2009. Vol. 158, No.5. P.741-752.
3. Vassilyev S.N., Druzhinin A.E., Morozov N.Yu. Derivation of Preservation Conditions for Properties of Mathematical Models // *Doklady Mathematics*. 2015. Vol. 92, No.3. P. 658–663.
4. Васильев С.Н. Формализация знаний и управление на основе позитивно-образованных языков // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2008. № 1. С. 3-17.
5. Robinson J.A. A Machine-oriented Logic Based on the Resolution Principle // *J. ACM*. 1965. No. 12. P. 23-41.
6. Otten J. NanoCoP: A Non-clausal Connection Prover // *Internat. Joint Conference on Automated Reasoning*. Springer Internat. Publ. 2016. P. 302-312.

7. Мальцев А.И. Алгебраические системы. М.: Наука. 1970. 329 с.
8. Aksaray D., Vasile C.-I., Belta C. Dynamic Routing of Energy-Aware Vehicles with Temporal Logic Constraints // Proceedings of the International Conference ICRA - Robotics and Automation. Stockholm, Sweden. 2016. P. 3141-3146.
9. Lomuscio A., Michaliszyn J. Verifying Multi-Agent Systems by Model Checking Three-valued Abstractions // Proceedings of the 14th International Conference on AAMAS – Autonomous Agents and Multiagent Systems. Istanbul, Turkey, 2015. P. 189-198.
10. Бузиков М.Э., Васильев С.Н. Гибридная технология интеллектуального управления // Сб. тезисов докладов «Ломоносовские чтения - 2018. Секция физики». М.: Физ. фак. МГУ им. М.В. Ломоносова. 2018. С. 112-114.
11. Такеути. Теория доказательств. 1978. М.: Мир. 412 с.
12. Leahy K., Zhou D., Vasile C.-I., Oikonomopoulos K., Schwager M., Belta C. Provably Correct Persistent Surveillance for Unmanned Aerial Vehicles Subject to Charging Constraints // Experimental Robotics. 2016. P. 605-619.
13. Zabarankin M., Uryasev S., Murphey R. Aircraft Routing under the Risk of Detection // Naval Research Logistics. 2006. Vol. 5, No. 8. P. 728-747.
14. Galyaev A.A., Maslov E.P., Yakhno V.P., Abramyan T.G. Evasion of a Moving Object from Detection by a System of Observers: Sensor-maneuvering Search Means // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78, No. 8. P. 1449-1459.
15. Vassilyev S.N., Smirnova N.V., Sukonnova A.A., Shvarts A.Yu. Methods of Knowledge Representation and Processing in Control of Intelligent Tutoring Systems // Intern. Journal on Management and Production Engineering Review. 2011. Vol. 3, No. 3. P. 71-84.