

Ю. О. Герман

Белорусский государственный технологический университет

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ «ВИРТУАЛЬНОГО» УЧИТЕЛЯ

Приведено описание формализованной модели поведенческой базы знаний «виртуального» учителя в системе электронного обучения. Модель состоит из логических формул, включающих состояния «учителя» и сигналы, поступающие от «ученика». Задача вывода, решаемая на поведенческой базе знаний, требует найти новое состояние «учителя» в зависимости от предполагаемого текущего состояния «ученика» и самого «учителя». Рассмотрен вариант с противоречивой базой или нечеткой поведенческой базой знаний. Показано, как сформулировать общую математическую задачу, что позволяет с единых позиций строить поведение «виртуального» учителя в электронной обучающей системе. Задача вывода решения в противоречивой базе знаний решается с позиций отыскания максимального непротиворечивого ее подмножества, из которого выводима доказываемая формула.

Ключевые слова: база знаний, обучающая система, «виртуальный» учитель, вывод.

Yu. O. German

Belarusian State Technological University

A FORMAL MODEL OF «VIRTUAL» TUTOR

There is given a formalized description of the behavioral knowledge base model of the virtual tutor in electronic learning system. The model consists of a number of logical formulas including the tutor's states and the signals coming from the disciple. An inference problem solved on the basis of the behavioral knowledge base requires to find a new state of the tutor in dependence of his current state and the state of the disciple. The paper deals with the contradictory and fuzzy knowledge bases and suggests a new general problem formulation enabling one to build a tutor behavior in electronic learning system. The inference problem in contradictory system is solved on the basis of finding a maximum non-contradictory subset of the knowledge model providing sound proving for the theorem.

Key words: knowledge base, learning system, “virtual” tutor, inference.

Введение. Современное программное обеспечение для e-обучения представлено как простыми HTML страницами, так и сложными системами управления обучением и учебным контентом (Learning Content Management Systems), использующимися в корпоративных компьютерных сетях. Сложные современные системы e-обучения включают (в том или ином виде и объеме) мультимедийный контент, поддержку интерактивного общения на естественном языке, развитую систему поиска информации, оценки знаний, средства обучения решению задач, техническую поддержку общения на разных уровнях и т. д.

В организации электронного обучения в настоящее время стандартом является SCORM (Shareable Content Object Reference Model) – международный стандарт для обмена учебными материалами на базе адаптированных спецификаций. Цель SCORM можно определить как независимость содержания электронного учебника от программы управления, что обеспечивает многократность использования учебных

модулей, их переносимость и модификацию. В настоящее время рынок обучающих электронных систем представлен разными по сложности и возможностям адаптации к «личности» обучаемого программными системами. Современные тенденции развития рынка обучающих e-систем направлены в сторону универсализации и увеличения функциональности систем. Использование коммерческих систем управления электронным обучением не доступно большинству отечественных вузов по причине их высокой стоимости и необходимости продления лицензии на каждый учебный год. Системы с открытым исходным кодом позволяют реализовать тот же набор возможностей, что и коммерческие с существенно меньшими затратами и большей эффективностью. В конце прошлого века в связи с бурным развитием теоретико-прикладных аспектов искусственного интеллекта Брауном и Венгером было введено понятие «интеллектуальные обучающие системы» (ITS – Intelligent Tutoring System) [1, 2]. Ранее

системы такого рода существовали под названием CAES (Computer-Aided Educational Systems), что не передавало роль искусственного интеллекта в той мере, в какой эта роль, несомненно, вышла на передний план в последнее время. Архитектура ITS состоит из трех модулей: модуля знаний (по предметной области), модуля «учителя» и модуля «ученика». Последние два задают поведение участников процесса обучения. Для описания поведения используются модели (знаний) на основе правил (rule-based models), а также модели на основе ограничений (constraint-based models).

Развитая система электронного on-line обучения строится как приложение, интегрирующее процессы «учителя» и «ученика», поведение которых организуется в соответствии с поведенческой базой знаний [3]. Основная задача, которая стоит перед разработчиками таких систем и рассматривается в настоящей работе, заключается в создании и развитии формальных средств для синтеза поведения «виртуального» учителя в различных контекстах процесса обучения. Для формального представления поведенческой базы знаний необходимо ввести множество сигналов, поступающих от «ученика», и множество состояний «учителя». Отслеживание процесса обучения сводится к определению следующих признаков (состояний «ученика» – A_i) [4]:

- 1) учащийся бессистемно просматривает материал (A_1);
- 2) учащийся возвращается к ранее пройденным фрагментам учебника (A_2);
- 3) учащийся остановился на некотором вопросе на долгое время (A_3);
- 4) процесс изучения завершен (инициируется учеником) (A_4);
- 5) ученик плохо отвечает на вопросы (A_5);
- 6) ученик не отвечает на сообщение (сообщение может быть нейтральным) (A_6);
- 7) ученик отказался от прохождения теста (A_7);
- 8) ученик прошел тест успешно (плохо) (A_8);
- 9) ученик слишком быстро просматривает страницы (A_9);
- 10) часто используется хэлпер (помощник) (A_{10});
- 11) выполнен переход на другую (не связанную) тему (A_{11});
- 12) ученик не пользуется хэлпером (A_{12});
- 13) ученик часто переходит к одной и той же странице (A_{13});
- 14) ученик проскакивает через страницы (A_{14});
- 15) ученик задерживается мало времени на более сложных страницах (A_{15});

16) ученик игнорирует инструкции «учителя» (A_{16});

17) ученик игнорирует предложение помощи или запрос (A_{17});

18) выбрана новая тема для изучения (A_{18});

19) истекло контрольное время (A_{19});

Автомат «учитель» может находиться в следующих обобщенных состояниях [4]:

W_{obs} – наблюдение;

W_{contr} – контроль знаний;

W_{distr} – вмешательство;

W_{plan} – оценка состояния и планирование стратегии поведения.

В состоянии «Наблюдение» автомат «учитель» не вмешивается в процесс обучения, но отслеживает поведение ученика, а именно: что просматривает ученик, сколько времени, просматривает ли он материал в некоторой допустимой последовательности или хаотически и т. д. В состоянии «Контроль знаний» выполняется проверка усвоения материала в форме тестов или вопросов. Состояние «Вмешательство» предполагает, что учитель обнаружил отклонение от процесса обучения и требует от ученика выполнить определенные действия, например, вернуться к конкретному материалу, ответить на вопросы (пройти тест), сделать напоминание о том, что поведение ученика контролируется и оценивается и т. п. В состоянии «Оценка состояния и планирование стратегии поведения» выполняется коррекция состояния «учителя».

Перейдем к описанию поведенческой базы знаний системы с помощью формул логики.

Основная часть. Формулы поведенческой базы знаний могут быть представлены следующим (упрощенным) образом:

$$\begin{aligned}
 & W_{obs}(t) \vee W_{distr}(t) \vee W_{contr}(t) \vee W_{plan}(t), \\
 & \neg W_{obs}(t) \vee \neg W_{distr}(t), \neg W_{obs}(t) \vee \neg W_{contr}(t), \\
 & \neg W_{obs}(t) \vee \neg W_{plan}(t), \neg W_{distr}(t) \vee \neg W_{contr}(t), \\
 & \neg W_{distr}(t) \vee \neg W_{plan}(t), \neg W_{contr}(t) \vee \neg W_{plan}(t), \\
 & W_{obs}(t+1) \vee W_{distr}(t+1) \vee W_{contr}(t+1) \vee \\
 & \vee W_{plan}(t+1) \vee Stop, \\
 & \neg W_{obs}(t+1) \vee \neg W_{distr}(t+1), \neg W_{obs}(t+1) \vee \\
 & \vee \neg W_{contr}(t), \neg W_{obs}(t+1) \vee \neg W_{plan}(t+1), \\
 & \neg W_{distr}(t+1) \vee \neg W_{contr}(t+1), \\
 & \neg W_{distr}(t+1) \vee \neg W_{plan}(t+1), \\
 & \neg W_{contr}(t+1) \vee \neg W_{plan}(t+1), \\
 & nil \rightarrow \neg A_1 \& \neg A_2 \& \neg A_3 \& \dots \& \neg A_{19}, \\
 & nil \vee A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee \dots \vee A_{19}, \\
 & Stop \rightarrow \neg W_{obs}(t+1) \& \neg W_{distr}(t+1) \& \\
 & \& \neg W_{contr}(t+1) \& \neg W_{plan}(t+1), \\
 & A_4 \rightarrow Stop, A_{18} \rightarrow W_{contr}(t+1), \\
 & W_{obs}(t) \& A_{10} \rightarrow W_{distr}(t+1) \vee W_{contr}(t+1), \\
 & W_{obs}(t) \& (A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_{11} \vee A_{13}) \rightarrow W_{distr}(t+1), \\
 & W_{obs}(t) \& (A_6 \vee A_7) \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
 & W_{obs}(t) \& A_{10} \rightarrow W_{obs}(t+1),
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& W_{obs}(t) \& A_{12} \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
& W_{obs}(t) \& (A_9 \vee A_{14} \vee A_{15}) \rightarrow W_{distr}(t+1) \vee \\
& \vee W_{contr}(t+1), \\
& W_{obs}(t) \& nil \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
& W_{distr}(t) \& nil \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
& W_{contr}(t) \& nil \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
& W_{plan}(t) \& nil \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
& W_{distr}(t) \& A_5 \rightarrow W_{obs}(t+1) \vee W_{contr}(t+1), \\
& W_{distr}(t) \& (A_6 \vee A_{17}) \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
& W_{distr}(t) \& A_{19} \rightarrow W_{obs}(t+1) \vee W_{plan}(t+1), \\
& W_{contr}(t) \& A_3 \rightarrow W_{plan}(t+1), \\
& W_{contr}(t) \& (A_4 \vee A_8) \rightarrow W_{obs}(t+1), \\
& W_{contr}(t) \& A_{19} \rightarrow Stop, \\
& W_{plan}(t) \& (A_3 \vee A_{19}) \rightarrow W_{obs}(t+1).
\end{aligned}$$

В системе (1) *nil* соответствует отсутствию сигнала или нераспознанному сигналу. Итак, система «учитель – ученик» описывается как система взаимодействующих автоматов, причем поведение автомата «учитель» основано на поведенческой базе знаний, а поведение автомата «ученик» реализуется «учителем» гипотетически (модельно) на основании распознавания состояния «ученика» по сигналам (признакам). «Учитель» работает за «ученика» в том смысле, что принимает решения о его поведении по поступающим сигналам. Рассмотрим, как получить вывод решения в системе. В общем случае эта система может быть противоречивой или нечеткой. Пусть для каждого дизъюнкта D_k известна нечеткая мера p_k принадлежности его к множеству истинных формул (т. е. мера истинности). Пусть далее требуется найти корни $x_1, x_2, \dots, x_n$ и проверить статистическую адекватность ему решения. Для каждого дизъюнкта D_k вводим булеву переменную $q_k \in 0,1$ и две импликации:

$$\begin{aligned}
q_k & \rightarrow D_k, \\
D_k & \rightarrow q_k.
\end{aligned} \quad (2)$$

Потребуем

$$\sum_k (q_k - p_k)^2 / p_k \rightarrow \min. \quad (3)$$

Функционал (3) соответствует формуле для критерия χ^2 . Он преобразуется к линейной целевой функции после возведения в квадрат выражения под знаком суммы:

$$\sum_k (q_k - p_k)^2 / p_k = \sum_k (1 - 2 \cdot p_k) \cdot q_k / p_k \rightarrow \min. \quad (4)$$

Таким образом, получаем линейную систему неравенств с целевой линейной функцией и 0,1-переменными (дизъюнкту $\vee x_i^{a_i}$ соответствует алгебраическое неравенство $\sum_i x_i^{a_i} \geq 1$).

Эту задачу можно решить методом, изложенным в [5]. Статистическую адекватность решения следует проверить с помощью статистического критерия (в качестве иллюстрации похожей задачи с применением критерия χ^2 и

подхода к ее решению см. [6]). Таким образом, задача построения выводов в нечеткой системе сводится к следующему:

- 1) построить целевую функцию (4);
- 2) заменить дизъюнкты алгебраическими неравенствами;
- 3) добавить в систему отрицание $\neg \phi$ доказываемой формулы ϕ с мерой истинности $p_{\neg \phi} = 1 - p_\phi$. Найти корни.

Если решения нет, то формула доказана. Если решение есть, то проверить его статистическую адекватность (например, как показано в [4]). Если решение не «проходит» тест на адекватность, то считать ϕ доказанной. Если решение удовлетворяет статистическому критерию, то вывести ϕ нельзя. В случае противоречивой или четкой непротиворечивой системы функционал (4) преобразуется к виду

$$\sum_k (q_k - p_k)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

и решение можно искать через определение максимального непротиворечивого подмножества дизъюнктов, из которого выводима доказываемая формула [6].

Обратимся к иллюстрации. Требуется вывести формулу $\phi = \neg x_2$ в системе с четкими формулами ($\forall k p_k = 1.0$):

$$\begin{aligned}
q_1 & \leftrightarrow x_1 \vee \neg x_2 \vee x_3, \\
q_2 & \leftrightarrow \neg x_1 \vee \neg x_2, \\
q_3 & \leftrightarrow x_1 \vee \neg x_3, \\
q_4 & \leftrightarrow \neg x_1 \vee \neg x_3, \\
q_5 & \leftrightarrow x_2 \vee x_3, \\
& x_2.
\end{aligned} \quad (6a)$$

Целевая функция:

$$\neg q_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 \rightarrow \min. \quad (6б)$$

Эту систему можно решить, например, в Excel, заменив символы логических операций соответствующими символами алгебраических операций и используя следующие эквивалентности:

$$\begin{aligned}
A \rightarrow B & = \neg A \vee B, \\
\neg A & = 1 - A.
\end{aligned}$$

Получаем:

$$\begin{aligned}
& -q_1 + x_1 - x_2 + x_3 \geq -1, \\
& -x_1 + q_1 \geq 0, \\
& x_2 + q_1 \geq 1, \\
& -x_3 + q_1 \geq 0, \\
& -q_2 - x_1 - x_2 \geq -2, \\
& x_1 + q_2 \geq 1, \\
& x_2 + q_2 \geq 1, \\
& -q_3 + x_1 - x_3 \geq -1, \\
& -x_1 + q_3 \geq 0, \\
& x_3 + q_3 \geq 1, \\
& -q_4 - x_1 - x_3 \geq -2, \\
& x_1 + q_4 \geq 1,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x_3 + q_4 \geq 1, \\
& -q_5 + x_2 + x_3 \geq 0, \\
& -x_2 + q_5 \geq 0, \\
& -x_3 + q_5 \geq 0, \\
& -q_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 \rightarrow \min.
\end{aligned}$$

Решение в Excel дает: $x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = 0, q_1 = 0, q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = 1$. Можно сделать вывод о том, что максимальное по включению непротиворечивое множество содержит дизъюнкты q_2, q_3, q_4, q_5 . В этом множестве выполняется формула x_2 . Теперь следует присоединить к системе дизъюнкцию тех q_i , которые получили нулевое значение в найденном решении. В примере нужно присоединить к системе q_1 и выполнить повторный поиск решения. Новое решение будет таким: $x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = 1, q_1 = 1, q_2 = 1, q_3 = 0, q_4 = q_5 = 1$. Присоединим к системе формулу q_3 . К этому моменту система примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
& -q_1 + x_1 - x_2 + x_3 \geq -1, \\
& -x_1 + q_1 \geq 0, \\
& x_2 + q_1 \geq 1, \\
& -x_3 + q_1 \geq 0, \\
& -q_2 - x_1 - x_2 \geq -2, \\
& x_1 + q_2 \geq 1, \\
& x_2 + q_2 \geq 1, \\
& -q_3 + x_1 - x_3 \geq -1, \\
& -x_1 + q_3 \geq 0, \\
& x_3 + q_3 \geq 1, \\
& -q_4 - x_1 - x_3 \geq -2, \\
& x_1 + q_4 \geq 1, \\
& x_3 + q_4 \geq 1, \\
& -q_5 + x_2 + x_3 \geq 0, \\
& -x_2 + q_5 \geq 0, \\
& -x_3 + q_5 \geq 0, \\
& q_1 = 1, \\
& q_3 = 1, \\
& -q_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 \rightarrow \min.
\end{aligned}$$

Решение: $x_1 = 1, x_2 = 1, x_3 = 1, q_1 = 1, q_2 = 0, q_3 = 1, q_4 = 0, q_5 = 1$. Присоединим дизъюнкт $q_2 \vee q_4$. Система становится противоречивой. Процесс завершается. В ходе итераций добавлены следующие новые формулы:

$$\begin{cases} q_2 \vee q_4, \\ q_1, \\ q_3. \end{cases}$$

Теорема. Пусть SYS^t непротиворечива, $SYS^t \& D^t \rightarrow \neg\phi$, причем не имеет места ни $SYS^t \rightarrow \neg\phi$, ни $SYS^t \rightarrow \neg D^t$. Тогда $\{SYS^t, D^t\}$ непротиворечива.

Доказательство. Перепишем $SYS^t \& D^t \rightarrow \neg\phi$ как $\neg SYS^t \vee \neg D^t \vee \neg\phi$. Допустим, что $SYS^t \rightarrow D^t$. Но тогда сразу получим, что $SYS^t \rightarrow \neg\phi$, что противоречит условиям теоремы. Сле-

довательно, неверно, что $SYS^t \rightarrow D^t$. Если допустить, что $\{SYS^t, D^t\}$ противоречива, то ввиду непротиворечивости SYS^t , заключаем, что $SYS^t \rightarrow \neg D^t$, но это исключено условиями теоремы.

Данная теорема позволяет выяснить заключительный момент, состоящий в том, что полученная противоречивая система действительно содержит непротиворечивую часть, из которой выводима доказываемая формула. Согласно теореме выше, нужно показать непротиворечивость $\{SYS^t, D^t\}$. Применительно к разобранному примеру следует найти хотя бы одну выполняющую интерпретацию для заключительной системы без доказываемой формулы (удалив x_2). Таким решением, например, является следующее: $q_1 = q_2 = q_3 = 1, q_4 = q_5 = 0, x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 1$.

Итак, получен ответ на исходную задачу – интересующее нас максимальное по включению непротиворечивое подмножество дизъюнктов системы (6а), из которого выводима формула $\neg x_2$, есть

$$\begin{aligned}
& x_1 \vee \neg x_2 \vee x_3, \\
& \neg x_1 \vee \neg x_2, \\
& x_1 \vee \neg x_3.
\end{aligned}$$

Заключение. Достоинство представленного в статье подхода состоит в том, что он «сохраняет» стандартную резолюционную схему вывода и, таким образом, позволяет избежать известных аномалий нечеткого резолюционирования. В сравнении с методами нечеткого вывода типа Мамдани, Цукamoto или Сугено данный подход не ограничивает степень общности представления формул. Это же касается неоднозначности представления нечеткой логической импликации (формулы «если – то»). Указанное свойство дает ключ к построению машины логического вывода в нечеткой (противоречивой) логике посредством аппроксимации нечетких значений значениями многозначной логики, достаточными для практических приложений.

В [6] представлен подход для сведения системы нечетких логических формул к задаче целочисленной оптимизации с 0,1-переменными. Ограничение этого подхода состоит в значительной вычислительной сложности процедуры целочисленной булевой оптимизации.

Таким образом, разработанный в данной статье подход обладает научной и практической новизной, имеет положительные особенности и может быть адаптирован для задач построения выводов в различных системах знаний электронных обучающих систем.

Литература

1. Wenger, E. Artificial intelligence and tutoring systems: computational and cognitive approaches to the communication of knowledge / E. Wenger. – California : Morgan Kaufmann Publishers, 1987. – 486 p.
2. Brown, J. S. Pedagogical, natural language and knowledge engineering techniques in Sophie I, II, and III / J. S. Brown, R. R. Burton, J. de Kleer // In Intelligent tutoring systems / D. Sleeman, J. S. Brown (eds.). – New York : Academic Press, 1982. – P. 227–282.
3. Гурин Н. И. Разработка активной обучающей среды для электронного учебника / Н. И. Гурин, О. В. Герман, Ю. О. Герман // Информатизация образования – 2012: педагогические основы разработки и использования электронных образовательных ресурсов : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 24-27 окт. 2012 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Казаченок (отв.ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2012. – С. 95–99.
4. Гурин Н. И. Технология разработки компьютерных обучающих систем с функциями виртуального преподавателя / Н. И. Гурин, О. В. Герман, Ю. О. Герман // Труды БГТУ. – 2011. – № 6 (144). – С. 146–149.
5. Герман, Ю. О. Эффективный в среднем алгоритм для задачи о покрытии с приложением к нечеткой классификации и нечеткому выводу / Ю. О. Герман, А. Р. Самко, О. В. Герман // Доклады БГУИР. – 2009. – №7(45). – С. 93–100.
6. Герман, О. В. Система вывода для нечеткой логики на основе многозначных исчислений Я. Лукасевича / О. В. Герман, А. Р. Самко, Ю. О. Герман // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2010. – №6 (18). – С. 190–192.

References

1. Wenger, E. Artificial intelligence and tutoring systems: computational and cognitive approaches to the communication of knowledge / E. Wenger. – California : Morgan Kaufmann Publishers, 1987. – 486 p.
2. Brown, J. S. Pedagogical, natural language and knowledge engineering techniques in Sophie I, II, and III / J. S. Brown, R. R. Burton, J. de Kleer // In Intelligent tutoring systems / D. Sleeman, J. S. Brown (eds.). – New York : Academic Press, 1982. – P. 227–282.
3. Gurin N. I. Razrabotka aktivnoi obuchajuchoi sredy dlya elektronnoho uchebnika / N. I. Gurin, O. V. German, Yu. O. German // Informatizacija obrazovanija – 2012: pedagogicheskie osnovy razrabotki i ispolzovania elektronnyh obrazovatelnyh resursov : materialy mezdunarodnoy nauch. konferencii., Minsk, 24-27 octjabr. 2012 g. / Belarus. gos. universitet ; redkol.: V. V. Kazachonok (otv.red.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2012. – S. 95–99.
4. Gurin N. I. Tehnologija razrabotki computernyh obuchajuchih syystem s funkciami virtualnogo prepodavatela. / N. I. Gurin, O. V. German, Yu. O. German // Trudy BGTU. – 2011. – № 6 (144). – S. 146–149.
5. German, Y. O. Effektivny v srednem algoritm dlya zadach o pocrytii s prolozeniem k nechetkoj klassifikacii i nechetkomu vyvodu. / Yu. O. Germn, A. R. Samko, O. V. German // Doklady BGUIR. – 2009. – №7(45). – S. 93–100.
6. German, O. V. Sistema vyvoda dlya nechetkoi logiki na osnove mnogoznachnyh ischisleniy Ya. Lukasiewicha. / O. V. German, A. R. Samko, Y. O. German // Trudy BGTU. Ser. VI, Phis.-mat. Nauki i informatika. – 2010. – №6 (18). – S. 190–192.

Информация об авторе

Герман Юлия Олеговна – старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: MaksHladki@gmail.com

Information about the author

German Julia Olegovna – senior lecturer, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: MaksHladki@gmail.com

Поступила 12.12.2016