

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

© 2015 С.А. Прохоров, И.М. Куликовских

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 30.07.2015

В работе рассматриваются вопросы разработки системы адаптивного обучения на основе таксономии Блума. Разработанная модель адаптивного обучения, описываемая конечным автоматом, была расширена в соответствии с концепцией дидактической эргономики и представлена в виде иерархического конечного автомата. На основе расширенной модели адаптивного обучения были сформулированы определения задачи адаптивного обучения и траектории обучения. Приведена программная реализация частной модели адаптивного обучения с оптимизацией предоставляемого контента по количеству тем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Системы адаптивного обучения представляют собой программные реализации совокупности педагогических методик и вычислительных алгоритмов, предназначенных для поддержки процесса обучения [1-4]. Несмотря на тот факт, что данные методики и алгоритмы главным образом определяются постановкой задачи и целью адаптивного обучения, системы должны соответствовать определенным требованиям, таким как оценивание текущего уровня знаний в соответствии с признанным стандартом, что позволяет создавать стратегии обучения и алгоритмы согласно определенным критериям и принимать решение о необходимости их корректировки.

На сегодняшний день таким стандартом является таксономия Блума [5], впоследствии доработанная многими авторами. Одной из наиболее известных пересмотренных версий таксономии является версия, предложенная Андерсоном в 2001 [6], в соответствии с которой задача систем адаптивного обучения сводится к приведению соответствия между уровнями знаний обучаемых и следующими когнитивными уровнями: восприятие, понимание, применение, анализ, оценивание, создание [7-16]. Таким образом, благодаря данной классификации, процесс адаптивного обучения становится структурированным и строго формализованным.

Для каждого из представленных когнитивных уровней существует набор ключевых слов, которые позволяют классифицировать вопро-

сы и задания. Как правило, для данной цели применяют алгоритмы анализа подмножеств естественного языка. Тем не менее, в работе [4] отмечается возможность применения «multiple choice» как инструмента классификации на низких уровнях таксономии и в то же время целесообразность их использования на высоких. В свою очередь, автор работы [16] представляет «multiple choice» как универсальный инструмент для решения задачи классификации на всех когнитивных уровнях, что в последующем было положено в основу ряда работ по разработке алгоритмов и систем адаптивного обучения [17,18] и получило подтверждение с точки зрения психологии [19].

Таким образом, системы адаптивного обучения являются инструментом классификации обучаемых на различные когнитивные уровни, однако, каждая система имеет уникальные алгоритмы адаптации, основанные на методике построения контента, стратегиях, анализе предпочитаемых стилей обучения, реакции системы на ответы обучаемых [20-23], что позволяет формировать уникальные траектории обучения для каждого обучаемого. Разработка данных алгоритмов предполагает создание модели адаптивного обучения. Так как специфика адаптивных систем в соответствии с таксономией Блума представлена конечным набором уровней, и использование «multiple choice» как инструмента для организации процесса обучения даже на высоких когнитивных уровнях является возможным, что также определяет конечность возможных состояний системы, применение теории конечных автоматов для построения такой модели является наиболее целесообразным. Следовательно, целью данной работы явилось разработка и формальное описание системы адаптивного обучения на основе конечных автоматов для формирования траекторий обучения.

Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и технологий. E-mail: sp.prokhorov@gmail.com

Куликовских Илона Марковна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий. E-mail: kulikovskikh.i@gmail.com

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Опираясь на постановку задачи, перейдем к ее формальному описанию.

Пусть система адаптивного обучения S формализована в виде конечного автомата (см. рис. 1)

$$S = \{U, Y, X, x_0, \Lambda, H\}, \quad (1)$$

где

U – конечный набор входов $\{u_i\}_{i=1..I}$;

Y – конечный набор выходов $\{y_i\}_{i=1..I}$;

X – конечный набор состояний $\{x_i\}_{i=1..I}$;

x_0 – начальное состояние системы;

Λ – набор функций перехода $U \times X \rightarrow X$, $\{\lambda_i\}_{i=1..I-1}$;

H – набор функций выхода $U \times X \rightarrow Y$, $\{\eta_i\}_{i=1..I}$.

Тогда интерпретируем представленную модель в терминах постановки задачи следующим образом:

$\{u_i\}_{i=1..I}$ – ответы обучаемого на поставленные задачи;

$\{y_i\}_{i=1..I}$ – реакция системы на ответы обучаемого;

$\{x_i\}_{i=1..I}$ – когнитивный уровень в соответствии с таксономией Блума;

x_0 – начальный уровень знаний обучаемого, выявленный в результате диагностического тестирования;

$\{\lambda_i\}_{i=1..I-1}$ – вопросы, задаваемые системой обучаемому для перехода на другой уровень компетенции с генерацией соответствующей реакции;

$\{\eta_i\}_{i=1..I}$ – объяснения, предлагаемые системой на данном уровне компетенции.

Для проверки целесообразности представленной модели, рассмотрим (1) в педагогическом контексте. Согласно [1,24], существует два типа переменных, описывающих процесс обучения: характеристики C , идентифицирующие обучаемого, и атрибуты A , характеризующие образовательный контент. В частности, данное разбиение положено в основу концепции дидактической эргономики [24], которая отмечает необходимость разработки обучающих систем в двух плоскостях: обучаемого и обучающего. Область пересечения этих плоскостей определяется педагогическими стратегиями, определяющими условия и стадии процесса обучения, и тактиками, отвечающими за то, каким образом стратегии будут реализованы в системе адаптивного обучения.

Рассмотрим (1) с учетом концепции дидактической эргономики. Зададим состояния X как педагогические стратегии, определяющие условия перехода на следующий когнитивный

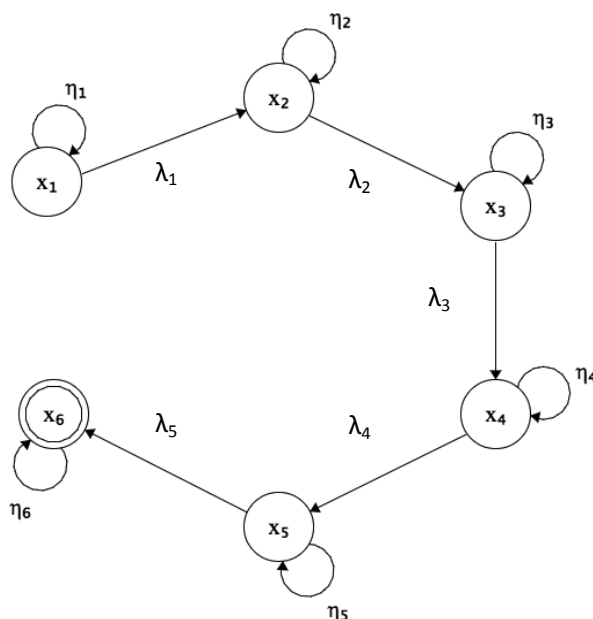


Рис. 1. Модель конечного автомата системы адаптивного обучения

уровень в зависимости от текущих характеристик C и заданных атрибутов A . В свою очередь, Y и U являются педагогическими тактиками, задающими различные стили обучения и степень интерактивного взаимодействия с обучаемым в форме атрибутов A . Тогда Λ определяет связь между характеристиками и атрибутами в виде $C \rightarrow A$, в то время как H задает обратное соотношение $A \rightarrow C$.

Таким образом, с учетом C и A , модель (1) должна быть конкретизирована как иерархический конечный автомат [25-27], в первую очередь, с целью компактности представления. В общем случае, задача адаптивного обучения, заданная таким иерархическим конечным автоматом является многокритериальной, что, главным образом, определяется конкретной постановкой задачи. В рамках данного исследования рассмотрим задачу адаптивного обучения с оптимизацией предоставляемого контента $A_{1,J} \in A$ по количеству тем J , необходимых для перехода на следующий когнитивный уровень. Сформулируем данную задачу адаптивного обучения в виде определения.

Определение 1. Пусть $A_{1,J} \in A$ – атрибут, задающий совокупность тем, составляющих обучающий контент. Тогда $\Lambda^{A_{1,J}} : U^{A_{1,J}} \times X^{A_{1,J}} \rightarrow X^{A_{1,J}}$ и $H^{A_{1,J}} : U^{A_{1,J}} \times X^{A_{1,J}} \rightarrow Y^{A_{1,J}}$ определяют тактики, которые необходимо оптимизировать на основе входов $U^{A_{1,J}}$ и выходов $Y^{A_{1,J}}$ на каждом когнитивном уровне $X^{A_{1,J}}$ при заданном $x_0^{A_{1,J}}$. Отсюда,

$$J = \arg \min_{J \in N} S^{A_{1,J}} \quad (2)$$

называется задачей адаптивного обучения с оп-

тимизацией по количеству тем предоставляемого контента.

Таким образом, задача адаптивного обучения представляет собой поиск оптимальных переходов иерархического конечного автомата, которая при заданных характеристиках и атрибутах определяет траекторию обучения. Обобщая (2) на случай произвольной оптимизации, можно записать следующее определение.

Определение 2. Пусть C и A – совокупность характеристик и атрибутов иерархического конечного автомата $S^{C,A}$, соответственно. Тогда

$$L = \arg \min_{A,C} S^{A,C}$$

называется задачей адаптивного обучения, а L – оптимальной траекторией обучения.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Как отмечалось ранее, данное исследование направлено на рассмотрение задачи адаптивного обучения с оптимизацией контента по количеству тем. С этой целью, разработанная модель (2) была реализована программно с помощью пакета StateForge (<http://www.stateforge.com/>). На рис. 2 приведена диаграмма представленного иерархического автомата. Следует отметить, что состояния автомата соответствуют когнитивным уровням версии таксономии Блума, предложенной Андерсоном [6].

Ниже представлены фрагменты кода XML для состояний «Diagnostic», «System» и вложенных «Remembering» и «Creating», позволяющие воспроизвести созданный автомат, а также сгенерировать код с помощью StateBuilder на Java посредством плагина Maven или Ant, или на C++/C# с помощью CMake, Qt и Visual Studio, Framework .Net, соответственно.

```
<sm:StateMachine xmlns:sm="http://
www.stateforge.com/
StateMachineJava-v1"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/
XMLSchema-instance"
xsi:schemaLocation="http://www.
stateforge.com/StateMachineJava-v1
http://www.stateforge.com/xsd/
StateMachineJava-v1.xsd">
<!-- General settings -->
<settings asynchronous=
"false" namespace="com.
stateforge.statemachine.examples.
AdaptiveLearningSystem">
<description>Adaptive learning
system: a hierarchical state machine</
description>
<object instance="system"
class="System"/>
</settings>
<!-- Events -->
```

```
<events>
<eventSource name="Management">
<event id="test"
name="evTestTes"/>
<event id="exploration"
name="evNoExploration"/>
<event id="correct"
name="evCorrect"/>
<event id="incorrect"
name="evIncorrect"/>
</eventSource>
</events>
<!-- States -->
<state name="AdaptiveLearningSystem">
<state name="Diagnostic">
<transition event="evTestRes"
nextState="System"/>
</state>
<state name="System">
<onEntry>
<action>level.
Chosen () </action>
<action>topic.
Chosen () </action>
</onEntry>
<onExit>
<action>explanations.
On () </action>
<action>questions.
On () </action>
</onExit>
<transition event="evNoExploration"
nextState="End"/>
<state name="Remembering">
<onEntry>
<action>studAnswer.
On () </action>
</onEntry>
<onExit>
<action>sysFeedback.
On () </action>
</onExit>
<transition event="evCorrect"
nextState="Understanding"/>
<transition event="evIncorrect"
nextState="Remembering"/>
</state>
<state name="Creating">
<onEntry>
<action>studAnswer.
On () </action>
</onEntry>
<onExit>
<action>sysFeedback.
On () </action>
</onExit>
<transition
event="evCorrect" nextState="System"/>
<transition event="evIncorrect"
nextState="Creating"/>
```

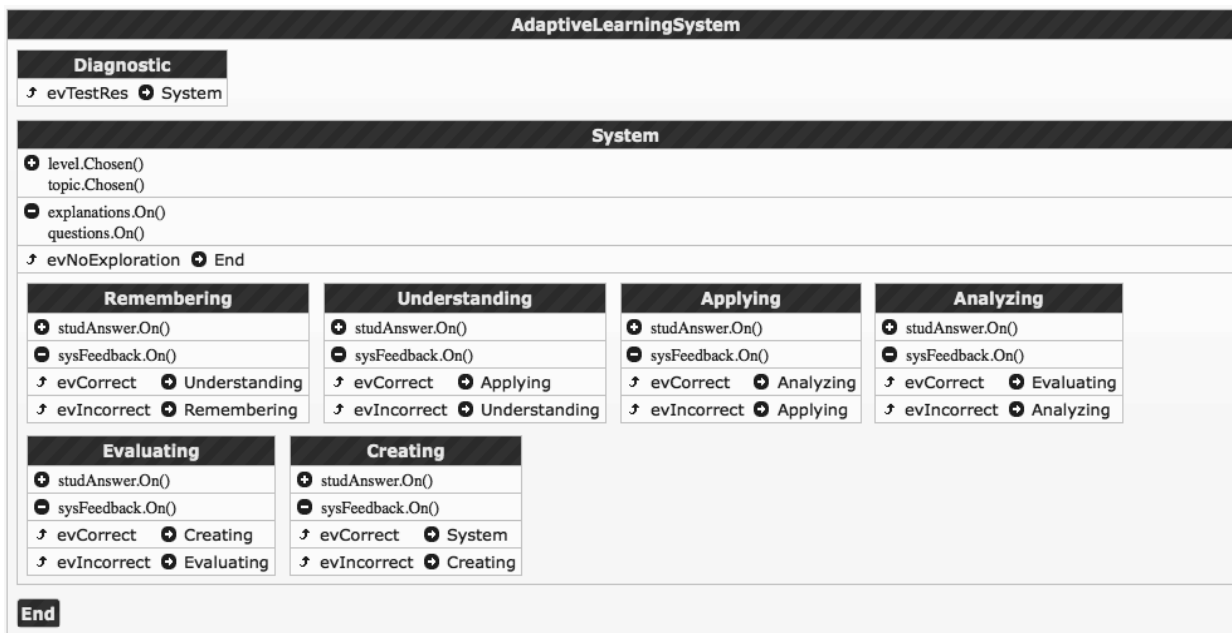


Рис. 2. Диаграмма иерархического конечного автомата, реализованного в StateForge

```

        </state>
    </state>
    <state name="End" kind="final"/>
</state>
</sm:StateMachine>

```

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования была поставлена и формализована задача адаптивного обучения, базирующаяся на таксономии Блума и теории конечных автоматов. Созданная модель была расширена согласно концепции дидактической эргономики, учитывающей характеристики *C* и атрибуты *A*, а также педагогические стратегии и тактики. Расширенная модель была представлена в виде иерархического конечного автомата, на основе которого даны определения задачи адаптивного обучения. Приведена программная реализация частной модели адаптивного обучения с оптимизацией предоставляемого контента $A_{1,J} \in A$ по количеству тем J .

На данном этапе исследований разработанная система адаптивного обучения воспринимает U – ответы обучаемого – лишь как события, поступающие на вход, таким образом, дальнейшее направление развития данной работы связано с реализацией асинхронного автомата, который учитывает отношения $C \rightarrow A$ и $A \rightarrow C$, а также с проведением экспериментальных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ве-

дущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Intelligent tutoring systems: formalization as automata and interface design using neural networks / S.G. Curilem, A.R. Barbosa, F.M. Azevedo // Computers & Education. 2007. Vol. 49. P. 545-561.
2. Automatic generation of just-in-time online assessments from software design models / I.A. Zualkernan, S.A. El-Naaj, M. Papadopoulos, B.K. Al-Amoudi, C.E. Metthews // Educational Technology & Society. 2009. Vol. 1. № 12. P. 173-192.
3. Designing and developing software for educative virtual laboratories with language processing techniques: lessons learned in practical experiments / J.J. Castro, M.A. Redondo, J. Gallardo, F. Jurado // Journal of Research and Practice in Information Technology. 2012. Vol. 44, № 3. - P. 289-308.
4. Riechert R., Hartmann W. On the learning in e-learning // The proceedings of World Conference on Education, Multimedia, Hypermedia and Telecommunication. 2004. P. 1590-1595.
5. Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook 1: Cognitive domain / B.S. Bloom (Ed.), M.D. Engelhart, E.J. Furst, W.H. Hill, D.R. Krathwohl. New York: David McKay, 1956. 207 p.
6. A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives / L.W. Anderson (Ed.), D.R. Krathwohl (Ed.), P.W. Airasian, K.A. Cruikshank, R.E. Mayer, P.R. Pintrich, J. Raths, M.C. Wittrock. New York: Longman, 2001. 336 p.
7. Hashim K., Khairuddin N.N. Software engineering assessments and learning outcomes / K. Hashim, // The proceedings of the 8th WSEAS Int. Conference on Software Engineering, Parallel and Distributed Systems. 2009. P. 131-134.
8. Bloom's taxonomy revised: specifying assessable learning objectives in computer science / C.W. Starr, B. Manaris, R.H. Stalvey // The proceedings of the 39th

- SIGSCE Technical Symposium on Computer Science Education. 2008. P. 261-265.
9. Automated analysis of exam questions according to Bloom's taxonomy / N. Omar, S.S. Haris, R. Hassan, H. Arshad, M. Rahmat, N.F.A. Zainal, R. Zulkifli // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 59. P. 297-303.
 10. Mayer R.E. A taxonomy for computer-based assessment of problem-solving // *Computers in Human Behaviour*. 2002. Vol. 18. P. 623-632.
 11. Terzis V., Economides A.A. The acceptance and use of computer based assessment // *Computers & Education*. 2011. Vol. 56. - P. 1032-1044.
 12. Implementing computer-based assessment - A web-based mock examination changes attitudes / T. Deutsch, K. Herrmann, T. Frese, H. Sandholzer // *Computers & Education*. 2012. Vol. 55. P. 1068-1075.
 13. Kuo C.-Y., Wu H.-K. Toward an integrated model for designing assessment systems: An analysis of the current status of computer-based assessment in science // *Computers & Education*. 2013. Vol. 68. - P. 388-403.
 14. Wang T.-H. Developing an assessment-centered e-learning system for improving student learning effectiveness // *Computers & Education*. 2014. Vol. 73. - P. 189-203.
 15. Problem solving learning environments and assessment: a knowledge space theory approach / P. Reimann, M. Kickmeier-Rust, D. Albeert // *Computers & Education*. 2013. Vol. 64. P. 183-193.
 16. Thelwall M. Computer-based assessment: a versatile educational tool // *Computers & Education*. 2000. Vol. 34. P. 37-49.
 17. Comparison of examination methods based on multiple-choice questions and constructed-response questions using personal computers / E. Ventouras, D. Triantis, P. Tsiakas, C. Stergiopoulos // *Computers & Education*. 2010. Vol. 54. P. 455-461.
 18. Visual attention for solving multiple-choice science problem: An eye-tracking analysis / M.-J. Tsai, H.-T. Hou, M.-L. Lai, W.-Y. Liu, F.-Y. Yang // *Computers & Education*. 2012. Vol. 58. P. 375-385.
 19. Espinosa M.P., Gardeazabal J. Optimal correction for guessing in multiple-choice tests // *Journal of Mathematical Psychology*. 2010. Vol. 54. P. 415-425.
 20. Effects of feedback in a computer-based assessment for learning / F.M. Kleij, T.J.H.M. Eggen, C.F. Timmers, B.P. Veldkamp // *Computers & Education*. 2012. Vol. 58. P. 263-272.
 21. Formative assessment and feedback: Making learning visible / A. Havnes, K. Smith, O. Dysthe, K. Ludvigsen // *Studies in Educational Evaluation*. 2012. Vol. 38. P. 21-27.
 22. Timmers C., Veldkamp B. Attention paid to feedback provided by a computer-based assessment for learning on information literacy / C. Timmers, // *Computers & Education*. 2011. Vol. 56. P. 923-930.
 23. Exploring feedback and student characteristics relevant for personalizing feedback strategies / S. Narciss, S. Sosnovsky, L. Schnaubert, E. Andres, A. Eichelmann, G. Gogvadze, E. Melis // *Computers & Education*. 2014. Vol. 71. P. 56-76.
 24. Computers and education. Towards a lifelong learning society / M. Liamas, M.J. Fernández-Iglesias, L.E. Anido-Rifon (Eds). Netherlands: Springer, 2006. 287 p.
 25. Кузьмин Е.В. Иерархическая модель автоматных программ // *Моделирование и анализ информационных систем*. - 2006. Т. 13, № 1. С. 27-34.
 26. Lemch E.S., Caines P.E. On the existence of hybrid models for finite state machines // *Systems & Control Letters*. 1999. Vol. 36. P. 253-259.
 27. Spinke V. An object-oriented implementation of concurrent and hierarchical state machines // *Information and Software Technology*. 2013. Vol. 55. P. 1726-1740.

ADAPTIVE LEARNING SYSTEM BASED ON HIERARCHICAL FINITE STATE MACHINES

© 2015 S.A. Prokhorov, I.M. Kulikovskikh

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article delves into adaptive learning systems based on Bloom's taxonomy. The adaptive learning model created by a finite state machine was extended to the case of a hierarchical finite state machine according to the didactic ergonomics concept. To formalize this extension, we proposed the definitions of an adaptive learning problem and a learning path using the extended adaptive learning model. The findings of this research present the software implementation of the adaptive learning problem to optimize educational content with respect to a number of topics.

Key words: adaptive learning, hierarchical finite state machine, Bloom's taxonomy, cognition level, learning path.

Sergej Prokhorov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Information Systems and Technologies Department.

E-mail: sp.prokhorov@gmail.com

Ilona Kulikovskikh, Candidate of Technics, Associate Professor at the Information System and Technologies Department.

E-mail: kulikovskikh.i@gmail.com