

УДК: 32.81

ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГНИТИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

*В.Г. Редько, НИИ системных исследований РАН, д.ф.-м.н.,
зам. руководителя центра, Москва, Россия,
vgredko@gmail.com*

Аннотация. Сделан обзор моделей интеллектуальных автономных агентов. Подчеркивается важность исследования автономных агентов для моделирования когнитивной эволюции.

Задача моделирования когнитивной эволюции

В настоящей работе анализируются подходы к моделированию когнитивной эволюции, т.е. эволюции познавательных способностей биологических организмов, в результате которой произошло мышление человека, обеспечивающее научное познание природы. Развивается подход, предложенный ранее в [1,2]. Основное внимание уделяется моделям основанным на биологических аналогиях автономных агентов, в которых используются гибридные интеллектуальные системы.

Кратко охарактеризуем постановку исследований когнитивной эволюции. Существует глубокая гносеологическая проблема: почему формальное логическое человеческое мышление, казалось бы, совсем не связанное с реальным физическим миром, применимо к познанию природы? Поясним проблему. Рассмотрим, например, физику, одну из фундаментальных естественнонаучных дисциплин. Мощь физики связана с эффективным применением математики. Но математик делает логические выводы, доказывает теоремы независимо от внешнего мира, используя свое мышление. Почему же эти выводы применимы к реальной природе? В общей формулировке про-

блема может быть сформулирована так: почему логика человеческого мышления применима к познанию природы? Для исследования проблемы целесообразно исследовать эволюцию познавательных свойств биологических организмов и с помощью моделирования анализировать, как в процессе эволюции возникали способности, обеспечивающие познание закономерностей внешнего мира, и как развитие этих способностей привело к научному познанию природы.

Заделы исследований когнитивной эволюции

В настоящее время в нескольких научных направлениях, таких как «Адаптивное поведение», «Искусственная жизнь», «Когнитивные архитектуры», научные основы искусственного интеллекта, ведутся исследования, близкие к моделированию когнитивной эволюции. В основном это работы по основанным на биологических аналогиях моделям автономных агентов с когнитивными свойствами. Кратко охарактеризуем эти направления.

Направление исследований «Адаптивное поведение» сформировалось в начале 1990-х годов [3]. Основной подход этих исследований – конструирование и изучение искусственных «организмов» (в виде компьютерной программы или робота), способных приспосабливаться к внешней среде. Исследователи адаптивного поведения разрабатывают такие модели, которые применимы к описанию поведения как реального животного, так и искусственного модельного организма. Дальняя цель этих работ – анализ эволюции когнитивных способностей животных в контексте происхождения интеллекта человека – близка к задаче моделирования когнитивной эволюции. Работы отечественных исследователей адаптивного поведения представлены в сборнике [4].

Под когнитивными архитектурами понимаются структуры и принципы функционирования познающих систем, которые можно использовать в искусственном интеллекте [5]. В по-

следние годы большое внимание уделяется биологически инспирированным когнитивным архитектурам [6].

В исследованиях автономных интеллектуальных или когнитивных агентов часто изучаются компьютерные модели основанные на биологических аналогиях агентов. Обзор исследований в этой области содержится в работе [7].

Подчеркнем также связь исследований когнитивной эволюции с основаниями математики. Выше заострялся вопрос о причинах применения математических доказательств к познанию реальных объектов в природе. Данный вопрос связан с обоснованием методов математического вывода и с возможностью пересмотра оснований математики. Именно в этом контексте в работе [8] был предложен подход к введению предиктивных логических правил, позволяющих предсказывать будущие ситуации.

Таким образом, со стороны нескольких направлений формируются подходы к построению и изучению моделей когнитивных, интеллектуальных автономных агентов.

Примеры моделей автономных адаптивных агентов

Приведем два примера моделей автономных агентов, обладающих когнитивными свойствами.

Нейробиологическая модель адаптивного поведения, разработанная в Институте нейронаук, руководимом Дж. Эдельманом. В цикле работ данного института анализировалось адаптивное поведение искусственного организма – устройства NOMAD (Neurally Organized Mobile Adaptive Device).

В [9] поведение NOMAD'a моделировало поведение мыши в лабиринте Морриса, которая в бассейне с непрозрачной жидкостью ищет скрытую от зрения платформу, ориентируясь по рисункам на бортах бассейна. NOMAD представлял собой подвижное роботоподобное устройство на колесах, система управления которого представляла собой большую структурированную нейронную сеть. NOMAD самостоятельно обучался

находить скрытую от зрения платформу, ориентируясь по разноцветным полосам на стенах комнаты.

Было продемонстрировано, что NOMAD адекватно имитирует нетривиальное адаптивное поведение мыши.

Бионическая модель поискового адаптивного поведения. В [10] промоделировано поисковое поведение личинок ручейников, обитающих на дне водоемов. Личинки носят на себе защитный чехол-домик – трубку из песчинок и других частиц, собираемых со дна водоемов. Компьютерная модель поискового поведения личинок ручейников, строящих чехол-домик из частиц разного размера и ведущих поиск скоплений подходящих частиц, использовала понятие мотивации M к прикреплению частиц к домику. Динамика регулирующей поведение мотивации M учитывала инерцию переключения между тактиками поведения, случайные вариации и направленное изменение мотивации. Если мотивация M была достаточно велика, то происходил сбор и приращение частиц к домику, если M была мала, то модельная личинка искала новое место с подходящими размерами частиц. Важно, что в модели использовались знания личинки о размерах последних протестированных и приращенных частиц.

Модель [10] качественно согласуется с биологическими экспериментальными данными, в частности, как в эксперименте, так и в модели к чехлу-домику преимущественно приращаются крупные частицы.

Контур программы будущих исследований когнитивной эволюции

Отталкиваясь от анализа современных биологически инспирированных моделей автономных «организмов», можно предложить следующие этапы моделирования когнитивной эволюции.

А) Моделирование адаптивного поведения агентов с несколькими естественными потребностями: питание, раз-

множение, безопасность. Это могло бы быть моделирование достаточно естественного и полноценного поведения простых модельных организмов. Моделирование в этом направлении уже начато, см. ниже.

Б) Исследование перехода от физического уровня обработки информации в нервной системе животных к уровню обобщенных образов. Такой переход можно рассматривать, как появление в «сознании» животного свойства «понятие». Обобщенные образы можно представить как мысленные аналоги наших слов, не произносимые животными, но реально используемые ими.

В) Исследование процессов формирования причинных связей в памяти животных. Запоминание причинно-следственных связей между событиями во внешней среде и адекватное использование этих связей в поведении – одно из ключевых свойств активного познания животным закономерностей внешнего мира. Такая связь формируется, например, при выработке условного рефлекса: животное запоминает связь между условным стимулом (УС) и следующим за ним безусловным стимулом (БС), что позволяет ему предвидеть события в окружающем мире и адекватно использовать это предвидение.

Естественный следующий шаг – переход от отдельных причинных связей к логическим выводам на основе уже сформировавшихся знаний.

Г) Исследование процессов формирования логических выводов в «сознании» животных. Фактически, уже на базе классического условного рефлекса животные способны делать «логический вывод» вида: $\{УС, УС \rightarrow БС\} \Rightarrow БС$ или «Если имеет место условный стимул, и за условным стимулом следует безусловный, то нужно ожидать появления безусловного стимула». В определенной степени такие выводы подобны выводам математика, доказывающего теоремы. И целесообразно разобраться в системах подобных выводов, понять, насколько

адаптивна логика поведения животных и насколько она подобна нашей, человеческой логике.

Д) Исследование коммуникаций, возникновения языка. Наше мышление тесно связано с языком, с языковым общением между людьми. Поэтому целесообразно проанализировать: как в процессе биологической эволюции возникал язык общения животных, как развитие коммуникаций привело к современному языку человека, как развитие коммуникаций и языка способствовало развитию логики, мышления, интеллекта человека.

Перечисленные пункты очерчивают круг исследований от моделирования простейших форм поведения к логическим правилам, используемым в математике.

Опираясь на эти пункты, мы начали соответствующее моделирование.

Начальные шаги моделирования

Модель автономных агентов с естественными потребностями. В [11] построена и исследована компьютерная модель автономных адаптивных агентов, обладающих естественными для живых организмов потребностями: питание, безопасность и размножение. Рядом с агентом имелся хищник, активность которого периодически менялась; защищаясь от хищника, агент мог обеспечивать свою безопасность.

Потребностям агента соответствовали три фактора: питания (F_F), безопасности (F_S) и размножения (F_R). Для каждого фактора имелся порог (T_F, T_S, T_R), при превышении фактором которого удовлетворялась соответствующая потребность.

Между потребностями вводилась следующая иерархия: 1) пищевая потребность (наиболее приоритетна), 2) потребность безопасности, 3) потребность размножения (наименее приоритетна). Потребность считалась ведущей, если она была наиболее приоритетной из всех потребностей, для которых $F_N < T_N$.

Система управления агента была основана на наборе правил вида: $S_k \rightarrow A_k$ (в ситуации S_k нужно выполнить действие A_k). Веса правил W_k настраивались методом обучения с подкреплением [12]. Ситуация S_k определялась активностью хищника рядом с агентом, предыдущим действием агента и ведущей потребностью. Агент мог выполнять одно из следующих действий A_k : 1) покой, 2) поиск пищи, 3) питание, 4) подготовка к размножению, 5) размножение, 6) оборона.

Каждый агент имел ресурс R , который уменьшался при выполнении действий и увеличивался при питании. Активный хищник также мог отнимать у агента значительный ресурс.

После выполнения цепочки действий «подготовка к размножению», «размножение» агент рождал потомка. Выполняя действие «оборона», агент защищался от активного хищника.

Преимущественно выполнялись действия, соответствующие максимальным весам правил W_k . Факторы F_F, F_S, F_R увеличивались при выполнении действий, направленных на удовлетворение ведущих потребностей.

В модели использовалось обучение с подкреплением [12]. Веса правил $S_k \rightarrow A_k$ менялись следующим образом:

$$\Delta W_{t-1} = \alpha (F_{L,t} - F_{L,t-1} + \gamma W_t - W_{t-1}),$$

где $F_{L,t}, F_{L,t-1}$ – факторы потребности, ведущей в такты времени t и $t-1$, W_t и W_{t-1} – веса правил, примененных в такты t и $t-1$, α – параметр скорости обучения, γ – дисконтный фактор.

Результаты компьютерного моделирования иллюстрируются рис. 1, на котором показана типичная динамика факторов F_F, F_S и F_R . Видно, что при достаточно большом времени все три фактора достигают порога, т.е. все потребности удовлетворяются. Формируется цикличность поведения агента, характерный цикл показан участком «а». В цикле агент сначала накапливает внутренний ресурс, затем его действия направлены на максимизацию безопасности, а когда обе потребности

(пищевая и потребность безопасности) удовлетворены, агент размножается.

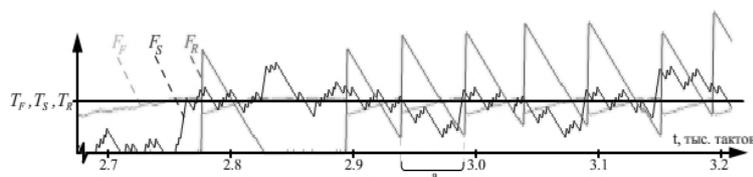


Рис. 1. Зависимость факторов F_F , F_S и F_R , соответствующих потребностям агента, от времени t .

Таким образом, исследована модель автономных агентов, обладающих несколькими потребностями (пункт *A* контуров программы). Показано, что происходит формирование циклов поведения, в которых последовательно удовлетворяются потребности питания, безопасности и размножения.

Модель формирования обобщенных эвристик и простых обобщенных образов. Формирование обобщенных эвристик и простых обобщенных образов (пункт *B*) в процессе обучения агентов при поиске агентами пищи в двумерной клеточной среде было продемонстрировано в модели [13], хотя пока эту модель целесообразно рассматривать как определенный начальный этап более полноценных исследований.

Заключение

Сопоставляя пункты контуров программы будущих исследований когнитивной эволюции с упомянутыми моделями и с другими близкими по тематике работами, можно заключить, что уже имеются отдельные элементы, соответствующие каждому из пунктов. Образно говоря, у нас уже есть некоторые небольшие фрагменты картины, но мы еще не видим всей картины. Четкой последовательности серьезных, канонических моделей, которые показывали бы общую картину происхождения логического мышления, пока еще нет.

При исследованиях когнитивной эволюции целесообразно использовать биологически инспирированные модели автономных агентов с когнитивными свойствами. При изучении таких агентов естественно применение нейронных сетей, эволюционного моделирования и других методов, характерных для гибридных систем.

Литература

1. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: УРСС, 2005.
2. Редько В.Г. Моделирование когнитивной эволюции – перспективное направление исследований на стыке биологии и математики // Математическая биология и биоинформатика (электронный журнал). 2010. Т. 5. № 2. С. 215-229. URL: [http://www.matbio.org/downloads/Redko2010\(5_215\).pdf](http://www.matbio.org/downloads/Redko2010(5_215).pdf)
3. From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (Meyer J.-A., Wilson S.W., Eds.). Cambridge: MIT Press, 1991.
4. От моделей поведения к искусственному интеллекту (Под ред. В.Г. Редько). М.: УРСС, 2006.
5. Langley P., Laird J.E., Rogers S. Cognitive architectures: Research issues and challenges // Cognitive Systems Research. 2009. V.10. No. 2. PP. 141-160.
6. Biologically Inspired Cognitive Architectures 2011. Proceedings of Second Annual Meeting of the BICA Society (Samsonovich A.V., Johannsdottir K.R., Eds.). Amsterdam et al.: IOS Press, 2011.
7. Vernon D., Metta G., Sandini G. A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents // IEEE Transactions on Evolutionary Computation (special issue on Autonomous Mental Development). 2007. V. 11. No. 2. PP. 151-180.

8. Turchin V.F. A constructive interpretation of the full set theory // Journal of Symbolic Logic. 1987. V. 52. No. 1. PP. 172 -201.

9. Krichmar J.L., Seth A.K., Nitz D.A., Fleischer J.G., Edelman G.M. Spatial navigation and causal analysis in a brain-based device modeling cortical-hippocampal interactions // Neuroinformatics. 2005. V. 3. No. 3. PP. 197-221.

10. Непомнящих В.А., Попов Е.Е., Редько В.Г. Бионическая модель адаптивного поискового поведения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 1. С. 85-93.

11. Коваль А.Г. Редько В.Г. Поведение модельных организмов, обладающих естественными потребностями и мотивациями // Математическая биология и биоинформатика (электронный журнал). 2012 (в печати).

12. Sutton R., Barto A. Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge: MIT Press, 1998.

13. Бесхлебнова Г.А., Редько В.Г. Модель формирования обобщенных понятий автономными агентами // Четвертая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: В 2 томах. Томск: ТГУ, 2010. Т. 1. С. 174-175.

HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS AND MODELING COGNITIVE EVOLUTION

Red'ko Vladimir Georgievich

Abstract. Models of intelligent autonomous agents are reviewed. Importance of investigations of autonomous agents for modeling cognitive evolution is underlined.