

А.А. Кулинич¹²

КОГНИТИВНАЯ АРХИТЕКТУРА КАЧЕСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА³

Предложена когнитивная архитектура качественного BDI-агента, включающая: модель представления знаний, подсистемы планирования поведения и кооперации агентов. Модель знаний агента представляется в виде концептуального каркаса, структурирующего среду функционирования агентов на подпространства, определяющие классы возможных состояний. В подсистеме планирования поведения агентов, выбор действия агента основан на решении обратной задачи в логико-лингвистических уравнениях динамики агентов и на критерии рациональности его поведения. Подсистема кооперации агентов основана на критерии взаимной полезности агентов.

BDI архитектура агента, планирование поведения, кооперация агентов.

A.A. Kulinich

The architecture of a quality BDI-agent is proposed, which includes: a qualitative model of knowledge representation, a subsystem of behavior planning and agent cooperation. The agent knowledge model is represented in the form of a conceptual framework structuring the environment for the functioning of agents on subspaces defining the classes of possible states. In the agent behavior planning subsystem, the agent's choice of action is based on solving the inverse problem in the logical-linguistic equations of agent dynamics and on the rationality criteria of his behavior. The subsystem of agent cooperation is based on the criterion of mutual usefulness of agents.

BDI agent architecture, behavior planning, cooperative agents.

Введение

¹ 117997, Москва, ул. Профсоюзная 65, Институт проблем управления РАН, e-mail: kulinich@ipu.ru; alexkul@rambler.ru

² 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1. НИЦ «Курчатовский институт»

³ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 16-11-00018), ОФИ_м (проект №16-29-04412).

В настоящее время выделяются два направления создания роботехнических и многоагентных систем. Первое направление связано с созданием агентов с когнитивными возможностями, максимально приближенными к возможностям человека. Когнитивная архитектура такого агента строится на основе исследований психологами интеллекта человека, его когнитивных функций: восприятия; представления в памяти окружающего мира; убеждений; целеполагания; предпочтений и др.

Среди программных когнитивных архитектур наиболее известные архитектуры: ACT-R, SOAR, CLARION, COGENT и др. Реализуются такие программные архитектуры в виде подсистем представления знаний, подобных иерархической организации памяти человека, продукционного вывода на знаниях и разнообразных моделей обучения. Одним из недостатков этих архитектур является трудоемкость их создания и не высокое качество работы в условиях неполноты информации.

В когнитивной архитектуре выделяется минимальный набор функциональных элементов, которые позволяют реализовать следующие свойства интеллектуальных агентов: *Автономность* – способность действовать самостоятельно; *Реактивность* – способность реагировать на изменение состояния среды функционирования; *Проактивность* – способность проявлять инициативу для достижения цели; *Социальность* – способность взаимодействовать с другими агентами для достижения цели.

Одна из архитектур, позволяющая реализовать эти свойства интеллектуальных агентов - это ментальная BDI (*Belief-Desire-Intention*) архитектура агента, в которой выделены три составляющие: убеждения (*Belief*), характеризующие знания о предметной области; желания (*Desire*), отражающие цели агентов и намерения (*Intention*) - это возможные действия агентов для достижения поставленных целей [1].

Второе направление предполагает создание множеств простых агентов с реактивной архитектурой. Здесь агенты реагируют своими действиями на изменения среды, в которой они находятся и могут адаптироваться к этой среде. Недостаток когнитивных способностей простого реактивного агента здесь компенсируют их большим количеством и организацией их взаимодействия на основе, например, биологических или социальных принципов. Считается, что у стаи или роя агентов за счет самоорганизации в этом случае появятся эмерджентные свойства, позволяющие такой команде агентов решать сложные задачи.

Классы задач, решаемые в рамках каждого из перечисленных подходов можно определить метафорически, сравнивая, например, организацию муравейника с сообществом людей. Понятно, что интеллектуальные агенты могут решать широкий класс задач, как автономно, так и в группе агентов. Однако, сложность создания самого

интеллектуального агента, несмотря на то, что в настоящее время технологии создания таких агентов существуют, остается высокой.

В этой работе рассматриваются интеллектуальные агенты с упрощенной BDI архитектурой. Упрощение это достигается за счет применения в качестве модели представления знаний агента о среде функционирования признаков пространств (семантического пространства среды) и качественных онтологий в виде так называемого концептуального каркаса среды функционирования.

1. Базовая когнитивная архитектура интеллектуального BDI-агента

В качестве базовой архитектуры для агентов с BDI-архитектурой рассмотрим архитектуру InteRRap, предложенную в работе [2]. Основными элементами этой архитектуры являются: иерархическая база знаний и компонента управления агентом (роботом).

Алгоритмы функционирования компоненты управления роботом определены в иерархической базе знаний робота. Нижний уровень представляет собой модель мира – среды функционирования робота, которая представляется тройкой BDI архитектуры робота. Это убеждения робота – его знания о мире, цели – определяющие желаемое роботом состояние среды, и действия, которые способны выполнить роботы, в зависимости от наличия у них того или иного ресурса. Средний уровень представляется как знания о правилах и рекомендациях планирования деятельности отдельных роботов. Верхний уровень иерархии знаний – это знания о кооперативных действиях роботов, позволяющие согласовать локальные планы роботов, и разработать план решения общей задачи.

Компонента управления роботом, представленная как многоуровневая управляющая система. Нижний уровень – реактивный, реализует элементарные действия робота (рефлекторные) для различных состояний среды функционирования. Средний уровень отвечает за планирование самостоятельных действий робота для достижения цели и определяет последовательность элементарных действий, реализуемых на нижнем уровне. Верхний уровень ответственен за организацию кооперативного поведения множества роботов, ресурсы которых объединяются для достижения общей цели. Организация кооперативного поведения – это планы, сценарии, отдельные действия, реализуемые на среднем и нижнем уровнях управляющей системы робота.

С внешним миром робот связан с помощью датчиков (восприятие), механизмов (воздействие) и подсистемы коммуникации, реализующей социальные функции роботов – общение для совместной работы.

Далее рассмотрим возможную реализацию элементов представления знаний, планирования поведения и кооперативное взаимодействие агентов в качественной семиотической среде.

2. Архитектура качественного агента

Для построения архитектуры качественного агента, многоагентную систему будем определять как динамическую систему [3] с пространством состояний (SS), которое определяется как прямое произведение параметров всех агентов R_i , объектов и состояний среды (E), т.е., $SS = \times_i$

$R_i \times E$. Следует отметить, что в когнитивной психологии, искусственном интеллекте пространство состояний SS может интерпретироваться как признаковое семантическое пространство, в котором объекты реального мира, различные ситуации представляются как понятия. В семантическом пространстве реальные объекты (ситуации), по сути, денотаты, определяются именами и векторами значений признаков, определяющие их содержание (смысл). Таким образом, элементами знаний, представленных в семантических пространствах, являются знаки-символы. В определении немецкого логика Г. Фреге [4], знаком называется тройка: имя, смысл и значение знака. Имя – это символ (образ, икона) обозначающее объект реального мира, смысл определяет свойства этого объекта, а значение – это и есть сам объект – денотат. В семантических пространствах реальный объект (денотат) имеет имя (символ) и представляется в признаковом пространстве как точка, координаты которой определяют значение признаков (смысл).

Модель представления знаний в виде семантического пространства выбрана в качестве модели знаний агента с BDI архитектурой.

Далее мы рассмотрим следующие подсистемы качественной BDI архитектуры агента: представления знаний; планирования поведения; кооперативного взаимодействия.

3. Подсистема представления знаний

В этой работе в пространстве состояний динамической системы «группа роботов - среда», по сути, в семантическом пространстве, с помощью концептуального каркаса выделяются подпространства, определяющие классы возможных состояний среды функционирования [5]. В концептуальном каркасе все классы возможных состояний имеют имена и образуют частично упорядоченное множество подпространств пространства состояний динамической системы «группа роботов - среда».

Формально концептуальный каркас определен следующим выражением:

$$KK^W = (\{d^H\}, \wedge, \vee),$$

где $\{d^H\}$ – частично упорядоченное множество имен классов состояний d^H , которые однозначно определяют вложенные подпространства среды функционирования – содержание $SS(d^H)$, и объем класса состояний $V(d^H)$.

Знания (убеждения) агента в этом случае определяется кортежем [6]:

$$\langle BEL_i, W_i^{BEL} \rangle,$$

где BEL_i – убеждения (знания агента) i -о агента представляются в виде частично упорядоченного множества имен классов состояний среды функционирования, доступных для этого агента, т.е.

$$BEL_i = (\{d^H\}, \leq), d^H \leftrightarrow SS_i(d^H) \subseteq KK^W, BEL_i \subseteq KK^W.$$

Вторая составляющая W_i^{BEL} – это знания агента о закономерностях среды функционирования представляются как отображение:

$$W_i^{BEL}: \varphi(\times Z_{ji}) \rightarrow \varphi(\times Z_{ji}),$$

где $\times Z_i$ – векторы значений признаков агентов, $\varphi(\times Z_{ji}) \in SS_{ji}(d^H)$, $d^H \in BEL_j$;

φ – соответствие векторов значений признаков классам состояний среды функционирования, W_i^{BEL} -множество правил продукций (Если, То), отражающих закономерности среды функционирования.

Особенность представления среды функционирования в виде концептуального каркаса заключается в том, что имена классов состояний могут быть искусственными. Если агенты договорились об именах классов всех классов состояний, то такую качественную среду функционирования агентов можно уже рассматривать как качественную семиотическую среду функционирования с искусственными именами.

4. Подсистема планирования поведения агента

Выбор модели планирования поведения агента в значительной степени зависит от его модели представления знаний. Так известные в настоящее время модели планирования поведения базируются на логических моделях представления знаний и основаны на строгих методах математической логики. Это модели: ситуационного исчисления [7]; STRIPS [8], PDDL (Planning Domain Definition Language) [9] и др.

В задачах планирования поведения агента определено: начальное и целевое состояние, в которое агент пытается попасть; множество возможных действий, включающие предусловия, выполнение которых необходимо для выполнения действий и постусловия – это изменения состояния, которые произойдут после выполнения действия. В основу

систем планирования поведения, как правило, заложена методология доказательства теорем, по типу универсального решателя задач (анализ средств и целей) с тем, чтобы в пространстве состояний получить ответы: какие действия нужно предпринять и будут ли достигнуты цели.

В модели представления знаний в виде структурированного семантического пространства (концептуального каркаса) решение задачи планирования поведения может быть сформулировано проще, а именно, как решение обратной задачи в уравнениях динамики многоагентной системы, заданных системой логико-лингвистических уравнений.

Так изменение состояния среды i -м агентом, с учетом его знаний W_i^{BEL} может быть выражена системой логико-лингвистических уравнений [6]:

$$W_i^{BEL}:(Z^*(t), INT_i^*) \rightarrow Z^*(t+1), \forall i,$$

где W_i^{BEL} – знания i -го агента (система правил «Если, То»), $Z^*(t) = \varphi(Z(t))$, – начальный вектор состояния среды в терминах имен классов состояний, INT_i^* – управление (действие агента), $Z^*(t+1) = \varphi(Z(t+1))$ состояние среды после управления в терминах имен классов состояний.

Цель агента может быть записана в терминах имен классов состояний среды функционирования [6]:

$$DES_i = (d_1^{Gi}; d_2^{Gi}; \dots; d_n^{Gi}), d_j^{Gi} \Leftrightarrow SS_j(d^H) \subseteq KK^W, \forall i, j, i, j = 1, \dots, N.$$

Формально поиск действий для достижения заданного вектора цели каждым агентом сводится к решению им обратной задачи [6]:

$$INT_i^* = DES_i \circledR W_j^{BEL}.$$

где INT_i^* – действия агентов, позволяющие достичь цели $DES_i \circledR$ – процедура обратного вывода.

Необходимо отметить, что языки и модели планирования поведения отдельных агентов при применении их к задачам командного поведения агентов становятся элементами системы, реализующей принципы командного поведения элементов [10], неотъемлемым элементом которой является система коммуникации агентов.

4.1. Ситуационное планирование. Возможны два подхода к планированию кооперативного поведения агентов для решения общей задачи. Первый предполагает построение общего плана (согласование действий агентов) до начала решения общей задачи, а второй, предполагает согласование действий в процессе решения задачи.

Алгоритмы совместной работы, основанные на построении общего плана, плохо работают в динамических средах, в условиях наличия в среде функционирования агентов, действия которых могут привести к

непрогнозируемым изменениям состояния среды функционирования, что потребует от команды агентов перестройки согласованного общего плана.

Второй подход – это, по сути, ситуационная кооперация между агентами, когда решение о совместных действиях принимаются агентами на каждом такте работы на основе анализа состояния среды функционирования и наличия у агентов условий для кооперации. В этом случае глубина планирования на каждом шаге совместных действий не высока – один шаг. Выбор действия агента, основанный на решении обратной задачи и на критерии рациональности поведения, позволяет выбрать одно, лучшее действие.

5. Подсистема кооперативного взаимодействия

В качестве условия для кооперации агентов рассмотрен критерий взаимной полезности агентов, предложенный в работе [11]. По этому критерию в качестве партнера выбирается агент, взаимодействие с которым максимально полезно обоим агентам.

В работе [6] были сформулированы три условия кооперации агентов:

1. Агент j считается привлекательным для кооперации для агента i , если элемент его цели $d_i^H \notin BEL_i$ существует в системе убеждений (знаний) агента j , т.е. $d_i^H \in BEL_j$.
2. Агент j считается привлекательным для кооперации для агента i , если в его системе убеждений существуют элементы $d_i^H \in BEL_i$, которые являются также элементами системы убеждений агента j , т.е. $d_i^H \in BEL_j$.
3. Агент j может изменить свойства агента i , если агент i включен в объем одного из возможных классов состояний агента j , т.е. $a_i \in V(d_j^H) | d_j^H \in BEL_j$.

Первое условия определяет, что у потенциального партнера должна быть возможность (ресурсы) для оказания помощи. Второе, у потенциальных партнеров должны быть пересечения их понятийных систем (знаний). Тогда они смогут говорить на одном понятном им языке. Третье условие, в случае если выполняются первые два условия, то агент, попросивший о помощи должен сам создать условия (изменить состояние ситуации), для того, чтобы совместные действия были возможны.

Поскольку глубина планирования невысока, а выбор действий и выбор партнера, основанные на критериях взаимной полезности и рациональности, единственны, то и нет комбинаторного взрыва возможного поведения группы агентов. Такой подход исследовался в работе [11] при моделировании динамической системы игры в виртуальный футбол.

Заключение

Предложена качественная архитектура BDI-агента включающая: качественную модель представления знаний, подсистемы планирования поведения и кооперации агентов. Модель представления знаний агента представляется в виде концептуального каркаса, структурирующего среду функционирования агентов на подпространства, определяющие классы возможных состояний. При решении задачи планирования поведения агентов, выбор действия агента основан на решении обратной задачи в логико-лингвистических уравнениях динамики агентов и на критерии рациональности его поведения, что позволяет выбрать лучшее действие. В основе подсистемы кооперации агентов лежит критерий взаимной полезности агентов. Предложенная качественная архитектура была исследована при имитационном моделировании механизмов образования и функционирования интеллектуальных агентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rao A.S., Georgeff M.P. BDI Agents: From Theory to Practice // Proc. First International Conference on Multi-Agent Systems (ed. V.Lesser). – AAAI Press/The MIT Press, 1995. – P. 312–319.
2. Müller J.P., Pischel M. The Agent Architecture InteRRaP: Concept and Application. 1993. С.99. <https://books.google.ru/books?id=gTNFOAAACA AJ> (13.06.2017).
3. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. -279 с.
4. Бирюков Б.В. Теория смысла Готлоба Фреге / В кн.: Применение логики в науке и технике. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 502–555.
5. Кулинич А.А. Концептуальные каркасы онтологий слабо структурированных предметных областей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. - № 4. - С. 31-41.
6. Кулинич А.А. Модель командной работы агентов с BDI архитектурой. 15-я национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2016 (3-7 октября 2016 г.): Тр. конф. Т.2. – Смоленск: Универсум, 2016. - с. 344-352.
7. McCarthy J., Situations, Actions and Causal Laws. Stanford Artificial Intelligence Project: Memo 2. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/785031.pdf> (13.06.2017).
8. Fikes R.E., Nilsson N.J., STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving. IJCAI'71, стр. 608-620.
9. Ghallab M., Howe A., Knobloch C., McDermott D., Ram A., Veloso M., Weld D., Wilkins D. PDDL — The Planning Domain Definition Language (version 1.2). AIPS'98, 1998.
10. Cohen P., Levesque H.J. Teamwork. *Nous*, 25(4), (1991) Special Issue on Cognitive Science and Artificial Intelligence, P. 487-512.
11. Кулинич А. А. Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход / Управление большими системами. Выпуск 51. М.: ИПУ РАН, 2014. С.174-196.

Автор: Кулинич Александр Алексеевич, Институт проблем управления Российской академии наук, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kulinich@ipu.ru.

Author: Kulinich Alexander Alexseevich, Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Ph.d., senior scientist, e-mail: kulinich@ipu.ru.