

Планирование поведения интеллектуального агента со знаковой картиной мира

Панов А. И.

ФИЦ ИУ РАН, пр. 60-летия Октября, 9, pan@isa.ru

Планирование поведения является важной функцией любой интеллектуальной системы управления сложным техническим объектом. В настоящее время в символьной парадигме искусственного интеллекта предложено большое количество различных алгоритмов планирования, в том числе и использующих прецедентную информацию, т.е. опирающихся на приобретенные знания. Однако проблема символизации (обоснования символов) в существующих способах представления знаний не позволяет эффективно использовать разработанные алгоритмы совместно с механизмами обучения при решении широкого спектра прикладных задач реальными интеллектуальными агентами (робототехническими системами). В настоящей работе представлен оригинальный алгоритм планирования (МАР-планировщик), который в качестве основы для приобретения и сохранения знаний, используемых в дальнейшем при планировании поведения, использует знаковую картину мира. В знаковой постановке задачи планирование является когнитивной функцией реализуемой картиной мира субъекта деятельности. Знаковая модель процесса планирования кроме решения проблемы символизации и обеспечения психологической и биологической правдоподобности, позволяет интеллектуальному агенту взаимодействовать с другими участниками при решении коалиционной задачи. В статье представлены описание используемого представления знаний, МАР-алгоритм планирования и модельный эксперимент в «мире кубиков».

Ключевые слова: планирование поведения, знаковая картина мира, образ, значение, личностный смысл, каузальная матрица, семиотическая сеть, МАР-алгоритм, планирование на основе прецедентов.

Введение

Вопрос разработки методов планирования поведения сложного технического или виртуального объекта имеет большую историю и в основном связывается с успехами отдельной области искусственного интеллекта - автоматического планирования. Здесь достигнуты существенные успехи - предложен ряд символьных методов планирования как в классической постановке задачи, когда действия детерминированы (такие алгоритмы планирования, как FF [21], FD [20], LAMA [30]), так и в недетерминированной постановке с учетом ненулевых вероятностей невыполнения действий и вероятностной реакции среды (алгоритмы на основе марковских процессов и динамического программирования [2; 4]). Однако создание эффективных и быстрых алгоритмов планирования действий основывается на заранее заданных эвристических принципах поиска на графе и на предположении, что набор действий заранее известен, что делает невозможным автоматическую адаптацию системы планирования к новой задаче с новым списком действий. Это означает, что переноса опыта планирования с выделением абстрактных действий, которые могут иметь различную реализацию в разных ситуациях, в классических подходах не происходит. Существенные трудности возникают, когда существующие алгоритмы адаптируются для многоагентного случая, где предполагается, что агенты обладают как различными наборами действий, так и обладают различными знаниями о внешней среде [6]. В случае коалиционного взаимодействия также необходимо обязательное включение элементов обучения для пополнения базы данных одного агента по поступающей от других участников коалиции информации.

В последнее время исследователи в области управления и планирования уделяют повышенное внимание психологически и биологически правдоподобным моделям и архитектурам управления агентами [23; 34]. Использование различных типов памяти (эпизодической, процедурной и др.) в когнитивных архитектурах нацеленно именно на задачу повторить биологические и психологические пути обмена и организации информации для решения таких задач как управление и планирование поведения. Это связано в первую очередь с тем, что повышающийся уровень сложности тех задач, в которых действуют робототехнические системы (агенты) требует от них большего уровня автономности, универсальности и гибкости, которую не могут обеспечить существующие методы и алгоритмы. Исследователи в области искусственного интеллекта снова обращаются к естественным примерам решения таких задач - к исследованию поведения человека и животных [29; 48]. Психологически правдоподобные модели когнитивных функций, в том числе планирования, нацелены не только на то, чтобы повторить поведение человека в сложных, в том числе коалиционных, условиях, но и по возможности более полно удовлетворить существующим психологическим представлениям о функционировании психики человека. С одной стороны это может привести к повышению ресурсоемкости предлагаемых алгоритмов, но, с другой стороны, позволит реализовать новые возможности, которые раньше оставались вне круга решаемых проблем специалистами по планированию, например, возможности к целеполаганию, распределению ролей в коллективе. Идеи когнитивной психологии и раньше использовались в классиче-

ском планировании, но, в основном, в бихевиориостском ключе. Так идея в разделении множества действий на автоматические, быстро совершаемые, специфические и произвольные, обобщенные, подсказанное психологической теорией [22], нашла свое воплощение в иерархическом планировании, а идея сохранения опыта планирования - в прецедентном [5; 10; 17].

В когнитивной психологии имеется ряд направлений, изучающих феномен планирования, среди которых необходимо выделить три основных [50]: планирование как часть когнитивной схемы [26], планирование как метапроцесс [14; 28] и планирование как часть деятельности [37]. В первом направлении для описания поведения человека используются когнитивные схемы. Например, перцептивная схема – это план сбора информации об объектах и событиях, получения новой информации, обеспечивающий ее непротиворечивую интерпретацию. Схема одновременно включает в себя и сам план, и исполнение плана, это структура действия, равно как и структура для действия. Во втором направлении предусматривается наличие метакогнитивных процессов, позволяющих человеку управлять своими когнитивными процессами и знаниями. С точки зрения Стернберга, можно говорить о глобальном (стратегическом) и локальном (тактическом) планировании. Глобальное планирование требует больших затрат времени, но это компенсируется уменьшением времени на локальное, тактическое планирование. Наконец, в третьем подходе, являющимся одним из наиболее общих, рассматривается иерархическая теория деятельности, которая используется в данной работе и описывается в следующем разделе.

Стоит отметить также, что психологически и биологически правдоподобные модели управления и планирования позволяют по-другому взглянуть на проблему символизации (symbol grounding problem) [1; 3; 8; 18]. Нейрофизиологические модели функционирования сенсорных отделов коры головного мозга в купе с психологической теорией категоризации и восприятия служат основой для построения новых непротиворечивых моделей привязки символов к сенсорным данным. Успехи в данном направлении позволили реализовать некоторые модели в робототехнических системах [19].

В настоящей работе будет представлен новый психологически и биологически правдоподобный метод планирования поведения, основанный на знаковой теории деятельности и моделях строения кортикально-таломических отделов коры головного мозга. Помимо своей ценности с точки зрения моделирования когнитивных функций человека знаковый подход может быть использован при решении ряда коллективных робототехнических задач (например, для задачи интеллектуального перемещения [46; 48]), не решаемой классическими и другими психолого ориентированными методами (такими как BDI [31]).

Далее статья организована следующим образом. В главе 1 вводятся основные понятия, используемые в статье: даны определения картине мира, знаку и его компонентам с психологическими и нейрофизиологическими обоснованиями. В параграфе 1.1 вводится понятие каузальной матрицы как математические структуры для описания компонент знака, рассматриваются ее основные характеристики. В параграфе 1.2 исследуются сети, формируемые на основе множеств каузальных матриц и моделирующих отношения на компонентах знака. В главе 2 вводится по-

нятие семиотической сети как модели картины мира, рассматриваются основные типы процессов распространения активности по семиотической сети. В главе 3 дано описание МАР-алгоритма планирования поведения в знаковой картине мира (на семиотической сети). В заключение, в главе 4 приведен модельный пример работы представленного МАР-планировщика.

1 Знаковая картина мира

В качестве способа представления знаний в настоящей работе используется модель знаковой картины мира [39; 40; 42], которая не только хранит знания об объектах, процессах и отношениях внешней среды, но также представляет внутренние параметры интеллектуального агента, определяющие его мотивационную составляющую и опыт действия. Картина мира также включает в себя процедуры оперирования со знаниями: их приобретение и использование в различных процессах, таких как восприятие, рассуждения, целеполагание, планирование поведения [43]. Модель картины мира строится на основе психологических представлений о функционировании психики человека, в частности на представлениях культурно-исторического подхода [35], теории деятельности [37; 51] и теории дуальных систем [13; 33]. В соответствии с психологическими воззрениями элементом картины мира является четырехкомпонентная структура - знак, которая представляет для субъекта (в нашем случае интеллектуального агента) все сущности внешней среды и внутреннего пространства: объекты, их свойства, процессы, отношения между объектами и процессами. Следует отметить, что знак является продуктом взаимодействия нескольких субъектов деятельности, образующих некоторую группу (культурную среду), т.е. понятие знака изначально предполагает работу картины мира индивида в кооперации с картинами мира других индивидов.

Образная компонента знака хранит характерные признаки представляемой сущности и одновременно является функцией построения представления этой сущности на основе потока данных, поступающих как с наружных, так и внутренних сенсоров, и в котором выделяются ключевые признаки. Образная компонента индивидуальна для каждого носителя картины мира и образуется в результате процесса наблюдения и обобщения [32; 45; 47].

Компонента значения знака представляет обобщенные, концептуальные знания субъекта о сущностях внешней среды, а также внутреннего пространства как себя, так и других участников группы. Эти знания являются согласованными, т.е. одинаковы у всех представителей группы. Коммуникативные процессы, которые протекают в группе субъектов (интеллектуальных агентов), в своей основе используют сообщения, которые строятся по общим для всех значениям знаков, задающих, таким образом, синтаксис протокола коммуникации.

Компонента личностного смысла знака содержит индивидуальный личный опыт взаимодействия субъекта с внешней средой с учетом отношения к этому опыту - послужил ли он достижению некоторой цели (удовлетворению некоторой потребности), или же наоборот, оказался неудачным. Личностный смысл знака является

динамической его характеристикой, которая постоянно формируется и обновляется в результате протекания тех или иных когнитивных процессов (планирования, целеполагания). Именно компонента личностного смысла определяется внутренними характеристиками субъекта и его потребностно-мотивационной сферой.

Наконец, четвертая компонента знак - имя - служит для его идентификации как в коммуникативных процессах, так и в произвольных процессах планирования и рассуждений. Имя знака, как и его значение, является утвержденной, слабо меняющейся в группе субъектов компонентой знака.

Знаки представляет в картине мира субъекта как статические объекты и свойства внешней среды, так и динамические ее составляющие: процессы, ситуации - а также внутренние характеристики агента: действия, объекты и свойства «внутренней среды». Пусть у нас есть объект внешней среды - *лимон*. В картине мира некоторого субъекта он может представляться знаком с именем «лимон», образ которого включает такие признаки как *желтый цвет, овальную форму и кислый вкус*. Эти признаки также могут быть представлены в картине мира знаками, либо являться информацией, поступающей напрямую от сенсоров. Значением знака «лимон» будут являться те обобщенные действия и процессы, в которых по общему согласованному мнению некоторого коллектива, которому принадлежит субъект, участвует *лимон*: *лимон принято употреблять в пищу, использовать как соус для рыбных блюд или использовать для профилактики болезней*. Личностный смысл лимона для субъекта - это те конкретные персональные действия и процессы, в которых субъект имел опыт использования лимона, решая некоторую задачу: *когда-то я кидал лимон в соседа по парте в школе или съедал целый лимон и не скривил лицо*. Все действия и процессы также могут быть представлены некоторыми знаками, либо не выводиться на знаковый произвольный уровень и являться некоторыми не обозначаемыми операциями.

Кроме психологических оснований четырехкомпонентной структуры знака имеются нейрофизиологические свидетельства в пользу существования такой структуры хранения и активации элементов индивидуального опыта [12; 36]. Кроме того, нейрофизиологические данные служат основой для построения моделей компонент знака и некоторых функций, таких как восприятие и распознавание [15; 45]. Нейрофизиологические свидетельства в пользу высокой однородности строения различных отделов коры больших полушарий мозга, а также участия таламуса в формировании и запоминании временных последовательностей [7; 9], приводят к используемой в данной статье математической структуре каузальной матрицы [47] для описания строения компонент знака.

Знаковый подход к представлению знаний и описание процессов, протекающих в знаковой картине мира позволяют решить ряд трудных задач в области ситуационного управления [41; 44] и управления сложными техническими объектами [49]. Использование знаковой картины мира для реализации функций стратегического уровня управления робототехническими системами [38] демонстрирует применимость используемого подхода не только для представления знаний, но и для решения задач коалиционного планирования и распределения ролей.

1.1 Компоненты знака

Рассмотрим структуру компонент знака на примере образной компоненты, которая участвует в распознавании (актуализации) знака, выделении представления об опосредуемом объекте или процессе на основе поступающей из внешней среды сенсорной информации и регистрируемой внутренними сенсорами моторной информации. До именования знак будем называть протознаком или признаком.

Предположим, что во входном потоке данных выделена последовательность (x_1, x_2, \dots, x_h) длины h векторов действительных чисел от 0 до 1, которые будем называться *событиями*. Каждое событие x_t длины q представляет собой запись выходов от q сенсоров, а каждый элемент события означает уверенность в срабатывании данного сенсора. Например, событие $(0.1, 0.9, 0.9)$ поступает с трех сенсоров - датчиков красного, синего и зеленого света - и означает, что уверенность в срабатывании датчика красного света составляет 10%, а синего и зеленого - по 90%.

Образная компонента знака должна по входной последовательности данных определить, присутствует ли (закодирован ли) опосредуемый объект или процесс в этой последовательности. Для этого мы будем кодировать характерные признаки объекта или процесса в специальной структуре - каузальной матрице $z = (e_1, e_2, \dots, e_h)$ размерности q на h , где q - размерность входных событий, а h - длина последовательности входных событий. При этом каждый столбец e_t каузальной матрицы является битовым вектором длины q и кодирует те признаки (которым соответствуют 1), которые необходимо должны присутствовать во входном событии в момент времени t , чтобы опосредуемый объект или процесс мог быть распознан во входном потоке данных, т.е. задают множество одновременных характерных признаков. Например, образу знака s , представляющему объект «квадрат», может соответствовать каузальная матрица

$$z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

где первая строчка является характеристическим вектором информации с датчика углов на изображении, вторая - с датчика положения визуального сенсора (верхнее положение), третья - нижнее положение сенсора, четвертая - левое положение сенсора, пятая - правое положение (см. рис.1.1).

Образу каждого знака может соответствовать несколько каузальных матриц, которые задают различные проявления представляемого объекта или процесса. Весь кортеж каузальных матриц образа знака s будем обозначать как $Z^p(s)$.

Случай, когда характерными признаками образа данного знака выступают данные с сенсоров, является частным. В более общей постановке, признаками для образа знака служат другие знаки, которые представляют эти характерные признаки. Таким образом, мы можем сопоставить образу знака s множество $S_p(s)$ мощности q , каждому элементу которого соответствует номер строчки каузальной матрицы z размера q на h , т.е. каждому признаку $s_i \in S_p(s)$ соответствует характеристический битовый вектор, задающий на местах 1 те моменты времени, когда данный признак

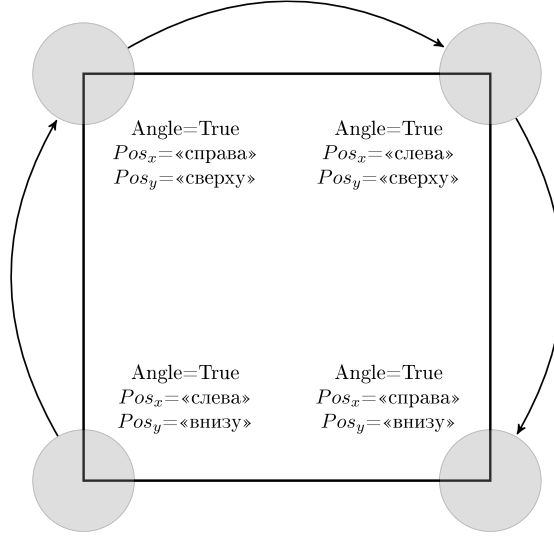


Рис. 1: Визуальная интерпретация каузальной матрицы

должен присутствовать во входных данных, чтобы успешно актуализировать знак (распознать образ знака) s .

Для уточнения определения множества $S_p(s)$ введем семейство бинарных отношений $\{\sqsubset_p, \sqsubset_p^1, \sqsubset_p^2, \dots\}$, определённых на декартовом произведении $S \times S$. Будем считать, что знак s_i является *элементом образа* знака s , $(s_i, s) \in \sqsubset_p$ или $s_i \sqsubset_p s$, в том случае, если $s_i \in S_p(s)$. Если известно, что знаку s_i соответствует 1 в t -м столбце некоторой каузальной матрицы $z \in Z^p(s)$ знака s , то мы будем использовать вложенное отношение $\sqsubset_p^t \sqsubset \sqsubset_p$.

1.2 Каузальная сеть

Введем специальную процедуру $\Lambda_p : 2^Z \rightarrow 2^{\mathbb{N}} \times 2^{\mathbb{N}}$, которая каждому кортежу каузальных матриц $Z^p(s) \subset Z$ образа знака s ставит в соответствие два не пересекающихся подмножества индексов собственных столбцов $I^c \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^c i \leq h$ (индексы столбцов условий) и $I^e \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^e i \leq h$ (индексы столбцов эффектов): $\Lambda_p(Z^p(s)) = (I^c, I^e), I^c \cap I^e = \emptyset$. Например, если для множества матриц $Z = \{((1, 0), (0, 1))\}$ процедура Λ_p выдает два множества $\{1\}$ и $\{2\}$, то это означает, что появление признака, соответствующего первой строчке матрицы, вызывает появление признака, соответствующего второй строчке. Процедура Λ_p по сути является функцией установления причинно-следственного отношения на множестве входных событий и может реализовываться различными способами, в т.ч. на основе алгоритмов Норриса, FCbO, AddIntent ([24; 25; 27])

В том случае, когда для матриц $Z^p(s)$ образа знака s множество столбцов эффектов пусто $I^e = \emptyset$, т.е. когда по данному множеству каузальных матриц не возможно однозначно определить, какие события всегда предшествуют другим, мы будем считать, что причинно-следственная связь не установлена и знак опосредует некоторый

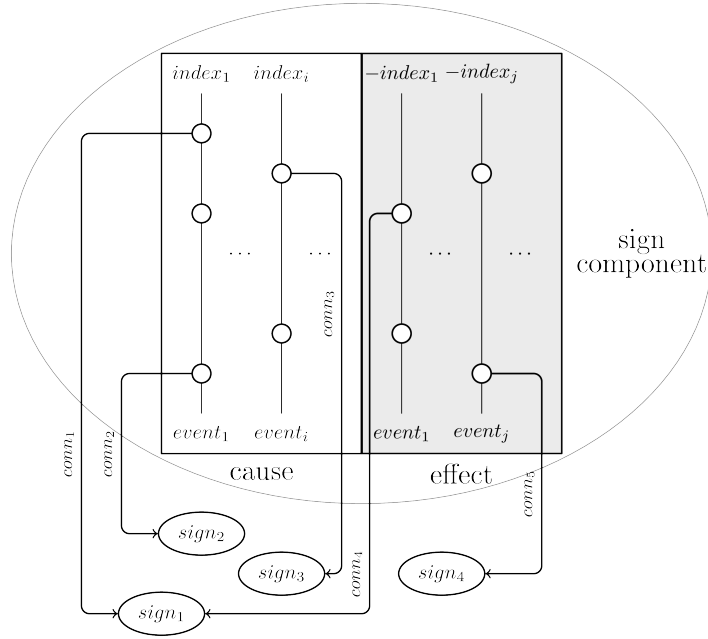


Рис. 2: Схема каузальной матрицы

объект или ситуацию. В противном случае будем считать, что знак опосредует некоторое действие или процесс, результат которого кодируется в столбцах эффектов, а условие - в столбцах условий.

Справедливы следующие утверждения относительно свойств процедуры Λ_p :

- $I^c \cap I^e = \emptyset$ — столбец матрицы предсказания не может быть одновременно и условием и эффектом,
- $|I^c \cup I^e| = h$ — столбец матрицы предсказания является либо условием либо эффектом,
- $I^c \neq \emptyset$ — среди столбцов матрицы предсказания должен быть хотя бы один столбец условий, в то время как эффектов может и не быть (в случае объектных признаков),
- $\forall i \in I^e, j \in I^c \ i > j$ — все условия предшествуют эффектам по времени.

Схема каузальной матрицы, с учетом выше сказанного, приведена на рис. 2.

Теперь введем понятие каузальной сети, которая будет определять гетерархию на множестве образов. Каузальная сеть $W_p = \langle V_p, E_p \rangle$ - является помеченным ориентированным графом, в котором

- каждому узлу $v \in V_p$ ставится в соответствие кортеж казуальных матриц $Z^p(s)$ образа некоторого знака s , что будем обозначать как $v \rightarrow Z^p(s)$;
- ребро $e = (v_1, v_2)$ принадлежит множеству ребер графа E , если $v_1 \rightarrow Z^p(s_1), v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$ и $s_1 \in S_p(s_2)$, т.е. если знак s_1 является элементом образа знаком s_2 ;

- каждому ребру графа $e = (v_1, v_2)$, $v_1 \rightarrow Z^p(s_1)$, $v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$ ставится в соответствие метка $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ - кортеж трех натуральных чисел:
 - ϵ_1 - индекс исходной матрицы в кортеже $Z^p(s_1)$, может принимать специальное значение 0, если исходными могут служить любые матрицы из кортежа;
 - ϵ_2 - индекс целевой матрицы в кортеже $Z^p(s_2)$, строка которой ставится в соответствие признаку s_1 ;
 - ϵ_3 - индекс столбца в целевой матрице, в которой в соответствующей строке стоит 1, может принимать положительные значения (столбцы условий) и отрицательные (столбцы эффектов).

Каузальная сеть представляет собой некоторое множество пересекающихся иерархий знаков. Каждый знак представлен множеством каузальных матриц, задающих образ этого знака, а иерархия представляет иерархические связи между образами. Такую связь можно читать как «знак x участвует в формировании образа знака y ». При этом мы специфицируем для какой именно матрицы знака y и какого именно столбца этой матрицы нужен знак x (метки ϵ_2 и ϵ_3 соответственно). В некоторых случаях мы также можем указать и участвующую в процессе формирования образа матрицу знака x (метка ϵ_1). Пример такой сети изображен на рис. 3.

Аналогичным образом определяются каузальные сети для остальных компонент знака - для значения и личностного смысла. Для каждого знака s задаются множества $S_m(s)$ и $S_a(s)$, т.е. определяются семейства отношений $\{\sqsubset_m, \sqsubset_m^1, \sqsubset_m^2, \dots\}$ и $\{\sqsubset_a, \sqsubset_a^1, \sqsubset_a^2, \dots\}$. Множество $S_m(s)$ интерпретируется как ролевой состав знака s , например, элементы подкласса или роль действия. Множество $S_a(s)$ интерпретируется как мгновенный компонентный состав некоторой ситуации, наблюдаемой и переживаемой субъектом, носителем картины мира, в настоящее время. Аналогично определяются множества $Z^m(s)$, $Z^a(s)$, процедуры Λ_m и Λ_a .

2 Семиотическая сеть

Знаком s будем называть четверку $\langle n, p, m, a \rangle$, где n - имя знака, p - образ знака, кортеж каузальных матриц $\langle z_1^p(s), z_2^p(s), \dots \rangle$, соответствующий узлу $w_p(s)$ каузальной сети на образах; m - значение знака, кортеж каузальных матриц $\langle z_1^m(s), z_2^m(s), \dots \rangle$, соответствующий узлу $w_m(s)$ каузальной сети на значениях, a - личностный смысл знака, кортеж каузальных матриц $\langle z_1^a(s), z_2^a(s), \dots \rangle$, соответствующий узлу $w_a(s)$ каузальной сети на смыслах.

Будем называть *семиотической сетью* пятерку $\Omega = \langle W_p, W_m, W_a, R_n, \Theta \rangle$, где

- W_p, W_m, W_a - соответственно каузальные сети на множестве образов, значений и личностных смыслах,
- R_n - семейство отношений на множестве знаков, сгенерированных на основе трех каузальных сетей, т.е. $R_n = \{R_p, R_m, R_a\}$,

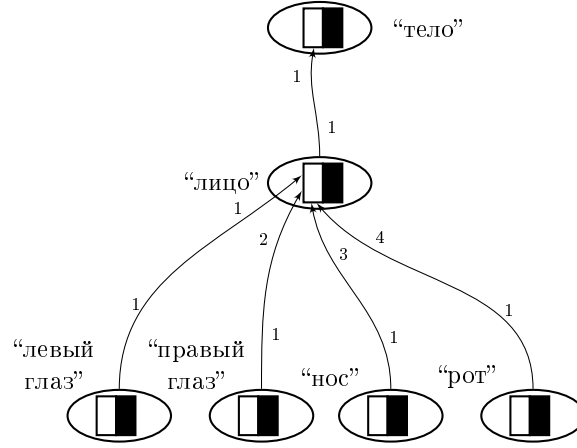


Рис. 3: Схема каузальной сети. Здесь каузальные матрицы изображены в виде квадратов, столбцы условий - левая белая часть квадрата, столбцы эффектов - черная правая часть квадратов. Метка ϵ_1 отображается в начале каждой стрелки, метка ϵ_2 определяется как номер квадрата, к которому идет стрелка, а метка ϵ_3 отображается в конце каждой стрелки.

- Θ - семейство операций на множестве знаков, которые генерируются на основе структуры фрагментов трех типов каузальных сетей, к которым принадлежат соответствующие компоненты знаков (подробнее см. [42]).

Еще раз отметим, что знак представляет не только объекты внешнего мира, но также процессы, протекающие в нем, выполнимые действия, а также ситуации, наблюдаемые во внешней среде.

Три типа каузальных сетей, составляющих семиотическую сеть, не независимы друг от друга. Между узлами каждой сети установлено взаимно-однозначное соответствие: для каждого узла w_x сети W_x найдутся единственные узлы w_y и w_z в сетях W_y, W_z ($x, y, z \in \{p, m, a\}$), такие, что все три узла соответствуют одному и тому же знаку $s = \langle w_p, w_m, w_a \rangle$. Имя знака служит меткой узлов в каждой сети: в каузальной сети может быть только один узел с данной меткой, а узлы всех сетей с одинаковыми метками образуют компоненты знака. Для связи каузальных матриц различных типов узлов в рамках одного знака служат специальные функции связывания: $\Psi_p^m, \Psi_m^a, \Psi_a^p$ и обратные им $\Psi_m^p, \Psi_a^m, \Psi_p^a$ [42]. Каждая функция связывания ставит каузальной матрице одного типа каузальную матрицу другого типа либо генерирует эту матрицу в том случае, если она отсутствует в соответствующем узле сети.

Введем понятия активности в семиотической сети и процесса его распространения. Введем некоторую метку активности для каузальных матриц сети W_x ($x \in \{p, m, a\}$) и будем называть активным множество Z_x^* матриц, обладающих этой меткой. Процесс распространения активности представляет собой изменение состава множества Z_x^* с течением времени (каждый дискретный момент) и описывается для каждого типа каузальной сети своей функцией: $\varphi_a, \varphi_m, \varphi_p$. Процесс распро-

странения активности является итерационным, т.е. на каждом шаге новый состав множества активных матриц порождается на основе предыдущего состава и зависит от матриц, туда входящих. В простейшем случае мы будем рассматривать такой процесс, в котором каждая матрица не влияет на ход распространения активности от другой матрицы и поэтому будем считать, что функции φ_x принимают на вход одну активную матрицу и выдают новое подмножество активных матриц.

В связи с тем, что ребра каузальных сетей имеют направлением, будем различать распространение активности вверх по сети, когда используются исходящие от узла ребра (функции φ_x^\uparrow), и распространение активности вниз по сети, когда используются входящие в узел ребра (функции φ_x^\downarrow). В дальнейшем, при описании алгоритма планирования, нам понадобятся только функции на сети значения и личностных смыслов. Каждую функцию $\varphi_x^\uparrow, \varphi_x^\downarrow$ будем параметризовать глубиной распространения активности d_x , которая указывает на какую глубину просматриваются ребра в данном направлении (вверх или вниз).

В дальнейшем при описании алгоритма планирования будет использоваться понятие фрагмента казуальной сети. Под фрагментом F мы будем подразумевать некоторое множество узлов V сети $W_x = \langle V_x, E_x \rangle$ вместе со всеми ребрами E их связывающими: $F = \langle V, E \rangle : V \subseteq V_x$ и $\forall e = (v_1, v_2) \in E v_1 \in V, v_2 \in V$.

3 Планирование в знаковой картине мира

Процесс планирования в знаковой картине мира реализуется с помощью МАР-алгоритма и идет в обратном направлении: от конечной ситуации к начальной. Кратко опишем основные этапы его работы. На вход алгоритма поступает описание задачи

$$T = \langle N_T, S, Sit_{start}, Sit_{goal} \rangle,$$

где N_T - идентификатор задачи, S - множество знаков семиотической сети, $Sit_{start} = \langle \emptyset, \emptyset, a_{start} \rangle$ - начальная ситуация со смыслом $a_{start} = \{z_{start}^a\}$, $Sit_{goal} = \langle \emptyset, \emptyset, a_{goal} \rangle$ - целевая ситуация со смыслом $a_{goal} = \{z_{goal}^a\}$. В общем случае задача T является результатом процедуры «означивания» - формирования картины мира по исходным описаниям домена планирования D , задающему списки возможных действий и типов объектов, и задачи планирования P , включающей в себя определение стартовых условий и конечной цели (шаг 1).

Результатом МАР-алгоритма является план $Plan = \{\langle z_{s1}^a, z_{p1}^a \rangle, \langle z_{s2}^a, z_{p2}^a \rangle, \dots, \langle z_{sn}^a, z_{pn}^a \rangle\}$ - последовательность длины n пар $\langle z_{si}^a, z_{pi}^a \rangle$, где z_{si}^a - каузальная матрица некоторого узла сети на личностных смыслах, представляющая i -ую ситуацию планирования, а z_{pi}^a - каузальная матрица некоторого личностного смысла, представляющая применяемое в ситуации z_{si}^a действие. При этом ситуация z_{si+1}^a является результатом выполнения действия z_{pi}^a , в том смысле, который раскрывается далее при обсуждении алгоритма, $z_{s1}^a := z_{start}^a$ - каузальная матрица, соответствующая смыслу начальной ситуации, $z_{sn}^a = z_{goal}^a$ - каузальная матрица, соответствующая смыслу целевой ситуации.

Input: описание домена планирования D , описание задачи планирования P , максимальная глубина итераций i_{max}

Output: план $Plan$

```

1:  $T = \langle N_T, S, Sit_{start}, Sit_{goal} \rangle := \text{GROUND}(P)$ 
   //  $N_T$  - идентификатор задачи,  $S$  - множество знаков,  $Sit_{start} = \langle id_{start} \emptyset, \emptyset, \{z_{start}^a\} \rangle$  -
   начальная ситуация со смыслом  $a_{start}$ ,  $Sit_{goal} = \langle id_{goal} \emptyset, \emptyset, \{z_{goal}^a\} \rangle$  - целевая ситуация со
   смыслом  $a_{goal}$ 
2:  $Plan := \text{MAP\_SEARCH}(T)$ 
3: function  $\text{MAP\_SEARCH}(T)$ 
4:    $z_{cur} := z_{goal}^a$ 
5:    $z_{start} := z_{start}^a$ 
6:    $Plans := \text{MAP\_ITERATION}(z_{cur}, z_{start}, \emptyset, 0)$ 
7:    $\{Plan_0, Plan_1, \dots\} = \text{SORT}(Plans)$ 
8:   return  $Plan_0$ 

```

Процесс планирования является иерархическим и состоит из повторения MAP-итерации, включающей в себя четыре этапа (см. рис. 4):

- *S-этап* – поиск прецедента совершения действий в текущей ситуации,
- *M-этап* – поиск применимых действий на сети значений,
- *A-этап* – генерация личностных смыслов, соответствующих найденным значениям,
- *P-этап* – построение новой текущей ситуации по множеству признаков условий найденных действий,

Кратко, MAP-алгоритм осуществляет итеративную генерацию новых каузальных матриц z_{next} личностных смыслов на основе текущей активной матрицы z_{cur} до тех пор, пока не будет достигнуто предельное количество шагов i_{max} (шаг 10) или не будет целиком активирован начальная матрица z_{start} (шаг 41), соответствующей личностному смыслу a_{start} начальной ситуации. В качестве текущей активной каузальной матрицы для первой итерации выступает матрица, соответствующая личностному смыслу целевой ситуации z_{goal}^a (шаг 6). После завершения выполнения всех итераций, найденные планы сортируются по длине (шаг 7) и самый короткий из них является решением задачи планирования в знаковой картине мира (шаг 8).

Первым этапом в MAP-итерации является S-этап. Его суть заключается в том, что в картине мира интеллектуального агента производится поиск прецедентов, т.е. поиск действий, которые совершались в текущих условиях z_{cur} . Для этого просматриваются все знаки в картине мира S и их личностные смыслы $a(s)$ (шаги 13–14). Если текущие условия z_{cur} удовлетворяются матрицей z_a , то список прецедентов \hat{A}_{case} пополняется результатом распространения активности по сети личностных смыслов от знака s на расстояние d_a (шаг 16).

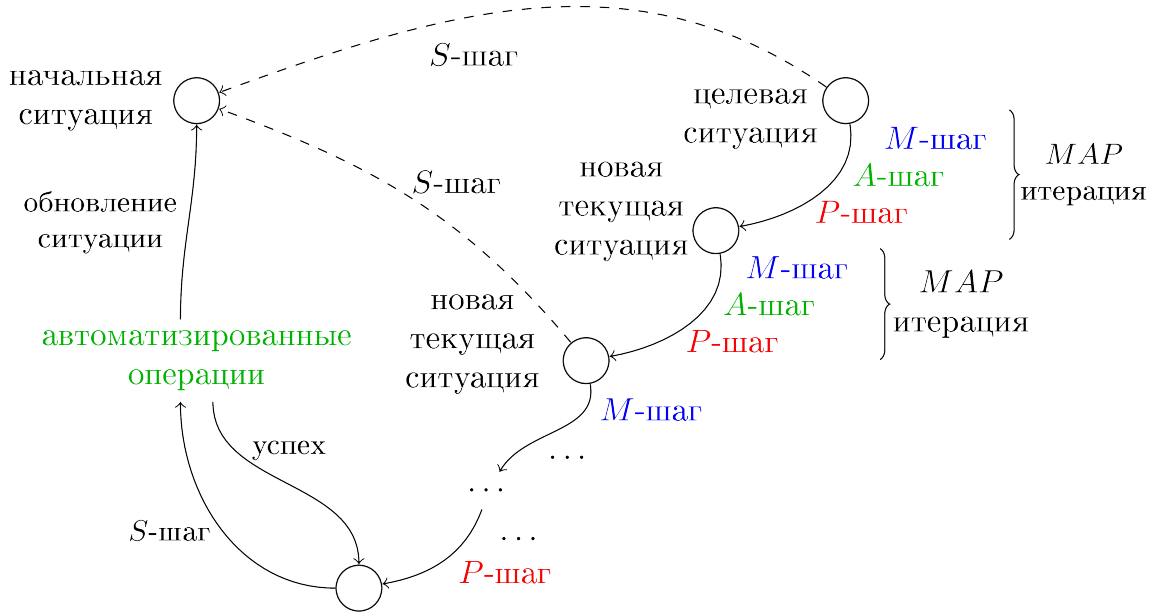


Рис. 4: Схема процесса планирования поведения

```

9: function MAP_ITERATION( $z_{cur}, z_{start}, Plan_{cur}, i$ )
10:   if  $i \geq i_{max}$  then
11:     return  $\emptyset$ 
12:    $\hat{A}_{case} := \emptyset$  // Список прецедентов
   // S-этап
   // Поиск прецедентов выполнения действий в текущих условиях
13:   for all  $s \in S$  do
14:     for all  $z_a \in a(s)$  do
15:       if  $z_a \geq z_{cur}$  then
16:          $\hat{A}_{case} = \hat{A}_{case} \cup \varphi_a^\uparrow(s, d_a)$ 

```

Далее в МАР-алгоритме следует М-этап, на котором происходит распространение активности по сети личностных смыслов на расстояние d_a с целью активации всех знаков, связанных с текущей ситуацией (шаг 17). Элементы полученного множества каузальных матриц A^* служат отправными точками для распространения активности по сети значений: для каждой матрицы z_a с помощью функции связывания Ψ_a^m определяется необходимый узел на каузальной сети значений, от которого активность распространяется на расстояние d_m (шаг 20). Если активированные матрицы являются каузальными, то они добавляются в множество активных значений M^* (шаг 22).

```

// М-этап
// Распространение активности вниз по сети личностных смыслов
17:    $A^* = \varphi_a^\downarrow(z_{cur}, d_a)$ 
18:    $M^* = \emptyset$ 
19:   for all  $z_a \in A^*$  do
    // Распространение активности вверх по сети значений
20:     for all  $z_m \in \varphi_m^\uparrow(s(z_a), d_m)$  do
21:       if  $I^e(z_m) \neq \emptyset$  then
22:          $M^* := M^* \cup \{z_m\}$ 

```

Затем переходим к А-этапу, на котором происходит генерация каузальных матриц на сети личностных смыслов, которые представляют специфицированные относительно текущих условий z_{cur} действия, определяемые активными значениями из множества M^* . Для этой цели служат шаги 25–27, в которых распространение активности на каузальной сети значений на расстояние d_m приводит к активации множества значений M^* знаков, связанных с ролевой структурой процедурной матрицы z_m , а затем с помощью функции связывания Ψ_m^a происходит генерация новой каузальной матрицы на сети личностных смыслов, которая копирует значение z_m^* с замещением абстрактных знаков-ролей объектными знаками, связанными с ролями отношением класс-подкласс. Затем на А-шаге происходит отбор тех каузальных матриц, которые представляют действия, выполнимые в текущих условиях z_{cur} (шаги 30–32). Для этого удаляются все каузальные матрицы, эффекты которых не включены в текущую ситуацию (напомним, что планирование осуществляется в обратном направлении). В заключение А-этапа выполняется одна из операций в картине мира θ_a , осуществляющая в данном случае метарегулирование - проверку некоторой эвристики, которая может выражать, например, то правило, что нельзя повторять одинаковые действия, или лучше выполнить то действие, которое быстрее всего приближает к начальным условиям z_{start} (шаг 33). Любое эвристическое правило также представимо в виде каузальной матрицы личностного смысла знака, представляющего внутреннюю стратегию планирования своего поведения.

Завершается МАР-алгоритм Р-этапом. Здесь для каждой сгенерированной каузальной матрицы z_a , представляющей некоторое действие, формируется новая ситуация Sit_{next} , которая является результатом обратного применения действия в текущих условиях z_{cur} . Обратное применение (шаг 39) заключается в формировании

```

// A-этап
23:    $\hat{A}_{gen} = \emptyset$ 
24:   for all  $z_m \in M^*$  do
// Распространение активности вниз по сети значений
25:      $M^* = \varphi_m^*(z_m, d_m)$ 
26:     for all  $z_m^* \in M^*$  do
27:        $\hat{A}_{gen} := \hat{A}_{gen} \cup \{\Psi_m^a(z_m^*)\}$ 
// Совмещение активности образованных смыслов и текущей ситуации
28:    $\hat{A} = \hat{A}_{gen} \cup \hat{A}_{case}$ 
29:   for all  $z_a \in \hat{A}$  do
30:      $z_{shift} = (e_i | i \in I^e)$ 
31:     if  $z_{cur} \not\supseteq z_{shift}$  then
32:        $\hat{A} = \hat{A} \setminus \{z_a\}$ 
// Метакогнитивная проверка эвристики
33:    $\hat{A} = \{\theta_a(z_a) | z_a \in \hat{A}\}$ 
34:   if  $\hat{A} = \emptyset$  then
35:     return  $\emptyset$ 

```

каузальной матрицы z_{next} , состоящей из событий, являющихся либо колонками-условиями действия $e_i \in \{e_k | e_k \in z_a, k \in I^e(z_a)\}$, либо принадлежащих текущей активной каузальной матрице и не являющихся колонками-эффектами действия $e_i \in z_{cur} \wedge e_i \notin \{e_j | e_j \in z_a, j \in I^e(z_a)\}$. В текущий план $Plan_{cur}$ добавляется пара текущие условия - применимое действие $\langle z_{cur}, z_a \rangle$. Если новая ситуация не покрывает стартовую ситуацию (шаг 41), то итерации продолжаются с новой текущей ситуацией, пополняя все множество генерируемых планов $Plans_{fin}$.

Константы d_a, d_m , которые определяют глубину распространения активности в каузальных сетях, являются параметрами алгоритма и задают внутреннюю характеристику носителя картины мира, различаясь от агента к агенту. Обычно в модельных экспериментах эти параметры не превышают 5.

4 Модельный пример: мир кубиков

Продemonстрируем работу представленного алгоритма планирования поведения с помощью модельного эксперимента, доменом планирования для которого выступает широко известный в области автоматического планирования пример «мир кубиков» [16]. Описание домена на языке PDDL [11] состоит из определения типа (*blocks*), четырех предикатов (*ontable*, *clear*, *handempty*, *holding*) и четырех действий (*pick-up*, *put-down*, *stack*, *unstack*) (см. табл. 1).

Приведем пример решения с использованием MAP-алгоритма следующей задачи планирования - построение башни из четырех кубиков, лежащих на столе (табл. 1). Фрагмент каузальной сети на личностных смыслах, задающего каузальную матрицу смысла начальной ситуации с именем *start*, приведен на рис. 5. У каждого

```

// P-этап
36:    $Plans_{fin} := \emptyset$ 
37:   for all  $z_a \in \hat{A}$  do
38:      $Plan_{cur} = Plan_{cur} \cup \{ \langle z_{cur}, z_a \rangle \}$ 
// Генерация новой ситуации - применение действия
39:      $z_{next} := (e_i | (e_i \in z_{cur} \wedge e_i \notin \{e_j | e_j \in z_a, j \in I^e(z_a)\}) \vee e_i \in \{e_k | e_k \in z_a, k \in I^c(z_a)\})$ 
40:      $Sit_{next} = \langle id_{next}, \emptyset, \emptyset, \{z_{next}\} \rangle$ 
41:     if  $z_{next} \geq z_{start}$  then
42:        $Plans_{fin} = Plans_{fin} \cup \{Plan_{cur}\}$ 
43:     else
44:        $Plans_{rec} := \text{MAP\_ITERATION}(z_{next}, z_{start}, Plan_{cur}, i + 1)$ 
45:        $Plans_{fin} = Plans_{fin} \cup Plans_{rec}$ 
46:   return  $Plans_{fin}$ 

```

(define (domain BLOCKS) (:requirements :strips :typing) (:types block) (:predicates (on ?x - block ?y - block) (ontable ?x - block) (clear ?x - block) (handempty) (holding ?x - block))	(:action pick-up :parameters (?x - block) :precondition (and (clear ?x) (ontable ?x) (handempty)) :effect (and (not (ontable ?x)) (not (clear ?x)) (not (handempty)) (holding ?x)))	(:action put-down :parameters (?x - block) :precondition (holding ?x) :effect (and (not (holding ?x)) (clear ?x) (handempty) (ontable ?x)))
(:action stack :parameters (?x - block ?y - block) :precondition (and (holding ?x) (clear ?y)) :effect (and (not (holding ?x)) (not (clear ?y)) (clear ?x) (handempty) (on ?x ?y)))	(:action unstack :parameters (?x - block ?y - block) :precondition (and (on ?x ?y) (clear ?x) (handempty)) :effect (and (holding ?x) (clear ?y) (not (clear ?x)) (not (handempty)) (not (on ?x ?y))))	(define (problem BLOCKS-4-0) (:domain BLOCKS) (:objects D B A C - block) (:INIT (CLEAR C) (CLEAR A) (CLEAR B) (CLEAR D) (ONTABLE C) (ONTABLE A) (ONTABLE B) (ONTABLE D) (HANDEEMPTY)) (:goal (AND (ON D C) (ON C B) (ON B A))))

Таблица 1: Описание домена планирование «мир кубиков» и задачи построения башни.

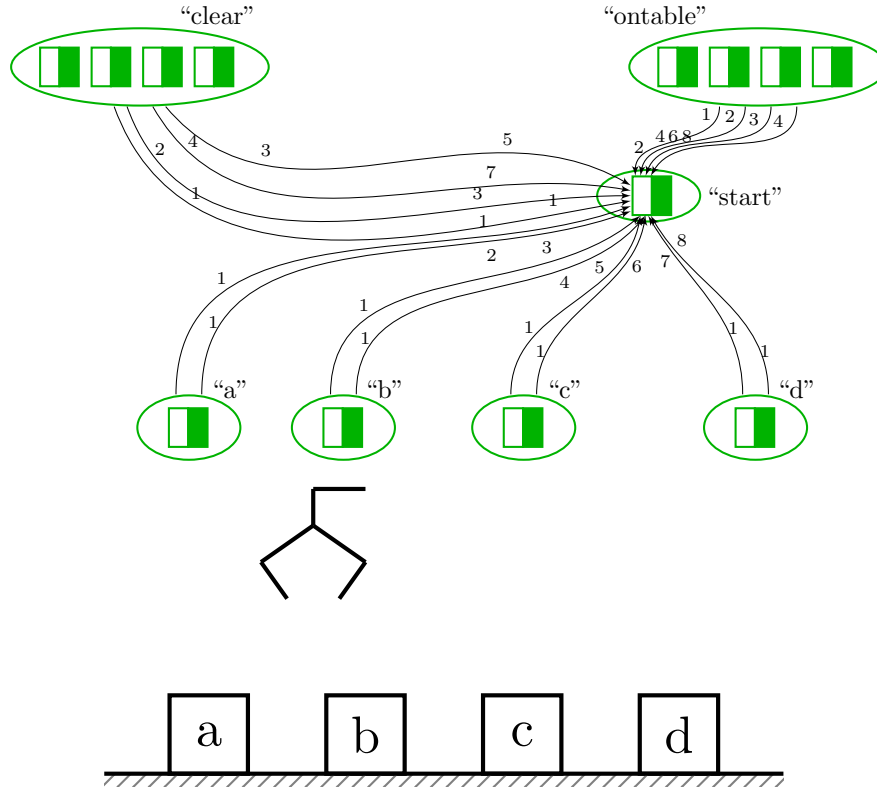


Рис. 5: Начальная ситуация: все четыре кубика лежат на столе.

отдельного кубика (a , b , c , d) одна каузальная матрица в узле сети, в то время как для предикатов *clear* и *ontable* имеется по четыре матрицы в узле, т.к. они принимают участие в событиях с разными кубиками. Например, матрицы знака *clear* присутствуют в 1, 3, 5 и 7 столбцах матрицы знака *start* одновременно с кубиками a , b , c , d соответственно, что означает, что на всех кубиках не лежат другие кубики.

На рис. 6 представлена целевая ситуация, в которой все четыре кубика составлены в башню: кубик d находится на столе, кубик c - на d , b - на c , и, наконец, на самом верху - кубик a . Предикат *on*, который задает отношение «находится на» может быть представлен в виде процедурный каузальной матрицы, чтобы явно продемонстрировать несимметричность этого отношения, хотя использование объектной матрицы никак не влияет на результат. Здесь также от каждого кубика в ситуации участвует одна каузальная матрица, а предикат *on* представлен в виде узла с тремя каузальными матрицами, т.к. участвует в матрице знака целевой ситуации *goal* в различных столбцах с тремя различными кубиками.

На рис. 7 представлен фрагмент каузальной сети на значениях, представляющий собой элементы процедурной каузальной матрицы знака *stack* и отношения «класс-подкласс» объектов-кубиков, класса *block* и ролей в действии *stack*: $block?x$ (аналог семантической роли «объект») $block?y$ (аналог семантической роли «директив»). Здесь необходимо отметить, что метка ϵ_1 ребра v (индекс исходной матрицы уз-

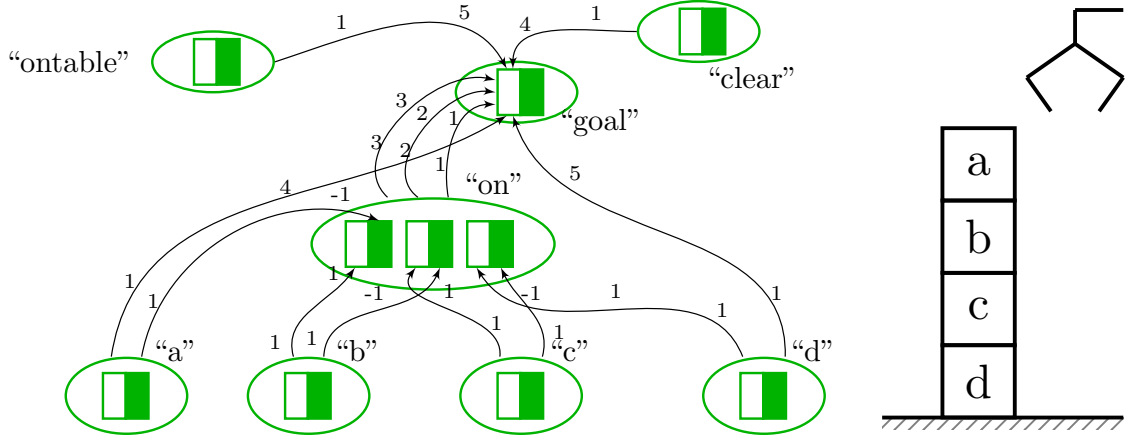


Рис. 6: Целевая ситуация: башня из четырех кубиков.

ла, из которого исходит ребро v) в случае отношения «класс-подкласс» ($a \rightarrow block$, $block \rightarrow block?x$) принимает специальное нулевое значение, что означает, что исходной может быть любая казуальная матрица данного узла. Иными словами, роль $block?x$ может играть любой из кубиков a , b , c или d .

Рассмотрим этапы MAP-алгоритма: S, M, A и P-этапы - на первой итерации алгоритма. Рассмотрим простейший случай, когда наш интеллектуальный агент не накопил опыта действия в условиях данной задачи. В следствие этого на S-этапе множество прецедентов \hat{A}_{case} будет пусто. С учетом того, что планирование осуществляется в обратном направлении, на первом M-этапе мы рассматриваем целевую ситуацию как текущую активную матрицу предсказания z_{cur} и распространение от нее активности вниз по сети личностных смыслов будет активировать множество A^* , совпадающее с фрагментом, изображенным на рис.5. В множество значений M^* попадут значения знаков, представляющих кубики a, b, c, d - это все связанные с ними по сети значений процедурные знаки *stack*, *unstack*, *pick-up*, *put-down*. На рис. 8 слева представлен фрагмент казуальной сети на значениях, включающий процедурную матрицу знака *unstack*. Для активации матрицы знака *unstack* от матрицы знака a достаточно использовать в качестве константы d_m значение в три ребра.

На A-этапе происходит генерация новых казуальных матриц \hat{A}_{gen} в сети личностных смыслов путем распространения активности вниз по сети значений. Пример такого распространения, в результате которого образуется новая казуальная матрица знака *unstack*, представлен на рис. 8 справа. Новая казуальная матрица на сети личностных смыслов является копией соответствующей матрицы на сети значений с заменой ссылок, указывающих на знаки-роли, на ссылки, указывающие на объектные не абстрактные знаки, представляющие кубики. В нашем примере будет сгенерирована матрица, соответствующая действию *unstack*(a, b) - снять кубик a с кубика b . На данном этапе будет сформировано по четыре матрицы для одноместных действий и двенадцать - для двухместных.

В завершение А-этапа эффекты построенных процедурных матриц проверяются на применимость в условиях текущей ситуации и среди применимых действий отбираются те, которые удовлетворяют некоторому метакогнитивному правилу (эвристике) θ_a . В нашем примере, единственным применимым действием из всех сформированных вариантов будет действие $unstack(a,b)$. В качестве эвристики может быть использовано жадное правило: выбираем те действия, которые максимально быстро приближают к успеху (новая ситуация имеет больше общих признаков с целевой).

В конце итерации, на Р-этапе, генерируется новая каузальная матрица z_{next} в сети личностных смыслов знака, представляющего следующую ситуацию планирования. В нашем примере новая текущая ситуация будет совпадать с предыдущей за исключением того, что кубик a теперь находится в манипуляторе, а на кубике b теперь ничего не находится. В текущий план $Plan_{cur}$ добавляется пара $\langle z_{cur}, z_a \rangle$ каузальных матриц текущей ситуации и выбранного действия. Т.к. новая ситуация не включает в себя стартовую ситуации начинаем новую итерацию.

В результате работы MAP-алгоритма в нашем примере будет получен план из 6 действий: $pick-up(c)$, $stack(c,d)$, $pick-up(b)$, $stack(b,c)$, $pick-up(a)$, $stack(a,b)$. В завершение работы агента над этой задачей он сохраняет прецедент планирования в своей картине мира: он сохраняет начальную и конечную ситуацию в виде новых знаков и образует новый процедурный знак, который можно назвать как «построить башню». Единственным признаком в столбце условий данного знака будет начальная ситуация, единственным признаком в столбце эффектов - целевая ситуация. После этого интеллектуальный агент сможет решить ту же задачу, найдя на S-этапе необходимое действие, которое сразу приведет к цели. Такая же ситуация может возникнуть и в другой задаче по ходу ее решения, что приведет к сокращению пространства поиска подходящих действий.

Заключение

В классической символьной постановке задачи планирования в искусственном интеллекте возникает проблема совмещения символьных алгоритмов планирования с методами обучения, сохраняющими как опыт планирования, так и обеспечивающими адаптацию действий к новым условиям. Данная проблема смыкается с проблемой символизации - привязки используемых в классическом способе представления знаний символов к реальным объектам, процессам и свойствам внешней среды. Особенно остро данные проблемы проявляются при реализации обучаемых робототехнических систем, для которых важно сопоставлять символы, используемые при концептуальном планировании с данными, поступающими от сенсоров. При этом, когда перед сложной технической системой ставится задача планирования в довольно широком спектре условий, в том числе и коалиционных, подходы с заранее сформированной, хоть и пополняемой, базой знаний показывают свою неэффективность. Способ представления знаний, на котором базируются функции управления интеллектуальным агентом, должен изначально поддерживать возможность

привязки символов к данным сенсоров и поддерживать как представление внутренней информации, так и обобщенной, согласованной с другими участниками коалиции информации. В настоящей работе эти задачи решаются с использованием знаковой картины мира. Представлен оригинальный метод планирования (МАР-алгоритм), который использует и сохраняет прецедентную информацию в процессе синтезе плана. Используемый четырехкомпонентный элемент картины мира (знак) позволяет кодировать не только информацию о внешней среде, но и внутренние характеристики и мотивационно-потребностные свойства, а так же общие коллективные знания. Представленный алгоритм также может быть использован и для составления коалиционных планов. Для демонстрации работы МАР-планировщика приведен модельный пример составления плана для одной из задач «мира кубиков». Программная реализация и модельные эксперименты представлены в репозитории <https://github.com/cog-isa/map-planner>.

Список литературы

1. *Barsalou L. W.* Perceptual symbol systems // *The Behavioral and brain sciences*. — 1999. — Vol. 22, no. 4. — 577–609, discussion 610–660.
2. *Barto A. G., Bradtke S. J., Singh S. P.* Learning to act using real-time dynamic programming // *Artificial Intelligence*. — 1995. — Vol. 72, no. 1–2. — Pp. 81–138.
3. *Besold T. R., Kuhnberger K. U.* Towards integrated neural-symbolic systems for human-level AI: Two research programs helping to bridge the gaps // *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. — 2015. — Vol. 14. — Pp. 97–110.
4. *Bonet B., Geffner H.* Solving POMDPs: RTDP-Bel vs. point-based algorithms // *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*. — 2009. — Pp. 1641–1646.
5. *Borrajo D., Roubířková A., Serina I.* Progress in Case-Based Planning // *ACM Computing Surveys*. — 2015. — Jan. — Vol. 47, no. 2. — Pp. 1–39.
6. *Brafman R. I.* A Privacy Preserving Algorithm for Multi-Agent Planning and Search // *Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015)*. — 2015. — Pp. 1530–1536.
7. *Buxhoeveden D. P., Casanova M.* The minicolumn hypothesis in neuroscience // *Brain*. — 2002. — Vol. 125, no. 5. — Pp. 935–951.
8. *Chella A., Frixione M., Gaglio S.* Anchoring symbols to conceptual spaces: The case of dynamic scenarios // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2003. — Vol. 43, no. 2–3. — Pp. 175–188.
9. *Constantinople C. M., Bruno R. M.* Deep cortical layers are activated directly by thalamus // *Science*. — 2013. — Vol. 1591, June. — Pp. 1591–1594.
10. *De La Rosa T., Garcia-Olaya A., Borrajo D.* A case-based approach to heuristic planning // *Applied Intelligence*. — 2013. — Vol. 39, no. 1. — Pp. 184–201.

11. Deterministic planning in the fifth international planning competition: PDDL3 and experimental evaluation of the planners / A. E. Gerevini [et al.] // Artificial Intelligence. — 2009. — Vol. 173, no. 5–6. — Pp. 619–668.
12. *Edelman G. M.* Neural Darwinism: The Theory Of Neuronal Group Selection. — New York : Basic Books, 1987. — P. 400.
13. *Evans J., Stanovich K. E.* Dual-process theories of higher cognition: Advancing the debate // Perspectives on Psychological Science. — 2013. — Vol. 8, no. 3. — Pp. 223–241.
14. *Flavell J. H.* Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive–developmental inquiry // American Psychologist. — 1979. — Vol. 34, no. 10. — Pp. 906–911.
15. *George D., Hawkins J.* Towards a mathematical theory of cortical micro-circuits // PLoS computational biology. — 2009. — Vol. 5, no. 10. — e1000532.
16. *Gupta N., Nau D. S.* On the complexity of Blocks-World planning // Artificial Intelligence. — 1992. — Vol. 56, no. 2–3. — Pp. 223–254.
17. *Hammond K. J.* Case-based planning: A framework for planning from experience // Cognitive Science. — 1990. — Vol. 14, no. 3. — Pp. 385–443.
18. *Harnad S.* Symbol Grounding Problem // Physica. — 1990. — Vol. 42. — Pp. 335–346. — arXiv: 9906002 [arXiv:cs.AI].
19. *Heintz F., Kvarnstrom J., Doherty P.* Bridging the sense-reasoning gap: DyKnow - Stream-based middleware for knowledge processing // Advanced Engineering Informatics. — 2010. — Vol. 24, no. 1. — Pp. 14–26.
20. *Helmert M.* The fast downward planning system // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2006. — Vol. 26. — Pp. 191–246. — arXiv: arXiv:1109.6051v1.
21. *Hoffmann J., Nebel B.* The FF Planning System: Fast Plan Generation Through Heuristic Search // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2001. — Vol. 14. — Pp. 253–302.
22. *Kahneman D.* Thinking Fast and Slow. — New York : Penguin, 2011. — P. 443.
23. *Kelley T. D.* Developing a psychologically inspired cognitive architecture for robotic control: The Symbolic and Subsymbolic Robotic Intelligence Control System (SS-RICS) // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2006. — Vol. 3, no. 3. — Pp. 219–222.
24. *Krajca P., Outrata J., Vychodil V.* Advances in algorithms based on CbO // Proceedings of the 7th International Conference on Concept Lattices and Their Applications / ed. by M. Kryszkiewicz, S. Obiedkov. — CEUR, 2010. — Pp. 325–337.
25. *Merwe D. V. D., Obiedkov S., Kourie D.* AddIntent: A new incremental algorithm for constructing concept lattices // Concept Lattices / ed. by P. Eklund. — Springer Berlin Heidelberg, 2004. — Pp. 372–385. — (Lecture Notes in Computer Science).

26. *Neisser U.* Cognition and Reality: Principles and Implications of Cognitive Psychology. — W. H. Freeman, Company, 1976. — P. 230.
27. *Norris E. M.* An Algorithm for Computing the Maximal Rectangles in a Binary Relation // *Revue Roumaine de Mathématiques Pures et Appliquées*. — 1978. — Vol. 23, no. 2. — Pp. 243–250.
28. Practical intelligence in everyday life / R. J. Sternberg [et al.]. — Cambridge University Press, 2000. — P. 304.
29. *Red'ko V., Burtsev M.* Modeling of Mechanism of Plan Formation by New Caledonian Crows // *Procedia Computer Science*. — 2016. — Vol. 88.
30. *Richter S., Westphal M.* The LAMA planner: Guiding cost-based anytime planning with landmarks // *Journal of Artificial Intelligence Research*. — 2010. — Vol. 39. — Pp. 127–177. — arXiv: 1401.3839.
31. *Sardina S., Silva L. D., Padgham L.* Hierarchical Planning in BDI Agent Programming Languages: A Formal Approach // *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS'06)*. — 2006. — Pp. 1001–1008.
32. *Skrynnik A., Petrov A., Panov A. I.* Hierarchical Temporal Memory Implementation with Explicit States Extraction // *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists* / ed. by A. V. Samsonovich, V. V. Klimov, G. V. Rybina. — Springer International Publishing, 2016. — Pp. 219–225. — (Advances in Intelligent Systems and Computing).
33. *Stanovich K. E.* Distinguishing the reflective, algorithmic, and autonomous minds: Is it time for a tri-process theory? // *In two minds: Dual processes and beyond* / ed. by J. Evans, K. Frankish. — Oxford University Press, 2009. — Pp. 55–88.
34. *Sun R., Hélie S.* Psychologically realistic cognitive agents: taking human cognition seriously // *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. — 2012. — Vol. 25, no. 1. — Pp. 65–92.
35. *Выготский Л. С.* Мышление и речь. — Изд. 5-е, — М. : Издательство «Лабиринт», 1999. — С. 352.
36. *Иваницкий А. М.* Мозговая основа субъективных переживаний: гипотеза информационного синтеза // *Журнал высшей нервной деятельности*. — 1996. — Т. 46, № 2. — С. 241–282.
37. *Леонтьев А. Н.* Деятельность. Сознание. Личность. — Изд. 2-е. — М. : Политиздат, 1977. — С. 304.
38. *Макаров Д. А., Панов А. И., Яковлев К. С.* Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // *Искусственный интеллект и принятие решений*. — 2015. — № 3. — С. 18–33.

39. *Осипов Г. С.* Знаковые модели как альтернатива символьным // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Материалы III Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / под ред. А. В. Колесников. — Издательство БФУ им. Иммануила Канта, 2016. — С. 56—69.
40. *Осипов Г. С.* Когнитивное мета моделирование // Информационные технологии и системы: Труды Четвертой международной научной конференции / под ред. Ю. С. Попков, А. В. Мельников. — Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2015. — С. 94—100.
41. *Осипов Г. С.* От ситуационного управления к прикладной семиотике // Новости искусственного интеллекта. — 2002. — № 6. — С. 3—7.
42. *Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2014. — № 4. — С. 49—62.
43. *Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2015. — № 6. — С. 47—61.
44. *Осипов Г. С., Поспелов Д. А.* Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. — 1999. — № 1. — С. 9—35.
45. *Панов А. И.* Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных. — 2014. — Т. 1, № 7. — С. 863—874.
46. *Панов А. И.* Представление знаний автономных агентов, планирующих согласованные перемещения // Робототехника и техническая кибернетика. — 2015. — 4(9). — С. 34—40.
47. *Панов А. И., Петров А. В.* Иерархическая временная память как модель восприятия и её автоматное представление // Шестая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2015 (15-20 июня 2015 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. В 2-х т. Т. 1. — М. : ИСА РАН, 2015. — С. 198—202.
48. *Панов А. И., Яковлев К. С.* Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиций агентов в динамической среде // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2016. — № 4. — (В печати).
49. Принципы построения многоуровневых архитектур систем управления беспилотными летательными аппаратами / Д. В. Зубарев [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. — 2013. — № 4. — С. 10—28.
50. *Чувгунова О. А.* Планирование как предмет психологического исследования // Психологические исследования. — 2015. — Т. 8, № 43. — С. 11.
51. *Чудова Н. В.* Концептуальная модель картины мира для задачи моделирования поведения, основанного на сознании // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2012. — № 2. — С. 51—62.