

Оптимизация, системный анализ и исследование операций

© 2023 г. В.Б. МЕЛЕХИН, д-р техн. наук (pashka1602@rambler.ru)
(Дагестанский государственный технический университет, Махачкала),
М.В. ХАЧУМОВ, канд. физ.-мат. наук (khmike@inbox.ru)
(Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН,
г. Переславль-Залесский;
Федеральный исследовательский центр
“Информатика и управление” РАН, Москва;
Российский университет дружбы народов, Москва)

ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОЭТАПНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ РОБОТОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ¹

Показана актуальность создания интеллектуальных роботов различного назначения, способных эффективным образом решать сложные многоэтапные задачи целенаправленной деятельности в априори неопределенных проблемных средах. Предложены оригинальные по содержанию элементы продукционной модели представления знаний безотносительно к конкретной предметной области. Построенная таким образом модель представления знаний позволяет интеллектуальным роботам автоматически планировать целенаправленную деятельность в условиях неопределенности, опираясь на обобщенное описание возможных закономерностей проблемной среды. Разработаны процедуры автоматического синтеза графа “видимости”, определяющего формальным образом воспринимаемый интеллектуальным роботом участок проблемной среды. Это, в свою очередь, позволяет роботу автоматически формировать локально-оптимальный маршрут целенаправленного перемещения в априори неопределенных условиях функционирования. Синтезированы процедуры автоматического планирования интеллектуальным роботом целенаправленной деятельности, связанной с преобразованием текущей ситуации проблемной среды в заданную целевую ситуацию в условиях неопределенности.

Ключевые слова: интеллектуальный робот, многоэтапное поведение, проблемная среда, элементы модели представления знаний, акты поведения, граф “видимости”, планирование целенаправленной деятельности.

DOI: 10.31857/S0005231023120127, EDN: NGVHRW

1. Введение

Создание интеллектуальных роботов (ИР) различного назначения, способных решать сложные многоэтапные задачи в условиях неопределенности, сводящиеся к необходимости перехода с одного участка проблемной среды

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-71-10056), <https://rscf.ru/project/21-71-10056>.

(ПС) на другие ее участки с целью перевода текущей ситуации в требуемое целевое состояние, является одной из актуальных и сложных проблем искусственного интеллекта.

В общем случае многоэтапная целенаправленная деятельность ИР складывается из ряда этапов, взаимосвязанных между собой достижением общей заданной роботу цели. Каждый такой этап может быть связан с характерным для него видом целенаправленной деятельности ИР. Достижение же текущей подцели поведения на отдельном его этапе является предпосылкой для перехода робота на следующий этап целенаправленной деятельности и т.д. до выполнения ИР полученного задания. Иначе говоря, многоэтапная деятельность ИР на каждом участке ПС, как правило, состоит из следующих двух фаз. В первой фазе целенаправленной деятельности ИР автоматически строит и обрабатывает маршрут перемещения из исходного к целевому местоположению на заданном участке ПС. Во второй фазе ИР планирует и обрабатывает упорядоченную последовательность действий, позволяющих выполнить преобразование исходной ситуации на текущем участке проблемной среды в заданную целевую ситуацию.

К одной из попыток решения данной сложной проблемы следует отнести когнитивные инструменты планирования ИР полифазной деятельности, предложенные в [1]. Однако модель представления знаний, на которую опираются в процессе вывода решений данные когнитивные инструменты, не позволяет в полной мере учитывать сложившиеся в ПС условия функционирования, влияющие на текущие функциональные возможности ИР. Другими словами, используемая в данном случае модель представления и обработки знаний не позволяет наделить ИР способностью на альтернативной основе автоматически формировать наиболее эффективный по принятой “стоимости” план многоэтапной деятельности, учитывающий сложившиеся в ПС условия функционирования. Например, при наличии грязи после дождя, препятствующей эффективному перемещению ИР в ПС. Это, в свою очередь, приводит к необходимости корректировки сформированного плана целенаправленной деятельности во время его реализации с учетом наблюдаемых в ПС неучтенных в процессе планирования особенностей. Либо ИР вынужден реализовать не совсем эффективный по принятой “стоимости” план целенаправленной деятельности.

Что же касается использования в рассматриваемом случае известных алгоритмических моделей представления и обработки знаний [2], позволяющих организовать планирование целенаправленной деятельности ИР, например [3–7], то такие модели фактически не предусматривают возможности решения интеллектуальным роботом сложных многоэтапных задач в условиях неопределенности. Помимо этого, алгоритмический подход к созданию интеллектуальных решателей задач имеет существенный недостаток, препятствующий построению ИР, которые способны целенаправленно функционировать в условиях неопределенности. Этот недостаток заключается в том, что применение алгоритмических методов вывода решений требует разработки

подробной модели представления знаний, ориентированной на выполнение ИР конкретных заданий в текущих условиях функционирования. Формулируемая ИР цель поведения в этом случае достигается путем планирования и отработки действий, обеспечивающих целенаправленное изменение значений отношений пространства состояний между различными объектами проблемной среды в пределах разрешающей способности подсистемы его технического зрения. Иначе говоря, известные методы планирования целенаправленной деятельности ИР, базирующиеся на аксиоматическом подходе вывода решений с применением логики предикатов первого порядка и ее различных модификаций, не позволяют решать многоэтапные задачи в условиях неопределенности [8]. Это связано с тем, что они требуют подробного формального описания закономерностей ПС и применения в худшем случае сложных процедур вывода решений методом перебора с экспоненциальной сложностью [9].

В свою очередь, для сетевого подхода к созданию интеллектуальных решателей задач ИР, связанного с использованием нейронных сетей для представления и обработки знаний [10, 11], характерны те же основные недостатки, что и для алгоритмического подхода. Данное обстоятельство обусловлено следующими двумя особенностями организации современного сетевого интеллекта. Во-первых, с моделированием на ЭВМ процессов вывода решений на нейронных сетях. Такое моделирование нейросетевых технологий фактически сводит процессы планирования целенаправленной деятельности ИР на основе решателя задач, организованного по принципу сетевого интеллекта, к процессам, свойственным алгоритмическому интеллекту. Во-вторых, нейронные сети в рассматриваемом случае, как правило, должны отражать подробное формальное описание закономерностей текущих условий функционирования ИР. Это, в свою очередь, не позволяет роботу решать задачи в условиях неопределенности и требует предварительного обучения нейронных сетей [12].

Кроме того, на практике построить подробную модель закономерностей реальной сложной ПС не представляется возможным [13], особенно если речь идет о труднодоступных и агрессивных для человека средах, в которых в основном и предстоит функционировать ИР.

Таким образом, отмеченные выше обстоятельства приводят к объективной необходимости разработки элементов процедурной модели представления знаний безотносительно к конкретной предметной области, позволяющих ИР адаптироваться к различным априори неописанным условиям функционирования [14]. Кроме того, такие элементы представления знаний должны обеспечивать ИР возможность планирования целенаправленной деятельности с учетом влияния текущих условий ПС на функциональные возможности робота.

Следует также отметить, что для планирования целенаправленных перемещений ИР в априори неописанной проблемной среде в настоящее время широко используются SLAM методы [15, 16]. На основе данных методов вначале строится формальное описание карты местности в виде помеченного гра-

фа, которая затем используется для маршрутизации перемещений ИР в ПС. С этой целью применяется один из методов поиска оптимального пути на графах [17]. Однако учитывая, что в процессе многоэтапной деятельности задача маршрутизации движения ИР решается в реальном времени, применение в рассматриваемом случае SLAM методов является нецелесообразным. В этой связи в работе предлагается оригинальный эвристический метод формирования модели воспринимаемого участка среды в виде графа “видимости”. Автоматическое построение такого графа позволяет ИР параллельно с его синтезом сформировать локально-оптимальный маршрут движения к целевому местоположению. Кроме того, предложенный метод маршрутизации движения ИР в отличие от SLAM методов, а также известных методов построения графов “видимости” [18, 19], не требует выполнения трудоемких вычислений.

Помимо метода планирования перемещений ИР в условиях неопределенности в настоящей статье предлагаются также различные элементы модели представления и обработки знаний безотносительно к конкретной предметной области. Использование такого вида элементов представления знаний позволяет ИР организовать модельный подход к организации вывода решений в процессе автоматического планирования многоэтапной целенаправленной деятельности в априори неопределенных и нестабильных условиях ПС. При этом предлагаемая в статье модель представления и обработки знаний позволяет ИР организовать планирование многоэтапной деятельности в условиях неопределенности с приемлемой для бортовой ЭВМ полиномиальной сложностью.

2. Постановка задачи

Рассмотрим ИР как мобильную систему, оснащенную манипулятором, которая ориентирована на решение определенного класса задач. Как правило, такая система состоит из сенсорной, решающей и моторной подсистем [4]. Сенсорная подсистема ИР включает модуль технического зрения и ряд датчиков, связанных с управлением навигацией робота в ПС, а также обеспечением данными, необходимыми для проведения анализа условий и результатов отработки различных действий. Решающая подсистема ИР состоит из базы знаний, в которой хранится модель их представления, и интеллектуального решателя задач, предназначенного для планирования многоэтапной деятельности, связанной с выполнением сформулированного интеллектуальному роботу задания. Моторная подсистема служит для отработки различных действий в процессе перемещения ИР в ПС и манипулирования находящимися в среде объектами в процессе целенаправленного преобразования текущей ситуации в целевую ситуацию проблемной среды.

Таким образом, ИР можно охарактеризовать множеством обрабатываемых элементарных действий $B = \{b_{i_1}\}$, $i_1 = \overline{1, n_1}$, например, поднять объект, подойти, захватить объект и т.д.; множествами объектов $O = \{o_2(X_{i_2})\}$, $i_2 = \overline{1, n_2}$ и событий $D = \{d_{i_3}(Y_{i_3})\}$, $i_3 = \overline{1, n_3}$, соответственно находящихся и происходящих в ПС, которые интеллектуальный робот способен распознать,

планируя целенаправленную деятельность. Здесь X_{i_2} и Y_{i_3} – множества характеристик, соответственно определяющих объекты и события ПС. В общем же случае функциональные возможности ИР определяются заданной моделью представленных в общем виде знаний и процедурами автоматического планирования целенаправленной деятельности в различных условиях априори неописанной ПС.

В свою очередь, нестабильную ПС в общем случае можно охарактеризовать

– множеством находящихся в среде объектов $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$;

– происходящими независимо от деятельности ИР событиями $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, спонтанное проявление которых в проблемной среде может препятствовать результативной отработке интеллектуальным роботом элементарных действий $b_{i_1} \in B$;

– различным видом семантических отношений [20] $R = \{r_{i_4}\}$, $i_4 = \overline{1, n_4}$, которые выполняются в ПС между объектами, событиями и находящимся в среде ИР.

В целом же ПС определяется сложившейся в ней текущей ситуацией $S = \{S_{i_5}\}$, $i_5 = \overline{1, n_5}$, содержание которой зависит от состояния находящихся в ней объектов $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ и происходящих $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, а также видом и значениями выполняющихся в среде отношений $r_{i_4} \in R$ между объектами, событиями и ИР.

Задание к выполнению ИР получает в декларативно-процедурной форме представления в виде упорядоченной последовательности сложных действий B_{j_1} , $j_1 = \overline{1, m_1}$ [21] и условий, которые должны выполняться в ПС для их результативной отработки. В общем случае целевое задание имеет следующую структуру и содержание:

$$\langle S_1^I \& B_{j_1}^1 \rightarrow S_1^II \& B_{j_1}^2 \rightarrow S_2^II, \dots, S_{k-1}^II \& B_{j_1}^k \rightarrow S_k^II \rangle,$$

где, например, S_1^I и S_1^II – описание в обобщенном виде соответственно исходных условий и условий, отражающих достижение подцели соответствующего этапа целенаправленной деятельности. Таким образом, в рассматриваемом случае целевая ситуация предыдущего этапа поведения, например, S_1^II определяет исходную ситуацию S_2^II для следующего этапа целенаправленной деятельности ИР.

Сложные действия B_{j_1} состоят из кортежей элементарных действий $b_{i_1} \in B$ и фактически отражают содержание соответствующего им этапа целенаправленной деятельности ИР. Например, полученное ИР задание может иметь следующее содержание: “найти на заданном участке ПС определенного вида объекты, перевести их в необходимое состояние или перенести в заданное местоположение”. При этом, если результативность определенных действий $b_{i_1} \in B$ зависит от текущего состояния ПС, то их отработка сопровождается проверкой определенного условия. По ее результатам либо действие непосредственно выполняется ИР, либо выбирается по ссылке другой

элемент модели представления знаний, позволяющий ИР отработать данное действие с учетом сложившихся в ПС условий. Например, действие подойти к объекту может быть непосредственно отработано по прямой линии движения только при отсутствии препятствий на пути перемещения ИР к этому объекту. В случае же наличия в ПС таких препятствий для отработки данного действия ИР требуется предварительно сформировать план движения к заданному объекту по проходимым между препятствиями участкам среды. Такой подход к построению типовых элементов модели представления знаний позволяет существенным образом

— снизить сложность процесса вывода решений за счет автоматического перехода по ссылкам от одного к другому типовому элементу представления знаний;

— сократить их количество за счет возможности использования одного и того же элемента для решения одной и той же по назначению подзадачи в различных условиях ПС.

Требуется, опираясь на вышеизложенное описание ИР, проблемной среды и заданной роботу цели, разработать такие типовые элементы модели представления знаний, которые позволяют автоматически строить планы многоэтапной деятельности в сложных априори неописанных условиях ПС. В общем случае такой план целенаправленной деятельности ИР представляет собой дерево вывода решений в пространстве состояний [8].

Следует отметить, что решение подзадач, связанных с распознаванием различных образов ПС в процессе планирования ИР целенаправленной деятельности, является самостоятельной проблемой, требующей отдельного обсуждения, и в настоящей статье по причине ее ограниченного объема не рассматривается.

3. Типовые элементы модели представления знаний ИР

В общем случае модель представления знаний состоит из декларативных и процедурных элементов, позволяющих ИР планировать многоэтапную деятельность в условиях неопределенности. Декларативные элементы модели представления знаний предназначены для формального описания допустимых ситуаций (состояний) ПС $S_{i_5} \in S$, а также их отдельных фрагментов $\Delta S_{i_5}^{j_2} \subset S_{i_5}$, $j_2 = \overline{1, m_2}$. Данные фрагменты ситуаций ПС служат для построения различных элементов процедурной модели представления знаний ИР. Здесь m_2 – множество допустимых фрагментов (частей), на которые допускается разбиение текущих ситуаций ПС $S_{i_5} \in S$.

Следует отметить, что минимальный допустимый фрагмент текущей ситуации ПС может состоять из двух объектов или одного объекта среды и ИР, а также отношений, которые выполняются между ними в проблемной среде.

Процедурные знания представляют собой набор элементов, определяющих безотносительно к конкретной предметной области решение различного вида типовых подзадач целенаправленной деятельности, т.е. “кирпичиков”, на основе которых ИР планирует свое поведение.

Формальное представление различных ситуаций ПС и их фрагментов зависит от роли, которую они выполняют в процессе вывода решений. Так, для обобщенного представления различных аналогичных друг другу ситуаций $S_{i_5} \in S$ и их фрагментов $\Delta S_{i_5}^{j_2} \subset S_{i_5}$, предназначенных для построения типовых элементов модели представления процедурных знаний ИР относительно к конкретной предметной области, используются активные нечеткие семантические сети [22]. Для описания же текущих ситуаций ПС служат классические семантические сети [8].

В общем случае активные нечеткие семантические сети, служащие для обобщенного описания различных ситуаций $S_{i_5} \in S$ и их отдельных частей $\Delta S_{i_5} \subset S_{i_5}$, представляют собой нечетко помеченный граф $G_a = (v_0, V_a, E_a)$. Здесь v_0 – базовая вершина сети, определяемая ИР, V_a, E_a – соответственно множества активных вершин и ребер. Активные вершины $v_{i_6} \in V_a, V_a = \{v_{i_6}\}$, $i_6 = \overline{1, n_6}$ согласно их назначению представляются слотами $O^* = \{o_{i_7}^*(X_{i_7}^*)\}$, $i_7 = \overline{1, n_7}$ и $D^* = \{d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*)\}$, $i_8 = \overline{1, n_8}$, которые в текущих условиях ПС помечаются соответственно находящимися в среде объектами $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ и происходящими в ней событиями $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$. Активные вершины $v_{i_6} \in V_a$ в нечеткой семантической сети G_a , определяемые слотами $o_{i_7}^*(X_{i_7}^*) \in O^*$ и $d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*) \in D^*$, могут быть помечены конкретными объектами $o_{i_2}(X_{i_2})$ и событиями $d_{i_3}(Y_{i_3})$ ПС, если они удовлетворяют следующим условиям $X_{i_7}^* \subseteq X_{i_2}$ и $Y_{i_8}^* \subseteq Y_{i_3}$.

Активные ребра $e_{i_9} \in E_a, E_a = \{e_{i_9}\}$, $i_9 = \overline{1, n_9}$ могут быть неориентированными и ориентированными. Неориентированные ребра $e_{i_7}^0 \in E_1^0$ в сети G^0 помечаются следующими тройками $\langle T_{j_3}^*(r_{i_4}), (r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*) \rangle$, где $T_{j_3}^*(r_{i_4})$ – j_3 терм лингвистической переменной (в общем случае $j_3 = \overline{1, 5}$ [23]) с названием, совпадающим с наименованием соответствующего отношения $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$, выполняющегося в ПС между двумя объектами или объектом и ИР; $(r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*)$ – соответственно нижняя и верхняя границы подынтервала численных значений термина $T_{j_3}^*(r_{i_4})$ на шкале количественных оценок соответствующей лингвистической переменной.

Ориентированные ребра $e_{i_9} \in E_a$ помечаются следующими тройками $\langle F_{i_9}, (t_{j_2}^1, t_{j_2}^2) \rangle$, где F_{i_9} – множество характеристик, описывающих влияние событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, определяемых активной вершиной $d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*) \in D^*$, на состояние ПС при их появлении; $(t_{j_2}^1, t_{j_2}^2)$ – интервал времени t , в течение которого может проявиться результат влияния событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$ на текущую деятельность ИР. Кроме того, события $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$ могут также влиять на состояние объекта ПС $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$, удовлетворяющего требованиям активной вершины $o_{i_7}^*(X_{i_7}^*) \in O^*$, в которую это ребро входит.

Текущие ситуации ПС $S_{i_5} \in S$ в модели представления знаний ИР описываются семантическими сетями, представляющими собой помеченный граф $G_{i_{10}}^{i_5} = (v_0, V_{i_{10}}^{i_5}, E_{i_{10}}^{i_5})$, который формируется в сенсорной подсистеме интеллектуального робота на основе информации, поступающей из проблемной среды. Здесь v_0 – ключевая помеченная ИР вершина, относительно кото-

рой формируется семантическая сеть. Остальные же вершины $V_{i_{10}}^{i_5} = \{v_{i_{11}}\}$, $i_{11} = \overline{1, n_{11}}$ графа $G_{i_{10}}^{i_5}$ в соответствии с их назначением определяются находящимися в ПС объектами $o_{i_2}(X_{i_2}) \in O$ и происходящими в ней событиями $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$. Ребра $E_{i_{10}}^{i_5} = \{e_{i_{12}}\}$, $i_{12} = \overline{1, n_{12}}$ в сети $G_{i_{10}}^{i_5}$ могут быть также ориентированными и неориентированными. Неориентированные ребра в сети $G_{i_{10}}^{i_5}$ помечаются количественными оценками $r_{i_4}^*$ отношений $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$, которые выполняются в ПС между ИР и находящимися в ней объектами. Ориентированные же ребра $e_{i_{12}} \in E_{i_{10}}^{i_5}$, определяющие характер влияния происходящих в среде событий на находящиеся в ней объекты и текущую деятельность ИР, помечаются так же, как и в активных нечетких семантических сетях тройками $\langle F_{i_9}, (t_{j_2}^1, t_{j_2}^2) \rangle$.

Содержание и структура типовых элементов процедурной модели представления знаний определяются функциональным назначением ИР. В общем случае такие элементы представления знаний с учетом их функционального назначения могут быть следующих видов.

1. Импликативные решающие правила, позволяющие ИР выявлять необходимые для достижения заданной подцели процедуры автоматического построения маршрута целенаправленного перемещения в ПС

$$(1) \quad F_{j_4} : S_{i_5}^I(j_4) \& B_{j_1}(j_4) \rightarrow S_{i_5}^{II}(j_4), \quad j_4 = \overline{1, 3},$$

где F_{j_4} – идентификатор, определяющий назначение решаемой на основе j_4 правила подзадачи, например, “маршрутизация движения в ПС с препятствиями”; $S_{i_5}^I(j_4)$ – исходная ситуация участка ПС, на котором ИР находится в текущий момент времени; $S_{i_5}^{II}(j_4)$ – ситуация, определяющая участок проблемной среды, на который ИР требуется перейти для достижения заданной подцели текущего этапа поведения; $B_{j_1}(j_4)$ – метод планирования маршрута движения, связанного с переходом ИР в текущее целевое местоположение.

2. Элементы представления знаний, характеризующие требуемые исходные условия и результаты отработки ИР элементарных действий $b_{i_1} \in B$

$$(2) \quad F_{j_5} : \Delta S_{i_1}^I(j_5) \& b_{i_1}(j_5) \rightarrow \Delta S_{i_1}^P(j_5), \quad j_5 = \overline{1, m_4},$$

где F_{j_5} – идентификатор подзадачи, решение которой обеспечивает ИР получение локального результата $\Delta S_{i_1}^P(j_5)$; $\Delta S_{i_1}^I(j_5) \& b_{i_1}(j_5) \rightarrow \Delta S_{i_1}^P(j_5)$ – элементарный акт поведения ИР, показывающий, что если в текущей ситуации ПС $S_{i_5} \in S$ выполняется условие $\Delta S_{i_1}^I(j_5) \subset S_{i_5}$, то для получения в среде локального результата $\Delta S_{i_1}^P(j_5)$ роботу следует отработать действие $b_{i_1}(j_5)$; m_4 – подмножество допустимых фрагментов $\Delta S_{i_1}^I(j_5) \subset S_{i_5}$, определяющих различные локальные условия, которые могут возникнуть в текущей ситуации ПС.

Таким образом, импликативные решающие правила (2) позволяют ИР устанавливать различные действия $b_{i_1}(j_5) \in B$, которые после их отработки в ПС приводят к получению результата $\Delta S_{i_1}^P(j_5)$ в соответствии со сложившимися в проблемной среде локальными условиями $\Delta S_{i_1}^I(j_4)$.

При этом множество элементов представления знаний (2) целесообразно разбить на классы эквивалентности по идентичности получаемого на их основе результата $\Delta S_{i_1}^P(j_5)$. Каждый такой класс определяется либо идентификатором F_{j_5} , либо локальным результатом $\Delta S_{i_1}^P(j_5)$, который ИП требуется получить для достижения текущей подцели поведения. Следовательно, если ИП в текущий момент времени необходимо обеспечить локальный результат $\Delta S_{i_1}^P(j_5)$ в текущей ситуации ПС $S_{i_5} \in S$, то по соответствующему ему содержанию в модели представления знаний в первую очередь определяется обеспечивающий этот результат класс элементов модели представления знаний (2). Затем в выбранном классе устанавливается типовой элемент представления знаний, у которого фрагменты $\Delta S_{i_1}^I(j_5)$ и $\Delta S_{i_1}^P(j_5)$ являются нечетко вложенными соответственно в текущую и целевую ситуации проблемной среды. Например, таким образом группируются в один класс эквивалентности все действия, связанные с изменением местоположения различных объектов в ПС. Так, одни объекты из-за их габаритных размеров и веса ИП может поднять и перенести, вторые только перекатить, а третьи — перетащить и т.п.

3. Описание в модели представления знаний ИП условий и результатов выполнения сложных действий B_{j_1} определяется следующими актами поведения:

$$(3) \quad F_{j_6} : S_{i_5}^I(j_6) \& B_{j_1} \left[S_{i_1}^{1,I}(j_6) \& b_{i_1}^1 \rightarrow \left(\Delta S_{i_1}^{1,P}(j_6) \approx \Delta S_{i_1}^{2,I}(j_6) \right) \& b_{i_1}^2 \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \Delta S_{i_1}^{2,P}(j_6) \approx, \dots, \approx \Delta S_{i_1}^{k,I}(j_6) \& b_{i_1}^k \rightarrow \Delta S_{i_1}^{k,P}(j_6) \right] \Rightarrow S_{i_5}^{II}(j_6), \quad j_6 = \overline{1, m_6}.$$

Импликативные решающие правила (3) означают следующее. Если текущее состояние ПС определяется ситуацией $S_{i_5} \in S$, в которую нечетко вложено обобщенное описание $S_{i_5}^I(j_6)$ аналогичных друг другу допустимых подситуаций проблемной среды, то для ее преобразования в целевую ситуацию, определяющуюся обобщенным описанием $S_{i_5}^{II}(j_6)$, ИП требуется выполнить сложное действие B_{j_1} , состоящее из кортежа элементарных действий $\langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^k \rangle$. Здесь \approx — знак нечеткого равенства сравниваемых между собой семантических сетей.

4. Для планирования многоэтапной деятельности в ПС, в которой спонтанно возникают события $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, негативно влияющие (препятствующие эффективной результативной отработке роботом определенных действий) на целенаправленную деятельность ИП, для построения подплана поведения, связанного со снижением и устранением такого влияния, используются следующие два вида импликативных решающих правил.

Первый вид данных импликативных решающих правил имеет следующую структуру и содержание:

$$(4) \quad F_{j_7} : \langle \Delta S_{i_5}^I(j_7), d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*) \rangle \& b_{i_1}(j_7) \rightarrow \overline{\Delta d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*)_{j_5}}, \quad j_7 = \overline{1, m_7},$$

где элементарный акт поведения $\Delta S_{i_5}^I(j_7) \& b_{i_1}(j_7) \rightarrow \overline{\Delta d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*)}$ означает, что если в текущую ситуацию ПС $S_{i_5} \in S$ нечетко вложен фрагмент $\Delta S_{i_5}^I(j_7)$, то

при появлении в проблемной среде события $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, удовлетворяющего требованиям слота $d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*) \in D^*$, обработка ИР элементарного действия $b_{i_1}(j_7)$ позволяет снизить $\Delta d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*)_{j_5}$ его негативное влияние на дальнейшую целенаправленную деятельность робота.

Второй вид таких правил вывода имеет следующее представление:

$$(5) \quad F_{j_8} : < S_{i_5}^I(j_8), S_{i_5}^P(j_8), d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*) > \& B_{j_1}(j_8) \rightarrow \overline{d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*)}, \quad j_8 = \overline{1, m_8},$$

где импликативные решающие правила (5) означают следующее. Если текущая ситуация ПС S_{i_5} является нечетко равной обобщенному описанию $S_{i_5}^I(j_8)$ аналогичных друг другу ситуаций проблемной среды, а заданная ИР цель поведения представлена семантической сетью $S_{i_5}^P(j_8)$, то при появлении в среде событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, удовлетворяющих требованиям слота $d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*) \in D^*$, выполнение роботом сложного действия $B_{j_1}(j_8)$ позволяет устранить $\overline{d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*)}$ негативное влияние этого события на дальнейшую целенаправленную деятельность.

Например, при наличии в ПС тумана, ИР для избегания столкновения с различными находящимися в среде объектами, используя правило (4), определяет, что ему в этом случае требуется снизить скорость своего передвижения и т.п.

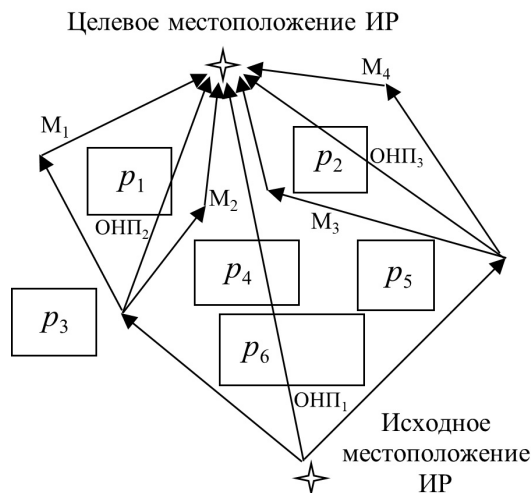
Следует отметить, что множества решающих правил (3)–(5) по характерному для них общему признаку (например, назначению), как и правила (2), разбиваются на соответствующие им классы эквивалентности. Это позволяет ИР эффективным образом определять результативные решающие правила на каждом этапе планирования целенаправленной деятельности в соответствии с текущими условиями ПС и заданной подцелью поведения.

4. Методы планирования многоэтапной деятельности ИР

Как уже отмечалось выше, на каждом этапе целенаправленной деятельности ИР в ПС с препятствиями, как правило, требуется автоматическое построение маршрута перемещения для перехода с одного участка проблемной среды на другой ее участок. В процессе решения данной подзадачи на основе типовых элементов представления знаний (1) ИР может столкнуться со следующими тремя случаями:

- целевое местоположение находится в зоне прямой видимости сенсорной подсистемы робота, а на пути движения к нему имеются препятствия;
- интеллектуальному роботу известны только координаты своего целевого местоположения в ПС с препятствиями;
- требуется найти заданные объекты в априори неописанной ПС с препятствиями.

В первом случае для построения маршрута движения к целевому местоположению в среде с препятствиями, габаритные размеры и координаты местоположения которых в ПС априори роботу не известны, используется ме-



Построение ИР графа “видимости” для выбора эффективного маршрута движения к целевому местоположению: (p_1-p_6) – препятствия; $(ОНП_1-ОНП_3)$ – основные направления перемещения; (M_1-M_4) – альтернативные маршруты движения к целевому местоположению.

метод 1. На основе *метода 1* и данных, поступающих из сенсорной подсистемы ИР, в его интеллектуальном решателе задач строится граф “видимости” $G_B = (V_B, E_B)$. Здесь $V_B = \{v_{i_{13}}\}$, $i_{13} = \overline{1, n_{13}}$ – множество вершин, соответствующих проходимым между препятствиями зонам ПС; $E_B = \{e_{i_{14}}\}$, $i_{14} = \overline{1, n_{14}}$ – множество ребер, определяющих связь между смежными проходимыми зонами ПС, которые определяются “затратами”, связанными с переходом ИР от одной такой зоны к смежной с ней в проблемной среде. Параллельно построению данного графа выбирается также и направление перемещения ИР на каждом шаге целенаправленного движения.

В общем случае *метод 1* автоматического построения графа “видимости” $G_B = (V_B, E_B)$ и локально-оптимального маршрута целенаправленного движения ИР к воспринимаемому целевому местоположению (при отсутствии формального описания карты местности) можно представить следующим образом:

1. Принять в качестве исходной вершины $v_0^0(0) \in V_B$ или истока графа “видимости”, имеющего нулевую условную стоимость, исходное местоположение ИР (см. рисунок).

2. Определить первое основное направление перемещения к цели $(ОНП_1)$, представляющее собой прямую или кратчайшее расстояние между исходным и целевым местоположением ИР.

3. Выбрать расположенные по разные стороны от $ОНП_1$ две отстоящие от него на минимальном расстоянии проходимые между препятствиями зоны, которые будут определять вершины $v_{i_{13}}^1(c_{i_{13}}^1)$ и $v_{i_{13}}^2(c_{i_{13}}^2)$ строящегося графа G_B , смежные с вершиной $v_0(0)$ и имеющие соответственно условные стоимости $c_{i_{13}}^1$ и $c_{i_{13}}^2$.

4. Определить для каждой принятой таким образом вершины $v_{i_{13}}^1(c_{i_{13}}^1), v_{i_{13}}^2(c_{i_{13}}^2) \in V_B$ их условные стоимости $c_{i_{13}}^1$ и $c_{i_{13}}^2$, равные стоимости инцидентных им ребер $e_{i_{14}} \in E_B$ и зависящие

— от расстояния, которое необходимо преодолеть ИР для перехода от текущего местоположения за пределы соответствующей вершине проходимой зоны ПС;

— от вида грунта на поверхности, по которому интеллектуальному роботу предстоит движение к каждой проходимой зоне с учетом конструктивных особенностей хода моторной системы.

5. Построить для каждой из выявленных на текущем шаге формирования графа “видимости” вершин $v_{i_{13}}^1(c_{i_{13}}^1), v_{i_{13}}^2(c_{i_{13}}^2) \in V_B$ исходящие из них основные направления перемещения ИР к целевому местоположению (например, на приведенном рисунке – это ОНП₂ и ОНП₃).

6. Выбрать относительно каждого построенного ОНП₂ и ОНП₃ по две отстоящие от них по разные стороны на минимальном расстоянии проходимые зоны ПС, которые определяют следующие вершины $v_{i_{13}}^k(c_{i_{13}}^k) \in V_B$, $k = \overline{1, 4}$ строящегося графа “видимости” G_B , смежные с присоединенными к нему на предыдущем шаге вершинами. Определить стоимость $c_{i_8}^k$ вершин $v_{i_{13}}^k(c_{i_{13}}^k) \in V_B$, складывающуюся из стоимости смежных с ними вершин строящегося графа “видимости” и стоимости инцидентных им ребер $e_{i_{14}} \in E_B$.

7. Продолжить дальнейшее построение графа “видимости” $G_B = (V_B, E_B)$ по описанному в пп. 1–6 принципу. В этом случае построение графа “видимости” происходит до тех пор, пока к каждой входящей в его структуру вершине, найденной на предыдущем шаге его построения, не будет присоединена вершина, соответствующая проходимой зоне ПС, между которой и заданным целевым местоположением ИР отсутствуют препятствия.

Определить “стоимость” каждой выявленной таким образом вершины, которая складывается из “стоимости” смежной с ней вершины и “стоимости”, зависящей от сложности перемещения ИР по отрезку прямой, связывающему соответствующую этой вершине проходимую зону и текущее целевое местоположение робота.

8. Присоединить к каждой вершине строящегося графа “видимости”, удовлетворяющей условиям п. 7, вершину – сток $v_{\text{ц}} \in E_B$, соответствующую целевому местоположению ИР.

Построенный таким способом граф “видимости” $G_B = (V_B, E_B)$ позволяет ИР определить локально-оптимальный маршрут $L_{j_9}(v_{\text{и}}, v_{\text{ц}})$, $j_9 = \overline{1, m_9}$ с минимальной “стоимостью” $C_{j_9} = \sum_{j_{10}=1}^{m_{10}} e_{i_{14}}^{j_9}(c_{i_{14}}^{j_9}, j_{10}) \rightarrow \min$. Здесь $v_{\text{и}}$ и $v_{\text{ц}}$ – вершины графа G_B , соответственно определяющие исходное и целевое местоположение интеллектуального робота; $e_{i_{14}}^{j_9}(c_{i_{14}}^{j_9}, j_{10})$ – ребра графа G_B , входящие в j_9 маршрут движения ИР к целевому местоположению; $c_{i_{14}}^{j_9}$ – “стоимость” j_9 ребра $e_{i_{14}}^{j_9} \in L_{j_9}(v_{\text{и}}, v_{\text{ц}})$.

Следует отметить, что построенный на основе *метода 1* граф “видимости” (см. рисунок) параллельно сопровождается формированием ИР в условиях

неопределенности локально-оптимального маршрута движения M_2 к заданному целевому местоположению.

Для второго случая, когда заданы только координаты целевого местоположения, и оно расположено за пределами зоны прямой видимости ИР, для планирования перемещения используется *метод 2*, имеющий следующее содержание:

1. На первом шаге планирования поведения определяется стратегическое направление движения ИР к целевому местоположению, которым является прямая, связывающая его исходное и целевое местоположения в ПС.

2. На втором шаге на стратегическом направлении движения выбирается наиболее удаленная точка, попадающая в зону прямой видимости и играющая роль подцели на текущем шаге планирования перемещения ИР.

3. На третьем шаге, используя приведенные выше инструменты планирования поведения при расположении целевого местоположения в зоне прямой видимости, ИР строит относительно выбранной точки, расположенной на стратегическом направлении движения, подграф “видимости”. Это позволяет ИР определить эффективный маршрут движения к данной точке, т.е. маршрут, имеющий минимальную “стоимость” в пределах видимого роботу участка ПС.

4. На четвертом шаге выбирается новая точка, расположенная на стратегическом направлении движения, относительно которой строится следующий соответствующий ей подграф “видимости” и т.д., пока ИР не достигнет заданного целевого местоположения.

В случае, когда ИР требуется найти в априори неописанной ПС заданные объекты, для планирования целесообразного поведения на заданном участке местности эффективно могут быть использованы алгоритмы самообучения, предложенные в [24].

Что же касается планирования целенаправленной деятельности ИР, связанной с манипулированием на каждом этапе деятельности находящимися в ПС объектами, то следует отметить, что основной операцией, которая выполняется в процессе вывода решений в этом случае, является операция сравнения между собой различных семантических сетей. В общем случае данная операция может быть связана

1. С необходимостью сравнения между собой семантической сети, соответствующей текущей ситуации ПС $S_{i_5} \in S$, и активной нечеткой семантической сети S_a на предмет их нечеткого равенства в процессе выбора сложного действия B_{j_1} , результативного с точки зрения достижения заданной подцели в текущих условиях среды.

Определение 1. Сравниваемые между собой семантические сети $G_a = (v_0, V_a, E_a)$ и $G_{i_{10}}^{i_5} = (v_0, V_{i_{10}}^{i_5}, E_{i_{10}}^{i_5})$ нечетко равны, если они удовлетворяют следующим условиям [25]:

— *данные семантические сети имеют одинаковое количество вершин и ребер;*

– для каждой вершины $v_{i_7} \in V_a$, помеченной в сети G_a слотом $o_{i_7}^*(X_{i_7}^*)$ или слотом $d_{i_8}^*(Y_{i_8}^*)$, имеется структурно эквивалентная ей вершина $v_{i_{11}} \in V_{i_{10}}^{i_5}$, помеченная в сети $G_{i_{10}}^{i_5}$ соответственно объектом $o_{i_2}(X_{i_2})$ или происходящим в проблемной среде событием $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, для которых справедливы следующие условия $X_{i_7}^* \subseteq X_{i_2}$ и $Y_{i_8}^* \subseteq Y_{i_3}$. В этом случае принимается решение, что пометки структурно эквивалентных вершин в сетях G_a и $G_{i_{10}}^{i_5}$ являются нечетко равными между собой ввиду того, что они определяются одними и теми же признаками, характерными для аналогичных друг другу объектов и событий ПС;

– для каждого неориентированного ребра $e_{i_9} \in E_a$, помеченного в сети G_a тройкой $\langle T_{j_3}^*(r_{i_4}), (r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*) \rangle$, имеется структурно эквивалентное ему неориентированное ребро $e_{i_{12}} \in E_{i_{10}}^{i_5}$, помеченное значением $r_{i_4}^*$ одноименного с этой тройкой отношения $r_{i_4} \in R$, для которого выполняется условие $r_{i_4}^* \in (r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*)$ или пометки сравниваемых между собой ребер нечетко равны между собой, так как определяются одним и тем же термом $T_{j_3}^*(r_{i_4})$;

– для каждого ориентированного ребра $e_{i_9} \in E_a$, помеченного в сети G_a тройкой $\langle T_{j_3}^*(r_{i_4}), (r_{j_3}^*, r_{j_3+1}^*) \rangle$, имеется структурно эквивалентное ему одинаково с ним помеченное ориентированное ребро $e_{i_{12}} \in E_{i_{10}}^{i_5}$.

В противном случае, если хотя бы одно из перечисленных выше условий не выполняется, то сравниваемые между собой семантические сети не являются нечетко равными.

2. С определением нечеткого вложения фрагментов $\Delta S_a = (\Delta V_a, \Delta E_a)$, имеющих нечеткое описание, в текущую ситуацию ПС $G_{i_{10}}^{i_5} = (v_0, V_{i_{10}}^{i_5}, E_{i_{10}}^{i_5})$, например, в процессе построения целенаправленной последовательности элементарных действий $b_{i_1} \in B$.

Определение 2. Нечетко заданный фрагмент $\Delta S = (\Delta V_a, \Delta E_a)$ обобщенного описания аналогичных друг другу ситуаций ПС $S_{i_5} \in S$ является нечетко вложенным в текущую ситуацию проблемной среды $G_{i_{10}}^{i_5} = (v_0, V_{i_{10}}^{i_5}, E_{i_{10}}^{i_5})$, если его матрица смежности $M(\Delta S_a)$ является частью матрицы смежности $M(G_{i_{10}}^{i_5})$ сети $G_{i_{10}}^{i_5}$ при нечетком равенстве пометок структурно эквивалентных в этих сетях вершин и ребер.

Необходимо отметить, что столбцы и строки в матрицах смежности, участвующих в определении нечеткого вложения одной семантической сети в другую, определяются пометками соответствующих им вершин. В свою очередь, элементы в данных матрицах представлены нечеткими значениями пометок ребер инцидентных вершинам, определяющим их соответствующие столбцы и строки.

В общем случае планирование многоэтапной деятельности ИР опирается на сформулированное роботу задание и имеющиеся у него типовые элементы модели представления знаний. Пусть на j_{11} этапе планирования в модели представления знаний имеется согласованная между собой и с полученным заданием пара имплекативных решающих правил $\langle (1), (3) \rangle$. Допустим, что для данных элементов соответственно выполняются следующие условия:

фрагмент ситуации $S_{i_5}^I(j_4)$ типового элемента (1) является нечетко вложенным в исходную на j_{11} шаге деятельности ситуацию ПС $S_{j_{11}}^I$ (см. определение 2); $S_{i_5}^I(j_4) \approx S_{i_5}^I(j_6)$ и фрагмент ситуации $S_{i_5}^I(j_6)$ типового элемента (4) является нечетко вложенным в целевую ситуацию среды $S_{i_{11}}^I$. Тогда задача планирования целенаправленной деятельности на данном этапе решается ИР на основе *метода 3* путем построения упорядоченной цепочки, состоящей из таких пар. При этом типовой элемент (1) при наличии на пути движения ИР препятствий по заданной ссылке встраивается в структуру типового элемента представления знаний (4) вместо элементарного действия “подойти к объекту”.

Следует отметить, учитывая, что ИР априори неизвестны условия ПС, в которых ему предстоит действовать на каждом следующем этапе, робот вначале обрабатывает подплан действий, полученный на текущем этапе функционирования. Затем ИР переходит к планированию дальнейшей целенаправленной деятельности следующего этапа поведения.

В противном случае, когда ИР для выполнения подзадания текущего этапа поведения требуется решить несколько подзадач, планирование целенаправленной деятельности на этом этапе сводится к автоматическому построению дерева вывода решений на основе имплицативных решающих правил (1)–(5) с использованием *метода 4*. Данный метод планирования имеет следующее описание.

1. На первом шаге построения дерева вывода решений соответствующего, например, текущему j_{11} этапу деятельности, его корневая вершина $v_0(j_{11})$ помечается целевой ситуацией $S_{j_{11}}^I$. Затем в модели представления знаний определяется первый акт поведения (3), у которого содержание ситуации $S_{i_5}^{1,I}(j_6)$ совпадает с содержанием целевой ситуации $S_{j_{11}}^I$.

При этом может возникнуть одно из условий: ситуация $S_{i_5}^{1,I}(j_6)$ является нечетко равной (см. определение 1), или нечетко вложенной (см. определение 2) в целевую ситуацию $S_{j_{11}}^I$. В первом случае осуществляется переход на следующий шаг построения дерева вывода решений (п. 2), в противном случае выполняется переход к п. 3.

2. На данном шаге построения дерева вывода решений проверяется условие: является или нет исходная ситуация $S_{i_5}^{1,I}(j_6)$ выбранного элемента представления знаний нечетко вложенной в текущую ситуацию ПС $S_{i_5} \in S$. Если данное условие выполняется, то план поведения, связанный с преобразованием текущей ситуации ПС S_{i_5} в ее целевую ситуацию $S_{j_{11}}^I$, является построенным. Таким образом, для достижения заданной подцели на текущем этапе деятельности ИР выполняет выбранное сложное действие $B_{j_1}^1$. В противном случае построение плана целенаправленной деятельности продолжается следующим образом.

На текущем k , $k = 2, \dots, n$ шаге построения дерева вывода решений определяется результативный акт поведения (3), у которого ситуация $S_{i_5}^{k,I}(j_6)$

является либо нечетко равной исходной ситуации $S_{i_5}^{k-1,И}(j_6)$ акта поведения выбранного на предыдущем шаге ее роста, либо нечетко вложена в эту ситуацию.

В случае, когда $S_{i_5}^{k,П}(j_6) \approx S_{i_5}^{k-1,И}(j_6)$, проверяется условие: является или нет исходная ситуация $S_{i_5}^{k,И}(j_6)$ последнего выбранного акта поведения нечетко вложенной в текущую ситуацию ПС $S_{i_5} \in S$. Если данное условие является справедливым, то принимается решение о том, что план целенаправленного поведения сформирован. Таким образом, для достижения заданной подцели $S_{j_{10}}^{П}$ ИР требуется выполнить построенный кортеж сложных действий $\langle B^k, \dots, B_{j_1}^2, B_{j_1}^1 \rangle$.

В случае же, когда условие $S_{i_5}^{k,П}(j_6) \approx S_{i_5}^{k-1,И}(j_6)$ не выполняется, построение основной ветви дерева вывода решений продолжается по вышеописанному принципу до тех пор, пока к нему не будет присоединен акт поведения z , у которого исходная ситуация $S_{i_5}^{z,И}(j_6)$ является нечетко вложенной в текущую ситуацию ПС $S_{i_5} \in S$.

Если же ситуация $S_{i_5}^{k,П}(j_6)$ оказывается нечетко вложенной в ситуацию $S_{i_5}^{k-1,И}(j_6)$, то это сигнализирует решающей подсистеме ИР о том, что требуется разветвление строящегося дерева вывода решений и осуществляется переход к п. 3.

3. На данном шаге определяются подцели поведения ИР для образующихся ветвей строящегося дерева вывода решений путем выполнения следующих операций над нечеткими семантическими сетями. Для определения подцели поведения и продолжения роста основной ветви дерева вывода или его ствола, например на $k + 1$ шаге планирования из исходной ситуации $S_{i_5}^{k-1,И}(j_6)$ акта поведения, выявленного на $k - 1$ шаге, вырезается подграф структурно эквивалентный семантической сети $S_{i_5}^{k,П}(j_6)$, соответствующей акту поведения, выбранному на k шаге построения дерева вывода решений. Затем выполняется переход к п.2, на котором продолжается построение ствола дерева вывода решений на основе полученной таким образом подцели поведения.

В оставшейся же части $\Delta S_{i_5}^{k-1,И}(j_6) \subset S_{i_5}^{k-1,И}(j_6)$ разбиваемой семантической сети к ее разрезанным ребрам присоединяются вершины, которые были им инцидентны в исходной семантической сети $S_{i_5}^{k-1,И}(j_5)$. В результате определяется фрагмент активной нечеткой семантической сети, определяющий подцель поведения ИР $\Delta S_{i_5}^{k+1,П}(j_6)$ для боковой ветви строящегося дерева вывода решений. Затем выполняется переход к п. 4.

4. На данном шаге для дальнейшего роста боковой ветви дерева вывода решений в модели представления знаний определяется акт поведения, у которого для целевой подситуации $S_{i_5}^{П}(j_6)$ выполняется условие $S_{i_5}^{П}(j_5) \approx \Delta S_{i_5}^{k+1,П}(j_5)$. Если найден такой акт поведения, то для дальнейшего роста боковой ветви выполняется переход к п. 2. Если же выполняется условие $S_{i_5}^{П}(j_5) \subset \Delta S_{i_5}^{k+1,П}(j_5)$, то рост боковой ветви дерева вывода решений осуществляется по описанному в пп. 3, 4 принципу.

В случае же, когда такой акт поведения не найден, то дальнейший рост боковой ветви дерева вывода решений осуществляется по тому же принципу, что и на основе формального описания условий и результатов выполнения сложных действий B_{j_1} , но только с использованием элементарных актов поведения (2).

Таким образом, построенное описанным выше способом дерево вывода решений определяет план целенаправленной деятельности ИР, состоящий из входящих в него различных актов поведения, связанных между собой условиями нечеткого равенства или нечеткого вхождения соответствующих им фрагментов нечетких семантических сетей. Отработка ИР данного плана целенаправленной деятельности начинается с выполнения последнего сложного действия, присоединенного к стволу дерева вывода решений. При этом подпланы целенаправленной деятельности, соответствующие боковым ветвям построенного дерева, отрабатываются в порядке возникновения условий, сигнализирующих о необходимости их построения, начиная с последнего присоединенного к ним сложного действия.

Примеры планирования целенаправленной деятельности ИР на основе предложенных типовых элементов представления знаний с использованием методов 3, 4 приводятся в Приложении П.1.

При самопроизвольном появлении в ПС событий $d_{i_5}(Y_{i_5}) \in D$, препятствующих эффективной отработке действий сформированного на текущем этапе плана поведения, ИР приостанавливает свою текущую целенаправленную деятельность и переключается к построению и отработке подплана, связанного с устранением негативного влияния этих событий на его дальнейшую деятельность. Данный подплан поведения автоматически формируется таким же способом, как и основной план целенаправленной деятельности. Только в этом случае процесс построения дерева вывода решений на первом шаге осуществляется на основе импликативных решающих правил (4) и (5). После устранения негативного влияния возникшего в ПС события $d_{i_5}(Y_{i_5}) \in D$, ИР продолжает свою многоэтапную целенаправленную деятельность. Для этого он, в зависимости от сложившейся в ПС ситуации $S_{i_5} \in S$, использует либо ранее разработанный план целенаправленной деятельности, либо перепланирует свою дальнейшую деятельность с учетом произошедших в проблемной среде изменений.

Предложение 1. Функциональная сложность β метода 4 планирования целенаправленной деятельности на каждом ее этапе зависит от количества операций сравнения пометок вершин и ребер в сопоставляемых между собой семантических сетях и определяется следующими граничными оценками:

$$3\delta \sum_{j_{12}=1}^{\delta} n_{j_{12}}^2 \leq \beta \leq 3\delta\lambda \sum_{j_{12}=1}^{\delta} n_{j_{12}}^2,$$

где δ, λ – соответственно общее количество выполненных шагов вывода решений и импликативных решающих правил, хранящихся в модели представ-

ления знаний, связанных с решаемой ИР задачей на текущем этапе деятельности; $n_{j_{12}}$ – количество вершин у максимальной по размерам семантической сети, участвующей в процессе вывода решений на j_{12} шаге планирования.

Доказательство сформулированного предложения приводится в Приложении П.2.

Таким образом, наиболее трудоемкий метод 4 планирования многоэтапной деятельности ИР имеет полиномиальную сложность второго порядка. Это позволяет ориентировочно определить производительность бортовой ЭВМ, необходимой для его реализации с учетом функционального назначения создаваемого интеллектуального робота.

5. Заключение

1. Предложенные элементы модели представления знаний позволяют ИР адаптироваться к априори неописанным проблемным средам путем конкретизации в процессе вывода решений имеющихся в их структуре слотов с учетом текущей ситуации ПС. Это, в свою очередь, обеспечивает ИР возможность на основе разработанных процедур вывода решений автоматически генерировать планы целенаправленной многоэтапной деятельности в нестабильных априори неописанных условиях функционирования.

2. Разработанные типовые элементы представления знаний позволяют существенным образом сузить пространство поиска решаемых ИР задач за счет выбора на каждом шаге планирования целенаправленной деятельности не одного, а сразу нескольких результативных действий. Кроме того, определение таких результативных действий осуществляется не путем перебора, а на основе целенаправленного выбора с учетом условий ПС, в которых ИР предстоит решать стоящую перед ним подзадачу на каждом этапе целенаправленной деятельности.

3. Важная особенность предложенных элементов представления знаний и методов вывода решений заключается в возможности их использования для вывода решений на семантических сетях, позволяющих наиболее выразительно и компактно выполнить формальное описание текущих условий функционирования ИР в различных по сложности ПС.

4. К основному недостатку предложенного подхода к построению интеллектуального решателя задач, позволяющего ИР планировать целенаправленную деятельность в априори неописанных нестабильных проблемных средах, следует отнести громоздкость задаваемой роботу цели. В этой связи возникает необходимость в дальнейшем развитии проведенного исследования, связанного с построением типовых элементов представления знаний, позволяющих формулировать ИР цель поведения в виде одной общей задачи. Затем выполнять разбиение этой задачи на подзадачи, решение которых обеспечивает достижение полученных подцелей в сложившихся в ПС условиях на различных этапах функционирования.

П.1. Примеры решения ИР гипотетических задач

Задача 1. Допустим, что робот получил следующее задание. Находясь на одном из участков ПС с препятствиями, роботу требуется перейти на другой ближайший к нему участок этой среды, на котором необходимо перенести объект $o_1(X_1)$ и поставить на объект $o_2(X_2)$. Затем попасть на следующий участок ПС, на котором следует заменить объект $o_3(X_3)$ (например, разряженную батарею питания), находящийся в закрытой дверцей нише объекта $o_4(X_4)$ (например, электронного прибора) на объект $o_5(X_5)$ (заряженную батарею питания).

Пусть в ПС выполняются следующие условия. В исходном состоянии ИР наблюдает объект $o_1(X_1)$, а на пути движения к этому объекту имеются препятствия. Между объектами $o_1(X_1)$ и $o_2(X_2)$ препятствия отсутствуют. Из местоположения объекта $o_2(X_2)$ ИР становится видимым объект $o_4(X_4)$, а между данными объектами в ПС имеются непреодолимые для робота препятствия. Объект $o_5(X_5)$ находится в специальном для этого “кармане 1” ИР.

Следует отметить, что сформулированное ИР задание состоит из следующих двух этапов. На первом этапе ИР требуется перейти в ПС с препятствиями к местоположению объекта $o_1(X_1)$. После этого захватить этот объект и перенести его к местоположению объекта $o_2(X_2)$. Затем поставить объект $o_1(X_1)$ на поверхность объекта $o_2(X_2)$.

На втором этапе ИР необходимо перейти в ПС с препятствиями к местоположению объекта $o_4(X_4)$. После этого заменить объект $o_3(X_3)$, находящийся в специальной для этого нише внутри объекта $o_4(X_4)$, на объект $o_5(X_5)$.

Таким образом, ИР для выполнения сформулированного ему задания требуется использовать типовые элементы модели представления знаний, обеспечивающие решение следующих подзадач.

1. Построить маршрут перемещения ИР в ПС с препятствиями, при условии воспринимаемого в среде целевого местоположения (типовой элемент представления процедурных знаний для решения данной подзадачи определяется *методом 1*).

2. Отработать сложное действие B_1 (поставить объект $o_1^*(X_1^*)$ на объект $o_2^*(X_2^*)$) при условии, что данные объекты расположены в зоне прямой видимости за пределами рабочей зоны манипулятора ИР. Здесь характеристики X_1^* слота $o_1^*(X_1^*)$ показывают, что первый, находящийся в ПС объект $o_1(X_1)$, для эффективной отработки действий данного элемента модели представления знаний должен иметь определенные габаритные размеры и вес, позволяющие ИР захватить поднять и перенести этот объект. В свою очередь, характеристики X_2^* слота $o_2^*(X_2^*)$ показывают, что для того, чтобы ИР мог поставить объект $o_1(X_1)$ на объект $o_2(X_2)$, последний должен иметь плоскую поверхность.

Сложное действие B_1 данного элемента представления знаний состоит из кортежа следующих элементарных действий: <подойти к объекту $o_1^*(X_1^*)$

(при наличии в ПС препятствий отработать данное действие, используя *метод 1*); захватить объект $o_1^*(X_1^*)$; поднять объект $o_1^*(X_1^*)$; перейти к объекту $o_2^*(X_2^*)$ (при наличии в ПС препятствий отработать данное действие, используя *метод 1*); поставить объект $o_1^*(X_1^*)$ на поверхность объекта $o_2^*(X_2^*)$ >.

3. Выполнить сложное действие B_2 [провести замену объекта $o_3^*(X_3^*)$, находящегося в нише с дверцей объекта $o_4^*(X_4^*)$, на объект $o_5^*(X_5^*)$]. В данном элементе представления знаний характеристики X_1^* слота $o_1^*(X_1^*)$ показывают, что имеющийся у ИР объект $o_5(X_5)$ для эффективной отработки действий данного элемента модели представления знаний должен удовлетворять следующему условию $X_5^* \subseteq X_5$. В свою очередь, для выполнения сложного действия B_2 для объектов $o_3(X_3)$ и $o_4(X_4)$ соответственно должны выполняться следующие условия $X_3^* \subseteq X_3$ и $X_4^* \subseteq X_4$.

При этом сложное действие B_2 состоит из следующего кортежа элементарных действий: <подойти к объекту $o_4^*(X_4^*)$ [при наличии в ПС препятствий для отработки действия использовать *метод 1*]; открыть дверцу ниши объекта $o_4^*(X_4^*)$, в которой расположен объект; отключить объект $o_3^*(X_3^*)$ от сети питания; вынуть объект $o_3^*(X_3^*)$ из ниши объекта $o_4^*(X_4^*)$; опустить объект $o_3^*(X_3^*)$ на поверхность земли; достать из “кармана 1” объект $o_5^*(X_5^*)$; вставить объект $o_5^*(X_5^*)$ в нишу объекта $o_4^*(X_4^*)$; подключить объект $o_5^*(X_5^*)$ к сети питания, закрыть крышку ниши объекта $o_4^*(X_4^*)$; поднять с земли объект $o_3^*(X_3^*)$ и поместить его в “карман 2” >.

Таким образом, используя *метод 3* и сформулированное задание, ИР приступает к планированию целенаправленной деятельности, связанной с выполнением первого этапа функционирования. Пусть на первом шаге такого планирования на основе *метода 3* робот устанавливает, что для объектов $o_1(X_1)$, $o_2(X_2)$ и типового элемента представления знаний “поставить объект $o_1^*(X_1^*)$ на объект $o_2^*(X_2^*)$ ” соответственно выполняются следующие условия $X_1^* \subseteq X_1$ и $X_2^* \subseteq X_2$. Отсюда для решения подзадачи первого этапа целенаправленной деятельности, ИР использует типовой элемент представления знаний, связанный с выполнением сложного действия B_1 . Таким образом, подплан первого этапа будет определяться кортежем элементарных действий этого сложного действия, в котором слоты $o_1^*(X_1^*)$ и $o_2^*(X_2^*)$ помечены соответственно находящимися в ПС объектами $o_1(X_1)$ и $o_2(X_2)$.

При этом, учитывая, что на пути движения робота к объекту $o_1(X_1)$ в среде имеются препятствия, отработка первого действия полученного подплана поведения выполняется с привлечением по ссылке *метода 1*. В итоге подплан первого этапа целенаправленной деятельности состоит из двух типовых элементов процедурной модели представления знаний ИР.

Кроме того, исходя из того, что ИР априори неизвестны условия ПС, в которых предстоит выполнять второй этап целенаправленной деятельности, робот непосредственно реализует подплан поведения первого этапа. В результате этого ИР переходит на новый участок ПС, на котором, согласно текущим условиям функционирования, объект $o_4(X_4)$ ему становится видимым. Это позволяет ИР на втором этапе планирования целенаправленной

деятельности, для достижения соответствующей ему подцели, выбрать элемент представления знаний, соответствующий сложному действию B_2 .

Пусть для объектов ПС $o_3(X_3)$, $o_4(X_4)$ и $o_5(X_5)$, а также данного элемента представления знаний, соответственно выполняются следующие условия $X_3^* \subseteq X_3$, $X_4^* \subseteq X_4$ и $X_5^* \subseteq X_5$. В этом случае, согласно *методу 3*, подплан целенаправленной деятельности ИР второго этапа будет состоять из кортежа элементарных действий сложного действия B_2 , в котором слоты помечены удовлетворяющими их требованиям объектами ПС. При этом первое действие этого кортежа выполняется с привлечением выбранного по его ссылке *метода 1*.

В итоге выполнение сформулированного ИР задания сводится к отработке следующего кортежа сложных действий $\langle B_1, B_2 \rangle$, в которых первые элементарные действия “подойти к заданному объекту” реализуются с привлечением *метода 1*.

Задача 2. Рассмотрим случай, когда ИР на одном из этапов требуется решить несколько взаимосвязанных между собой подзадач. Например, “снять объект $o_5(X_5)$, расположенный на объекте $o_6(X_6)$ ” и “заменить объект $o_7(X_7)$, находящийся в закрытой дверцей нише объекта $o_8(X_8)$, на объект $o_5(X_5)$ ”.

В этом случае для планирования целенаправленной деятельности ИР использует *метод 4*. При этом сформированный подплан целенаправленной деятельности ИР будет состоять из следующего кортежа типовых элементов модели представления знаний \langle сложное действие B_3 , сложное действие $B_2 \rangle$. Здесь третье сложное действие определяется следующим типовым элементом B_3 (снять объект $o_5^*(X_5^*)$, расположенный на объекте $o_6^*(X_6^*)$). При этом, если на пути движения ИР к объекту $o_6(X_6)$ и пути перехода от местоположения объекта $o_6(X_6)$ к местоположению в ПС объекта $o_8(X_8)$ имеются препятствия, то первые элементарные действия сложных действий B_3 и B_2 отрабатываются роботом с привлечением для этого *метода 1*.

П.2. Доказательство сформулированного утверждения

Доказательство предложения 1. Справедливость сформулированного предложения вытекает из следующих соображений.

1. На каждом j_{12} шаге вывода решений сравниваются между собой семантические сети, представляющие собой помеченные графы. Следовательно, количество сравнений между собой пометок имеющих в них структурно эквивалентных вершин и ребер не может превышать величины, равной $n_{j_{12}}^2$.

2. Каждый шаг вывода решений в процессе построения плана целенаправленного поведения на текущем этапе деятельности сводится к выбору путем направленного перебора акта поведения, удовлетворяющего следующим условиям: $S_{i_5}^I(j_4) \approx S_{j_{11}}^I$, $S_{i_5}^{II}(j_4) \approx S_{i_5}^I(j_6)$ и $S_{i_5}^{II}(j_6) \approx S_{j_{11}}^{II}$.

Таким образом, количество сравнений пометок в сопоставляемых между собой семантических сетях, в лучшем случае, когда результативный акт по-

ведения выбирается в первую очередь (что вполне вероятно), может быть не менее трех. Следовательно, в течение δ шагов синтеза дерева вывода решений, исходя из п. 1 проводимого доказательства, количество таких сравнений не может быть менее величины, равной $3\delta \sum_{j_{12}=1}^{\delta} n_{j_{12}}^2$.

В худшем же случае, когда необходимое импликативное решающее правило определяется в последнюю очередь, количество сравнений пометок в сопоставляемых между собой семантических сетях на каждом j_{12} шаге вывода решений выполняется не более λ раз. Следовательно, количество сравнений между собой пометок структурно эквивалентных вершин и ребер в сопоставляемых семантических сетях на протяжении всего процесса построения дерева вывода решений, состоящего из δ шагов, не может превышать величины, равной $3\delta\lambda \sum_{j_{12}=1}^{\delta} n_{j_{12}}^2$.

3. Из пп. 1–2 проводимого доказательства с очевидностью следует справедливость сформулированного *предложения*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Melekhin V.B., Khachumov M.V.* Planning polyphasic behavior of autonomous intelligent mobile systems in uncertain environments // Inform. Control. Syst. 2021. V. 113. No. 4. P. 28–36.
2. *Амосов Н.М.* Алгоритмы разума. Киев: Наукова думка, 1979.
3. *Kelly A.* Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
4. *Давыдов О.И., Платонов А.К.* Роботы и искусственный интеллект. Технократический подход // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 112. 24 с.
5. *Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А.* От амёбы к роботу. Модели поведения. 4 изд., стереотип. М.: URSS, 2019.
6. *Kober J., Peters J.* Learning Motor Skills: From Algorithms to Robot Experiments. Cham: Springer, 2014.
7. *Абасов И.Б., Игнатъев В.В., Орехов В.В.* Дизайн автономного мобильного робототехнического комплекса // Междунар. науч.-исслед. журн. 2019. № 1–1. С. 3340–3351.
8. *Russell S., Norvig P.* Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4 ed. Pearson, 2020.
9. *Вагин В.Н.* Дедуктивный вывод на знаниях / Искусственный интеллект. В 3-х кн. Кн. 2. Методы и модели. Справочник: под ред. Д.А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. С. 89–105.
10. *Абросимов В.К.* Нейронная пространственно-временная модель движения объектов управления // Нейрокомпьютеры. Разработка, применение. 2014. № 3. С. 26–35.
11. *Бодин О.Н., Безбородова О.Е., Спиркин А.Н., Шерстнев В.В.* Бионические системы управления робототехническими комплексами. Пенза: ПГУ, 2022.
12. *Редько В.Г.* Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: Ленанд, 2019.
13. *Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.Н., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990.

14. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных систем в условиях неопределенности: под ред. проф. М.В. Хачумова. СПб.: Политехника, 2022.
15. Павловский В.Е., Павловский В.В. Технологии SLAM для подвижных роботов: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 1. № 6. С. 384–394.
16. Labbe M., Michaud F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation // Field Robotics. 2019. No. 35. P. 416–446.
17. Носков В.П., Рубцов И.В. Ключевые вопросы создания интеллектуальных мобильных роботов // Инженер. журн.: наука и инновации. 2013. Вып. 3. С. 1–11.
18. Заева К.А., Семенов А.Б. Метод маршрутизации с препятствиями на основе параллельных вычислений // Вестник ТвГУ. Прикладная математика. 2016. Вып. 3. С. 85–95.
19. Tomas L.P., Michael A.W. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles // Commun. ACM. 1979. Vol. 22. No. 10. P. 560–570.
20. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. 2-е изд., стереотип. М.: URSS, 2022.
21. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Элементы понятийного мышления в планировании поведения автономных интеллектуальных агентов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 8. С. 411–419.
22. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems // Sci. Tech. Inf. Process. 2021. Vol. 48. No. 5. P. 1–8.
23. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений: пер. с англ. М.: Мир, 1976.
24. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Процедуры самообучения автономных интеллектуальных мобильных систем в нестабильных априори неописанных проблемных средах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 7. С. 356–366.
25. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Принцип построения процедур планирования поведения автономных интеллектуальных роботов на основе полипеременных условно-зависимых предикатов // АиТ. 2022. № 4. С. 140–154.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.

Поступила в редакцию 20.07.2022

После доработки 09.06.2023

Принята к публикации 30.09.2023