

В. Б. Мелехин, д-р техн. наук, проф., pashka1602@rambler.ru,
Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала,
М. В. Хачумов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., khmike@ribox.ru,
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии наук,
Российский университет дружбы народов, Москва

Элементы понятийного мышления в планировании поведения автономных интеллектуальных агентов*

Обоснована целесообразность использования инструментальных средств наглядно-действенного, наглядно-образного и понятийного мышления для планирования целенаправленной деятельности автономных интеллектуальных агентов в различных по степени априорной неопределенности проблемных средах. Раскрыто содержание и показана роль каждой формы мышления в процессе автоматического планирования целенаправленного поведения автономных интеллектуальных агентов в меняющихся условиях функционирования. Обозначена особая роль понятийного мышления в выполнении автономными агентами сложных заданий и связанного с ним планирования полифазного поведения. С учетом сложности проблем, связанных с формализацией мыслительных актов понятийного мышления, показаны возможные пути постепенного его развития от начального уровня до перехода на более высокие уровни развития, и на этой основе расширен класс решаемых автономными интеллектуальными агентами задач. Разработана модель представления знаний и инструментальные средства вывода решений начального уровня понятийного мышления, позволяющие интеллектуальным агентам разбивать полученные ими задания на подцели поведения, а затем планировать на этой основе полифазную деятельность путем поиска решений связанных с ней подзадач, которые обеспечивают определение минимальных по длине маршрутов перемещения в проблемной среде с препятствиями и целенаправленное манипулирование находящимися в ней объектами. Синтезированы инструментальные средства, позволяющие устанавливать порядок отработки сложных действий, входящих в структуру сформулированного автономному интеллектуальному агенту задания. Показано, что дальнейшее развитие предложенных методических основ построения интеллектуальных решателей задач связано с формализацией более высокого уровня мыслительных актов понятийного мышления, позволяющих обеспечить возможность решения различных по сложности практических задач, сформулированных как в процедурной, так и в декларативной форме представления в виде различных целевых ситуаций проблемной среды, имеющих большую размерность.

Ключевые слова: автономный интеллектуальный агент, виды мышления, планирование полифазного поведения, разбиение задач на подзадачи, маршрут движения

Введение

В общем случае для обеспечения эффективного целенаправленного функционирования по аналогии с человеком [1, 2] в сложных проблемных средах (ПС) автономных интеллектуальных агентов (АИА) различного назначения целесообразно наделить возможностями следующих взаимосвязанных и дополняющих друг друга видов мышления: наглядно-действенного, наглядно-образного и понятийного мышления. Включение определенной формы мышления и переход от одной формы к другой его форме осуществляется интеллектуальным решателем задач в процессе вывода решений в соответствии с их функциональным назначением, а также сложностью сформулированного АИА задания и условий функционирования.

Инструментальные средства наглядно-действенного мышления АИА служат для изучения закономерностей целенаправленного пре-

образования различных ситуаций ПС в априори неопределенных условиях функционирования и построения на этой основе условных программ целесообразной деятельности, позволяющих переносить накопленный опыт поведения в новые условия, аналогичные ранее изученным условиям ПС [3]. Следует отметить, что процесс самообучения на основе инструментальных средств наглядно-действенного мышления осуществляется АИА на участке ПС, расположенном в пределах разрешающей способности его технического зрения или в рамках воспринимаемой им текущей ситуации ПС.

Для вывода решений в процессе планирования поведения, связанного с целенаправленным преобразованием текущих ситуаций ПС путем манипулирования находящимися в ней объектами на основе заданной модели представления знаний и процедур вывода решений, АИА использует инструментальные средства наглядно-образного мышления [4–6]. В этом случае целенаправленная деятельность АИА осуществляется также в рамках текущей ситу-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-71-10056).

ации ПС, соответствующей воспринимаемому участку среды.

Понятийное мышление включается для построения стратегии целенаправленного поведения, обеспечивающей выполнение полученного задания (основной цели поведения), когда АИА располагается в одной ситуации ПС, а цель достигается в другой ее ситуации. На основе инструментальных средств понятийного мышления строится цепочка взаимосвязанных подцелей, на которые разделяется основная цель поведения. Каждая из таких подцелей поведения достигается путем решения соответствующей ей подзадачи по мере перехода АИА из одних условий в другие условия функционирования.

Сформированный в процессе понятийного мышления общий план полифазной деятельности в зависимости от уровня априорной неопределенности текущих условий функционирования либо обеспечивает достижение текущей подцели с использованием инструментальных средств наглядно-действенного мышления в условиях с высоким уровнем неопределенности, либо строится на основе инструментальных средств наглядно-образного мышления в случае, когда АИА априори известны закономерности преобразования текущих условий среды, связанные с достижением текущей подцели поведения.

В общем же случае понятийное мышление согласно функциональным возможностям и назначению АИА целесообразно разделить на различные уровни развития, от начального и до высокого уровня развития мыслительной деятельности в форме сложных взаимосвязанных между собой рассуждений.

Понятийное мышление начального уровня развития предназначено для пополнения знаний, которых не хватает АИА для эффективного планирования целенаправленного поведения на основе инструментальных средств наглядно-образного мышления в недоопределенных условиях ПС, а также для решения различных по сложности задач поведения, требующих для достижения заданной цели полной смены текущих условий функционирования.

Следует отметить, что для пополнения недостающих в процессе вывода решений знаний в недоопределенных ПС в качестве инструментальных средств понятийного мышления начального уровня развития могут использоваться различные правила вывода как простых, так и сложных умозаключений в немонотонной

предметной области [7–10]. Что же касается проблем, связанных с планированием целенаправленного поведения АИА в реальных ПС на основе инструментальных средств понятийного мышления различного уровня развития, то они на сегодняшний день практически остаются открытыми.

В связи с этим формализацию мыслительных актов понятийного мышления, в первую очередь, целесообразно выполнить на начальном уровне развития, постепенно выводя его на более высокие уровни, расширяя на этой основе класс решаемых АИА задач. На начальном уровне развития инструментальные средства понятийного мышления должны обеспечивать АИА возможность планирования полифазного поведения, другими словами, наделить его способностью решать сложные задачи, когда для достижения заданной цели требуется переход из одной ситуации ПС в другую ее ситуацию, которая является невидимой из исходного местоположения АИА. Для решения такого вида задач АИА может потребоваться предварительно преобразовать ряд промежуточных ситуаций для достижения в каждой такой ситуации соответствующей ей подцели, связанной с выполнением общего целевого задания. Иначе говоря, понятийное мышление предназначено для планирования целенаправленной деятельности, когда основная цель поведения достигается в ситуации, расположенной за пределами разрешающей способности технического зрения АИА.

Что же касается более высоких уровней развития понятийного мышления АИА, то для их организации необходимо разработать логику рассуждений, оперирующую сложными понятиями, позволяющими определять и использовать в процессе вывода решений типовые конструкции представления знаний, определяющие:

- структурированное представление отдельных типовых закономерностей преобразования различных ситуаций ПС, связанных с достижением стоящей цели или текущей подцели поведения, например, закономерностей, заданных безотносительно конкретной предметной области, следующего вида: если в ПС наблюдается ситуация S_j , то отработка последовательности действий $b_1 \sim b_6 \sim b_3$ позволяет получить в ней результат S_j^* . Связывая между собой на основе мыслительных актов понятийного мышления такие закономерности преобразования текущей ситуации ПС, АИА

может строить сложные программы своей целенаправленной деятельности;

- сценарии, определяющие характер целенаправленного поведения, например, целенаправленный переход из одних условий функционирования в другие условия ПС, в которых достигается одна из подцелей полифазного поведения. Например, если АИА находится в ситуации S_j , то использование процедуры планирования пути перемещения B_z^1 на основе формального представления карты местности позволяет сформировать план поведения, обеспечивающий его перемещение в ситуацию S_{j+k} , в которой после отработки определенных действий достигается заданная подцель или общая цель поведения;
- условия перехода от одного вида мышления к другому в соответствии со сложностью решаемой задачи и уровнем априорной неопределенности условий функционирования.

Таким образом, наглядно-действенное и наглядно-образное мышление предназначены для вывода решений в процессе планирования целенаправленного поведения АИА, соответственно, в условиях с высоким уровнем неопределенности и при заданной модели ПС, когда цель поведения достигается в ситуации, расположенной в пределах разрешающей способности его технического зрения. В отличие от этих видов мышления понятийное мышление обеспечивает возможность планирования целенаправленной деятельности, когда для достижения заданной цели АИА требуется перейти в новые условия функционирования.

В настоящей работе рассматривается одна из попыток, связанная с разработкой модели представления знаний и инструментальных средств начального уровня развития понятийного мышления, позволяющего АИА планировать полифазное поведение в различных условиях ПС.

Постановка задачи

Рассмотрим в качестве АИА:

1) автономный интеллектуальный робот (АИР), способный осуществлять поиск и идентифицировать заданные объекты ПС $o_i \in O$, а также перемещать их в заданную точку местности, расположенную за пределами разрешающей способности его технического зрения;

2) автономный интеллектуальный беспилотный летательный аппарат (ИБЛА), осна-

щенный манипулятором и системой технического зрения. Такой летающий робот помимо целенаправленных полетов в воздушном пространстве должен быть также способен после посадки на землю перемещаться и целенаправленно манипулировать расположенными на ней объектами $O = \{o_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n_1$, отработывая для этого различные действия $b_k \in B$, $B = \{b_k\}$, $k = 1, 2, \dots, m$.

Пусть формулируемые АИА цели поведения определяются в процедурной форме представления в виде определенного задания, которое АИА должен выполнить в ПС, например:

— для АИР: "Загрузить на складе заготовки R , перевезти их в заданный цех A предприятия и перегрузить в бункер обрабатывающего центра с ЧПУ F ";

— для ИБЛА: "Загрузить на борт n различных объектов $o_i \in O$, перелететь и разгрузить каждый из них в определенной точке местности A_{j_1} , $j_1 = 1, 2, \dots, n_2$, для доставки различным адресатам заказанных ими товаров".

Для выполнения сформулированного в таком виде задания АИА на первом этапе планирования поведения необходимо разложить его на подцели, связанные с необходимостью перемещения на определенные участки ПС, и подцели, которые достигаются в результате отработки входящих в полученное задание сложных действий на определенных участках местности.

На втором этапе планирования АИА требуется, оперируя в процессе вывода различными понятиями, соответствующими типовым элементам представления знаний, построить общий план полифазного поведения, обеспечивающий выполнение сформулированного ему задания.

Наконец, на третьем этапе АИА формирует и отработывает все локальные подпланы, позволяющие реализовать в каждой фазе целенаправленной деятельности соответствующую им подзадачу общего плана поведения, используя для этого инструментальные средства наглядно-действенного и наглядно-образного мышления.

Таким образом, возникает необходимость в разработке модели представления знаний и элементов понятийного мышления, позволяющих АИА различного назначения эффективным образом реализовать рассмотренные выше этапы планирования полифазного поведения для выполнения в ПС сформулированного им задания.

Модель представления знаний и выделение подцелей поведения в сформулированном АИР задании

Пусть АИР получил следующее задание: "Загрузить на складе M z штук заготовок вида R , затем перевезти их в заданный цех A и разгрузить в бункер обрабатывающего центра с ЧПУ F " при следующих условиях. Автономному интеллектуальному роботу априори задано формальное описание карты территории производственного предприятия в виде взвешенного связанного графа $G = (V, E)$, построенного, например, в правой прямоугольной системе координат. Здесь:

$V = \{v_{j_2}\}, j_2 = 1, 2, \dots, n_3$, — множество вершин, помеченных координатами препятствий ПС, дойдя до которых по проходимым участкам, АИР должен сменить направление движения, а также координатами местоположения на территории предприятия различных помещений, в которых ему предстоит выполнить определенные сложные действия $b_k^* \in B$;

$E = \{e_{j_3}\}, j_3 = 1, 2, \dots, n_4$, — множество ребер, определяющих длину проходимых между препятствиями участков ПС, а также помеченных углами, указывающими направление движения по соответствующим им участкам среды в заданной системе координат.

Тогда на первом этапе планирования АИР необходимо на основе полученного задания определить все связанные с его выполнением подцели поведения. Для этого, в первую очередь, идентифицируются все входящие в его структуру сложные действия $b_k^* \in B$.

Для идентификации сложных, как правило, взаимосвязанных между собой действий $b_k^* \in B$, входящих в структуру полученного АИР задания, каждое из них в модели представления знаний определяется структурированным образом в следующем формате:

$$\langle P_k(b_k^*), S_k(b_k^*) \rangle,$$

где $P_k(b_k^*)$ — идентификатор или понятие, соответствующее действию b_k^* ; $S_k(b_k^*)$ — условия, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки сложного действия b_k^* , заданные безотносительно к конкретной предметной области, например, в виде активной нечеткой семантической сети [11]. В структуру сформулированного АИР задания входят два таких действия: b_1^* — загрузить на свою плат-

форму заготовки R ; b_2^* — разгрузить заготовки R в бункер обрабатывающего центра с ЧПУ F .

На втором этапе планирования поведения выявленные сложные действия рассматриваются как решаемые для достижения общей цели задачи вида "Отработать действие b_k^* ", которые разбиваются на отдельные подзадачи, определяющие подцели поведения АИР. Для достижения таких подцелей в модели представления знаний АИР определяются типовые элементы разбиения процесса отработки сложных действий b_k^* на подзадачи, имеющие в общем случае структуру описания, показанную на рис. 1.

На рис. 1 "корни" $D_{j_4}(b_k^*), j_4 = 1, 2, \dots, z_2$, представляют собой подзадачи, решение которых позволяет обеспечить в ПС условия $S_k(b_k^*)$, необходимые для успешной отработки действия b_k^* , а "ветви" соответствуют подзадачам $B_{j_5}(b_k^*), j_5 = 1, 2, \dots, z_1$, реализация которых непосредственно связана с отработкой действия b_k^* .

Каждая полученная таким образом подзадача, решение которой обеспечивает успешную отработку сложного действия b_k^* , и определяет связанную с ней подцель, для достижения которой АИР необходимо сформировать соответствующий подплан целенаправленного поведения. Следует отметить, что использование типовых элементов разбиения сложных действий b_k^* на подзадачи позволяет одновременно с этим определить и порядок их решения АИР. Так, вначале решаются все корневые подзадачи в порядке роста соответствующих им индексов, т. е. первой решается подзадача $D_1(b_k^*)$ и т. д. Затем в заданном порядке решаются все подзадачи, относящиеся к ветвям элемента разбиения, начиная с подзадачи $B_1(b_k^*)$.

Необходимо также отметить, что сформулированное выше задание для ИБЛА анало-

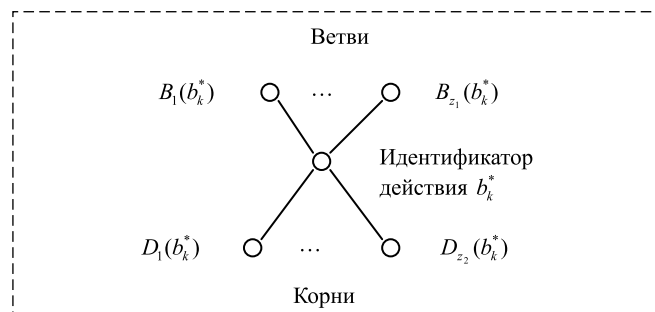


Рис. 1. Структура типового элемента разбиения сложного действия b_k^* на подзадачи, решение которых обеспечивает его выполнение

Fig. 1. The structure of a typical element of dividing a complex action b_k^* into subtasks, the solution of which ensures its implementation

гичным образом разбивается на подзадачи, на основе которых определяются вытекающие из них подцели поведения.

После выделения в полученном задании подцелей поведения осуществляется переход на следующий этап планирования, связанный с построением подпланов деятельности, обеспечивающих достижение этих подцелей, а также определением порядка их реализации.

Планирование полифазной деятельности АИР и процедуры упорядочения отработки сформированных локальных планов поведения

Используя предложенные выше инструментальные средства, служащие для выделения в сформулированном АИР задании подцелей поведения, достижение которых связано с отработкой сложного действия b_1^* , получим:

- подцель поведения, связанную с решением подзадачи $D_1(b_1^*)$, определяющей необходимость перехода робота из исходного местоположения к участку местности, на котором расположено складское помещение M ;
- подцель поведения, вытекающую из подзадачи $D_2(b_1^*)$, для решения которой АИР требуется зайти на территорию складского помещения и найти местоположение заготовок R . Следует отметить, что целесообразность поиска АИР местоположения различных заготовок, а не использование для этого заданной модели их расположения, обусловлена высокой динамикой изменения их местоположения на территории складского помещения. Для решения данной подзадачи поиска местоположения заданных заготовок эффективно могут быть использованы алгоритмы наглядно-действенного мышления или поисковой деятельности АИР, предложенные в работах [3, 12];
- подцель поведения, соответствующую подзадаче $D_3(b_1^*)$ связанной с выходом АИР после загрузки заготовок R за пределы территории складского помещения M ;
- подцель поведения, связанную с необходимостью решения подзадачи $B_1(b_k^*)$ — загрузить заготовки R на платформу. Соответствующая этой подзадаче подцель поведения достигается в результате непосредственной отработки действия b_1^* при выполнении в ПС условий $S_1(b_1^*)$. Для решения такого вида подзадач используется модель пред-

ставления знаний АИР, состоящая из типовых фрейм-микропрограмм поведения, имеющих следующую структуру описания [13]:

<"Идентификатор действия b_k^* "
"вход $S_k^*(b_k^*)$ " "ядро $B_k^*(b_k^*)$ " "слот"
"выход $S_k^*(b_k^*)$ ">,

где "вход $S_k^*(b_k^*)$ " определяет текущие условия ПС $S_k^*(b_k^*)$, в которых отработка сложного действия b_k^* является результативной; "ядро $B_k^*(b_k^*)$ " — упорядоченная последовательность элементарных действий $b_k \in B$, отработка которых приводит к выполнению сложного действия b_k^* ; "слот" определяет необходимое число (в рассматриваемом случае z) повторных отработок элементарных действий $b_k \in B$ для реализации сложного действия b_k^* ; "выход $S_k^*(b_k^*)$ " определяет текущее состояние АИР после отработки действия b_k^* .

Следует отметить, что практически на аналогичные подцели поведения разделяется и отработка сложного действия b_2^* .

Таким образом, для выполнения полученного задания АИР требуется решить ряд подзадач, связанных с планированием целенаправленного перемещения, на основе формального описания карты местности в форме графа $G = (V, E)$. Для этого могут быть использованы различные алгоритмы поиска путей на графах [14—17]. Однако применение известных алгоритмов поиска путей на графах для планирования перемещений АИР в ПС является в ряде случаев нецелесообразным. Это обусловлено тем, что АИР может располагаться на произвольном участке ПС, а известные алгоритмы поиска путей на графе не предусматривают направление, в котором следует осуществлять поиск маршрута перемещения в соответствии с местоположением цели. Например, пусть исходное местоположение АИР определяется вершиной $v_5 \in V$, а цель поведения — вершиной $v_3 \in V$ (рис. 2).

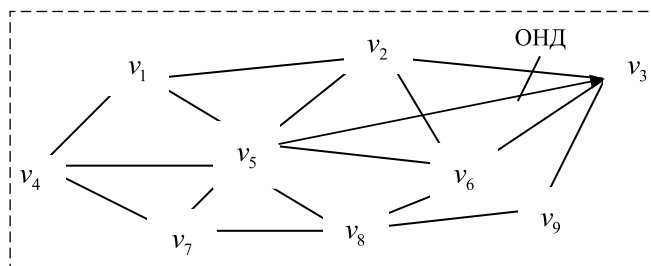


Рис. 2. Формальное представление карты местности в виде взвешенного неориентированного графа $G = (V, E)$

Fig. 2. Formal representation of the terrain map as a weighted undirected graph $G = (V, E)$

В этом случае, если не определить в качестве ориентира поиска основное направление движения (ОНД) (показано стрелкой, соединяющей вершины v_5 и v_3), то в процессе поиска маршрута, связывающего эти вершины, по известным алгоритмам могут быть рассмотрены все вершины графа G .

Организация же поиска требуемого для достижения цели маршрута движения относительно ОНД позволяет на каждом его шаге рассматривать в качестве ориентиров движения только препятствия, определяемые вершинами $v_{j_2} \in V$, которые расположены к нему под острым углом, что можно установить по пометкам инцидентных им ребер.

В структурированном виде алгоритм планирования целенаправленного движения АИР относительно ОНД можно представить следующим образом.

Входные переменные: формальное описание карты местности $G = (V, E)$, координаты местоположения АИР и цели, соответственно определяемые вершинами $v_{j_2}^o$ и $v_{j_2}^*$.

Промежуточные переменные: вершины $v_{j_2} \in V$ графа G , определяющие координаты местоположения АИР, текущей цели поведения, а также препятствий, рассматриваемых в качестве ориентиров направления движения; ребра $e_{j_3} \in E$, соответствующие проходным участкам ПС между находящимися на ее территории препятствиями.

Выходные переменные: оптимальный по принятой стоимости маршрут $L(v_{j_2}^o, v_{j_2}^*)$ перемещения АИР к заданной цели.

Метод. 1. Начало: положить $j_4 = 1$ — индекс текущего шага поиска минимального маршрута движения к цели.

2. Определить в заданной системе координат ОНД и отразить его на заданной в формальном виде карте местности.

3. Раскрыть все вершины $v_{j_2} \in V$ графа G , смежные вершине $v_{j_2}^o$ и инцидентные ребрам $e_{j_3} \in E$, помеченным острым углом относительно ОНД. Присвоить каждой такой вершине v_{j_2} стоимость l_{j_3} , равную длине инцидентного ей и вершине $v_{j_2}^o$ ребра e_{j_3} , обозначить полученные таким образом вершины $v_{j_2}(l_{j_2})$. (Например, для графа G , приведенного на рис. 2, такими являются следующие вершины: $v_2(l_{5,2})$, $v_6(l_{5,6})$ и $v_8(l_{5,8})$.)

4. Проверить условие: "среди раскрытых вершин имеется вершина $v_{j_2}^*$ "; если условие

выполняется, то перейти к п. 20; в противном случае перейти к п. 5.

5. Выбрать среди всех ранее раскрытых вершин графа G вершину $v_{j_2}(l_{j_2})$ с минимальной стоимостью l_{j_2} .

6. Раскрыть все вершины $v_{j_2} \in V$ графа G , смежные с вершиной $v_{j_2}(l_{j_2})$. Присвоить каждой вновь раскрытой вершине стоимость, равную стоимости l_{j_2} вершины $v_{j_2}(l_{j_2})$, добавив к ней стоимость l_{j_3} ребра e_{j_3} , инцидентного раскрытой вершине и вершине $v_{j_2}(l_{j_2})$.

7. Проверить условие: "среди вновь раскрытых вершин имеется вершина $v_{j_2}^*$ "; если условие выполняется, то перейти к п. 10; в противном случае перейти к п. 8.

8. Проверить условие: "среди вновь раскрытых вершин имеются ранее рассмотренные вершины графа G "; если условие выполняется, то перейти к п. 9; в противном случае перейти к п. 5.

9. Удалить из множества строящихся маршрутов движения к цели на текущем шаге поиска различные пути, связывающие вершину $v_{j_2}^o$ с повторяющимися раскрытыми вершинами $v_{j_2}(l_{j_2})$, оставив по одному из них с минимальной стоимостью, перейти к п. 5.

10. Принять решение о том, что выявлен маршрут $L_{j_4}(l_{j_4})$ движения к цели, состоящий из последовательности ребер графа G , образующих путь, связывающий вершины $v_{j_2}^o$ и $v_{j_2}^*$, где l_{j_4} — длина найденного маршрута, которая определяется суммарной длиной ребер, входящих в путь на графе G , связывающий вершину $v_{j_2}^o$ с вершиной $v_{j_2}^*$.

11. Проверить условие " $j_4 > 1$ "; если условие выполняется, то перейти к п. 12; в противном случае перейти к п. 13.

12. Проверить условие " $l_{j_4} < l_{j_4-1}$ "; если условие выполняется, то перейти к п. 13; в противном случае перейти к п. 14.

13. Принять за оптимальный найденный на текущем шаге поиска маршрут $L_{j_4}(l_{j_4})$ движения к цели, перейти к п. 16.

14. Считать оптимальным маршрут $L_{j_4-1}(l_{j_4-1})$, найденный на предыдущем шаге поиска.

15. Проверить условие: "среди раскрытых вершин графа G имеются вершины $v_{j_2}(l_{j_2})$, для которых справедливо отношение $l_{j_2} < l_{j_4}$ "; если условие выполняется, то перейти к п. 16; в противном случае перейти к п. 18.

16. Сформировать подмножество V^* из раскрытых вершин $v_{j_2}(l_{j_2})$, для которых выполняется условие $l_{j_2} < l^*$, остальные ранее раскрытые

вершины исключить из дальнейшего рассмотрения.

17. Выбрать вершину $v_{j_2}^*(l_{j_2}) \in V^*$ с минимальной стоимостью l_{j_2} , $j_4 = j_4 + 1$, перейти к п. 6.

18. Найденный маршрут движения АИА к цели является минимальным по стоимости, перейти к п. 20.

19. Принять решение о том, что маршрут $L_{j_4}(l_{j_4})$, определяющий путь движения АИР к цели, состоит из одного ребра, инцидентного вершинам $v_{j_2}^o$, $v_{j_2}^*$, который имеет стоимость l_{j_4} , равную стоимости этого ребра. Иначе говоря, исходное и целевое местоположения АИР в ПС являются смежными.

20. Конец.

Следует отметить, что приведенный выше алгоритм планирования маршрута передвижения АИР к заданной цели по формальному описанию карты местности в виде графа G обладает верхней граничной оценкой сложности порядка $O[n_3^2]$, где n_3 — число вершин исследуемого графа. Справедливость данной верхней граничной оценки следует из того, что поиск минимального по длине маршрута целенаправленного движения АИР осуществляется на основе сравнения между собой вершин помеченного графа [17]. Однако в случае отсекающего ряда вершин графа G на первом шаге поиска на основе ОНД верхняя граничная оценка предложенного алгоритма маршрутизации движения АИР будет иметь порядок $O[(n_3 - m)^2]$, где m — число вершин графа G , не участвующих в процессе поиска минимального по длине маршрута, связывающего исходное положение АИР с местоположением в ПС заданной цели. Это, в свою очередь, при достаточно часто встречающихся благоприятных условиях позволяет существенным образом сократить время планирования целенаправленного перемещения АИР в ПС. Таким образом, предложенный алгоритм планирования маршрута перемещения в ПС с препятствиями обладает трудоемкостью, позволяющей эффективно реализовать его на бортовой ЭВМ, обладающей у АИР, как правило, ограниченными вычислительными ресурсами.

После построения всех необходимых для выполнения задания подпланов поведения АИР требуется установить порядок их реализации. Для этого используются заданные в модели представления знаний традиционные решающие правила, имеющие следующее содержание: "если требуется отработать сложное действие

b_k^{**} , то для этого необходимо вначале выполнить сложное действие b_k^* ". Такие решающие правила хранятся в базе знаний АИР в следующей форме представления: $P_{z_4} : b_k^* \sim b_k^{**}$.

Конкатенация правил вывода $P_{z_4} : b_k^* \sim b_k^{**}$ позволяет определить последовательность отработки различного числа сложных действий, входящих в структуру полученного задания, и на этой основе определить порядок отработки АИР всех построенных локальных планов целенаправленной деятельности в различных условиях ПС. Например, пусть заданы следующие решающие правила: $P_1 : b_k^* \sim b_k^{**}$ и $P_2 : b_k^{**} \sim b_k^{***}$. Тогда в результате их конкатенации получится сложное решающее правило вида $P_{1,2} : b_k^* \sim b_k^{**} \sim b_k^{***}$, показывающее следующий порядок отработки входящих в него сложных действий: вначале отрабатывается сложное действие b_k^* , затем действие b_k^{**} и только после этого выполняется сложное действие b_k^{***} .

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить, что предложенная модель представления знаний и процедуры вывода позволяют АИА различного назначения автоматически формировать в общем виде план реализации полифазного поведения без привлечения для этого формального описания текущих условий ПС. Планирование полифазного поведения осуществляется только на основе обработки полученного АИА задания и представленной в общем виде модели знаний. Для решения же различных подзадач, входящих в сформированный план поведения, в зависимости от сложившейся в ПС текущей ситуации АИА привлекаются инструментальные средства либо наглядно-действенного, либо наглядно-образного мышления в зависимости от уровня неопределенности условий функционирования. Такая организация планирования целенаправленного поведения АИА обладает характерными признаками понятийного мышления живых систем [18].

Заключение

1. Разработка процедур вывода на основе формализации мыслительных актов наглядно-действенного, наглядно-образного и понятийного мышления человека и их сочетания позволяет создать интеллектуальный решатель задач, который обеспечивает АИА способность

решать практические задачи в ПС с различным уровнем априорной неопределенности.

2. Предложенные в работе инструментальные средства начального уровня развития понятийного мышления позволяют АИА планировать полифазную деятельность в различных условиях проблемной среды, включающую необходимость как перемещения в среде с препятствиями, так и манипулирования заданными объектами.

3. Разработанный алгоритм планирования перемещений в ПС с препятствиями дает возможность автоматически определить оптимальный маршрут движения к цели, обладая при этом трудоемкостью, которая позволяет эффективно реализовать его на бортовой вычислительной системе АИА.

4. Дальнейшее развитие предложенных методических основ построения интеллектуальных решателей задач для АИА связано с формализацией более высокого уровня мыслительных актов понятийного мышления, позволяющих обеспечить возможность решения различных по сложности практических задач, сформулированных как в процедурной, так и в декларативной форме представления в виде различных целевых ситуаций ПС, имеющих большую размерность.

Список литературы

1. Подъяков Н. Н. Мышление дошкольника. М.: Педагогика, 1977. 277 с.
2. Поспелов Д. А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. М.: Радио и связь, 1989. 184 с.
3. Берштейн Л. С., Мелехин В. Б. Планирование поведения интеллектуального робота. М.: Энегоатомиздат, 1994. 340 с.

4. Stuart Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4 ed. Pearson, 2020. 1216 p.
5. George F. Luger. Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 6 ed. Pearson, 2008. 784 p.
6. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 808 p.
7. Вагин В. Н., Головина Е. Ю., Загорянская А. А., Фомина М. В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В. Н. Вагина, Д. А. Поспелова. 2-е изд. доп. и испр. М.: Физматлит, 2008. 729 с.
8. Мелехин В. Б. Пополнение знаний автономного интеллектуального робота в недоопределенных средах на основе комбинированных правил вывода логики условно-зависимых рассуждений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 3. С. 11–20.
9. Морис Коэн, Эрнст Нагель. Введение в логику и научный метод. М.: Социум, 2017. 520 с.
10. Мелехин В. Б., Хачумов В. М. Пополнение знаний автономного беспилотного квадрокоптера — манипулятора в недоопределенной проблемной среде // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 1. С. 39–48.
11. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Нечеткие семантические сети как адаптивная модель представления знаний автономных интеллектуальных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 3. С. 61–72.
12. Кулинич А. А., Карпов В. Э., Карпова И. П. Социальные сообщества роботов. М.: URSS, ООО "ЛЕНАНД", 2019. 352 с.
13. Мелехин В. Б. Модель представления и получения новых знаний автономным интеллектуальным роботом на основе логики условно-зависимых предикатов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 87–107.
14. Поляков И. В., Чеповский А. А., Чеповский А. М. Алгоритмы поиска путей на графах большого размера // Фундаментальная и прикладная математика. 2014. № 1(19). С. 165–172.
15. Esposito F., Paola D., Matta I. On Distributed Virtual Network Embedding with Guarantees // IEEE ACM Trans. Netw. 2014. Vol. 4(1). P. 569–582.
16. Cormen T., Leiserson C., Rivest R. Introduction to Algorithms. Cambridge, 1990. 1091 p.
17. Dehmer M., Emmert-Streib F. ed. Quantitative Graph Theory. Mathematical Foundations and Applications. Taylor & Francis, 2015. 493 p.
18. Беккер Л. М. Психика и роль. М.: Мысль, 1998. 684 с.

Elements of Conceptual Thinking in Planning the Behavior of Autonomous Intelligent Agents

V. B. Melekhin, pashka1602@rambler.ru,

Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367015, Russian Federation,

M. V. Khachumov, khmike@ribox.ru, Federal Research Center "Informatics and Control"

Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312, Russian Federation,

People's Friendship University of Russia, 117198, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Melekhin Vladimir B., D. Sc., Professor,
Makhachkala, 367015, Russian Federation, e-mail: pashka1602@rambler.ru

Accepted April 02, 2021

Abstract

The expediency of using the tools of visual-effective, visual-figurative and conceptual thinking for planning the purposeful activity of autonomous intelligent agents in problem environments of various degrees of a priori uncertainty has been substantiated. The content is revealed and the role of each form of thinking is shown in the process of automatic planning of the

purposeful behavior of autonomous intelligent agents in the changing conditions of functioning. The special role of conceptual thinking in the performance of complex tasks by autonomous agents and the planning of polyphasic behavior associated with it is indicated. Taking into account the complexity of the problems associated with the formalization of mental acts of conceptual thinking, possible ways of its gradual development from the initial level to the transition to higher levels of development are shown, expanding on this basis the class of tasks solved by autonomous intelligent agents. A model of knowledge representation and tools for deriving solutions of the initial level of conceptual thinking have been developed, which allow intelligent agents to break down the tasks they receive into sub-goals of behavior. Then, on this basis, plan polyphase activity by searching for solutions to the associated subtasks, which ensure the determination of the minimum length routes of movement in a problematic environment with obstacles and the purposeful manipulation of objects in it. The tools are synthesized allowing to establish the order of elaboration of complex actions included in the structure of the task formulated by autonomous intelligent agents. It is shown that the further development of the proposed methodological foundations for constructing intelligent problem solvers is associated with the formalization of a higher level of mental acts of conceptual thinking, which make it possible to solve practical problems of different complexity, formulated both in procedural and declarative form of presentation in the form of various target situations of the problem environment, having a large dimension.

Keywords: autonomous intelligent agent, types of thinking, planning polyphasic behavior, division of tasks into subtasks, route of movement

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (Grant No. 21-71-10056).

For citation:

Melekhin V. B., Khachumov M. V. Elements of Conceptual Thinking in Planning the Behavior of Autonomous Intelligent Agents, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 8, pp. 411–419.

DOI: 10.17587/mau.22.411-419

References

1. **Podd'yakov N. N.** Preschooler thinking, Moscow, Pedagogika, 1977, 277 p. (in Russian).
2. **Pospelov D. A.** Modeling reasoning. Experience in the analysis of mental acts, Moscow, Radio i svyaz', 1989, 184 p. (in Russian).
3. **Bershtejn L. S., Melekhin V. B.** Planning the behavior of an intelligent robot, Moscow, Enegoatomizdat, 1994, 40 p. (in Russian).
4. **Stuart Russell, Peter Norvig.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4 ed. Pearson, 2020, 1216 p.
5. **George F. Luger.** Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 6 ed. Pearson, 2008, 784 p.
6. **Kelly A.** Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods, Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 808 p.
7. **Vagin V. N., Golovina E.YU., Zagoryanskaya A. A., Fomina M. V.** Reliable and plausible conclusion in intelligent systems, Moscow, Fizmatlit, 2008, 729 p. (in Russian).
8. **Melekhin V. B.** Replenishment of knowledge of an autonomous intelligent robot in underdetermined environments based on combined rules for deriving the logic of conditionally dependent reasoning, *Iskusstvennyj Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2016, no 3, pp. 11–20.
9. **Moris Koen, Ernst Nagel'.** An introduction to logic and the scientific method, Moscow, Socium, 2017. 520 p. (in Russian).
10. **Melekhin V. B., Hachumov V. M.** Replenishment of knowledge of an autonomous unmanned quadcopter-manipulator in an underdetermined problematic environment, *Iskusstvennyj Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2019, no 1, pp. 39–48 (in Russian).
11. **Melekhin V. B., Hachumov M. V.** Fuzzy semantic networks as an adaptive model for representing knowledge of autonomous intelligent systems, *Iskusstvennyj Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2020, no 3, pp. 1–7 (in Russian).
12. **Kulinich A. A., Karpov V. E., Karpova I. P.** Social communities of robots, Moscow, URSS, OOO "LENAND", 2019, 352 p. (in Russian).
13. **Melekhin V. B.** Model of representation and acquisition of new knowledge by an autonomous intelligent robot based on the logic of conditionally dependent predicates, *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2019, no. 5, pp. 87–107 (in Russian).
14. **Polyakov I. V., Chepovskij A. A., Chepovskij A. M.** Algorithms for finding paths on large graphs, *Fundamental'naya i Prikladnaya Matematika*, 2014, no. 1(19), pp. 165–17 (in Russian).
15. **Esposito F., Paola D., Matta I.** On Distributed Virtual Network Embedding with Guarantees, *IEEE ACM Trans. Netw.*, 2014, Vol. 4(1), pp. 569–582.
16. **Cormen T., Leiserson S., Rivest R.** Introduction to Algorithms, Cambridge, 1990, 1091 p.
17. **Dehmer M., Emmert-Streib F.** ed. Quantitative Graph Theory. Mathematical Foundations and Applications, Taylor & Francis, 2015, 493 p.
18. **Vekker L. M.** Psyche and role, Moscow, Mysl', 1998, 684 p. (in Russian)