Пополнение знаний автономного интеллектуального робота в недоопределенных средах на основе комбинированных правил вывода логики условно-зависимых рассуждений

Аннотация. Предложены инструментальные средства для организации пополнения знаний автономного интеллектуального робота в процессе целенаправленного поведения в недоопределенной проблемной среде. Сформулированы основные свойства исчисления условно-зависимых предикатов, позволяющие организовать построение комбинированных схем вывода логики условно-зависимых рассуждений и на этой основе формировать сложные умозаключения в виде цепочки взаимосвязанных между собой простых умозаключений. Полученные таким образом сложные умозаключения обеспечивают пополнение знаний робота о различных объектах проблемной среды в процессе реализации и корректировки сформированного в общем виде плана целенаправленной деятельности в условиях неопределенности.

Ключевые слова: пополнение знаний, автономный интеллектуальный робот, недоопределенная проблемная среда, планирование поведения, сложное умозаключение, условно-зависимый предикат.

Введение

Актуальной проблемой искусственного интеллекта является разработка эффективных процедур принятия решений автономным интеллектуальным роботом (АИР) в процессе целенаправленного поведения в априори недоопределенных условиях проблемной среды (ПС). К одному из эффективных подходов решения данной проблемы следует отнести разработку планов целенаправленного поведения АИР, по аналогии с человеком, на понятийном уровне «мышления» в общем виде [1]. Другими словами, в недоопределенных условиях ПС в процессе решения сложных задач АИР вынужден формировать планы своего целенаправленного поведения в общем виде из-за отсутствия возможности прямого восприятия и анализа текущих ситуаций ПС, следующих друг за другом. Для этого он манипулирует имеющимися у него знаниями общего назначения, заданными безотносительно к конкретной предметной области. Например, использует имеющиеся у него знания для ответа на следующие

вопросы: как лучше переместиться в заданное место, какие могут иметься в ПС для этого альтернативные возможности и как лучше их использовать, какой объект проблемной среды можно использовать в качестве того или иного инструмента и т.п.

Робот переходит к активному взаимодействию с ПС, а также к анализу воспринимаемой из нее информации только в процессе реализации сформированного таким образом плана своего целенаправленного поведения. Однако, как правило, в этом случае, возникает необходимость в корректировке сформированного в общем виде плана с учетом конкретных условий ПС, в которые попадает АИР в результате активного с ней взаимодействия. Для решения этой проблемы системе планирования поведения АИР необходимо регулярно проводить в реальном времени анализ поступающей из ПС информации и пополнять недостающие для принятия текущих управленческих решений.

Следует отметить, что построение сложных целенаправленных планов поведения в общем

виде при априори недоопределенной ПС и их адаптация к конкретным ее условиям в процессе их реализации с привлечением инструментария пополнения знаний, является фактически одной из нерешенных проблем понятийного «мышления» АИР, активно взаимодействующего с проблемной средой.

Необходимо также отметить, что автоматическое построение сложных планов целенаправленного поведения в общем виде и их корректировка в процессе реализации с привлечением инструментария пополнения знаний возникает в процессе полифазного поведения АИР в сложных ПС [2]. Иными словами, в условиях, когда стоящая перед роботом цель поведения для решения сложной задачи представляет собой цепочку взаимосвязанных между собой автономных подцелей, которые в совокупности не реализуются в текущей ситуации ПС. При этом только достижение каждой текущей подцели является предпосылкой для перехода к достижению следующей за ней подцели и т.д., до реализации общей заданной АИР цели поведения.

К одному из подходов решения проблемы, связанной с необходимостью пополнения знаний в процессе целенаправленного поведения АИР в недоопределенных ПС, следует отнести автоматическое формирование сложных умозаключений, представляющих собой последовательность следуемых друг за другом простых умозаключений. Вывод сложных умозаключений позволяет АИР пополнить недостающие для принятия решений знания в процессе целенаправленной деятельности, например, для определения и включения в реализуемый общий план поведения дополнительных целенаправленных действий.

Другой подход к решению данной проблемы может быть связан с применением типовых программ поведения и процедур формирования на их основе сложной последовательности целенаправленных действий, с применением в качестве таких программ, либо сценариев [3], либо фрейм микропрограммы поведения [4]. Однако такой подход имеет существенный недостаток, связанный с тем, что для формирования сложных планов полифазного поведения на основе априори заданного множества типовых программ путем их объединения в сложные цепи активной целенаправленной деятельности, требуется построение громоздкой модели представления

знаний АИР безотносительно к конкретной предметной области. Формируемые для этого формальные модели знаний с учетом предполагаемых условий ПС являются громоздкими даже для обеспечения АИР достаточно низких функциональных возможностей. Однако для специализированных АИР применение необходимых для решения определенного класса задач априори заданных типовых программ поведения и автоматическое формирование на их основе различных планов целенаправленной деятельности является достаточно эффективным. Следовательно, такой подход приемлем только для организации решающей системы АИР с достаточно ограниченным интеллектом.

Еще один подход к решению данной проблемы можно свести к применению специальной модели представления знаний АИР безотносительно к конкретной предметной области в виде заданного множества фреймов действий и отношений, а также эвристических процедур, обеспечивающих автоматическое их упорядочение в процессе планирования целенаправленного поведения [5]. Однако применение данного принципа организации процесса планирования целенаправленного полифазного поведения АИР в сложной недоопределенной ПС ограничено необходимостью автоматического построения в реальном времени модели ее текущих ситуаций в виде расплывчатой семантической сети [6]. Отмеченная выше проблема применений фреймов действий и отношений для формирования сложных планов целенаправленного поведения АИР связана с тем, что построение моделей ПС в виде нечетко заданных семантических сетей в реальном времени весьма проблематично. Это обусловлено тем, что для автоматического формирования таких моделей требуется мощная система технического зрения и относительно длительные периоды времени для проведения анализа текущих ситуаций ПС, что приводит к необходимости остановки АИР на данные периоды.

В настоящей работе предлагается решение проблемы корректировки сформированных в общем виде планов целенаправленной деятельности АИР в процессе их реализации в конкретных условиях недоопределенных ПС на основе пополнения недостающих для принятия решений знаний путем вывода сложных умозаключений, который осуществляется на основе автоматического построения комбинированных правил

вывода логики условно-зависимых рассуждений [7]. Данная логика, в отличие от известных логик вывода умозаключений [8,9] хорошо зарекомендовавших себя в решателях интеллектуальных систем, работающих без активного взаимодействия с ПС, позволяет эффективным образом организовать пополнение знаний АИР в процессе целенаправленного поведения в недоопределенных проблемных средах.

1. Основные свойства исчисления условно-зависимых предикатов

В основе построения различных простых правил вывода логики условно-зависимых рассуждений в немонотонных условиях ПС лежит исчисление условно-зависимых предикатов [7], в котором область допустимых значений каждой предметной переменной $y_p(X_p) \in Y, Y = \{y_p(X_p)\}, p = 1, 2, \dots, m$ определяется множеством X_p принятых, исходя из класса решаемых ИР задач, характеристик. В данной логике произвольная предикатная формула $M(y_1(X_1), \dots, y_p(X_p), \dots, y_9(X_9))$ принимает истинное значение, только в том случае, когда для всех объектов ПС $O = \{o_j(X_j)\}, j = 1, m_1$, используемых для означивания ее предметных переменных, например, $y_p(X_p), p = 1, 2, \dots, 9$, выполняются условия: « $(X_p \subseteq X_j)$ », где X_j - характеристики j -го объекта проблемной среды, который используется для означивания предметной переменной $y_p(X_p)$. Например, двухместный предикат $M(y_1(X_{p1}), y_2(X_{p2}))$, при означивании его предметных переменных $y_1(X_{p1})$ и $y_2(X_{p2})$ соответственно произвольными объектами ПС $o_1(X_1)$ и $o_2(X_2)$, становится истинным только в том случае, когда выполняется условие: « $(X_{p1} \subseteq X_1) \& (X_{p2} \subseteq X_2)$ », где знаком $\&$ здесь и далее будем обозначать либо одновременное выполнение правой и левой части проверяемых условий, либо одновременность происходящих событий.

Следовательно, в интеллектуальном решателе АИР каждый j -й объект $o_j(X_j) \in O$, определяющий предметную область ПС, необходи-

мо определить с помощью идентифицирующего его понятия o_j и множества X_j свойственных ему характеристик. Таким образом, в интерпретации формул исчисления условно-зависимых предикатов участвует семантическая составляющая в описании предметных переменных и объектов ПС. Это позволяет в ряде случаев использовать в интеллектуальных решателях проблем не только предикаты первого порядка, например, при необходимости построения моделей ПС с учетом n -х отношений, выполняющихся между различными множествами ее однотипных объектов, в частности, в двухместных условно-зависимых предикатах, позволяющих оценивать степень аналогии между двумя предметными переменными.

Определим основные свойства условно-зависимых предикатов, позволяющие формировать различные комбинированные правила вывода сложных умозаключений.

1. Если для двух n -местных условно-зависимых предикатов $M_1(y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), \dots, y_n^1(X_n^1))$ и $M_2(y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), \dots, y_n^2(X_n^2))$ выполняется условие:

$$\forall y_i^1(X_i^1) \in M_1 \exists y_j^2(X_j^2) \in M_2 [X_i^1 = X_j^2], i, j = 1, n,$$

то данные предикаты являются логически эквивалентными и обозначаются следующим образом: $M_1 \sim M_2$. Другими словами, при одних и тех же интерпретациях предметных переменных истинностные значения предикатов M_1 и M_2 совпадают. Приведенная выше запись означает, что для каждой предметной переменной $y_i^1(X_i^1)$ в предикате $M_1(y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), \dots, y_n^1(X_n^1))$ существует такая предметная переменная $y_j^2(X_j^2)$ в предикате $M_2(y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), \dots, y_n^2(X_n^2))$, для которой область ее допустимых значений совпадает с областью значений $y_i^1(X_i^1)$ предметной переменной. Множество эквивалентных друг другу условно зависимых предикатов позволяет пополнять знания АИР о различных объектах ПС, которые удовлетворяют требованиям означивания их предметных переменных, определяющими данными предикатами свойствами. Например, возможностью использова-

ния роботом объекта ПС в качестве инструмента для выполнения, определяемого предикатом действия, или возможностью прикреплять один объект ПС к другому и т.п.

2. Если для двух n -местных условно-зависимых предикатов

$M_1(y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), \dots, y_n^1(X_n^1))$ и $M_2(y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), \dots, y_n^2(X_n^2))$ выполняется условие:

$$(\forall y_i^1(X_i^1) \in M_1 \exists y_i(X_i^2) \in M_2 [X_i^1 = X_i^2], i = 1, n_1) \& \\ \& (\forall y_j^1(X_j^1) \in M_1 \exists y_j(X_j^2) \in M_2 [(X_j^1 \subset X_j^2) \& (i \neq j)], j = 1, n_2), \quad (1)$$

то предикат $M_1(y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), \dots, y_n^1(X_n^1))$ называется условно зависимым покрытием предиката $M_2(y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), \dots, y_n^2(X_n^2))$, а предикат M_2 логически следует из предиката M_1 , что обозначается следующим образом: $M_1 \Rightarrow M_2$. Другими словами для всех наборов означивания предметных переменных, для которых предикат $M_2(y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), \dots, y_n^2(X_n^2))$ является истинным, истинным также является и предикат $M_1(y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), \dots, y_n^1(X_n^1))$, но не наоборот, т.е. обратное условие не выполняется. Корректность введенного понятия описанного выше свойства условно-зависимых предикатов обусловлена тем, что множества объектов ПС относящихся к области значений различных предметных переменных предиката $M_1(y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), \dots, y_n^1(X_n^1))$ при выполнении условия $X_i^1 \subset X_i^*$, являются покрытиями множеств объектов, определяющих области значений биективно соответствующих им предметных переменных предиката $M_2(y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), \dots, y_n^2(X_n^2))$.

Приведенная выше запись (1) означает, что для i -х предметных переменных $y_i^1(X_i^1)$ и $y_i^2(X_i^2)$, относящихся соответственно к предикатам $M_1(y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), \dots, y_n^1(X_n^1))$ и $M_2(y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), \dots, y_n^2(X_n^2))$, область их допустимых значений совпадает. Однако существует хотя бы одна j -я предметная переменная

$j \neq i$, для которой выполняется условие: « $X_j^1 \subset X_j^2$ ». В этом случае область значений предметной переменной $y_j^1(X_j^1)$ определяется более общим понятием, чем понятие, которое определяет область допустимых значений соответствующей ей $y_j^2(X_j^2)$ предметной переменной. Например, если область значений предметной переменной $y_j^1(X_j^1)$ определяется понятием «электрические инструменты», то область значений предметной переменной $y_j^2(X_j^2)$ будет определяться, например, одним из следующих понятий «электрические пилы», «болгарки» и т.д.

3. Пусть задано множество одноместных условно-зависимых предикатов $\{M_k(y_k(X_k))\}, k = 1, m_2$, которые можно упорядочить таким образом, чтобы для каждой пары рядом стоящих в кортеже $M = \langle M_1(X_1), M_2(X_2), \dots, M_k(X_k), \dots, M_{m_2}(X_{m_2}) \rangle$ предикатов $M_k(y_k(X_k))$ и $M_{k+1}(y_{k+1}(X_{k+1}))$ выполнялось условие « $X_k \subset X_{k+1}$ ». Тогда, согласно свойству транзитивности данного отношения порядка, любой относящийся к кортежу M предикат $M_k(y_k(X_k)), k = 1, m_2$ является условно-зависимым покрытием всех стоящих справа от него в этом кортеже предикатов $M_{k+i}(y_{k+i}(X_{k+i})) \in M, i = k - 1, m_2$.

Например, пусть предикат $M_k(y_k(X_k))$ определяет объекты, которые можно перенести, если они являются легкими и длинными, а предикат $M_{k+1}(y_{k+1}(X_{k+1}))$, который условно-зависимым образом покрывается данным предикатом, определяет возможность использования различных объектов ПС в качестве определяемого им инструмента, если они являются легкими, длинными, крепкими и их можно перенести. Таким образом, используя формулу $M_k(y_k(X_k)) \& M(y_{k+1}(X_{k+1}))$, АИР может выявлять объекты в ПС, которые можно перенести и использовать в качестве инструмента, определяемого предикатом $M_{k+1}(y_{k+1}(X_{k+1}))$. Следовательно, с помощью кортежей M робот в процессе целенаправленного поведения может пополнять недостающие для принятия решений

знания о различных объектах ПС $o_j(X_j) \in O$, которые удовлетворяют условию: $\langle X_{m_2} \subseteq X_j \rangle$.

Распространить данное свойство одноместных предикатов на некоторое множество m_2 предикатов $\{M_k(y_1(X_1^k), \dots, y_n(X_n^k))\}, k=1, m_2$ можно в том случае, если в каждом из них имеется хотя бы по одной i -й предметной переменной, позволяющей сформировать кортеж, для элементов которого выполняется следующее условие их упорядочивания:

$$\langle X_i^{k=1} \subset X_i^{k+1} \subset, \dots, \subset X_i^{k+j} \subset, \dots, \subset X_i^{k=n} \rangle.$$

Назовем такие предметные переменные «базовыми» и, как правило, соответствующие им предикаты позволяют получить АИР о них дополнительные сведения.

Определим кортежи M , как кортежи логически связанных между собой и следующих друг за другом условно-зависимых предикатов $M_k(y_k(X_k)) \in M$, в которых каждый слева стоящий предикат от исходного предиката является его условно-зависимым покрытием.

Отсюда между предметными переменными $y_k(X_k)$ в предикатах $M_k(y_k(X_k)) \in M$ и различными объектами ПС $o_j(X_j) \in O$ можно установить следующее соответствие: «Допускается означивание переменных $y_k(X_k)$ объектами ПС $o_j(X_j) \in O$, если для них выполняются условия $\langle X_k \subseteq X_j \rangle$ » и доказать следующее утверждение, а отношение эквивалентности с таким же названием, определенное на множестве объектов ПС позволяет разбить его на классы однотипных между собой объектов.

Утверждение. Переход по кортежу M от одного предиката к другому:

- справа налево, начиная с произвольного предиката $M_k(y_k(X_k)) \in M$, позволяет ИР обобщить имеющиеся у него знания об объектах ПС $o_j(X_j) \in O$, для которых выполняется условие: $\langle X_{k-i} \subseteq X_j, i=1, 2, \dots, m_2-k \rangle$;

- слева направо позволяет ИР конкретизировать, т.е. уточнить знания о различных объектах ПС $o_j(X_j) \in O$, если для них выполняется следующее условие: $\langle X_{k+i} \subseteq X_j, i=k+1, m_2 \rangle$, где X_{k+i} - множества характеристик, опреде-

ляющих предметные переменные $y_{k+i}(X_{k+i})$ предикатов, стоящих справа в кортеже M от исходного предиката $M_k(y_k(X_k)) \in M$.

Доказательство. 1. Если в произвольной паре условно-зависимых предикатов $M_k(y_k(X_k))$ и $M_{k+1}(y_{k+1}(X_{k+1}))$, предикат $M_k(y_k(X_k))$ является условно-зависимым покрытием предиката $M_{k+1}(y_{k+1}(X_{k+1}))$, то все объекты ПС $o_j(X_j) \in O$, удовлетворяющие условию $\langle X_{k+1} \subseteq X_j \rangle$, определяемому предметной переменной $y_{k+1}(X_{k+1})$, будут удовлетворять и условию $\langle X_k \subseteq X_j \rangle$, определяемому предметной переменной $y_k(X_k)$. Следовательно, АИР может использовать данные объекты в качествах, которые определяются обоими $M_k(y_k(X_k))$ и $M_{k+1}(y_{k+1}(X_{k+1}))$ предикатами. Однако, согласно условию $\langle X_k \subseteq X_{k+i} \rangle$, область значений предметной переменной $y_k(X_k)$ определяется более широким понятием, чем понятие, характеризующее область значений предметной переменной $y_{k+1}(X_{k+1})$. Это подтверждается тем, что количество объектов ПС $o_j(X_j) \in O$, удовлетворяющих требованиям предметной переменной $y_k(X_k)$, больше количества объектов среды, удовлетворяющих требованиям предметной переменной $y_{k+1}(X_{k+1})$, так как мощность $|X_k|$ множества характеристик X_k меньше мощности $|X_{k+1}|$ множества характеристик X_{k+1} .

При этом, все объекты, удовлетворяющие условию $\langle (X_k \subset X_j) \& (X_{k+1} \subseteq X_j) \rangle$, можно отнести только к понятию, характеризующему область значений предметной переменной $y_k(X_k)$. Например, если область значений предметной переменной $y_{k+1}(X_{k+1})$ определяется понятием «электрические пилы», то область значений предметной переменной $y_k(X_k)$ будет определяться понятием «электрические режущие инструменты» и т.д.

2. Согласно свойству условно-зависимого покрытия условно-зависимым предикатом $M_k(y_k(X_k))$ условно-зависимого предиката

$M_{k+1}(y_{k+1}(X_{k+1}))$ для входящих в них предметных переменных выполняется условие « $(X_k \subseteq X_{k+1})$ ». Таким образом, исходя из того, что отношение порядка в виде кортежа M условно-зависимых предикатов, обладает свойством транзитивности, то для любого произвольного его элемента $M_k(y_k(X_k)) \in M$ выполняются следующие условия:

$(X_k \subseteq X_{k+1}), i = k + 1, m_2$ для всех предикатов $M_{k+i}(y_{k+i}(X_{k+i})) \in M$, стоящих справа от исходного предиката $M_k(y_k(X_k)) \in M$ в кортеже M ;

$(X_{k-i} \subseteq X_k), i = 1, m_2 - k$ для всех предикатов $M_{k-i}(y_{k-i}(X_{k-i})) \in M$, стоящих слева от исходного предиката $M_k(y_k(X_k)) \in M$ в кортеже M .

Следовательно, согласно п.1:

а) области допустимых значений всех предметных переменных $y_{k-i}(X_{k-i}), i = k + 1, m_2$ условно-зависимых предикатов $M_{k-i}(y_{k-i}(X_{k-i})) \in M$ по ходу движения по элементам кортежа M справа налево определяются более широкими понятиями, чем понятие, которое характеризует область допустимых значений предметной переменной $y_k(X_k)$ исходного предиката. Данное условие выполняется для всех произвольных объектов ПС $o_j(X_j) \in O$, используемых для означивания предметных переменных в предикатах $M_{k-i}(y_{k-i}(X_{k-i})) \in M$, если для них выполняется требование $(X_k \subseteq X_j)$.

Другими словами, понятия, которые определяют область допустимых значений предметных переменных $y_{k+i}(X_{k+i})$ в предикатах $M_{k+i}(y_{k+i}(X_{k+i})) \in M$, позволяют обобщить понятие, определяющее область допустимых значений предметной переменной $y_k(X_k)$ исходного предиката $M_k(y_k(X_k))$ с соответствующим им уровнем общности;

б) области допустимых значений предметных переменных $y_{k+i}(X_{k+i}), i = k + 1, m$ условно-зависимых предикатов $M_{k+i}(y_{k+i}(X_{k+i})) \in M$ по ходу движения по элементам кортежа M слева направо определяются более узкими понятиями, чем понятие, которое характеризует область допустимых значений $y_k(X_k)$ предметной переменной. Это условие выполняется

для всех произвольных объектов ПС $o_j(X_j) \in O$, если для них выполняется требование « $(X_{m_2} \subseteq X_j)$ ».

Другими словами, понятия, с помощью которых определяются области допустимых значений предметных переменных в предикатах $M_{k+i}(y_{k+i}(X_{k+i})) \in M$, позволяют конкретизировать понятие, определяющее область допустимых значений предметной переменной $y_k(X_k)$ исходного предиката с соответствующим им уровнем детализации.

3. Из пп.1,2 с очевидностью следует справедливость сформулированного утверждения.

Опираясь на рассмотренные выше свойства условно-зависимых предикатов и априори заданное АИР множество $\Pi = \{\Pi_i\}, i = 1, n$ простых правил логики условно-зависимых рассуждений, он может различными способами сформировать различные комбинированные правила вывода сложных умозаключений.

2. Комбинированные правила вывода логики условно-зависимых рассуждений

К одной из основных операций над множеством простых правил вывода $\Pi = \{\Pi_i\}, i = 1, n$ логики условно-зависимых рассуждений, связанных с построением комбинированных правил вывода сложных умозаключений, следует отнести операцию подстановки при выполнении заданных условий одной простой схемы вывода в другую. Выполнение этой операции для дедуктивных правил вывода простых умозаключений осуществляется по следующему принципу формирования комбинированных правил дедуктивного вывода логики условно-зависимых рассуждений.

Правило подстановки 1. Пусть заданы два произвольных простых правила дедуктивного вывода логики условно-зависимых рассуждений:

$$\Pi_1 : B_1 \& M_1 \rightarrow Z_1 \text{ и } \Pi_2 : B_2 \& M_2 \rightarrow Z_2,$$

где B_1 и B_2 - большие посылки (представляют собой условно-зависимые предикаты, определяющие множество характеристик определенного класса объектов ПС и биективно соответствующее этому множеству общее для них свойство); M_1 и M_2 - малые посылки (пред-

ставляют собой условно-зависимые предикаты, определяющие принадлежность конкретных объектов ПС согласно множеству описывающих их характеристик к классу объектов, заданному большой посылкой); Z_1 и Z_2 - выводимые соответственно на основе данных правил простые умозаключения.

Если умозаключение Z_2 , выводимое по правилу P_2 , является логически эквивалентным малой посылке M_1 правила вывода P_1 , а матрица S_1 большой посылки B_1 (часть ее формулы, не содержащая кванторов) правила вывода P_1 является условно-зависимым покрытием матрицы S_2 большой посылки B_2 правила вывода P_2 , то допускается подстановка правила вывода P_2 в правило вывода P_1 вместо малой посылки M_1 .

В результате получается следующее комбинированное правило дедуктивного вывода:

$$P_3 : (B_1 \& (P_2) \rightarrow Z_2 \& Z_1) \leftrightarrow (B_1 \& (B_2 \& M_2 \rightarrow Z_2) \rightarrow Z_1),$$

где $\leftrightarrow$ - операция эквивалентности между различными записями комбинированных правил вывода сложных умозаключений.

Таким образом, в получаемом по Правилу подстановки 1 комбинированном правиле вывода, либо малая посылка для правила P_1 выводится на основе правила вывода P_2 , либо путем последовательного вывода по правилам P_2 и P_2 формируется сложное умозаключение $Z_2 \rightarrow Z_1$.

Следует отметить, что Правило подстановки 1 распространяется на множество простых дедуктивных правил условно-зависимых рассуждений при выполнении следующих условий:

- матрицы больших посылок простых дедуктивных правил вывода образуют кортеж M упорядоченно логически следуемых друг за другом условно-зависимых предикатов $M_k (y_k (X_k)) \in M$;

- малые посылки данных правил вывода являются логически эквивалентными условно-зависимыми предикатами.

Пример 1. Пусть заданы следующие два правила дедуктивного вывода простых умозаключений:

P_1 : Все птицы, имеющие развитые крылья при отсутствии повреждений – летают;
объект $o_j (X_j)$ есть птица, имеющая развитые крылья и у нее отсутствуют повреждения;

птица $o_j (X_j)$ – летает.

P_2 : Все $o_j^* (X_j^*)$ - живые существа, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – трудно поймать;
объект $o_j (X_j) \in o_j^* (X_j^*)$ есть птица, имеющая развитые крылья и у нее отсутствуют повреждения.

Летающую птицу $o_j (X_j)$ - трудно поймать.

Согласно условиям Правила подстановки 1 допустимой является подстановка правила вывода P_1 в правило вывода P_2 . В результате получаем следующее комбинированное правило вывода P_3 сложных умозаключений:

P_3 : Все - живые существа $o_j^* (X_j^*)$, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – трудно поймать;
все птицы, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – летают;
объект $o_j (X_j) \in o_j^* (X_j^*)$ есть птица, имеющая развитые крылья и у нее отсутствуют повреждения.

Птица $o_j (X_j)$ - летает и ее трудно поймать.

Следует отметить, что на основе Правила подстановки 1 и заданного множества кортежей M могут быть сформированы различные комбинированные правила вывода сложных умозаключений по следующему принципу. На каждом шаге автоматической генерации комбинированного правила вывода выполняется замена малой посылки M_i простого правила вывода P_i , вложенного в формируемую многоярусную конструкцию на предыдущем шаге построения, на правило P_j , удовлетворяющее требованиям такой подстановки, и т.д., до получения необходимого комбинированного правила вывода. Однако следует иметь в виду, что

для любого произвольного условно-зависимого предиката $M_k(y_k(X_k)) \in M$, определяющего малую посылку последнего вложенного в формируемое комбинированное правило дедуктивного вывода Π_i , подстановка в него простых правил дедуктивного вывода допускается только в том случае, если у данных правил малые посылки определяются предикатами $M_{k+i}(y_{k+i}(X_{k+i})) \in M, i = k-1, m_2$, стоящими в кортеже M по правую сторону от исходного предиката $M_k(y_k(X_k)) \in M$.

Рассмотрим условия выполнения операций подстановки для индуктивного и дедуктивного простых правил вывода логики условно-зависимых рассуждений.

Пусть заданы следующие правила Π_4 индуктивного и Π_5 дедуктивного вывода простых умозаключений соответственно:

$$\begin{aligned} -\Pi_4 : & ((\Pi\Pi_4 = (M(o_1(X_1)) \& M(o_2(X_2)) \& \dots \& \\ & M(o_i(X_i)) \& \dots \& M(o_{m_3}(X_{m_3})) \& \\ & \& (M_4 = (o_i(X_i) \in O_j(X_j), i = 1, 2, \dots, m_3)) \rightarrow \\ & (B_4(O_j(X_j) = \forall o_i(X_i) \in O_j(X_j)[M(o_i(X_i))]), \end{aligned}$$

где $\Pi\Pi_4 = (M(o_i(X_i), i = 1, 2, \dots, m_3))$ - положительные примеры индуктивного вывода, определяющие объекты, относящиеся к одному классу, для которого характерным является определенное свойство; M_4 - посылка индуктивного вывода, показывающая, что объекты ПС в положительных примерах можно отнести к классу объектов, который определяется понятием $O_j(X_j)$, т.е. для всех объектов данного класса выполняется условие $X_j \subseteq X_i, i = 1, 2, \dots, m_3$; $B_4(O_j(X_j))$ - выводимое по правилу вывода Π_4 простое умозаключение, которое обобщает сведения, полученные в положительных примерах;

- $\Pi_5 : B_5 \& M_5 \rightarrow Z_5$, где B_5, M_5, Z_5 соответственно большая посылка, малая посылка и простое умозаключение, выводимое по данному правилу дедуктивного вывода.

Для данных правил вывода простых умозаключений можно сформулировать следующие два правила подстановки, которые позволяют автоматически формировать комбинированные правила вывода сложных умозаключений.

Правило подстановки 2. Если матрица $M(o_i(X_i))$ простого умозаключения $B_4(O_j(X_j))$, выводимого по правилу индуктивного вывода Π_4 , является условно-зависимым покрытием матрицы большой посылки B_5 и логически эквивалентной малой посылке M_5 простого правила дедуктивного вывода Π_5 , то допускается конкатенация правила вывода Π_5 без большой посылки B_5 к правилу вывода Π_4 по следующей схеме построения комбинированных правил вывода:

$$\Pi_6 = ((\Pi\Pi_4 \& M_4) \rightarrow B_4(O_j(X_j)) \& M_5) \rightarrow Z_5.$$

Правило подстановки 3. Допустим простые умозаключения $Z_i, i = 1, 2, \dots, m_4$, выводимые на основе заданных дедуктивных правил вывода $\Pi_i, i = 1, 2, \dots, m_4$, являются логически эквивалентными примерам $M(o_i(X_i), i = 1, m_3$ индуктивного правила вывода Π_4 .

Тогда, если матрица простого умозаключения, полученная на основе индуктивного правила вывода Π_4 , условно-зависимо покрывает все матрицы больших посылок заданного множества правил дедуктивного вывода $\Pi_i, i = 1, 2, \dots, m_3$, то допускается подстановка правил дедуктивного вывода $\Pi_i, i = 1, 2, \dots, m_3$ в правило индуктивного вывода Π_4 на позиции его положительных примеров. В результате получается следующее комбинированное правило дедуктивно-индуктивного вывода:

$$\begin{aligned} \Pi_7 : & B_1 \& M_1 \rightarrow Z_1(o_1^*(X_1^*)); \\ & \dots \\ & B_{m_3} \& M_{m_3} \rightarrow Z_{m_4}(o_{m_3}^*(X_{m_3}^*); \\ & M^* = ((o_i^*(X_i^*) \in O_j(X_j), i = 1, 2, \dots, m_3), \end{aligned}$$

$$Z_{m_3+1} = (\forall o_i^*(X_i^*) \in O_j(X_j)[M(o_i^*(X_i^*))]).$$

С помощью полученного таким образом комбинированного правила вывода Π_7 выводится следующее сложное умозаключение:

$$\langle Z_1(o_1^*(X_1^*)), Z_2(o_2^*(X_2^*)), \dots, Z_{m_3}(o_{m_3}^*(X_{m_3}^*)), M^*, Z_{m_3+1} \rangle.$$

Пример 2. Вывод сложного умозаключения на основе комбинированного правила вывода Π_6 :

Все птицы, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – летают;

воробьи - есть птицы;

воробьи, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – летают.

Все насекомые, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – летают;

жуки - есть насекомые;

жуки, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – летают.

Воробьи, жуки – есть живые существа.

Все живые существа, имеющие развитые крылья, при отсутствии повреждений – летают.

Следует отметить, что аналогичным образом формулируются и правила подстановки и конкатенации для автоматического формирования комбинированных правил вывода сложных умозаключений и для других различных сочетаний простых правил вывода $\Pi_i, i = 1, 2, \dots, m_4$, например, для двух и более традуктивных правил вывода простых умозаключений (правил вывода умозаключений от частного к частному) и т.д. Определенный интерес представляет также комбинирование традуктивных правил вывода с дедуктивными и индуктивными правилами при означивании входящих в них предметных переменных аналогичными друг другу объектами ПС, относящимися к различным классам объектов и использовании различных способов оценки степени их аналогичности между собой [10].

Пример 3. Дедуктивно-традуктивное комбинированное правило вывода по аналогии:

Все электрические инструменты для использования необходимо подключить к электрической сети; дрель (А) – есть электрический инструмент.

Для использования дрели (А) ее необходимо подключить к электрической сети.

Степень аналогии между дрелью (А) и болгаркой (Б)

превышает требуемый порог схожести.

Болгарка (Б) – есть электрический инструмент, для использования которого необходимо подключение к электрической сети.

Данное комбинированное дедуктивно-традуктивное правило вывода построено путем конкатенации простого традуктивного правила вывода без его первой посылки к простому дедуктивному правилу вывода при условии того, что выводимое дедуктивным образом умозаключение является логически эквивалентным первой посылке традуктивного вывода.

Следует также отметить, что в процессе решения сложных задач, требующих четырех и более шагов вывода на основе предложенного принципа формирования комбинированных правил, будут строиться достаточно громоздкие и неудобные для применения конструкции вывода сложных умозаключений. В этом случае целесообразно выполнить не подстановку одного простого правила в другое, а строить кортеж простых правил вывода, ранжируя их в порядке применения. Принцип такого ранжирования простых правил вывода заключается в следующем. Если предметная переменная или константа $y_i^j(X_i^j)$ удовлетворяет требованиям посылок простых правил дедуктивного вывода Π_1 и Π_2 , а содержание малой посылки M_1 правила вывода Π_1 является логически эквивалентным заключению Z_2 правила вывода Π_2 , то формируется следующий кортеж простых правил вывода $\langle \Pi_1, \Pi_2 \rangle$ и т.д. до обеспечения возможности вывода необходимого сложного умозаключения. В этом кортеже вначале выполняется правило вывода Π_2 , а затем - Π_1 . При этом, роль малой посылки M_1 правила вывода Π_1 выполняет умозаключение Z_2 , выводимое на основе правила вывода Π_2 .

По данному принципу могут строиться многоэлементные кортежи, как слева направо, так и справа налево от исходного правила вывода, которые позволяют формировать сложные умозаключения, обеспечивающие возможность пополнения знаний АИР в процессе решения сложных задач. Однако следует иметь в виду, что при ранжировании простых правил вывода для хранения формируемых кортежей требуется больший объем памяти, чем для хранения комбинированных правил вывода того же порядка. Это обусловлено тем, что в отличие от комбинированных правил, которые обычно состоят из усеченных простых правил вывода (правил, из которых удалены ненужные посылки в процессе их комбинирования), в кортежах

содержатся полные исходные правила вывода умозаключений со всеми посылками и вытекающими из посылок следствиями.

Заключение

Резюмируя изложенное, следует отметить:

- предложенный в работе инструментарий для пополнения знаний позволяет АИР в процессе целенаправленного поведения в недоопределенной ПС обеспечить возможность адаптации сформированного в общем виде плана целенаправленной деятельности к ее текущим условиям. Это осуществляется за счет выявления априори неизвестных АИР свойств воспринимаемых в среде объектов на основе комбинированных правил вывода логики условно-зависимых рассуждений и знаний, заданных роботу безотносительно к конкретной предметной области и условий поведения;

- сформулированные в работе свойства условно-зависимых предикатов позволяют автоматически строить комбинированные правила вывода логики условно-зависимых рассуждений и на этой основе формировать сложные умозаключения, позволяющие пополнять знания АИР о возможностях различного применения объектов ПС, необходимых ему для организации целенаправленного поведения в недоопределенной проблемной среде;

- дальнейшее развитие предложенного способа вывода сложных умозаключений для пополнения знаний АИР в процессе целенаправленного поведения в недоопределенных ПС просматривается в применении математического аппарата нечетких множеств для обобщенного описания характеристик различных объектов проблемной среды и характеристик, определяющих области допустимых значений предметных переменных в исчислении условно-зависимых предикатов. Это позволяет эффек-

тивным образом организовать вывод, как простых, так и сложных умозаключений соответственно на основе простых и комбинированных правил традиционного вывода по аналогии, определяемой различными способами между различными объектами ПС.

Литература

1. Поддъяков Н.Н. Мышление дошкольника. – М.: Педагогика. 1977. – 277 с.
2. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование полифазного поведения самоорганизующихся интеллектуальных систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2000. – № 5. – С. 62-65.
3. Литвинцева Л.В. Сценарии. В кн.: Искусственный интеллект. – В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь. 1990. – С. 56 – 76.
4. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура процедурного представления знаний интегрального робота. Кн.2. Фрейм микропрограммы поведения // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1988. – №5. – С. 190-194.
5. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Процедуры принятия решений интегральным роботом в условиях априорной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1989. – №8. – С. 106-116.
6. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура процедурного представления знаний интегрального робота. Кн.1. Расплывчатые семантические сети // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1988. – №6. – С. 119–124.
7. Мелехин В.Б. Логика условно-зависимых рассуждений: представление знаний и правила вывода умозаключений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. – №1. – С 65–74.
8. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. – М.: Физматлит. 2004. – 367 с.
9. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA). 2-е издание. - М.: Вильямс. 2005. - 1424 с.
10. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Определение аналогии между ситуациями проблемной среды для переноса накопленного опыта поведения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1997. – №5. – С 84–87.

Мелехин Владимир Борисович. Профессор кафедры управления и вычислительной техники Дагестанского государственного технического университета. Окончил Дагестанский политехнический институт в 1976 году. Доктор технических наук. Автор 109 печатных работ и четырех монографий. Область научных интересов: интеллектуальные роботы, управление сложными социальными и экономическими системами. E-mail: Pashka1602@rambler.ru