

Логика условно-зависимых рассуждений: представление знаний и правила вывода умозаключений

Аннотация. Раскрыто содержание различных форм мышления интеллектуального робота, позволяющих эффективным образом организовать планирование его целенаправленного поведения в различных условиях проблемной среды. Разработана одна из составляющих понятийного мышления интеллектуального робота, связанная с организацией вывода общезначимых умозаключений в произвольной предметной области для пополнения его знаний в процессе планирования целенаправленного поведения. Предложено исчисление условно-зависимых предикатов, обеспечивающее вывод общезначимых умозаключений в произвольной предметной области путем выделения в ней монотонных участков вывода. Построены различные правила вывода общезначимых умозаключений. Обозначены перспективы дальнейшего развития предложенного подхода, связанного с организацией вывода общезначимых умозаключений, которое сводится к построению многоярусных схем вывода, позволяющих формировать цепочки взаимосвязанных рассуждений, обеспечивающих планирование поведения и принятия решений интеллектуального робота в сложных проблемных средах.

Ключевые слова: интеллектуальный робот, виды мышления, проблемная среда, логика условно-зависимых рассуждений, участок монотонного вывода, правила вывода умозаключений.

Введение

Решая проблему эффективной организации интеллектуальной системы принятия решений для интеллектуального робота (ИР), активно взаимодействующего с проблемной средой (ПС), по аналогии с человеком [1], можно определить следующие три типа его мышления:

- наглядно-действенное мышление (видим – не знаем, что делать – пробуем – формируем в процессе самообучения и запоминаем сформированную условную программу целесообразного поведения), в процессе целенаправленного поведения ИР в априори неописанных условиях проблемной среды с целью изучения ее закономерностей, связанных с достижением заданной цели [2];

- наглядно-образное мышление (видим – знаем, что делать – планируем и реализуем сформированный план поведения). Данный вид мышления реализуется ИР, либо в процессе планирования целенаправленного поведения в недоопределенных условиях ПС путем использования модели представления знаний безотносительно к конкретной проблемной области,

например, [3]. Либо при априори заданной модели ПС в процессе планирования поведения и активного с ней взаимодействия для достижения заданной цели;

- понятийное мышление (не видим – в общем знаем – пополняем знания – планируем, реализуем и корректируем сформированный план поведения в процессе активного взаимодействия с ПС) или мышление интеллектуальной системы, обеспечивающее планирование целенаправленного поведения ИР на основе различных рассуждений (например, что лучше сделать, как лучше сделать и т.п.), пополнения знаний и применения абстрактно заданных отдельных его типовых фрагментов (сценариев [4] и фрейм-микропрограмм поведения [5]) после их привязки к конкретным условиям ПС.

К одной из форм организации понятийного мышления ИР, на основе которой можно реализовать пополнение знаний и принятие решений в процессе планирования целенаправленного поведения, следует отнести применение различных логик вывода умозаключений. Однако, эффективность использования такого подхода ограничена в связи с немонотонностью различ-

ных предметных областей, в рамках которых организуется вывод умозаключений на основе применения классических логик вывода. Обойти данную проблему в ряде случаев позволяет использование различных логик правдоподобного вывода [6], обеспечивающих вывод умозаключений в немонотонных средах с определенным уровнем их достоверности, которые, к сожалению, не учитывают особенности активного взаимодействия ИР с ПС.

В работе предлагается один из эффективных подходов решения отмеченной выше проблемы, основанный на применении исчисления логики условно-зависимых предикатов для представления знаний, позволяющей выделить монотонные участки (участки, не содержащие исключений) в процессе вывода умозаключений в немонотонных средах, используемых для пополнения знаний ИР в процессе формирования планов целенаправленного поведения.

1. Исчисление условно-зависимых предикатов

Основу исчисления условно-зависимых предикатов определяет субъектно-предикатный условно-зависимый язык. Предлагаемый условно-зависимый язык отличается от известного субъектно-предикатного языка [7] тем, что в нем предметные переменные задаются понятиями по ряду характерных для них признаков, обеспечивающих им различную степень общности. Полученные таким образом понятия определяют предметные константы (ПК) и условно-зависимые предметные переменные (ПП) языка предикатов. При этом при означивании формул допускается замена одной ПП на другую ПП с меньшим уровнем общности. После выполнения такой замены формула (предикат) остается формулой (не обращается в высказывание), но с более узкой областью определения и с соответствующим смысловым содержанием, учитывающим содержание исходного предиката. Например, после замены ПП "инструмент" в предикате «Использовать (инструмент) для выполнения действия D » на ПП "гаечные ключи" получим предикат - «Использовать (гаечные ключи) для выполнения действия D ».

На основе классификации объектов и описывающих их характеристик, приведенной в [8], алфавит условно-зависимого субъектно-

предикатного языка можно определить, используя следующие понятия:

Различные объекты ПС определяются как ПП или ПК:

– $y_1^0(X_1^0), y_2^0(X_2^0), \dots$ – ПК или индивидуумы, имеющие нулевой ($E = 0$) уровень общности;

– $y_1^1(X_1^1), y_2^1(X_2^1), y_3^1(X_3^1), \dots$ – ПП сорта «вид» с уровнем общности $E = 1$;

– $y_1^2(X_1^2), y_2^2(X_2^2), y_3^2(X_3^2), \dots$ – ПП сорта «род» с уровнем общности $E = 2$;

– $y_1^3(X_1^3), y_2^3(X_2^3), \dots$ – ПП сорта «класс» с уровнем общности $E = 3$,

где верхний индекс показывает уровень общности понятий, определяющих объекты ПС и биективно соответствующие им ПП или ПК, а нижний индекс играет роль идентификатора для различных ПП или ПК, имеющих один и тот же уровень общности; X_i^j – множество характеристик, с помощью которых, в данном случае, описываются i -е предметные переменные j -го уровня общности;

– $A_1(F_A^1), A_2(F_A^2), \dots$ – переменные сорта «условно-зависимые множества», где F_A^i –

множество характеристик, которыми должны обладать различные ПП и ПК для их принадлежности к множеству $A_i(F_A^i)$, например, ПП

$y_1^1(X_1^1) \in A_1(F_A^1)$, если выполняется условие: « $F_A^1 \subseteq X_1^1$ », где верхний индекс (здесь и далее)

определяет соответствие между множествами характеристик F_A^i и условно-зависимыми множествами A_i , а нижний индекс (здесь и далее)

показывает, что множество F_A^i относится к переменным соответствующего сорта, в данном случае к «условно-зависимым множествам A ». Условно-зависимые множества служат для выделения монотонных участков вывода в немонотонной предметной области относительно понятий, определяющих их название, например, «летающие животные» в предметной области «живые существа»;

– переменные $P_1, P_2, \dots$ и константы

$p_1^1, p_1^2, \dots \in P_1, p_2^1, p_2^2, \dots \in P_2, \dots$ сорта «признаки» характеризуют цвет, вес, геометрические размеры, форму, химический состав, запах различных ПП или ПК. Например, переменная сорта «форма» определяется следующими зна-

чениями: «круглая форма», «квадратная форма» и т.д.;

– переменные $S_1, S_2, \dots$ и константы $s_1^1, s_1^2, \dots, s_2^1, s_2^2, \dots$ сорта «составные части», определяют элементы, из которых состоят ПП или ПК. Например, манипулятор ИР состоит из рабочего органа, приводов и т.д.;

– переменные $B_1(F_b^1), B_2(F_b^2), \dots$ и константы $b_1^1(X_1^1), b_1^2(X_1^2), \dots \in B_1(F_b^1)$, $b_2^1(X_2^1), b_2^2(X_2^2), \dots \in B_2(F_b^2)$, $\dots$ сорта «допустимые действия» и «умения», обозначают умения и действия, которыми соответственно обладают или могут выполнять ПП и ПК (в том числе и ИР), или которые допустимо выполнять над заданными ПП или ПК. Например, умение - «летать», действие - «перенести предмет» и т.п. Здесь F_b^i - множество характеристик, которыми должны обладать ПП или ПК, чтобы они обладали соответствующим умением или, например, ИР может выполнить над всеми объектами ПС, относящимися к ПП $y_1^1(X_1^1)$ все действия $b_i^j(X_i^j)$, относящиеся к переменной $B_i(F_b^i)$, когда выполняется условие: « $F_b^i \subseteq X_1^1$ ». Например, ИР может манипулировать всеми объектами ПС, когда они имеют определенные размеры и вес;

– переменные $\Psi_1(F_\psi^1), \Psi_2(F_\psi^2), \dots$ и константы $\psi_1^1(X_1^1), \psi_2^1(X_2^1), \dots \in \Psi_1(F_\psi^1)$, $\psi_2^1(X_2^1), \psi_2^2(X_2^2), \dots \in \Psi_2(F_\psi^2)$ сорта «свойства» обозначают такие характеристики ПП, которые определяют их функциональное назначение, или возможность использования ИР в качестве вспомогательного инструмента, где F_ψ^i - множество характеристик, которыми должны обладать ПП или ПК, чтобы им было присуще i -е свойство. Например, все ПК, относящиеся к ПП $y_i^1(X_i^1)$ сорта «вид», обладают свойством $\psi_i^j(X_i^j)$, если выполняется условие: « $X_i^j \subseteq X_i^1$ » и т.д.;

– переменные $C_1(F_c^1), C_2(F_c^2), \dots$ и константы $c_1^1(X_1^1), c_2^1(X_1^1), \dots \in C_1(F_c^1)$, $c_1^2(X_1^2), c_2^2(X_2^2), c_3^2(X_3^2), \dots \in C_2(F_c^2)$ сорта «результат» которые определяют, либо результат выполнения соответствующих им действий ИР над различными ПП или ПК, либо возможность ПП или ПК воздействовать на различные объекты заданной предметной области, когда они

соответственно обладают множествами характеристик F_c^i и X_j^i ;

– ρ - константа сорта «степень аналогии», определяющая сходство сравниваемых между собой либо двух ПП, либо двух ПК;

– $M_1, M_2, \dots$ предикатные символы;

– операции над ПП или ПК: $\phi_1(F_1^1, F_2^1), \phi_2(F_1^2, F_2^2), \dots$. Операционные символы $\phi_i(F_i^1, F_i^2)$ определяют бинарные операции с именами ϕ_i , которые реализуются над двумя ПП или ПК при выполнении необходимого для этого условия. Например, операции $\phi_i(F_i^1, F_i^2)$ могут быть реализованы над ПК $y_1^0(X_1^0)$ и $y_2^0(X_2^0)$, если выполняется условие: « $(F_i^1 \subseteq X_1^0) \& (F_i^2 \subseteq X_2^0)$ ». Следует отметить, что переменные $C_i(F_c^i)$ и константы $c_i^j(X_i^j)$ сорта «результат» с именами C_i и c_i^j могут определять результат выполнения операции $\phi_i(F_i^1, F_i^2)$ над ПП или ПК;

– операции:

а) логические операции: $\&$ - конъюнкция, $\vee$ - дизъюнкция, $\leftrightarrow$ - эквивалентность, $\leftrightarrow_{\sim}$ - условно-зависимая эквивалентность, $\rightarrow$ - импликация, $\rightarrow_{\sim}$ - условно-зависимое следование, $\bar{Z}$ - отрицание Z ;

б) $\forall, \exists \dots$ кванторы, соответственно всеобщности и существования;

в) теоретико-множественные операции: $\in$ - принадлежность; $\in_{\sim}$ - условно-зависимая принадлежность, например, $y_1^0(X_1^0) \in_{\sim} y_1^1(X_1^1)$, если выполняется условие: $X_1^1 \subseteq X_1^0$; $\subseteq$ - включение одного множества в другое; $\subseteq_{\sim}$ - условно-зависимое включение одного множества в другое множество. Например, множество $A_1(X_A^1)$, все элементы которого имеют характеристики X_A^1 условно-зависимо включается в множество $A_2(X_A^2)$ и обозначается $A_1(X_A^1) \subseteq_{\sim} A_2(X_A^2)$, если выполняется условие: « $X_A^2 \subseteq X_A^1$ »; $\cup$ - объединение множеств; $\cap$ - пересечение множеств;

г) операции сравнения: $=$ - тождественность, и $\leq, \geq$ - сравнение, соответственно, меньше или равно и больше или равно.

Приведем правильно построенные выражения субъектно-предикатного языка логики условно-зависимых рассуждений.

2. Элементарные термины

Элементарные термины определяются символами любого сорта ПК или ПП: «результат», «признак», «свойства», «умения», «составные части», «условно-зависимые множества».

2.1. Термины

1. Термином является любой элементарный термин.

2. Если K_1 - элементарный термин сорта «ПП или ПК», а K_2 - элементарный термин сорта «условно-зависимое множество», то $K_1 \in K_2$ является термином «предметная переменная или предметная константа, удовлетворяющая требованиям условно-зависимого множества K_2 ».

3. Если K_1 и K_2 - соответственно элементарные термины сорта «ПП или ПК», а $\phi_1(F_1^1, F_2^1)$ элементарный термин сорта «условно-зависимая операция», то выражение $K_1 \phi_1(F_1^1, F_2^1) K_2$ является термином сорта «выполнить операцию ϕ_1 над соответствующими ПП или ПК».

4. Если K_1 - элементарный термин сорта ПП или ПК, а $b_i^j(X_i^j)$ элементарный термин сорта «выполнить допустимое действие», то выражение $b_i^j(K_1)$ является термином сорта «выполнить действие $b_i^j(X_i^j)$ над ПП или ПК K_1 ».

5. Если K_1 - элементарный термин сорта ПП или ПК, а K_2 - элементарный термин ПП с более высоким уровнем общности, а $\in$ - символ сорта «условная принадлежность», то $K_1 \in K_2$ - термин сорта «ПП или ПК K_1 удовлетворяет требованиям (условиям) ПП K_2 ».

6. Если K_1 и K_2 - соответственно элементарные термины сорта ПП или ПК, а ρ - константа сорта «степень аналогии», то выражение $\rho(K_1, K_2)$ является термином «оценка степени сходства между двумя ПП или двумя ПК K_1 и K_2 ».

2.2. Атомарные формулы

1. Пусть M предикатный символ, $K_1^j(X_1^j)$, $j=0,3$ - термин сорта ПП или ПК, а $K_2(X_2), K_3(X_3), K_4(X_4), K_5(X_5)$ - термины сорта «условно зависимые множества», определяющие, соответственно, «признаки», «свойства», «умения» и «составные части» ПП или ПК. Тогда при выполнении условия: « $X_i \subseteq X_1^j$, $i=2,5$ », выражения $M(K_1(X_1^j), K_i(X_i))$ являются атомарными формулами.

2. Если $K_1(X_1)$ и $K_2(X_2)$ - термины одного сорта, то $K_1(X_1) = K_2(X_2)$ является атомарной формулой, если выполняется условие « $(X_1 \subseteq X_2) \& (X_2 \subseteq X_1)$ ».

3. Если $K_1(X_1)$ и $K_2(X_2)$ - термины «предметная переменная», то выражение $K_1(X_1) \in K_2(X_2)$ является атомарной формулой, если выполняется условие: « $K_2 \subseteq K_1$ », а ПП $K_1(X_1)$ имеет меньшую степень общности в сравнении с ПП $K_2(X_2)$.

4. Если K_1 - термин сорта «результат», а $K_2(X_2)$ - термин сорта «операция» или «действие», выполнение которых допустимо над ПП или ПК $K_3(X_3)$, т.е. выполняется условие: « $X_2 \subseteq X_3$ », то выражение $K_2(K_3) \rightarrow K_1$ является атомарной формулой, означающей, что выполнение действия K_2 над ПП или ПК K_3 приводит к результату K_1 .

5. Если K_1 - термин сорта «оценка степени аналогии», а h - константа «требуемый порог сходства», то проверка условия: « $K_1 \geq h$ » является атомарной формулой.

2.3. Формулы

1. Атомарная формула - есть формула.

2. Если M_i и M_j - формулы, то выражения $M_i \& M_j$, $M_i \vee M_j$, $M_i \rightarrow M_j$, $M_i \rightarrow M_j$, $M_i \leftrightarrow M_j$ и $M_i \leftrightarrow M_j$ являются формулами.

3. Если M_i - формула, термин K_i - ПП или ПК, а термин K_j является предметной переменной с более высоким уровнем общности или условно зависимым множеством, то

выражения $\forall K_i \in K_j[M(K_i)]$ и $\exists K_i \in K_j[M(K_i)]$ есть формулы.

Других формул нет.

Проведем интерпретацию ранее неопределенных символов условно-зависимого субъектно-предикатного языка. Между символами и выражениями языка, с одной стороны, и моделью условно-зависимых рассуждений, с другой стороны, имеют место следующие биективные соответствия.

Символы $y_i^0(X_i^0)$ соответствуют ПК, которые определяются множествами характеристик X_i^0 . Другими словами, конкретные объекты ПС (индивидуумы) с именем y_i^0 , определяются множеством характеристик X_i^0 , например, «самолет ТУ134 под номером 43 (имеет крылья, умеет летать и т.д.)».

С помощью символов $y_i^1(X_i^1)$ обозначаются ПП, область определения которых задается множеством аналогичных друг другу ПК, удовлетворяющих условию: « $X_i^1 \subseteq X_i^0$ » согласно которому они объединяются в ПП сорта «вид объектов» с именем y_i^1 , например, «самолеты ТУ134». Здесь X_i^1 - множество характеристик, которыми должны обладать индивидуумы, относящиеся к ПП $y_i^1(X_i^1)$ сорта «вид».

При помощи элементов $y_i^2(X_i^2)$ обозначаются ПП, область определения которых задается множеством аналогичных друг другу видов, удовлетворяющих условию « $X_i^2 \subseteq X_i^1$ » и на этой основе объединяющихся в ПП сорта «род объектов» с именем y_i^2 , например, «летательные аппараты типа самолет». Здесь X_i^2 - множество характеристик, присущих только всем ПП сорта «вид», относящимся к соответствующей ПП сорта «род».

С помощью символов $y_i^3(X_i^3)$ обозначаются ПП, область определения которых задается множеством аналогичных друг другу ПП сорта «род», удовлетворяющих условию « $X_i^3 \subseteq X_i^2$ » и объединяющихся на этой основе во множество «класс объектов» с именем y_i^3 , например, «летательные аппараты», где X_i^3 - множество характеристик, общих для всех летательных аппаратов.

Используя множества характеристик, например, F_ψ^i и F_b^j можно объединять различные ПП или ПК в условно-зависимые ПП или в условно-зависимые множества объектов ПС $A(F_\psi^i)$ и $A(F_b^j)$, удовлетворяющих требованиям множеств F_ψ^i и F_b^j и определяющихся с помощью соответствующих им составных имен, например, условно-зависимая ПП «легкие объекты», или объекты которые можно захватить и поднять и т.п. Построенные таким образом условно-зависимые ПП и множества будут определять монотонные участки вывода умозаключений в произвольной предметной области относительно заданных ограничений, и обеспечивать на этой основе вывод общезначимых умозаключений, определяющих свойства, умения и другие характеристики различных ее объектов. Другими словами, множества характеристик F_ψ^i и F_b^j играют роль «абсолютных причинно-следственных ограничений», определяющих допустимую область принятия решений ИР в процессе планирования целенаправленного поведения, например, для пополнения знаний в процессе выбора эффективного инструмента для инструментальной деятельности и т.д.

Следует отметить, что в процессе принятия решений ИР может столкнуться и с произвольно возникающими в ПС причинно-следственными ограничениями. Назовем такие ограничения «тормозными характеристиками» $Z = \{z_\chi\}, \chi = 1, s$. Появление у ПП или ПК «тормозных характеристик» нарушает принятое условие монотонности вывода умозаключений, в рамках ранее выделенного на основе абсолютных ограничений монотонного участка вывода. Например, все живые существа, имеющие развитые крылья объединяются во множество $A(F_a)$ - «летающих живых существ». Однако, при наличии тормозной характеристики $z_\chi \in Z$, например, «повреждений» любой объект из множества $A(F_a)$ теряет способность летать.

Константный символ h , обозначающий «порог необходимой степени сходства между сравниваемыми объектами ПС», характеризует порог степень сходства $\rho(K_1, K_2)$ между парами сравниваемых между собой ПП или ПК, при котором принимается решение о достоверности

умозаключений, выводимых на основе традиционных правил вывода, например, по аналогии.

Константы $\forall$ и $\exists$ - соответственно кванторы всеобщности и существования, имеют общепринятый смысл.

Операционный символ $\rightarrow$ означает, что формула $M_1 \rightarrow M_2$ является истинной тогда и только тогда, когда M_1 и M_2 одновременно истинны. В этом случае M_2 является условно-зависимым логическим следствием формулы M_1 .

Операции: $=, \&, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow, \leq, \geq, >, <$ - имеют общепринятый смысл.

Множество интерпретаций для выражений условно-зависимого субъектно-предикатного языка так же, как и для любого предикатного языка, содержит два значения: «истина - 1» и «ложь-0».

Введем следующие обозначения. Определим через $\tau(X_\tau)$ имена, биективно соответствующие различным ПП или ПК $y_i^j(X_i^j)$, где $X_\tau = X_i^j$ - множество характеристик, которыми обладают объекты ПС, относящиеся к понятию $\tau(X_\tau)$. Обозначим также через $\gamma(X\gamma)$ переменную, которая может быть либо переменной сорта «условно-зависимое множество», либо переменной сорта «свойства», «действия» и «умения».

Определение 1. Двухместная предикатная формула $M(\tau(X_\tau), \gamma(X\gamma))$ называется условно-зависимым предикатом, который принимает истинное значение в том случае, если подставляемые в него при означивании ПП или ПК $y_i^j(X_i^j)$ относящиеся к понятию $\tau(X_\tau)$ удовлетворяют требованиям абсолютных причинно-следственных ограничений $X\gamma$, определяемых переменной или константой сорта $\gamma(X\gamma)$, т.е. для них выполняется условие: $X\gamma \subseteq (X_\tau = X_i^j)$.

Другими словами предикат $M(\tau(X_\tau), \gamma(X\gamma))$ играет роль функции, выделяющей монотонный участок вывода общезначимых умозаключений в произвольной предметной области на основе требований, определяемых переменной или константой сорта $\gamma(X\gamma)$.

Например, допустим ПП $y_1^2(X_1^2)$ является сортом «птицы», переменная $\gamma(X\gamma)$ определяет свойство «уметь летать», а M представляет собой условно зависимый предикат «Уметь

летать (птицы)». Тогда предикат $M(y_1^2(X_1^2), \gamma(X\gamma))$ - «Уметь летать (птицы)» становится истинным, только в том случае, когда для подставляемой в него ПК $y_1^0(X_1^0)$, относящейся к ПП «птицы» выполняется условие: « $X\gamma \subseteq X_1^0$ », например, когда конкретная птица имеет развитые крылья.

Определение 2. Предикатная формула $M_1(\tau(X_\tau), Z_j)$ называется дополнением или уточнением монотонного участка вывода, выявленного на основе заданного множества причинно-следственных ограничений, и принимает истинное значение только в том случае, если у подставляемых в нее при означивании ПП или ПК отсутствуют «тормозные характеристики» Z_j , возникающие в динамической проблемной среде.

Определение 3. Условно-зависимый предикат $M(\tau(X_\tau), \gamma(X\gamma))$ образует причинно-следственное дополнение с предикатом $M_1(\tau(X_\tau), Z_j)$, которое обозначается $E\gamma = M(\tau(X_\tau), \gamma(X\gamma)) \& M(\tau(X_\tau), Z_j)$ для тех и только для тех ПП или ПК, для которых предикаты $M(\tau(X_\tau), \gamma(X\gamma))$ и $M_1(\tau(X_\tau), Z_j)$ являются одновременно истинными.

В причинно-следственном дополнении $E\gamma$ между образующими его формулами фактически устанавливается причинно-следственная связь, для которой множество характеристик $V\gamma = X\gamma \cup Z_j$ определяет требования к ПП или ПК, выполнение которых влечет за собой общезначимость предиката $M(\tau(X_\tau), \gamma(V_\gamma))$ в немонотонной предметной области при подстановке в него ПП или ПК $y_1^j(X_1^j)$, удовлетворяющих требованиям множества $V\gamma$.

Определение 4. Множество $V\gamma$ называется замкнутым для условно-зависимого множества ПП или ПК $A\gamma(V\gamma)$, если для всех относящихся к этому множеству объектов, например, $y_1^j(X_1^j)$ выполняется условие: « $V\gamma \subseteq X_1^j$ », а множество $V\gamma$ содержит все необходимые и достаточные причины и сопричины для обеспечения общезначимости причинно-следственного дополнения:

$$E\gamma = \forall y_1^j \in A\gamma(V\gamma)$$

$$[M(\tau(X_\tau), \gamma(X\gamma)) \& M(\tau(X_\tau), Z_j)].$$

В противном случае множество $V\gamma$ называется открытым для множества условно – зависимых ПП $A\gamma(V\gamma)$ и может доопределяться в процессе самообучения ИР.

Таким образом, открытое множество $V\gamma$ должно пополняться и корректироваться ИР по мере приобретения новых знаний. Корректировка такой составляющей открытого множества $V\gamma$ как множество тормозных характеристик Z_j может выполняться, например, в процессе самообучения [3].

Утверждение 1. Причинно-следственное дополнение $E\gamma$ является общезначимым для элементов условно-зависимого множества $A\gamma(V\gamma)$ тогда и только тогда, когда является замкнутым соответствующее ему множество $V\gamma$.

Справедливость утверждения 1 с очевидностью следует из условия общезначимости причинно-следственного дополнения (определение 1) и определения замкнутого множества $V\gamma$ (определение 4).

Утверждение 2. При замкнутом множестве $V\gamma$ множество $A\gamma(V\gamma)$ образует монотонный участок вывода умозаключений в произвольной предметной области ПС.

Справедливость утверждения 2 вытекает из условия необходимости и достаточности причин и сопричин, образующих множество $V\gamma$, влекущее за собой общезначимость следствия $\forall y_i(X_i) \in A_\gamma(V\gamma)[M(y_i(X_i), \gamma(V_\gamma))]$, представляющего собой большую посылку для дедуктивных правил вывода логики условно-зависимых рассуждений.

Определение 5. Условно-зависимый операционный предикат $M_1^*(\langle y_1^j(X_1^j), y_2^j(X_2^j) \rangle, \varphi(F_1, F_2))$ является истинным, если при означивании подставляемая в него ПП или ПК $y_1^j(X_1^j)$ обладает множеством характеристик F_1 , относящихся к операции $\varphi(F_1, F_2)$, а ПП или константа $y_2^j(X_2^j)$ обладает множеством характеристик F_2 данной операции.

Определение 6. Операционный условно-зависимый предикат называется каузально-зависимым, когда множества F_1 и F_2 являются замкнутыми, т.е. определяют необходимые и достаточные условия, влекущие за собой общезначимость формулы:

$$M_3(\langle y_1^j(X_1^j), y_2^j(X_2^j) \rangle, \varphi(F_1, F_2)) \rightarrow \rightarrow c_1^k(X_1^k) \in C_k(F_c^k).$$

для ПП или ПК, удовлетворяющих заданным требованиям, где $c_1^k(X_1^k)$ - результат выполнения операции $\varphi(F_1, F_2)$ над заданными объектами.

3. Теоретико-множественная модель логики условно-зависимых рассуждений

В общем случае, теоретико-множественная модель N_1 произвольной предметной области ПС в логике условно-зависимых рассуждений определяется следующим множеством пар:

$$N_1 = \{ \langle \tau_j, X_\tau^j \rangle \}, j = 1, n,$$

где τ - понятие или идентификатор, однозначно определяющий объекты ПС и биективно соответствующие им ПП или ПК τ ; X_τ^j - множество характеристик, которыми должны обладать объекты ПС, относящиеся к понятию τ_j .

Таким образом, теоретико-множественную модель N_2 логики условно-зависимых рассуждений можно представить в виде следующей пятерки:

$$N_2 = (N_1, \psi^*, R^*, V^*, Q^*),$$

где ψ^* - множество аксиоматических посылок, формируемых в виде причинно-следственных дополнений на основе множества V^* , образованного из замкнутых множеств $V\gamma, \gamma = 1..r$ причинно-следственных ограничений и тормозных характеристик; R^* - множество выводимых умозаключений; Q^* - множество условно-зависимых правил вывода.

Утверждение 3. Логика условно-зависимых рассуждений обеспечивает монотонный вывод умозаключений в произвольной предметной области N_1 тогда и только тогда, когда все элементы $V\gamma \in V^*$ представляют собой замкнутые множества для относящихся к ним условно-зависимых ПП и условно-зависимых множеств $A\gamma(X\gamma), \gamma = 1..m$.

Доказательство. Справедливость утверждения вытекает из условия, что множества

$A\gamma(X\gamma), \gamma=1, m$, образованные на основе замкнутых множеств $V\gamma$ определяют монотонные участки вывода умозаключений в произвольной предметной области N_1 .

Это подтверждается тем, что в правилах вывода логики условно-зависимых рассуждений используются только общезначимые посылки ψ^* , сформированные на основе замкнутых множеств $V\gamma \in V^*$, определяющих необходимые и достаточные условия, которым должны удовлетворять элементы, образующие область их определения, т.е. входящие в нее ПП или ПК. Таким образом, вывод умозаключений в логике условно-зависимых рассуждений будет проводиться только на монотонных участках произвольной предметной области ПС, определяемых условно-зависимыми множествами $A\gamma(X\gamma), \gamma=1, m$. Из вышесказанного с очевидностью и следует справедливость утверждения 3.

Расширить функциональные возможности логики условно-зависимых рассуждений, если это позволяет решаемый ИР класс задач, можно за счет различных правил вывода правдоподобных умозаключений, сформулированных в рамках открытых множеств $V\gamma^0$ причинно-следственных ограничений.

Рассмотрим одно из таких расширений, позволяющих сформировать нечеткие правила традуктивного вывода по аналогии. Для данного случая приведенная выше теоретико-множественная модель N_1 логики условно-зависимых рассуждений доопределяется нечеткими множествами, определяющими характеристики различных ПП или ПК путем оценки степени их принадлежности к различным множествам причинно-следственных ограничений, образующих монотонные участки для вывода правдоподобных умозаключений.

В этом случае, вывод правдоподобных умозаключений будет основываться на следующих эвристических правилах принятия решений.

1. Пусть в монотонной логике условно-зависимых рассуждений причинно-следственное дополнение $E\gamma$ является истинным для ПК $y_1^0(X_1^0)$. Тогда, если степень ее сходства с нечетко заданной ПК $y_2^0(\tilde{X}_2^0)$ в расширенной логике условно-зависимых рассуждений больше

или равна пороговому значению $h\gamma$, то принимается решение, что логическое дополнение $E\gamma$ является правдоподобным для ПК $y_2^0(\tilde{X}_2^0)$.

Здесь $\tilde{X}_2^0$ - множество нечетко заданных характеристик ПК $y_2^0(\tilde{X}_2^0)$. При этом, достоверность получаемых таким образом правдоподобных умозаключений, можно оценить степенью нечеткого равенства $\rho_\gamma(y_1^0(X_1^0), y_2^0(\tilde{X}_2^0))$ между сравниваемыми ПК[9], если принять степень принадлежности различных элементов к четко заданному множеству X_1^0 , равной 1.

2. Пусть в расширенной логике условно-зависимых рассуждений логическое продолжение $E\gamma$ является правдоподобным для нечетко заданной ПК $y_2^0(\tilde{X}_2^0)$. Тогда, если степень сходства между ПК $y_2^0(\tilde{X}_2^0)$ и $y_3^0(\tilde{X}_3^0)$ больше или равна пороговому значению $h\gamma$, то принимается решение, что умозаключение, выведенное на основе логического продолжения $E\gamma$ относительно ПК $y_2^j(\tilde{X}_2^j)$, является правдоподобным для ПК $y_3^0(\tilde{X}_3^0)$ с достоверностью, равной степени их нечеткого равенства $\rho_\gamma(y_2^0(\tilde{X}_2^0), y_3^0(\tilde{X}_3^0))$.

4. Правила вывода логики условно-зависимых рассуждений

По аналогии со структурой традиционных правил вывода умозаключений дедуктивные, индуктивные и традуктивные правила вывода логики условно-зависимых рассуждений могут быть представлены следующим образом.

4.1. Дедуктивный вывод

В содержательной форме записи

Все объекты ПС $y_i^0(X_i^0) \in \tau_j(X_i^j)$

при выполнении условия: « $X\gamma \subseteq X_i^j$ »

и отсутствии тормозных характеристик Z_j ,
обладают умением $\gamma(X\gamma)$.

Для объекта ПС $y_2^0(X_2^j)$ выполняется условие:

$$\langle y_2^0(X_2^j) \in \tau(X_\tau^j) \rangle.$$

При отсутствии тормозных характеристик $\bar{Z}_j$

объект $y_2^0(X_2^j)$ обладает умением $\gamma(X\gamma)$.

В логической форме записи

$$\begin{aligned} &(\forall y_i^0(X_i^0) \in \tau_j(X_\tau^j)) [M_1(\tau_j(X_\tau^j), \bar{Z}_j) \rightarrow \\ &\rightarrow (M(\tau_j(X_\tau^j), \gamma(X\gamma)))] \\ &y_2^0(X_2^0) \in \tau_j(X_\tau^j). \end{aligned}$$

$$M_1(y_2^0(X_2^0), \bar{Z}_j) \rightarrow M(y_2^0(X_2^0), \gamma(X\gamma)).$$

Поясняющий пример

Все предметы ПС, имеющие вес и габаритные размеры, соответственно, равные не более p_1 и p_2 и если они не закреплены, могут быть взяты и перенесены. Гаечный ключ имеет вес и габаритные размеры, соответственно, равные не более p_1 и p_2 .

Если гаечный ключ не закреплен, то его можно взять и перенести.

Аналогичным образом строятся и индуктивные и традитивные правила вывода логики условно-зависимых рассуждений.

4.2. Нечеткий традитивный вывод

В содержательной форме записи

При отсутствии тормозных характеристик $\bar{Z}_j$

для объекта $y_1^0(X_1^0)$ присуще $\gamma(X\gamma)$.

Степень сходства объектов $y_1^0(X_1^0)$ и $y_2^0(\tilde{X}_2^0)$ между собой больше заданного порога $h\gamma$.

При отсутствии тормозных характеристик $\bar{Z}_j$

для объекта $y_2^0(\tilde{X}_2^0)$ присуще $\gamma(X\gamma)$.

В логической форме записи

$$\begin{aligned} &M_1(y_1^0(X_1^0), \bar{Z}_j) \rightarrow M(y_1^0(X_1^0), \gamma(X\gamma)); \\ &\rho(y_1^0(X_1^0), y_2^0(\tilde{X}_2^0)) > h\gamma. \end{aligned}$$

$$M_1(y_2^0(\tilde{X}_2^0), \bar{Z}_j) \rightarrow M(y_2^0(\tilde{X}_2^0), \gamma(X\gamma)).$$

Поясняющий пример

Для использования дрели, имеющей электродвигатель, вес и габаритные размеры, соответственно, равные не более p_1 и p_2 и отсутствии неисправностей, ее необходимо подключить к электросети. Степень сходства между дрелью и болгаркой, имеющей характеристики «небольшие габаритные размеры, малый вес и наличие электродвигателя», равна 0,9.

При отсутствии неисправностей, для использования болгарки ее необходимо подключить к электросети.

Рассмотрим операционные правила вывода логики условно-зависимых рассуждений, используемые ИР для пополнения знаний в процессе планирования поведения. Каждая условно-зависимая операция $\phi_1(F_1^1, F_2^1)$ определяется на элементах условно-зависимых ПП и множеств $A_1(F_A^1)$ и $A_2(F_A^2)$, если выполняется условие: $\langle (F_1^1 \subseteq F_A^1) \& (F_2^1 \subseteq F_A^2) \rangle$. В этом случае элементы условно-зависимых множеств $A_1(F_A^1)$ и $A_2(F_A^2)$ соответственно определяют область отправления и прибытия для данной операции, а также образуют монотонные подмножества ПП или ПК в произвольной предметной области, которые удовлетворяют условию общезначимости следующей формулы:

$$\begin{aligned} &M_3(\langle y_1^j(X_1^j), y_2^j(X_2^j) \rangle, \phi(F_1, F_2)) \rightarrow \\ &\rightarrow c_1^k(X_1^k) \in C_k(F_C^k). \end{aligned}$$

Получаемые таким образом общезначимые формулы и играют роль аксиоматических посылок операционных правил вывода логики условно-зависимых рассуждений.

Ограничимся построением дедуктивных операционных правил вывода умозаключений в немонотонной предметной области.

4.3. Дедуктивные операционные правила вывода

Содержательная форма записи

Выполнение операции $\phi_1(F_1^1, F_1^2)$ над каждой парой объектов $y_1^0(X_1^0), y_2^0(X_1^0) \in (A_1(F_A^1) \times A_2(F_A^2))$,

при выполнении условия:

$$\langle F_1^1 \subseteq F_A^1 \rangle \& \langle F_2^1 \subseteq F_A^2 \rangle,$$

приводит к получению результата

$$c_1^k(X_1^k) \in C_k(F_C^k).$$

Произвольная пара объектов $y_3^0(X_3^0)$ и $y_4^0(X_4^0)$

удовлетворяет условию:

$$\langle (F_A^1 \subseteq X_3^0) \& (F_A^2 \subseteq X_4^0) \rangle.$$

Выполнение операции $\varphi_1(F_1^1, F_1^2)$ над парой

объектов $y_3^0(X_3^0)$ и $y_4^0(X_4^0)$ приводит

к получению результата $c_1^k(X_1^k) \in C_k(F_C^k)$.

Логическая форма записи

$$\forall y_1^0(X_1^0), y_2^0(X_2^0) \in (A_1(F_A^1) \times A_2(F_A^2))$$

$$[M_3 = M_1(< y_1^0(X_1^0), y_2^0(X_2^0) >, \varphi_1(F_1^1, F_1^2)) \rightarrow$$

$$\rightarrow c_1^k(X_1^k) \in C_k(F_C^k)].$$

$$< y_3^0(X_3^0), y_4^0(X_4^0) > \in (A_1(F_A^1) \times A_2(F_A^2)).$$

$$M_1(< y_3^0(X_3^0), y_4^0(X_4^0) >, \varphi_1(F_1^1, F_1^2)) \rightarrow$$

$$\rightarrow c_1^k(X_1^k) \in C_k(F_C^k).$$

Поясняющий пример

На каждый винт a_i (диаметр P_1 ,

с шагом резьбы P_1')

можно закрутить гайку b_j (диаметром P_1 ,

с шагом резьбы P_1'), в результате получим

C_1 - резьбовое соединение.

Винт a_i' и гайка b_j' имеют одинаковый

диаметр и шаг резьбы.

Для получения резьбового соединения необходимо гайку b_j' закрутить на винт a_i' .

Аналогичным образом строятся и операционные правила вывода общезначимых умозаключений в произвольной предметной области индуктивного и традуктивного типа.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, отметим:

- предложенная логика условно-зависимых предикатов позволяет выделять монотонные участки в произвольной предметной области ПС и на этой основе выводить ИР общезначимые умозаключения для пополнения знаний в процессе планирования целенаправленного поведения в ПС, используя различные дедуктивные, индуктивные и традуктивные правила вывода;

- дальнейшее развитие предложенного подхода вывода общезначимых умозаключений в произвольной предметной области связано с построением многоярусных схем вывода, позволяющих формировать цепочки взаимосвязанных умозаключений, обеспечивающих планирование поведения и принятие решений ИР в сложных ПС. Например, при совпадении по содержанию умозаключения, полученного в результате индуктивного вывода с содержанием большой посылки дедуктивного вывода и т.д.

Литература

1. Поддъяков Н.Н. Мышление дошкольника. – М.: Педагогика, 1977. – 277 с.
2. Мелехин В.Б. Алгоритмы самообучения интегрального робота в сложных средах // Кибернетика. 1986. №1. – С. 102 – 108.
3. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. М.: Энергоатомиздат, 1994. – 240 с.
4. 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.
5. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура процедурного представления знаний интегрального робота. 2. Фрейм микропрограммы поведения // Изв. АН СССР. Технич. кибернетика. 1988. №5. С. 190-194.
6. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. – М.: Физматлит, 2004. – 367 с.
7. Чень Ч., Ли Р. Математическая логика и автоматическое доказательство теорем. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
8. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура представления декларативных знаний интегрального робота // Управляющие системы и машины. 1990. № 6. С. 75-83.
9. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура процедурного представления знаний интегрального робота. 1. Расплывчатые семантические сети // Изв. АН СССР. Технич. кибернетика. 1988. № 6. С. 119-124.

Мелехин Владимир Борисович. Профессор кафедры управления и вычислительной техники ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Окончил Дагестанский политехнический институт в 1976 году. Доктор технических наук. Автор 103 печатных работ и четырех монографий. Область научных интересов: интеллектуальные роботы, управление сложными социальными и экономическими системами. E-mail : Pashka1602@rambler.ru