КІБЕРНЕТИКА

В.Ю. МЕЙТУС

УДК 004.896

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ

Аннотация. Рассмотрено построение формальной модели предметной области для интеллектуальной системы, использующей интеллект с дескрипционной логикой. Созданы три взаимосвязанные категориальные модели. В частности определено представление знаний о предметной области в виде категории знаний. Рассмотрены отдельные свойства введенных категорий и связь категории знаний с возможностью решения задач в моделируемой предметной области.

Ключевые слова: интеллект, интеллектуальная система, предметная область, дескрипционная логика, модель предметной области, знание, интенсионал, онтология, категория знаний.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением и развитием представлений, связанных с построением интеллектуальных систем (ИС) и изложенных в [1], здесь также используются аналогичные [1] понятия и определения. Основная проблема, рассматриваемая в статье, заключается в разработке для ИС средств и способов представления информации о предметной области (ПрО) в виде знаний, ориентированных на решение задач в заданной ПрО.

Под интеллектом субъекта понимается свойство, позволяющее субъекту адекватно моделировать ПрО, которую он воспринимает и с которой взаимодействует, и на уровне построенной модели решать задачи взаимодействия субъекта и ПрО. А интеллектуальная система — это обладающий интеллектом субъект, действующий в ПрО и использующий свой интеллект при организации взаимодействия с ПрО.

Отметим, что в зависимости от методов моделирования возможно существование различных моделей ПрО, например моделей представления внешнего мира: от физики Ньютона до физики Эйнштейна, от квантовой физики до теории струн, от четырехмерной модели мира Минковского или 10-мерной теории струн до модели Шапиро–Вирасоро с 26-мерной размерностью пространства. Различные модели применяются в классической и конструктивной математике или в группах подстановок и p-адических чисел в теории групп. Собственно математика — это наука о формировании поведения (последовательного решения задач) в различных формальных моделях. А интеллект математика позволяет ему строить модель и на основании определенной логики решать в ней задачи.

Онтологическая модель ПрО, предложенная в [1], в действительности включает множество различных моделей для одной и той же ПрО, которые отличаются одна от другой, прежде всего, онтологиями и связанными с ними логиками. Основным преимуществом этих моделей является их связь с естественным языком, что обеспечивает понимание пользователем построенной модели и процессов решения задач

© В.Ю. Мейтус, 2019

с ее помощью. Однако в общем случае ПрО по своим параметрам, свойствам и компонентам шире онтологической модели, поскольку чаще всего не все элементы ПрО представлены в онтологии. Поэтому при доказательстве тех или иных результатов формируются онтологические определения новых компонентов ПрО, которые естественно могут появиться в ходе такого доказательства.

Способ построения решения задач на основании онтологической модели в первую очередь предполагает, что ИС должна понимать семантику — смысл слов, их комбинаций и конструкций из них, использованных в результате применения логики в этих онтологиях и соответственно в ПрО, в которую эта логика переносится. В общем случае это достаточно сложно. Известны феноминальные результаты ученых-математиков, полученные как решение непростых проблем, а детали их доказательств большинству специалистов, работающих в этих областях, не всегда понятны. Например, такие уникальные результаты, как решение Г. Перельманом проблемы Пуанкаре или доказательство Э. Уайлсом большой теоремы Ферма.

Однако желательно, чтобы ИС, даже не обладающая высоким уровнем интеллекта [1], могла обрабатывать информацию, связанную с относительно простыми задачами, которые приходится решать человеку, и решала бы их без его участия. В этом направлении одним из возможных способов задания необходимой информации является использование знаний, рассматриваемое в настоящей работе.

ЗНАНИЯ О ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Если принять, что ИС будет моделировать ПрО, а затем, используя эту модель, решать в ней задачи, то очевидно, что ИС должна иметь средства, позволяющие ей воспринимать ПрО, анализировать и сохранять полученную информацию в форме, которая допускает возможность построения модели ПрО на основе этой информации. В общем случае ПрО может быть шире и многообразнее, чем представления о ней ИС. Со временем понимание отдельных аспектов ПрО расширяется, собирается новая информация о ней, выдвигаются и подтверждаются или опровергаются гипотезы об особенностях структуры ПрО, создаются современные модели с другими задачами.

В дальнейшем под информацией будем понимать новые характеристики, полученные субъектом из внешней среды с помощью органов чувств или соответствующих приборов о ее содержании, состоянии и изменениях. При этом предполагается, что ПрО состоит из совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих элементов (их частей и связей). При построении субъектом (ИС) модели ПрО информацию об области необходимо описать, структурировать, связать с известными субъекту элементами внешней среды (понять информацию) и сохранить это описание. Информация о ПрО, которую сохраняет субъект (ИС) для дальнейшего предполагаемого или конкретного применения, используется при формировании знаний о ПрО.

Формально знание — это представление и семантическое описание отдельных составляющих ПрО, т.е. элементов и связей между ними. Знания ИС получает как в процессе отображения ПрО с помощью органов восприятия и последующего анализа этого отображения, так и от других субъектов (ИС) или из баз знаний. При этом в виде знаний обычно представляется описание только некоторой части ПрО, которую понимает и в которой действует ИС.

Далее знания рассматриваются как связанные между собой компоненты семантического описания ПрО, которые ИС формирует на основе информации, получаемой ею из ПрО, а затем сохраняет, модифицирует, использует для построения модели ПрО и формирования своего поведения в ней. Последнее предполагает ориентацию знаний на решение задач в ПрО.

В общем случае возможны различные способы представления знаний о ПрО. В качестве знаний будем рассматривать совокупность фактов, утверждений (одно или несколько одновременно), форм, представлений, схем, моделей, которые задают объекты ПрО, образы в ПрО, структурные связи (зависимости) между объектами и образами, геометрию ПрО. Знания могут быть доказаны, выведены, подтверждены как факты или выводы в ПрО в процессе ее изучения и исследования [2].

Для ИС существуют три основные проблемы, связанные с знаниями:

• проблема формы — какова форма представления знаний о ПрО?

• проблема преобразования — как связываются знания между собой, каким способом возможен переход от одних знаний к другим?

• проблема решения — как ИС решает задачи в ПрО с использованием ее модели, построенной на основе знаний?

Решение этих проблем непосредственно связано с глобальной задачей создания ИС — построения систем для решения задач на основе накопленной базы знаний, т.е. решения задач в произвольных ПрО, для которых существует или может быть создана база знаний. Более того, формируя базы знаний, можем строить ИС с заданными свойствами и типами поведения для различных возможных представлений ПрО.

Трудность решения этих проблем обусловлена наличием очень сложных, хотя и взаимосвязанных структур, взаимодействие которых зависит от используемого способа рассуждений, определяемого, что важно, не обязательно классической логикой, а также базовой онтологией. В этом случае выбор соответствующих примеров, ожидаемые результаты, понимание семантики области и интуиция исследователя во многом определяются логикой, которая выбрана для онтологии и распространяется на описание компонентов ПрО и зависимостей между ними. С моделями ПрО и с решениями задач в них могут быть связаны различные интеллекты, что приводит к отличиям результатов исследования и описаний даже одинаковых ПрО.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПрО

Моделирование ПрО начинается с задания спецификации модели и описания структуры, в которую может быть вложена данная спецификация. Чаще всего в качестве такой структуры выбирается некоторая математическая модель, рассматриваемая как формальное представление области. На следующем шаге определяется семантика модели, которая предполагает связь между формальными элементами выбранной структуры и элементами реальной ПрО. И, наконец, построение модели завершается заданием логики, позволяющей на основе правил вывода переходить от одних элементов модели к другим и тем самым решать задачи, поставленные перед ИС. Отметим, что к логике можно подключать дополнительные механизмы поиска и выбора преобразований, необходимых для решения задачи.

В работе [1] предлагалось рассматривать спецификацию модели как множество выделенных элементов ПрО со связывающими их отношениями (преобразованиями). Структуры ПрО могут быть различными в зависимости от предполагаемого использования будущей модели. Приведем несколько примеров задания различных структур для описания модели возможной ПрО.

В работе [3] рассматривалась структура, определяемая множеством элементов, над которыми задана алгебра возможных преобразований. Эту схему можно расширить за счет добавления типов, которые присваиваются элементам множества, и перехода к типизированным множествам [4].

В настоящей статье для представления модели предлагается рассматривать структуру на основе теории категорий [5, 6], построенную над спецификацией ПрО, прежде всего потому, что схема категорий достаточно универсальна и позволяет расширить возможные операции над моделью ПрО за счет известных формулировок из теории категорий. Отметим, что такой подход можно расширить при переходе к типизированным категориям [7].

Широкий спектр различных моделей предметных областей обусловливает появление математических теорий, начиная с топологии и функциональных пространств и кончая алгебраической геометрией и теорией вероятности. Особенности таких теорий заключаются в создании различных математических моделей со своей семантикой и методами решения задач или моделей в виде различных языков программирования, представляющих в разных формах ПрО, связанные со спецификой решения задач с помощью этих языков.

В работе [1] модель ПрО задавалась шестеркой символов: $\boldsymbol{SA} = (U, N, Id, M, Ud, \boldsymbol{R})$, где U — универсум, заданный как частично именованное множество объектов и конструкций ПрО, выделяемых ИС из области; N — понятия, соответствующие объектам или конструкциям области; Id — индивидуальные представители класса объектов, определяемых понятиями; M — атрибуты понятий; $\boldsymbol{R}$ — отношения, которые в совокупности включаются в универсум U и в дальнейшем называются концептами модели ПрО. Кроме того, в ПрО могут существовать некоторые элементы (один или несколько), которые не классифицированы. Такие элементы из Ud называются неопределенными.

Это абстрактное представление для любой реальной ПрО необходимо конкретизировать и связывать с восприятием ИС данной ПрО с помощью своих органов чувств или устройств, ориентированных на расширение возможностей этих органов.

Возможен и другой вариант построения реальной модели ПрО, связанный с определением элементов универсума новых сущностей. Таким образом обычно строятся математические теории. Например, моноид — это множество, в котором определена ассоциативная операция композиции, ставящая паре $\langle x, y \rangle$ элементов моноида его элемент $x \times y$. Кроме того, определен элемент моноида e, называемый единицей моноида, композиция которого с любым элементом моноида x совпадает с самим элементом x. Состоящая из моноидов ПрО пополняется за счет различных преобразований, связывающих между собой моноиды из ПрО, что позволяет изучать свойства этих моноидов в их взаимодействии.

Для любой ПрО, в которой действует ИС, система строит свое представление о составляющих элементах этой области и связях между ними. Для каждого объекта в это представление включаются признаки объекта, рассматриваемые как набор показателей, сформированных ИС на основании информации, получаемой из внешней среды с помощью ее органов, и использующих некоторые шаблоны представления совокупностей данных, существующих в ИС.

Понятие шаблона включает отдельные взаимосвязанные показатели, определяемые органами ИС или вычисляемые ею на основе собранной информации, хотя в отдельных случаях шаблон может состоять из единственного показателя. Входящие в шаблон показатели рассматриваются как единый образ восприятия, формирующий признаки, определяющие объект. Иногда при рассмотрении признака достаточно указать только наименование соответствующего шаблона без детализации его составляющих. Например, при исследовании человека как объекта ПрО можно по отдельности анализировать его лицо, фигуру, одежду, обувь, аксессуары. Аналогично при анализе лица используется его шаблон, включающий составляющие и связанные между собой шаблоны рта, носа, глаз, губ, овала лица, формы подбородка, каждый из которых задается своими характеристиками.

Способность формирования сложных признаков, распределенных в пространстве (объединяются данные, полученные из различных точек пространства) и во времени (анализ данных за определенные промежутки времени), увеличивает интеллектуальный ресурс ИС по сравнению с человеком, у которого ограничены возможности обработки больших объемов информации.

Для анализа получаемой информации и формирования признаков каждой части ПрО ИС, используя свой шаблон, может включать несколько анализируемых фрагментов. Последние затем связываются в некоторый составной образ, признак которого задается иерархией признаков отдельных частей.

Формально множество органов ИС или их возможных сочетаний в виде сформированных образов восприятия, характеризующих объект, определяется набором $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_n\}$. Пусть Λ — оператор, который по набору Ξ сопоставляет произвольному объекту X набор признаков (атрибутов) этого объекта,

$\Lambda(X)=\lambda_X=(\alpha_X^1,\ldots,\alpha_X^n)$. Отметим, что количество образов восприятия может быть очень большим, но из этого множества выбираются не более n, используемых для характеристики объектов. Так, в музыке из семи нот с полутонами получаются миллионы разных мелодий.

Если объект X — это множество, то признаки присваиваются всем его точкам. Каждое α_X^r связано с некоторой областью $D(r,X)$, в которой может изменяться значение этого признака для объекта X. Обозначим β_X^i пару $[\alpha_X^i, D(i,X)]$.

Набор $\lambda_X=\Lambda(X)$ можно рассматривать в виде:

$$\lambda_X=\Lambda(X)=([\alpha_X^1, D(1,X)],\ldots,[\alpha_X^n, D(n,X)])=(\beta_X^1,\ldots,\beta_X^n),$$

в котором к признаку добавлена область задания его возможного значения. Для некоторых объектов эта область может быть пустой в двух случаях: во-первых, если признак r не связан с объектом X, и, во-вторых, если признак связан с объектом X, но не имеется информации о значении этого признака для объекта X. Область во втором случае характеризуется неполной информацией, которую можно уточнять в процессе решения задач в этой области. Объектам из Ud сопоставляется множество признаков с пустой областью значений. Таким образом, от объектов вида X переходим к объектам, представленным в виде пар $(X,\Lambda(X))$, где $\Lambda(X)$ — интенсионал объекта X (в терминах работы [1]), называемый его естественной интерпретацией.

Если пара объектов (X,Y) из модели ПрО связана отношением $R\in\boldsymbol{R}$, то оператор Λ преобразует отношение R в набор преобразований признаков R_Λ, отображающих признаки λ_X в признаки λ_Y, $R_\Lambda:\lambda_X\to\lambda_Y$.

Набор признаков, связываемый с каждым отдельным объектом ПрО, является представлением этого объекта в некоторой системе координат, которую формирует для себя ИС при моделировании ПрО. Именно в этой системе ИС строит свою модель ПрО на основе исходной модели $\boldsymbol{SA}$.

Еще одна составляющая описания модели определяется связью между ПрО и онтологией, сопоставленной этой области. На уровне онтологий человек осознает, воспринимает, анализирует и представляет конкретные ПрО. Объединяя модель ПрО $\boldsymbol{SA}$ и онтологию $\Omega=\{C,D,A,R_\Omega,\mathcal{L},\mathcal{J},L_\Omega\}$, определенную в [1], получаем возможность исследования ПрО на семантическом уровне, связываемом с формальной моделью.

В [1] предложена онтологическая модель $\boldsymbol{SA}^*$, полученная присвоением онтологических описаний некоторым элементам универсума, входящим в модель $\boldsymbol{SA}$, и установлением логической взаимосвязи между ними. В этой модели онтология, описывающая реальную ПрО, связывается с составляющими элементами универсума, расширяя их представление за счет включения онтологического описания в элементы, для которых такое описание существует. Тем самым устанавливается зависимость между элементами универсума и их описанием, связанным с их семантикой в реальном мире, отраженным в онтологии этого мира.

Рассмотрим оператор Λ_Ω, который каждый объект — понятие или индивид — из модели $\boldsymbol{SA}^*$ с его представлением в виде пары $(X,\Lambda(X))$, полученным после применения оператора Λ, преобразует к виду $X:(\Lambda(X),\Lambda_\Omega(X))$, где $\Lambda_\Omega(X)=X_\Omega$ — онтологическое описание объекта X. Для тех объектов Y, которые не входят в $\boldsymbol{SA}^*$, оператор Λ_Ω задает их неопределенное значение в виде элемента $\{\bot\}$. Для этих элементов в настоящее время онтология не известна. Максимальный концепт $\top$ оператор Λ_Ω переводит в онтологическое значение, обозначенное $\top$.

Кроме того, можно расширить оператор Λ_Ω до оператора Λ'_Ω, который дополнительно каждому признаку (атрибуту), имеющему в онтологии название, присваивает его, извлекая из множества имен атрибутов A онтологии Ω. Наконец, на элементы ПрО вида $X:(\Lambda(X), \Lambda_{\Omega}(X))$, описание которых получено с использованием операторов Λ и Λ_{Ω}, распространяется логика $\mathcal{L}$, входящая в определение онтологии Ω.

ЛОГИКА МОДЕЛИ ПрО

Модель ПрО является основным пространством, которое представляет и строит для себя ИС. Поскольку главное предназначение ИС — это решение возникающих в этом пространстве задач установления связей между различными элементами или областями пространства, наряду с элементами пространства ИС необходимо и задание связей между этими элементами, которые бы позволили трансформировать одни элементы в другие или связывать различные области пространства между собой.

Для достижения этого используется логика, основная цель которой — определить, как из одних объектов, выражений и утверждений можно строить другие. Распространим этот подход и на ИС. Тогда, чтобы построить свое представление о ПрО, которое будем называть моделью, ИС нужно объединить основное пространство, в котором определяется модель с описаниями отдельных элементов ПрО и связей между ними включительно. Это выполняется с использованием языка некоторой логики. Затем осуществляется переход от одних описаний взаимосвязанных элементов ПрО к другим, что рассматривается как процесс вывода в такой логике. Тогда решение задач — это переход в модели от условия задачи к результату ее решения, от одной области ПрО к другой.

По предположению, в модели ПрО условие и ожидаемый результат строятся в виде формул логического языка, используемого для описания модели. А переход от одних объектов к другим определяется правилами перехода, допустимыми в рассматриваемой области. Эти правила с условиями их применения используют логику, на основании которой в модели выполняются соответствующие действия.

Возможен выбор различных логик в зависимости от того, какая схема рассуждений заложена в ИС. Далее будем считать, что логика модели ПрО совпадает с логикой $\mathcal{L}$, которая уже использована при построении онтологии. Можно рассматривать любую другую логику, но тогда придется заново переопределять и используемую онтологию, чтобы рассуждения в модели совпадали с их онтологическим представлением прежде всего потому, что предполагается, что онтология является одним из адекватных представлений ПрО.

Далее в качестве такой логики рассматривается логика $\mathcal{AL}$ [8]. Эта дескрипционная логика (ДЛ) включает дополнительные операции по сравнению с логикой $\mathcal{EL}$, использованной в [1] при построении онтологической модели. Естественно, что в реальных условиях ИС использует более сложные логики, более развитые логические представления, поскольку от них зависит уровень задач, которые может решить ИС. Для ИС в логику можно включать задание эмоций (эмоциональный интеллект), многовариантный выбор, образное представление ПрО.

Чтобы задать любой язык, нужно задать его синтаксис и семантику [4]. Для языка описания модели ПрО в рассматриваемой схеме его синтаксис определяется тем, как в логике $\mathcal{AL}$ задаются описания элементов ПрО, которые строятся из набора атомарных концептов и отношений модели ПрО с помощью операций логики $\mathcal{AL}$, рассмотренных далее.

Набор концептов в $\mathcal{AL}$ включает концепты $\top$ и $\bot$, которым сопоставлены понятия «максимальный» и «минимальный» концепты, множество атомарных концептов $CN\{A_1, A_2, \ldots, A_p\}$, построенных на основе понятий из множества N, к которым добавлены индивиды $CI = \{a_i \mid i \in J\}$ из множества In. Всем бинарным отношениям, входящим в множество $\boldsymbol{R}$, сопоставляются атомарные роли — множество $CR = \{R_1, R_2, \ldots, R_s \mid s \in S\}$. Отметим, что множество ролей в рассматриваемом языке для всей модели ПрО расширено относительно ролей, входящих в онтологическую модель ПрО, поскольку модель использует все отношения логики, а не только те, которым дано имя в онтологии.

В логике $\mathcal{AL}$ множество операций включает: $\neg$ (отрицание), $\cap$ (пересечение), $\forall$ (ограничение значения), $\exists$ (экзистенциальное значение). По определению каждый атомарный концепт является концептом. Если A — атомарный концепт, то $\neg A$ — концепт, причем операция отрицания применяется только к атомарным концептам. Если B и C — произвольные концепты, то пересечение $B \cap C$ — концепт. Если R — атомарная роль из CR, то $\forall R.B$ и $\exists R.\top$ — концепты. Неопределенным элементам из Ud сопоставляется минимальный концепт $\perp$. Других концептов в языке представления модели ПрО не существует. Концепты, построенные в логике $\mathcal{AL}$, отражают все возможные элементы модели ПрО. Это, конечно, ограничивает возможности ИС, но в этом случае таким является ее интеллект.

Для логики $\mathcal{AL}$ справедливо следующее соотношение:

$$\forall R.(A \cap B) \equiv \forall R.A \cap \forall R.B. \tag{1}$$

Нормальной формой для формулы в логике $\mathcal{AL}$ будем называть либо выражение вида

$$A_1 \cap A_2 \cap \ldots \cap A_k \cap \forall R_1.C_1 \cap \ldots \cap \forall R_n.C_n,$$

где A_i $(1 \le i \le k)$ — атомарные концепты или их отрицание, $R_i (1 \le i \le n)$ — атомарные роли, а C_i $(1 \le i \le n)$ — концепты, не содержащие операции $\cap$, либо выражение, состоящее из минимального концепта $\perp$.

Теорема 1. Любую формулу логики $\mathcal{AL}$ можно привести к нормальной форме.

Доказательство теоремы заключается в последовательном применении к формуле логики правила (1) для раскрытия скобок и правила $C \cap \perp \equiv \perp$.

Для того чтобы решать задачи в ПрО, необходимо иметь возможность перехода от одних элементов модели к другим. Такая возможность определяется связями, которые наряду с элементами выделяются при формировании спецификаций ПрО. В ДЛ существующие связи и зависящие от них правила вывода основаны на системе аксиом для концептов и индивидов. Таким образом, от одних концептов можно переходить к другим, либо преобразовывая логические представления концептов к нормальной форме, либо используя заданные аксиомы, позволяющие один концепт заменять другим.

Система аксиом в рассматриваемом языке ДЛ $\mathcal{AL}$ определяется как некоторое множество отношений вида $B \equiv C$ или $B \subseteq C$, где B и C — произвольные концепты. Произвольный конечный набор таких аксиом называется терминологией. Кроме того, терминология пополняется системой фактов, устанавливающей связи между индивидами и понятиями вместе с отношениями между индивидами через заданные роли. Эти факты записываются в виде $C(a)$, если индивид a принадлежит к классу, определяемому концептом C, и aRb, если пара (a, b) индивидов связана отношением R, т.е. $(a, b) \in R$.

Семантика модели определяется множеством правил, позволяющих присваивать синтаксически заданным концептам определенные смысловые значения, связанные с их пониманием в ПрО. Для этого рассматривается интерпретация концептов и ролей, входящих в синтаксические конструкции в семантической области Δ, определяемой множеством признаков, которые характеризуют объекты и роли в модели ПрО. Если общее число признаков, входящих в множество Ξ , равно n, то

$$\Delta = \prod_{i=1}^{n} [i, D(i)] = \prod_{i=1}^{n} \beta_X^i ,$$

где $D(i)$ — область возможных значений признака с номером i в модели ПрО.

Каждому атомарному концепту его интерпретация сопоставляет множество связанных с ним признаков и одновременно для каждого признака задает возможную область изменения его значений для данного концепта. Интерпретация задается как функция вида $(\cdot^I)$:

$$A^I = \partial\Lambda(A),$$

где ∂ — операция выбора области изменения каждого признака i в пределах области $D(i)$ для рассматриваемого конкретного концепта A. Естественно, что операция ∂ зависит от концепта. Такая зависимость не указывается, если в контексте изложения это несущественно.

Каждой атомарной роли R из CR интерпретация сопоставляет подмножество $R^I \subseteq \partial\Delta \times \partial\Delta$.

Интерпретацию атомарных концептов и ролей можно распространить на концепты, определяемые с помощью операций логики $\mathcal{AL}$

$$(\neg A)^I = \Delta \setminus A^I, (B \cap C)^I = B^I \cap C^I, \ \top^I = \Delta, \ \ \bot^I = \varnothing,$$

$$(\forall R.B)^I = \{\beta' \in \Delta \mid \forall \beta.(\beta', \beta) \in R^I \to \beta \in B^I\},$$

$$(\exists R.\top)^I = \{\beta' \in \Delta \mid \exists \beta.(\beta', \beta) \in R^I\}.$$

Поскольку $\Delta(A)$ — это кортеж пар вида [признак, область изменения признака], пересечение значений $\Delta(A)$ и $\Delta(B)$ является кортежем, в который входят все признаки α, общие для концептов A и B, для которых область значений лежит в пересечении областей каждого признака α, т.е. $D(\alpha, A) \cap D(\alpha, B)$.

Интерпретация аксиом логики задается следующими условиями. Для аксиомы типа $B \equiv C$ имеем $(B \equiv C)^I = (\partial\Lambda(B) = \partial\Lambda(C))$, т.е. совпадают признаки и области их значения для концептов B и C. А для аксиомы типа $B \subseteq C$ имеем $(B \subseteq C)^I = (\partial\Lambda(B) \subseteq \partial\Lambda(C))$. Включение $(\partial\Lambda(B) \subseteq \partial\Lambda(C))$ предполагает, что множество признаков, входящих в выражения $(\partial\Lambda(B), \partial\Lambda(C))$, совпадают и для каждого признака α область его значения $D(\alpha, B)$, связанная с концептом B, содержится в области значения $D(\alpha, C)$ этого признака, связанного с концептом C, т.е. $D(\alpha, B) \subseteq D(\alpha, C)$.

Модель ПрО $\mathcal{M}$, построенная с помощью логики $\mathcal{AL}$ из атомарных концептов, ролей и набора аксиом, определяется интерпретированным множеством возможных концептов и переходами между ними, использующими введенную систему аксиом.

Онтологическое расширение $\mathcal{M}_\Omega$ модели $\mathcal{M}$ определяется дополнением оператора Λ, интерпретирующего концепты и аксиомы, оператором Λ_Ω, который включает онтологические значения отдельных концептов и признаков. В модели $\mathcal{M}_\Omega$ имеется возможность описать на онтологическом уровне операции для решения задач в ПрО.

КАТЕГОРИАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Формализуем модель ПрО, представив ее в виде категории $\mathfrak{C}$, множество объектов $Ob\mathfrak{C}$ которой соответствует концептам, входящим в модель $\mathcal{M}$.

Множество морфизмов (стрелок) категории $\mathfrak{C}$ определяется следующим образом. Для каждого объекта $X \in Ob\mathfrak{C}$ множество морфизмов $H(X, X)$ включает единичный морфизм 1_X. Для любой пары объектов $X, Y \in Ob\mathfrak{C}$ множество морфизмов $H(X, Y)$ категории $\mathfrak{C}$ содержит единственный морфизм φ_{XY}, если объекты X и Y удовлетворяют аксиоме $X \subseteq Y$, и пусто в противном случае. Если существует аксиома $X \equiv Y$, то она рассматривается как пара аксиом: $X \subseteq Y$ и $Y \subseteq X$, с соответствующими морфизмами для каждого элемента пары.

Композиция морфизмов в категории $\mathfrak{C}$ определяется следующим образом. Пусть заданы два непустых морфизма: φ_{XY} и φ_{YZ}. Тогда справедливы аксиомы $X \subseteq Y$ и $Y \subseteq Z$, которые определяют эти морфизмы, а значит, и аксиома $X \subseteq Z$ в силу транзитивности операции включения. Она определяет соответственно морфизм φ_{XZ}, который и рассматривается как композиция исходных морфизмов, $\varphi_{XY} \circ \varphi_{YZ} = \varphi_{XZ}$. Ассоциативность композиции очевидна в силу ассоциативности включения, используемого в аксиомах.

Построенную таким образом категорию $\mathfrak{C}$ будем называть $\mathcal{AL}$ -категорией, определяемой для модели ПрО интеллектом, заданным с помощью ДЛ $\mathcal{AL}$. Рассмотрим некоторые свойства этой категории.

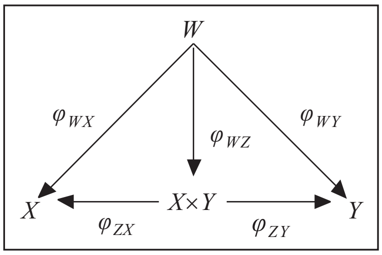

Рис. 1

Пусть $\perp$ — минимальный концепт, рассматриваемый как пустой объект категории $\mathfrak{C}$. Относительно $\perp$ известно, что его характеризует множество признаков с пустыми областями определения и для любого объекта X имеем $\perp \subseteq X$, поскольку пустая область определения признака входит в непустую область определения этого же признака. Поэтому как объект $\perp$ категории $\mathfrak{C}$ он потенциально может быть связан с любым другим объектом. Отсюда будем считать, что для $\perp$ существует единственная стрелка из него в любой объект X, поскольку пустой объект содержится в любом объекте. Эту стрелку обозначим $O_X : \perp \to X$. Это означает, что объект $\perp$ является начальным объектом категории $\mathfrak{C}$. Аналогично легко показать, что объект $\top$ — конечный объект категории $\mathfrak{C}$. Следовательно, категория $\mathfrak{C}$ имеет начальный и конечный объекты.

Теорема 2. Категория $\mathfrak{C}$ является категорией с произведениями.

Пусть X и Y — произвольные объекты из множества $Ob\mathfrak{C}$. Согласно заданию ДЛ $\mathcal{AL}$ существует операция $\cap$, которую можно применить к этим объектам, построив объект $X \cap Y = Z$. Для объекта Z его интерпретация определяется множеством признаков, которые лежат в пересечении множеств признаков $X^I \cap Y^I$. Поэтому существуют морфизмы $\varphi_{ZX} : Z \to X$ и $\varphi_{ZY} : Z \to Y$. Чтобы доказать, что Z — произведение объектов X и Y, $Z = X \times Y$, покажем, что для любого объекта W с морфизмами $\varphi_{WX} : W \to X$ и $\varphi_{WY} : W \to Y$ существует единственный морфизм $\varphi_{WZ} : W \to Z$, для которого коммутативна диаграмма, показанная на рис. 1.

Действительно, по определению для $Z = X \times Y$ справедливы включения, определяющие морфизмы φ_{ZX} и φ_{ZY}, поскольку $X^I \cap Y^I \subseteq X^I$ и $X^I \cap Y^I \subseteq Y^I$. Если для произвольного объекта W существуют морфизмы φ_{WX} и φ_{WY} с соответствующими включениями, это означает, что $W^I \subseteq X^I \cap Y^I$, а следовательно, существует морфизм φ_{WZ}, делающий диаграмму коммутативной. Если бы существовал в W элемент, входящий в X^I и не входящий в Y^I, то не было бы вхождения W^I в Y^I, а по предположению морфизм φ_{WY} существует.

Теорема доказана.

Следствие 1. $\mathcal{AL}$ -категория $\mathfrak{C}$ — это категория с конечными произведениями.

Действительно, приведенные в теореме 2 рассуждения легко распространяются на несколько объектов категории.

Пусть рассматривается модель ПрО, формализованная с помощью $\mathcal{AL}$-категории, в которой ИС должна решать поставленные задачи. Любая задача с использованием категории $\mathfrak{C}$ определяется заданием пары объектов: X и Y, где X — условие задачи, а Y — результат ее решения. Решение задачи существует, если множество морфизмов $H(X, Y) \neq \varnothing$. Тогда морфизм $\varphi \in H(X, Y)$ задает искомое формальное решение. Отметим, что морфизм φ определяется включением $X \subseteq Y$. Если множество $H(X, Y)$ пусто, то поставленная задача в модели ПрО не имеет решения. Таким образом, справедлива следующая теорема.

Теорема 3. В модели ПрО, представленной $\mathcal{AL}$-категорией $\mathfrak{C}$, разрешима любая задача, заданная парой объектов (X, Y) этой категории. ИС может найти это решение, определив, является ли непустым множество морфизмов $H(X, Y)$ в категории $\mathfrak{C}$.

Используя категорию $\mathfrak{C}$, построим новую категорию $\mathfrak{C}_\Omega$ следующим образом. Применим к каждому объекту $X \in Ob\mathfrak{C}$ ранее определенный оператор Λ_Ω: $\Lambda_\Omega(\perp) = \perp$, $\Lambda_\Omega(\top) = \top$, $\Lambda_\Omega(X) = X_\Omega$, если такое онтологическое описание для X существует, и $\Lambda_\Omega(X) = \perp$, если онтологического описания не существует.

Так, определенное множество объектов обозначим как множество объектов категории $\mathfrak{C}_\Omega$, а отображение множества $Ob\mathfrak{C}$ в множество $Ob\mathfrak{C}_\Omega$ будем называть функтором $\mathcal{F}:\mathfrak{C} \to \mathfrak{C}_\Omega$.

Множество морфизмов $\mathrm{Mor}\,\mathfrak{C}_\Omega$ категории $\mathfrak{C}_\Omega$ задается следующим образом. Пусть $\varphi \in H(X, Y)$ категории $\mathfrak{C}$. Тогда

$$\mathcal{F}(\varphi) = \varphi, \text{ если } \mathcal{F}(X) \neq \perp, \mathcal{F}(Y) \neq \perp,$$

$$\mathcal{F}(\varphi) = 0_Y, \text{ если } \mathcal{F}(X) = \perp, \mathcal{F}(Y) \neq \perp,$$

$$\mathcal{F}(\varphi) = 0^X, \text{ если } \mathcal{F}(X) \neq \perp, \mathcal{F}(Y) = \perp,$$

$$\mathcal{F}(\varphi) = 1_\perp, \text{ если } \mathcal{F}(X) = \perp, \mathcal{F}(Y) = \perp.$$

Морфизмы 0^X и 0_Y нулевые и связаны с отображением неопределенных объектов. Их композиция с любым другим морфизмом также дает нулевой морфизм. Таким образом, множество $\mathrm{Mor}\,\mathfrak{C}_\Omega$ состоит из морфизмов категории $\mathfrak{C}$, связывающих между собой объекты, для которых существует онтологическое описание, и нулевых морфизмов, разложение которых проходит через неопределенный минимальный объект $\perp$.

Относительно категории $\mathfrak{C}$, которая представляет ПрО, категорию $\mathfrak{C}_\Omega$ будем называть онтологическим представлением ПрО, а функтор $\mathcal{F}: \mathfrak{C} \to \mathfrak{C}_\Omega$ — онтологическим функтором.

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

ИС имеет представление о ПрО на уровне своих знаний о ней. Это знание порождается объективной реальностью окружающей среды, но при этом она трансформируется через восприятия ИС (субъекта). Процесс может быть эмпирическим, переносящим полученные наблюдения в форму знаний, либо теоретическим, проходящим вначале через создание теории, а затем включающим теоретические гипотезы и выводы в знаниях о среде. Хотя между этими формами получения знаний в реальности возможны и существуют переходы.

Поскольку знания непосредственно связаны с ПрО, форма их представления также зависит от области, ее составляющих и отношений между ними. Кроме того, знания связаны с ИС, а также с ее возможностями представления и переходами между элементами ПрО, которые формулируются в виде логики $\mathcal{L}$, являющейся составляющей интеллекта системы.

В работе [2] предложен вариант задания знаний в виде модели, состоящей из трех компонентов. В настоящей статье знание о произвольном объекте X будем рассматривать как пару, состоящую из протознания $kn(X)$, которое согласовано с введенной онтологией и к которому добавлено онтологическое представление (если оно существует) данного объекта — онтология объекта. Для объекта X эту пару [протознание (Ω), онтология] будем называть знанием об объекте X.

Протознание kn объекта X, т.е. $kn(X)$, рассматривается как тройка элементов:

- набор признаков $\Lambda(X)$, который является интенсионалом объекта;
- $\mathcal{L}(X)$ — экстенсионал объекта X, заданный логической формулой логики $\mathcal{L}$, определяющей этот объект;
- множество преобразований $T(X) = \langle \varphi_1, \ldots, \varphi_n \rangle$, которые связывают в модели $\mathcal{M}$ объект X с другими объектами модели.

Таким образом, $kn(X) = [\Lambda(X), \mathcal{L}(X), T(X)]$.

Протознание рассматривается как узкое представление знания о ПрО.

Иногда множество преобразований $T(X)$ заменяется указанием множества объектов, в которые может быть преобразован объект X. Например, в математических работах используется запись вида: «из формулы (a) следует формула (b)», в предположении, что преобразование, трансформирующее (a) в (b), специалист легко найдет сам.

Чтобы формализовать переход от преобразований $T(X)$ к объектам, введем оператор $\boldsymbol{P}(X)$, сопоставляющий объекту X и множеству $T(X)$ множество объектов модели $\mathcal{M}$ в виде $\boldsymbol{P}(X) = \langle \varphi_1(X), \ldots, \varphi_n(X) \rangle$, в которые с помощью операций из $T(X)$ может быть преобразован объект X. Тогда задание формального протознания об объекте X модели ПрО имеет вид $kn(X) = [\Lambda(X), \mathcal{L}(X), \boldsymbol{P}(X)]$ или $kn(X) = [\Lambda, \mathcal{L}, \boldsymbol{P}](X)$, если ввести многокомпонентный оператор $[\Lambda, \mathcal{L}, \boldsymbol{P}]$.

Знание ζ_X об объекте модели ПрО задается как протознание об объекте X, интерпретированное в онтологии модели. Интерпретация задается следующим образом. Если $\Lambda_\Omega(X) = \perp$, то объект X называется онтологически неопределенным объектом. Для такого объекта знание ζ_X также не определено и задается равенством $\zeta_X = \perp$. Если $\Lambda_\Omega(X) \neq \perp$, то объект X онтологически определен и знание ζ_X о нем задается выражением $[\Lambda, \mathcal{L}_\Omega, \boldsymbol{P}_\Omega, \Lambda_\Omega](X)$, в котором применение операторов с индексом Ω предполагает замену всех онтологически неопределенных объектов символом $\perp$: для оператора $\mathcal{L}_\Omega$ в логической формуле объекта X, а для оператора $\boldsymbol{P}_\Omega$ в определяемом им списке возможных объектов. Оператор Λ_Ω заменяет объект X его онтологическим описанием.

Таким образом, знание относительно модели ПрО тесно связано с онтологией, используемой для описания данной ПрО. Знание включает информацию об объекте ПрО в виде его восприятия ИС, а также его структуры как формулы логики, связи с другими элементами ПрО (протознание) и онтологического описания, которое связывает объект с внешним миром. То, что невозможно описать на уровне онтологии, не является знанием. Отметим, что в общем случае онтология может включать для различных ПрО язык математической теории, химические формулы, мифологические представления, метафоры, фантастические понятия и описания.

Категория знаний $\mathcal{R}_\mathcal{M}$ о ПрО, определенной моделью $\mathcal{M}$ с онтологическим расширением $\mathcal{M}_\Omega$, называется категорией с множеством объектов, в которой для каждого объекта X модели $\mathcal{M}$ существует объект κ_X категории $\mathcal{R}_\mathcal{M}$, представленный в виде выражения $\kappa_X = [\Lambda, \mathcal{L}_\Omega, \boldsymbol{P}_\Omega, \Lambda_\Omega](X)$, рассматриваемого как знание об объектах, существующих в модели $\mathcal{M}$. Категория знаний $\mathcal{R}_\mathcal{M}$ является формальным представлением знаний о ПрО.

Множество объектов категории знаний $\mathcal{R}_\mathcal{M}$ определяется следующим образом:

$$Ob\mathcal{R}_\mathcal{M} = \{\kappa_X \mid X \in Ob\mathfrak{E}_\Omega\} \cup \{\perp, \top\}.$$

Множество морфизмов категории $\mathcal{R}_\mathcal{M}$ включает для каждого объекта κ_X, $X \in Ob\mathfrak{E}_\Omega$, и для объектов $\{\perp, \top\}$ единичные морфизмы 1_X. Для пары объектов: κ_X и κ_Y, морфизм $\hat{\theta}$ из множества $H(\kappa_X, \kappa_Y)$ определяется ненулевым морфизмом θ из $H(X, Y)$, где X, Y — объекты категории $\mathfrak{E}_\Omega$, для которых существует онтологическое описание. Морфизм $\hat{\theta}$ преобразует знание κ_X в знание $\kappa_Y = [\Lambda, \mathcal{L}_\Omega, \boldsymbol{P}_\Omega, \Lambda_\Omega](Y)$. Если пара (X, Y) представляет задачу, а пара (κ_X, κ_Y) — знания о ней, то морфизм $\hat{\theta}$ задает полное решение этой задачи на уровне онтологии Ω. Решение называется полным, если оно является формальным решением и одновременно для него существует онтологическое описание, позволяющее понять это решение на уровне заданной онтологии. Отсюда следует такая теорема.

Теорема 4. Для заданной онтологии Ω категория знаний $\mathcal{R}_\mathcal{M}$ задает полные решения всех задач для модели $\mathcal{M}$, которые такие решения допускают.

Теорема 5. Если для задачи (X, Y) существует формальное решение в логике $\mathcal{AL}$, то всегда можно пополнить онтологию, связанную с категорией знаний, таким образом, чтобы решение задач было полным.

Действительно, для этого достаточно ввести в онтологию отсутствующие понятия, которые дадут онтологическое описание соответствующих объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно определению ИС, действующая в заданной ПрО, предназначена для решения задач, которые можно сформулировать в этой области. Показано, что модель ПрО и возможные задачи можно формализовать с использованием математической схемы, которая представляется в виде соответствующих категорий. Для того чтобы задача и ее решения были понятны, используется онтологическое описание в виде знаний, потому что даже тогда, когда решение задачи существует на уровне используемой логики, его не всегда можно задать на уровне полного решения, включающего онтологическое описание. Хотя всегда можно пополнить онтологию таким образом, чтобы превратить формальное решение в полное. Остается нерешенным вопрос, можно ли для логики $\mathcal{AL}$ построить категорию знаний с бесконечным числом объектов, в которой все задачи были бы разрешимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейтус В.Ю. Проблемы построения интеллектуальных систем. Уровни интеллекта. *Кибернетика и системный анализ*. 2018. Т. 54, № 4. С. 32–44.
2. Мейтус В.Ю. Введение в теорию интеллектуальных систем. Основные представления. Саарбрюкен: Palmarium academic publishing, 2015. 189 с.
3. Letichevsky A. Theory of interaction, insertion modeling, and cognitive architectures. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2014. Vol. 8. P. 19–32.
4. Тейз А., Грибомон П., Юлен Г., Пирот А., Ролан Д., Снайерс Д., Воклер М., Гоше П., Вольпер П., Грегуар Э., Дельсарт Ф. Логический подход к искусственному интеллекту. От модальной логики к логике баз данных: пер. с франц. Москва: Мир, 1998. 494 с.
5. Маклейн С. Категории для работающего математика: пер. с англ. Москва: Физматлит, 2004. 352 с.
6. Голдблатт Р. Топосы. Категорный анализ логики: пер. с англ. Москва: Мир, 1983. 488 с.
7. Lu R.-Q. Towards a mathematical theory of knowledge. *J. Comput. Sci. & Technol*. 2005. Vol. 20, N 6. P. 751–757.
8. Baader F., Nutt W. Basic description logics. In: *The Description Logic Handbook.* Baader F., Calvanese D., McGuinness D.L., Nardi D., Pater-Schneider P.F. (Eds). Cambridge Univer. Press, 2007. P. 47–104.

Надійшла до редакції 02.10.2018

В.Ю. Мейтус

ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ. ПОДАННЯ ЗНАНЬ

Анотація. Розглянуто побудову формальної моделі предметної області для інтелектуальної системи, що використовує інтелект із дескрипційною логікою. Створено три взаємопов’язані моделі у вигляді категорій. Зокрема, визначено подання знань про предметну область у вигляді категорії знань. Розглянуто окремі властивості введених категорій і зв’язок категорії знань з можливістю розв'язання задач у модельованій предметній області.

Ключові слова: інтелект, інтелектуальна система, предметна область, дескрипційна логіка, модель предметної області, знання, інтенсіонал, онтологія, категорія знань.

V. Meytus

PROBLEMS OF CONSTRUCTING INTELLIGENT SYSTEMS. KNOWLEDGE REPRESENTATION

Abstract. Construction of a formal domain model for an intelligent system using intelligence with descriptive logic is considered. Three interrelated category models are created. In particular, the representation of knowledge about the subject area is defined as a category of knowledge. The individual properties of the introduced categories and the relationship of the category of knowledge with the ability to solve problems in the modeled subject area are considered..

Keywords: intelligence, inteligent system, subject domain, description logic, domain model, knowledge, intensional, ontology, category of knowledge.

Мейтус Владимир Юльевич,
доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего отделом Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев,
e-mail: vmeitus@gmail.com.