

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ. УРОВНИ ИНТЕЛЛЕКТА

Аннотация. Описана разработка теории построения интеллектуальных систем, созданных для решения задач в произвольных предметных областях. Рассмотрены процессы моделирования предметной области на основе использования онтологического представления, включающего логику, и задания отдельных элементов модели как триад, состоящих из экстенционала, интенционала и коннотации. Предложены определения уровней интеллекта, каждый из которых соответствует уровню возможностей интеллектуальной системы.

Ключевые слова: интеллект, интеллектуальная система, уровень интеллекта, предметная область, онтология, онтологическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Создание компьютерной техники обусловило глобальный переход к разработке новых технологий, используемых в различных областях деятельности человека. Третья промышленная революция — цифровая — определила современную компьютерную цивилизацию, в которой компьютеры явились составной частью существующих производственных и социальных процессов [1]. В настоящее время наблюдается переход к четвертой промышленной революции, когда средства сбора и обработки информации выполняют роль инфраструктурной составляющей общества [2]. Одновременно происходит переход к новому уровню информационного и программного обеспечения — к интеллектуальным системам, которые по своему потенциалу обработки информации превосходят не только возможности отдельного человека, но и коллективы специалистов. Вопросы экологии и природных процессов, экономики, медицины, биологии, физики, образования, развития мировых информационных систем и других областей жизнедеятельности человека требуют своих решений, определяемых уровнем интеллектуального развития общества и новым качеством постановки социальных проблем на основе интеллектуального подхода к их анализу и моделированию.

Применение компьютеров расширило чувственные и управляющие возможности человека, ускорило обработку информации, на основании которой он принимает решения и строит свои представления об окружающем мире. А перспективы развития общества, определяемые искусственным интеллектом, приоткрывают плотно закрытые до сих пор двери в мир мыслей и идей, в мир чувств и эмоций, в мир проблем, решение которых доступно только гениям.

Интеллектуальные системы, использующие интеллект при формировании своего поведения, — это новый мощный ресурс развития современной цивилизации, от которого человечество не может отказаться, если не хочет приостановить этот процесс или поставить под вопрос свое дальнейшее существование. При разработке таких систем необходимо понять, что такое интеллект, какие его представления или формы выбирать в качестве основы создания интеллектуальных систем и какова общая технология их построения.

В настоящее время области применения интеллектуальных систем многообразны и продолжают расширяться. Отметим основные из этих областей:

- транспортные беспилотные устройства (автомобили, тракторы и другие агромашины, самолеты и военная техника);
- робототехника (от обслуживания человека и домашних роботов до промышленных и военных роботов различного назначения);

- оптимальные системы управления производством;
- аналитические системы в обществе (сбор данных, их анализ в целях выявления характера изменений в социальных процессах) и в экономике, включая банковские, финансовые и юридические системы;
- эффективные поисковые системы, работа с большими данными (Big Data), анализ неполной, неоднозначной, не полностью определенной информации;
- разумные помощники (типа Siri, Cortana, Deep Mind), интеллектуальные помощники в системах управления, включающие, например, борьбу с мошенничеством в банковских системах;
- технологии создания «умных» систем (автомобиль, дом, цех, предприятие, район, город).

Практически не ограничена область применения интеллектуальных систем в образовании, в частности в процессе обучения. Разработка таких систем — обязательное условие эффективного взаимодействия человека с новым промышленно-компьютерным миром.

Объединенные в сеть интеллектуальные компьютеры позволяют повысить современный уровень обучения, сочетать индивидуальность и потребности общества, а также выявлять те персональные качества человека, которые сейчас, к сожалению, не востребованы. Уровень интеллекта человека будет определяться на самых ранних стадиях, отслеживаться и направляться соответствующей системой, чтобы потенциальные возможности каждого развивались без помех и использовались на благо общества.

Настоящая работа посвящена вопросам определения интеллекта и его уровня как базового понятия при построении интеллектуальных систем, связям интеллекта с психологическими понятиями сознания и мышления, а также проблемам моделирования предметной области, в которой действует такая система.

ПЕРВИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБ ИНТЕЛЛЕКТЕ

Интеллект — это свойство высокоорганизованного субъекта, позволяющее ему эффективно взаимодействовать с окружающим его миром, с окружающей средой. Это свойство помогает человеку не только приспосабливаться к среде, выживая в ней, но и решать возникающие проблемы, улучшать качество жизни, расширять возможности в условиях постоянных изменений.

Не ограничивая общности, можно считать, что окружающая среда состоит из множества различных областей, каждая из которых рассматривается на некотором уровне ее восприятия и в пределах некоторого контекста. Такая область называется предметной областью (ПрО). Предполагается, что любую ПрО можно описать некоторым набором правил и ограничений, которые распространяются на всю область, одновременно выделяя ее.

Отметим, что наряду с естественным материальным миром, рассматриваемым как некоторое множество ПрО (дом, учеба, работа, досуг (театры, клубы, концерты)), можно исследовать миры идей, представлений, фантазий, верований, надежд, виртуальных конструкций. К ПрО относятся области науки, искусства, управления, производства. Каждая из них имеет свои особенности и признаки, законы и формы, и в каждой человек может себя реализовать в художественных, научных, производственных, технологических и других направлениях, характерных для современной цивилизации.

Для эффективного взаимодействия с ПрО вначале необходимо получить о ней информацию, на основе которой создать о ПрО целостное представление, затем, используя его, определить свои действия для решения возникшей проблемы, проверить адекватность этих действий, выполнив их в ПрО. Такое представление ПрО назовем ее моделью, а процесс построения модели — моделированием ПрО. Это моделирование является необходимой частью общего представления об интеллекте, определяющего взаимодействие с ПрО. С моделированием можно отождествить процесс познания субъектом окружающего мира.

После создания модели приступаем к решению проблемы, состоящей из последовательности задач, результаты решения которых сводятся к решению этой проблемы.

Таким образом, интеллект субъекта — это свойство, позволяющее ему адекватно моделировать ПрО и на уровне построенной модели решать задачи, относящиеся к этой области. А интеллектуальная система (ИС) — это субъект, обладающий интеллектом и использующий его при организации взаимодействия с ПрО.

В общем случае ИС воспринимает ПрО своими органами, приборами, устройствами, анализирует ПрО, связывая с ее отдельными элементами, подобластями и структурами определенные свойства, показатели, характеристики, измеряемые качественными или числовыми величинами. Используя эти свойства на уровне своего интеллекта, ИС моделирует ПрО, представляя ее в виде модели, являющейся основой, которая позволяет ИС формировать свое поведение в ПрО, перенося решения, найденные в модели, на ПрО.

Поведение ИС направлено на достижение некоторой цели, поставленной перед ИС или сформулированной ею самостоятельно в процессе самоорганизации. Поведение состоит из последовательности решенных системой задач, сформулированных в ПрО или в ее модели. Результаты решения задач определяют, как ИС должна воздействовать на ПрО, чтобы достичь заданной цели. Последняя может разбиваться на некоторые подцели, которые предварительно достигаются ИС. В некоторых случаях ИС воздействует на ПрО (это воздействие вначале проверяется на модели ПрО), чтобы изменить ее, упростив процесс достижения цели. При этом может изменяться не только ПрО, но и ее модель, созданная ИС. Возникает взаимодействие между ПрО и ИС. По предположению, ИС может получить из ПрО характеристики, определяющие такое взаимодействие.

ИС моделирует ПрО на основе своего представления о ней. Модель для ИС заменяет ПрО в процессе решения задач, а затем результаты решения проверяются действиями ИС в ПрО. ИС формирует свое поведение как композицию результатов решения задач на основе полученной и переработанной информации об окружающей среде. Одновременно ИС сравнивает полученную информацию со своим предыдущим опытом решения задач.

ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Спецификация модели — это множество выделенных элементов ПрО со связывающими их отношениями (преобразованиями). В эту спецификацию входят возможные преобразования, которые может выполнять ИС в ПрО.

Определим общий подход к построению модели ПрО в виде совокупности условий:

- представления ПрО в виде некоторого основного пространства (непрерывного или дискретного);
- интерпретации для спецификаций модели в основном пространстве, которое входит в описание ПрО;
- построении структур, аксиоматических выражений, постулатов, схем с использованием значений, указанных в спецификации;
- новых спецификаций и выражений, включая структуры, образы и ситуации, которые конструируются из исходных спецификаций и связаны с воспринимаемыми новыми сущностями ПрО как целостная картина, состоящая из конечного числа интерпретируемых элементов;
- задания допустимых преобразований, связывающих отдельные элементы и области рассматриваемого пространства в единую область построения модели;
- описания геометрии ПрО в виде преобразований и ограничений, наложенных на структуру основного пространства и заданных в нем как составляющая интерпретации ПрО;
- оценки сложности ПрО, которая рассматривается как мера вычислительных ресурсов, необходимых для нахождения части ПрО, определяемой ее спецификациями.

Отметим, что отдельные варианты моделей могут состоять только из части приведенных условий, поскольку некоторые из них можно опустить и не включать в конкретную модель.

Другой подход к целостному представлению ПрО вместе со связанными проблемами и понятиями, определяющими возможности решения задач в этих областях, рассмотрен в работах академика А. Летичевского, в частности в [3].

По предположению, для каждой ПрО существует некоторое пространство, в котором эта область представлена. И особенность ПрО состоит в задании этого пространства, рассматриваемого как множество элементов (объектов, точек), которые могут объединяться в пространстве в некоторые подмножества (подобласти), связанные между собой отношениями. На элементы пространства можно воздействовать, определяя некоторые преобразования элементов, переходы от одних точек (подобластей) к другим. Поиск требуемых преобразований в пространстве, связывающих между собой отдельные точки или подобласти, рассматривается как задача в этом пространстве. Возможен также вариант задания задачи как сужение исходной области формулировки задачи.

ИС воспринимает ПрО с помощью органов, приборов, устройств, которые обозначим $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$. Для построения модели пространство ПрО разбивается на некоторое число более мелких частей $\{A_i | i \in I\}$, и каждую такую часть A или некоторые из них органы Ξ воспринимают, оценивают и сопоставляют ей множество значений, рассматриваемых как признаки частей $A = (\alpha_A^1, \dots, \alpha_A^m | m \leq n)$.

ИС отождествляет это представление в модели ПрО с рассматриваемой частью A .

Важной частью представления ПрО являются отношения, зависимости, связи, существующие между элементами ПрО. Эти отношения определяют, каким образом изменения одних элементов вызывают изменения других. В действительности в ПрО возможны (допустимы) не все комбинации элементов. Между собой могут взаимодействовать только некоторые элементы, имеющие определенные признаки. Это условие накладывает ограничения на возможные свойства взаимодействующих элементов в ПрО и на преобразования, допустимые в модели ПрО.

Множество отношений R , выделяемых ИС из ПрО, на основании информации как собственной, так и получаемой из ПрО, задает возможные связи между элементами ПрО.

В ПрО одновременно может находиться несколько ИС, которые рассматриваются другими ИС в этой ПрО как части последней. Воспринимая структуру ПрО в виде разбиения $\{A_i | i \in I\}$ и отношений из R , ИС может изменяться, подключая новые органы или инструменты восприятия окружающей среды и влияя на нее.

Интеллект системы проявляется в том, что действия ИС в ПрО, во-первых, адекватны этой области, совпадают с допустимыми в ней преобразованиями по крайней мере на уровне ее восприятия, осуществляемого ИС. Следовательно, построенная системой модель действительно является моделью ПрО, созданной на уровне восприятия ИС и отражающей основные закономерности ПрО. И, во-вторых, действия ИС направлены на достижение цели, стоящей перед системой. Общая схема такого поведения основана на том, что ИС вначале моделирует ПрО или ту ее часть, с которой система связана при решении задач, включаемых в ее поведение, а затем, используя построенную модель, выбирает и решает задачи, определяемые исходной целью и позволяющие ее достичь. Отметим, что цель может распадаться на ряд промежуточных подцелей, причем иногда их достижение может быть противоречивым и требовать дополнительных действий от ИС.

В конечном итоге разработка ИС для заданной ПрО при поставленной цели распадается на ряд промежуточных этапов. Это создание средств моделирования ПрО, трансформация цели, поставленной перед системой, во множество задач, которые необходимо решать в построенной модели, чтобы эту цель достичь, и, наконец, выбор, разработка способов решения этих задач. Композиция результатов решения определяет поведение ИС в виде последовательности воздействий на ПрО, которые должна выполнить ИС. В случае нескольких целей их достижение и согласование — это отдельный этап формирования поведения ИС.

МОДЕЛЬ ПрО

Формально модель ПрО (SA) — это пространство, включающее частично именованное множество U объектов и конструкций из окружающей среды, элементы которой воспринимаются или осознаются интеллектуальным субъектом, взаимодействующим с этой средой, с помощью органов чувств или других средств представления окружающей среды. Конструкции среды создаются из объектов этой среды с помощью бинарных отношений, связей, операций, преобразований, обозначаемых R , которые также включаются в U . Иногда в модель ПрО субъект вводит воображаемые образы, виртуальные конструкции, помогающие ему воспринимать среду. Например, древние греки, представляя мир, отождествляли природу с различными богами — покровителями определенных событий и явлений.

Множество U называется универсумом ПрО. Частичная именованность предполагает, что отдельные элементы ПрО или их конструкции из этих элементов могут иметь собственное имя, под которым они рассматриваются в модели ПрО, строящейся субъектом (ИС). С именованными частями ПрО связываются понятия как описание совокупности свойств, характерных для этой части. Понятиям соответствуют классы объектов, существующих в ПрО.

Понятия N , индивидуальные представители класса объектов Id , определяемых понятиями, атрибутов понятий M , отношения R в совокупности составляют универсум U и в дальнейшем называются концептами модели ПрО.

Кроме того, в ПрО существуют некоторые элементы, которые не классифицированы. Такие элементы будем называть неопределенными и обозначать Ud . Они также включаются в универсум. Их свойства можно уточнять по мере взаимодействия субъекта с ПрО. Другими словами, будем предполагать, что ПрО не полностью известна. В ней может существовать ассоциированная с отдельными областями неоднозначность, неопределенность, неполнота представления.

Таким образом, модель ПрО SA задается как шестерка символов $SA = (U, N, Id, M, Ud, R)$, каждый из которых отождествляется с соответствующим множеством элементов ПрО. Каждый концепт универсума U , входящий в ПрО, принадлежит одному из множеств U, N, Id, M, Ud, R . Существуют различные уровни представления ПрО, рассматриваемой как некоторая целостность. Эти уровни связаны с ее структурным представлением в этой среде и одновременно со свойствами субъекта (ИС), формирующего в среде свое поведение.

Взаимодействие со средой может измеряться набором показателей (свойств), воспринимаемых органами чувств субъекта или полученных на основании известных и используемых закономерностей данной ПрО. Каждый показатель или их подмножество, в совокупности относящиеся к отдельному объекту D , называется признаком объекта D . Часто признак характеризуется функцией α из универсума U , рассматриваемого как $Dom \alpha$ в некоторую кообласть C_α этой функции, $\alpha : U \rightarrow C_\alpha$. Представление о любом выделяемом и рассматриваемом компоненте (объекте) ПрО на уровне присущих ему наборов признаков и их значений называется интенционалом этого объекта и обозначается $Int D$. Признаки чаще всего либо имеют некоторые числовые значения, принадлежащие кообласти признака, либо определяются на качественном уровне, который также рассматривается как значение признака.

Объекты в ПрО могут объединяться в некоторую общую конструкцию, называемую классом. Каждый элемент класса имеет общие признаки, определяющие принадлежность объекта к рассматриваемому классу. Этот класс по отношению к отдельному объекту D , входящему в него, называется экстенционалом объекта и обозначается $Ext D$. В качестве экстенционала можно рассматривать примеры использования объекта D в ПрО, заданные в виде утверждений, или некоторые конструкции, включающие этот объект.

Некоторые объекты непосредственно связаны отношениями из R , присущими данной области с точки зрения субъекта. Например, отношения сходства, подобия, аналогии или отношения, преобразующие одни признаки в другие. Преобразование из R может состоять в том, что к объекту добавляются некоторые

признаки или наоборот заменяются, элиминируются отдельные признаки, что переводит объект в другой класс, либо с помощью преобразований создаются некоторые конструкции, выделяемые субъектом в этой ПрО.

С каждым объектом D можно связать два коннотируемых множества: прямое и обратное. Первое — подмножество отношений из R , которые связывают D с одним из объектов универсума, т.е. прямое коннотируемое множество $Con_{\alpha}D$. Второе — это множество объектов, имеющих общие признаки с объектом D , и для которого его прямое коннотируемое множество имеет непустое пересечение с $Con_{\alpha}D$. Такое множество по отношению к заданному объекту D называется обратным коннотируемым множеством (коннотацией D) и обозначается $BConD$. В дальнейшем коннотируемые множества используются при формировании знаний о ПрО.

Отдельные объекты и отношения между ними в модели ПрО типизируются. Для этого вводится специальный язык, на котором описываются характеристики сущностей, используемых при представлении ПрО. Применение такого языка позволяет дать некоторую общую характеристику компонентам и структурам, которые извлечены субъектом при взаимодействии с ПрО. Им сопоставляется свойство, рассматриваемое как тип, определяющий эти структуры.

В ПрО могут существовать характеристики области, общие для всего пространства, в котором рассматривается модель ПрО. Например, в физике это характеристики полей. Для ПрО выделим особую характеристику, называемую кривизной. Она может определяться различными показателями, связанными с пространством, в котором рассматривается ПрО, но влияющими на свойства концептов ПрО.

Для некоторых конечных подмножеств элементов ПрО можно задать дополнительные отношения, позволяющие рассматривать это конечное множество как единую конструкцию — образ. Особенность образа заключается в том, что он взаимодействует в пределах модели ПрО как единая целостная структура: воздействие на один элемент образа передается, распространяется на все остальные элементы, входящие в образ. И наоборот, образ оказывает воздействие на другие концепты ПрО как множество воздействий, определяемых составляющими его концептами.

ОНТОЛОГИЯ

Представление об интеллекте субъекта, взаимодействующего с ПрО, неразрывно связано с семантическими свойствами этой области, смысловыми характеристиками ее объектов и связей между ними с их привязкой к тем реальным сущностям, которые входят в ПрО как в составную часть окружающей среды. Семантика является общим механизмом, обеспечивающим дополнительные возможности при обработке информации за счет использования семантических зависимостей, наиболее адекватно соответствующих внешнему окружению. Поэтому, создавая ИС, необходимо рассматривать структурное представление о среде на основе схем представления ПрО, которые отражали бы семантические зависимости, существующие между составляющими ее структуры. Принятым способом такого представления, сформированным в процессе развития человеческой цивилизации, является применение естественного языка.

Семантическое представление базируется на построениях, связанных с понятием «онтология». Именно онтологии, основанные на связи между элементами ПрО и естественным языком, отражают тот факт, что человек успешно применяет язык для формирования своих представлений о среде, с которой он взаимодействует, для описания этой среды и процессов мышления. В идеале ИС также должны действовать, используя языковые представления, поскольку этот способ эффективно применяется человеком. Это позволит общаться с ИС, понимать ее поведение и действия на уровне словесных формулировок, передавать ИС свои команды.

В современной информатике рассмотрение онтологий имеет различную направленность, но далее это понятие будет употребляться именно для учета тех семантических зависимостей, которые существуют в ПрО.

Онтология связывается с представлением ПрО, ориентированной на использование множеств как структурных составляющих ПрО. В этом представлении

на уровне естественного языка задаются отдельные элементы и классы элементов этой области, а также детализируются сущности ПрО с указанием структурной связи между различными элементами с помощью отношений. Далее рассматриваются именно такие онтологии.

Содержательно спецификация базового множества \mathcal{B} онтологии, ориентированной на ПрО, включает следующие составляющие элементы, которым одновременно приписываются типы элементов спецификации:

- имена классов элементов (понятия);
- индивиды как отдельные элементы классов, названных соответствующими понятиями;
- атрибуты (признаки, свойства) как отдельные характеристики элементов, принадлежащих классу. Эти элементы (понятия, индивиды, атрибуты) аналогично модели ПрО имеют единое название — концепты онтологии. К концептам добавляется один элемент $\{\varepsilon\}$, называемый неопределенным элементом, который не относится ни к одному из предыдущих концептов;
- бинарные отношения R_Ω , связывающие различные концепты онтологии между собой и представленные в виде предикатов.

На основе базового множества \mathcal{B} следующим образом строится язык L_Ω , используемый при описании онтологии. Пусть \mathcal{L} — некоторая логика, задаваемая своим синтаксисом и семантикой. В качестве примера логики приведем некоторую дескрипционную логику (ДЛ), рассматриваемую как фрагмент классической логики первого порядка [4]. Синтаксис ДЛ задается множеством атомарных концептов $CN = (A_1, \dots, A_m)$ и атомарных ролей $RN = \{R_1, \dots, R_n\}$ с логическими операциями над ними. Концепты связываются с индивидами и понятиями, а роли — с отношениями над ними. В зависимости от выбора логических операций получают различные возможные варианты логики. Соответственно можно получить различные онтологии со своим представлением окружающей среды.

Например, простейшую ДЛ \mathcal{EL} получают, добавляя к множеству концептов, связанных с базовым множеством, концепт \sqcap , операцию пересечения концептов $*$ и операцию существования \exists , применяемую в виде выражения $\exists R.A$. В результате имеют концепт, составляющие которого связаны отношением-ролью R с A . Семантика ДЛ \mathcal{EL} определяется ее интерпретацией \mathfrak{I} , сопоставляющей каждому концепту A подмножество $\mathfrak{I}(A)$ элементов из \mathcal{B} , а роли R — бинарное отношение $\mathfrak{I}(R)$ в $\mathcal{B} \times \mathcal{B}$. Интерпретация произвольного концепта в логике \mathcal{EL} задается индуктивно

$$\mathfrak{I}(\sqcap) = \mathcal{B},$$

$$\mathfrak{I}(A * B) = \mathfrak{I}(A) \cap \mathfrak{I}(B),$$

$$\mathfrak{I}(\exists R.A) = \{x \in \mathcal{B} \mid \text{существует } y \in \mathcal{B} \text{ такой, что } (x, y) \in \mathfrak{I}(R) \text{ и } y \in \mathfrak{I}(A)\}.$$

В общем случае, если рассматривается логика \mathcal{L} , то язык L_Ω определяется интерпретацией \mathfrak{I} формул логики \mathcal{L} в базовом множестве \mathcal{B} .

Онтология Ω задается с помощью логики \mathcal{L} , интерпретированной в базовом множестве \mathcal{B} , которое представлено естественным языком:

$$\Omega = \{x \mid x \in L_\Omega, \exists f \mathfrak{I}(f) = x \wedge f \in \mathcal{L}\}.$$

Иногда говорят, что онтология — это множество слов, терминов, предложений естественного языка, наделенное некоторой логикой.

Формально онтология Ω определяется как семерка символов, включающая три символа, обозначающих концепты: C — понятия, D — индивиды, A — атрибуты, и R_Ω — отношения, а также три понятия, связанные с логикой: \mathcal{L} — логика, \mathfrak{I} — функция интерпретации и L_Ω — язык, т.е. $\Omega = \{C, D, A, R_\Omega, \mathcal{L}, \mathfrak{I}, L_\Omega\}$.

Для одного и того же базового множества \mathcal{B} можно рассматривать различные логики, например, многочисленные варианты дескрипционной логики, модальную, конструктивную, мультимодальную, нечеткую и др. В каждом случае

получаются разные варианты онтологии, хотя и определенные для одного и того же базового множества. Отметим, что варианты построения онтологий, связанных с логикой, но отличающиеся от известных классических представлений, предлагались еще в работе [5].

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПрО

Определим теперь онтологическую модель ПрО, связывающую представление ПрО с ее описанием, которое можно получить с помощью онтологии. Такая модель соответствует обычному представлению окружающей среды, используемому человеком, включая постановку и решение задач.

Пусть заданы модель ПрО $\mathcal{SA} = (U, N, Id, M, Ud, \mathbf{R})$ над универсумом U и онтология $\Omega = \{C, D, A, \mathbf{R}_\Omega, \mathcal{L}, \mathfrak{I}, L_\Omega\}$. Онтологической проекцией ПрО \mathcal{SA}_Ω будем называть набор $\mathcal{SA}_\Omega = (\mathcal{SA}, \Omega, V, V^*)$, состоящий из модели ПрО и онтологии, которые связаны частичными отображениями из модели ПрО в онтологию Ω , $V: \mathcal{SA} \rightarrow \Omega$, где отображение $V = (V_N, V_I, V_M, V_\emptyset, V_R)$ состоит из следующих компонентов:

$$V_N: N \rightarrow C, V_I: Id \rightarrow D, V_M: M \rightarrow A, V_\emptyset: Ud \rightarrow \{\varepsilon\}, V_R: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}_\Omega.$$

Каждое из четырех отображений: V_N, V_I, V_M, V_R , входящих в отображение V , является частичным отображением, которое сопоставляет элементы онтологии не всем компонентам модели ПрО в силу того, что не все компоненты ПрО имеют свой онтологический образ. Кроме того, не все элементы онтологии имеют свой прообраз в модели ПрО, поскольку отображение V не обязательно сюръективно.

Образы отображений (V_N, V_I, V_M, V_R) обозначим соответственно $C^V, D^V, A^V, \mathbf{R}^*$ и определим новую производную онтологию $\Omega^* = \{C^V, D^V, A^V, \mathbf{R}^*, \mathcal{L}, \mathfrak{I}^V, L_\Omega^V\}$ относительно отображения V . Для производной онтологии отображение $V = (V_N, V_I, V_M, V_\emptyset, V_R)$ сюръективно. Соответственно в Ω^* базовое множество \mathcal{B} онтологии Ω заменяется базовым множеством \mathcal{B}^V , включающим множества C^V, D^V, A^V . Интерпретация \mathfrak{I}^V определена для измененного базового множества \mathcal{B}^V . Одновременно язык L_Ω заменяется языком L_Ω^V . Множество отношений \mathbf{R}^* состоит из тех отношений множества \mathbf{R} , которые определены на базовом множестве \mathcal{B}^V . Таким образом, строится производная онтология Ω^* вместе с проекцией на нее онтологии Ω — $P_\Omega: \Omega \rightarrow \Omega^*$.

Теперь из моделируемой ПрО \mathcal{SA} выделим часть, для которой существуют онтологические образы. Это прообразы отображений $(V_N, V_I, V_M, V_\emptyset)$ из \mathcal{SA} в онтологию Ω . Одновременно на таким образом определенное множество распространяется логика \mathcal{L} с ее синтаксисом и семантикой. В результате получим множество элементов модели ПрО, именованное элементами онтологии Ω с отношениями из этой онтологии и логикой, определяющей возможность вывода в данном множестве.

Эту часть преобразованной модели ПрО будем называть онтологической моделью \mathcal{SA}^* , полученной в результате применения сопряженного отображения $V^*: \Omega^* \rightarrow \mathcal{SA}^*$ к производной онтологии Ω^* . Онтологическая модель естественным образом вкладывается в модель ПрО, $In: \mathcal{SA}^* \rightarrow \mathcal{SA}$.

Полученная система областей и преобразований представлена диаграммой на рис. 1.

Онтологическая модель ПрО — основа построения ИС. Задачи, которые ставятся перед ИС, представляются в виде формул логики, являющейся составляющей модели \mathcal{SA}^* . Стандартная задача, решаемая ИС, задается набором формул логики \mathcal{L} , для которого нужно показать, что из него можно вывести формулу, рассматриваемую как результат решения задачи. Причем процесс решения в онто-

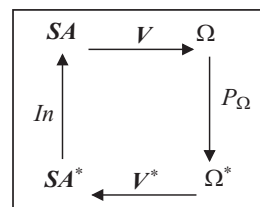


Рис. 1

логической модели ассоциируется с человеком, формулирующим мысли на естественном языке.

Справедлива следующая теорема.

Теорема 1. Пусть для модели предметной области SA существует ее онтологическая модель SA^* , связанная с онтологией, определяемой дескрипционной логикой. Тогда любая задача в модели предметной области SA , сформулированная в ее онтологической модели, разрешима.

Действительно, любая задача, относящаяся к модели ПрО SA , рассматривается в ее онтологической модели SA как формула, заданная в логике, которую онтология индуцирует в модели ПрО. По условию теоремы это дескрипционная логика, которая может быть погружена в логику предикатов с двумя переменными. Но такая логика является разрешимой [6]. Поэтому и любую задачу, сформулированную в модели SA^* как формула такой логики, можно решить, что и требовалось доказать.

УРОВНИ ИНТЕЛЛЕКТА

Экспериментальные исследования процессов, связанных с понятием интеллекта, показывают, что люди по-разному решают одни и те же задачи. Например, существуют математические проблемы, которые безуспешно пытаются решить на протяжении многих лет, пока не появляется человек, получающий искомое решение. В этом случае он вносит необходимые для решения изменения в модель ПрО либо находит новый путь использования уже существующих элементов.

Другими словами, имеются отличия в интеллектах тех, кто решает проблему. Поэтому построивший наиболее подходящую модель или выбравший удачный путь опережает того, кому это не под силу. Естественно предположить, что и у настроенных на решение задач ИС также возможны различные уровни интеллекта. Например, в [7] при рассмотрении проблемы создания супермозга (суперинтеллекта) предполагается, что возможны три типа сверхразума (интеллекта).

Применительно к проблеме создания ИС рассмотрим классификацию интеллекта, сопоставленную с его возможностями. Интеллект существует в различных формах, допускающих их описание по степеням (уровням), исходя из определения интеллекта. Дадим характеристику этих уровней. Каждый уровень определяется разными действиями, соотносимыми с последовательно усложняющимися формами интеллекта [8, 9].

Интеллект нулевого уровня (0-интеллект) — конечный набор алгоритмов, используемых для решения задач в заданной и неизменной модели окружающей среды. Поставленная задача связывается с одним из имеющихся алгоритмов. Для отождествления с этим уровнем необходимо знать каждый алгоритм, выбирать его из существующих алгоритмов и уметь связывать задачу с решающим ее алгоритмом, а также применять алгоритм к условию задачи, чтобы получить ее решение.

Это один пример из наиболее часто встречающихся проявлений интеллекта человека, который, обучаясь, строит модель, запоминает необходимые правила действия в ней и применяет их для решения соответствующих задач. На развитие 0-интеллекта направлено обучение в школе. Другими примерами использования могут являться правила этикета, корпоративные правила компаний или армейские уставы.

Интеллект первого уровня (1-интеллект) — это готовая модель ПрО с успешно функционирующими методами обработки информации в ПрО, позволяющими построить решение задачи как композицию из множества известных и заданных в среде (ПрО) преобразований (отношений, алгоритмов). В этом варианте алгоритм строится из готовых и сохраненных элементов. Таким образом, уже задана исходная модель ПрО, а решение задач в ней заключается в отыскании подходящей композиции известных компонентов. Например, решение шахматной задачи или этюда в ПрО — шахматная доска и набор фигур, или вычисление интеграла для выражения, построенного из элементарных функций, или построение примитивно-рекурсивной функции из набора заданных элементов (0, 1, операции: выбор компонента, подстановка, примитивная рекурсия).

Интеллект полуторного уровня (1.5-интеллект) — это расширение предыдущего 1-интеллекта за счет механизмов сохранения удачных композиций алгоритмов (обучение системы) вместе с классами задач, которые решаются этими алгоритмами в рассматриваемой модели ПрО. Интеллект расширяется путем накопления опыта решения задач для фиксированной модели ПрО. К 1.5-интеллекту можно отнести использование нескольких готовых моделей со своими алгоритмами решения задач в них.

Интеллект второго уровня (2-интеллект) — это неотъемлемое качество субъекта, ориентированного на успешное взаимодействие с ПрО, рассматриваемой как окружающая среда. Причем модель ПрО в данном случае не является неизменной. Она строится или модифицируется субъектом с применением исходно заданных или сформированных им методов анализа и синтеза информации, полученной с помощью средств взаимодействия субъекта с ПрО. Это позволяет субъекту виртуально концептуализировать ПрО, организовывать, сохранять и модифицировать полученное концептуальное представление (интеллектуальное отражение) как форму своего когнитивного опыта, который используется им при организации его взаимодействия со средой на основании решения задач в модели ПрО.

Отметим, что 2-интеллект состоит из классов интеллектов, соответствующих сложности ПрО, в которой действует субъект. Чем сложнее область, с которой взаимодействует субъект, и чем больше ресурсов ему требуется для построения модели, тем сильнее оказывается интеллект в классе в 2-интеллекте, поскольку он должен адекватно взаимодействовать с более сложными областями. Это замечание справедливо и для определения интеллектов последующих уровней.

Концептуализация понимается как задание спецификации среды на уровне отдельных элементов и связывающих их преобразований. Отличие 2-интеллекта от 1-интеллекта заключается в том, что исходное пространство и сама модель расширяются, перестраиваются, уточняются, чтобы решить поставленную задачу за счет направленно полученной информации. К алгоритму поиска решения добавляются алгоритмы анализа и синтеза информации, определяющей ПрО.

Интеллект уровня 2.2 (2.2-интеллект) — это пополнение 2-интеллекта путем включения в алгоритмы синтеза информации о возможности введения в модель ПрО гипотетических и мифологизированных представлений об объектах и связях между ними. Другими словами, предполагается, что в ПрО имеются элементы, которые не наблюдаются субъектом, но существование которых может объяснить выполнение отдельных процессов в модели. При этом возникает дополнительная цель, состоящая в усовершенствовании средств наблюдения за ПрО.

Интеллект уровня 2.5 (2.5-интеллект) — это пополнение 2.2-интеллекта за счет использования различных видов логики при формировании новых знаний о ПрО. Эти средства позволяют изменять процесс моделирования ПрО. Они допускают работу с неполной информацией, внедрение нечетких и вероятностных рассуждений в логические построения и оценки. Возможно построение различных моделей для одной и той же ПрО, оперирование с различными оценками и интерпретациями событий и ситуаций в ПрО.

Каждый последующий уровень интеллекта рассматривается как дополнение предыдущего новыми свойствами и качествами, расширяющими процессы построения моделей и решения задач.

Интеллект третьего уровня (3-интеллект) связан с решением задач в ПрО, которая состоит из различных миров (многомировое пространство). В каждом мире задаются свои условия, спецификация и логика, но миры связаны между собой. Задача ее решения применяется информация из различных миров, связанных с реальным миром. Таким образом, 3-интеллект решает задачу, используя ее частичные решения, полученные в разных мирах.

Реализацию 3-интеллекта можно рассматривать в сети из отдельных субъектов, обладающих 2.5-интеллектом. Эти субъекты связаны между собой транссвязями (вычислимыми связями), которые при передаче информации между субъектами предполагают возможность одновременного преобразования этой информа-

ции из формата элемента ее образования в формат элемента сети, которому эта информация передается. Такая сеть называется транссетью. Ее можно использовать и для определения последующих уровней интеллекта.

Интеллект четвертого уровня (4-интеллект) определяется не только спецификацией реального мира, но и его математической структурой (топологией, геометрией, алгебраическими конструкциями, размерностью пространств). Решая задачу, этот интеллект может выбирать и перестраивать структуру основного пространства, логику рассуждений в нем, а затем выбирать способ моделирования реального мира и поиска возможных решений в нем тех задач, которые необходимо решать, используя 4-интеллект.

Интеллект пятого уровня (5-интеллект) — свойство субъекта, определяющее возможность решения им задач в многомировом пространстве, причем различные миры (предметные области) могут иметь собственные формальные структуры и свои логики рассуждений. Этот интеллект позволяет объединять решения между собой, пополняя модели различных ПрО новыми подходами к их созданию и использованию, заимствованными из других ПрО.

Утверждение 1. Можно реализовать 5-интеллект транссетью, состоящей из элементов с интеллектом 4-го уровня.

Интеллект уровня 5.5 (5.5-интеллект) определяется возможностями для транссети объектов, обладающих 5-интеллектом, динамически во время решения задач создавать и использовать в транссети новые объекты, расширяя транссеть, представляющую 5.5-интеллект.

Для сравнения различных уровней интеллекта введем для них отношение упорядоченности. Пусть заданы два интеллекта: \mathfrak{A}_i и \mathfrak{B}_j , соответственно уровней i и j , $i < j$. Будем говорить, что интеллект \mathfrak{A}_i слабее интеллекта \mathfrak{B}_j , если найдутся такие ограничения μ на интеллект \mathfrak{B}_j , что, применив их к \mathfrak{B}_j , в результате получим интеллект $\mathfrak{B}_j(\mu)$, который решит в ПрО те же задачи, которые решаются с применением интеллекта \mathfrak{A}_i . Иными словами, один интеллект может быть сведен к другому за счет применения некоторых ограничений на его действия.

Ранее были введены уровни интеллекта, которые определялись элементами из множества $I = \{0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 5.5\}$. Тогда справедлив следующий результат.

Теорема 2. Множество интеллектов \mathfrak{A}_i ($i \in I$) множества I с одинаковой логикой линейно упорядочено, т.е. для каждой пары элементов $i < k$ множества I справедливо отношение между интеллектами $\mathfrak{A}_i, \mathfrak{A}_j, \mathfrak{A}_i < \mathfrak{A}_j$.

Не исследованы вопросы, может ли интеллект более высокого уровня но с более слабой логикой быть слабее интеллекта более низкого уровня, но с более мощной логикой. Вероятнее всего, что это возможно, но автор настоящей статьи не имеет доказательства.

Не исследована также проблема определения уровней интеллекта, а именно наличие последующих уровней интеллекта (шестого и выше), формирования их границ и направления возможных расширений интеллекта, связанных с построением и использованием более сильных интеллектов.

ПРИМЕРЫ ИС

Рассмотрим простые примеры ИС, использующие постоянную модель для представления ПрО, т.е. в своей деятельности они не учитывают возможных изменений ПрО и не имеют органов ее восприятия. Сама модель ПрО считается заданной, а основная задача ИС состоит в решении задач в этой модели с использованием готовых алгоритмов. Поэтому, естественно, эти варианты ИС самые простые по уровню интеллекта. Отметим, что в рассматриваемом варианте низкоуровневый интеллект не является примитивным и легко доступным.

Вначале рассмотрим ПрО $\mathfrak{N}_0 = (N, N)$, состоящую из двух пространств натуральных чисел $N = \{0, 1, 2, \dots\}$. Эти пространства связаны отображением, определяемым примитивно-рекурсивной функцией $p(n)$, которая аргументу n сопоставляет $n+1$ простое число p_n из ряда натуральных чисел N . Модель области \mathfrak{N}_0 в этом случае совпадает с самой областью, пополняющейся онтологией, включаю-

щей слова, понятия, атрибуты, с помощью которых называются все составляющие этой ПрО. Отметим, что в состав онтологии входят также понятия элементарных функций, операций подстановки и примитивной рекурсии, используемые при определении примитивно-рекурсивных функций [8].

В задаче из \mathfrak{N}_0 выбирается произвольное число n . Ее решение заключается в применении алгоритма вычисления числа p_n . Поэтому ИС, использующая модель области \mathfrak{N}_0 и алгоритм решения задач на основе функции $p(n)$, по определению обладает 0-интеллектом. Таким образом, справедлива следующая теорема.

Теорема 3. Для ПрО \mathfrak{N}_0 можно эффективно построить ИС с уровнем 0-интеллекта, которая решает задачу вычисления n -го простого числа в пространстве натуральных чисел по его номеру n .

Теперь рассмотрим более сложный пример, основанный на использовании ПрО \mathfrak{N} , которая состоит из двух пространств: A и B при $A = N \times N, B = N$. Пространство N , как и в предыдущем примере, — это дискретное пространство натуральных чисел $N = \{0, 1, 2, \dots\}$. Пространства A и B связаны вычисляемой связью \mathbb{F} , действие которой определяется связываемыми элементами. Другими словами, действие связи \mathbb{F} на элемент $(a_1, a_2) \in A$ зависит от значения элементов a_1 и a_2 . Такая связь является примером транссвязи, описанной при определении уровня интеллекта.

Значение $\mathbb{F}(a_1, a_2)$ находится следующим образом: $\mathbb{F}(a_1, a_2) = K^2(a_1, a_2)$, где $K^2(a_1, a_2)$ — функция Клини, универсальная для всех одноместных частично рекурсивных функций [10], a_1 — это номер некоторой функции $f(x)$, а $K^2(a_1, a_2) = f(a_2)$ — значение этой функции для аргумента a_2 . Транссвязь \mathbb{F} сопоставляет элементу (a_1, a_2) элемент $b = f(a_2) \in B$.

Онтологическая модель Ω_0 ПрО \mathfrak{N} присваивает всем элементам ПрО имена, которые использовались ранее при описании области: натуральные числа, рекурсивные функции, нумерация, функция Клини, транссвязь и т.д. Задача в ПрО \mathfrak{N} задается парой натуральных чисел (n, m) , а решение задачи состоит в вычислении значения функции с номером Клини n для аргумента m .

ИС, решающая задачи в ПрО, включает алгоритм, преобразующий клиниевский номер рекурсивной функции непосредственно в саму функцию, и алгоритм, который по представлению рекурсивной функции через элементарные функции и операции подстановки и примитивной рекурсии вычисляет эту функцию для заданного аргумента. Таким образом, для ИС задана исходная модель ПрО, а алгоритм ее работы выбирается в процессе обработки соответствующей информации из заданных компонентов, определяющих представление произвольной рекурсивной функции. Это соответствует 1-интеллекту. Поэтому справедлив следующий результат.

Теорема 4. Для ПрО $\mathfrak{N} = (N \times N, N)$ можно эффективно построить ИС с уровнем 1-интеллекта, которая решает задачи, задаваемые парой натуральных чисел в этой области.

Приведенные примеры показывают, что даже интеллекты нижних уровней в действительности не только не являются тривиальными, а могут быть достаточно сложными конструкциями.

Наконец, отметим, что ИС, которую можно построить по предложенной ранее технологии, основанной на создании онтологической модели ПрО и онтологии с дескрипционной логикой, является примером системы, обладающей 2-интеллектом. Система вначале моделирует ПрО, а затем решает в ней поставленные задачи.

Отметим, что проблема моделирования ПрО связана с онтологией и представляющей ее логикой, а решение задач ИС зависит от модели ПрО, которую система может построить. Существенно, что при решении можно использовать когнитивную архитектуру [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание интеллектуальных систем зависит от двух основных условий: предметной области, в которой должна действовать (решать задачи) система,

и уровня интеллекта, используемого при решении этих задач. Настоящая работа представляет основные понятия, которые в последующем будут развиты и на которых базируется теория создания интеллектуальных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейтус В.Ю. Введение в теорию интеллектуальных систем. Основные представления. Саар-брюкен: Palmarium Acad. Publ., 2015. 189 с.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция. Пер. с англ. Москва: Изд-во «Э», 2017. 208 с.
3. Letichevsky A. Theory of interaction, insertion modeling, and cognitive architectures. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2014. Vol. 8. P. 19–32.
4. Baader F., Nutt W. Basic description logics. *The Description Logic Handbook*. Baader F., Calvanese D., McGuinness D.L., Nardi D., Pater-Schneider P.F. (Eds.). Cambridge: Cambridge Univer. Press, 2007. P. 47–104.
5. Мейтус В.Ю. Проблемы разработки интеллектуальных систем. *Материалы XXI Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»* (Севастополь, 12–16 сент. 2011 г.). Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 43–46.
6. Mortimer M. On languages with two variables. *Zeitschrift für Mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik*. 1975. Vol. 21. P. 135–140.
7. Бостром Н. Искусственный интеллект. Этапы. Угрозы. Стратегии. Москва: ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2016. 496 с.
8. Мейтус В.Ю. Знания в 1-интеллектуальных системах. *Proc. of 18th Intern. Conf. System Analysis and Information Technologies (SAIT 2016)* (Kyiv, May 30–June 2, 2016). Kyiv: ESC “IASA” NTUU “KPI”, 2016. P. 229–230.
9. Мейтус В.Ю. Рівні інтелекту в інтелектуальних системах. *Наукові записки НаУКМА*. 2016. Т. 190. Комп’ютерні науки. С. 11–15.
10. Мальцев А.И. Алгоритмы и рекурсивные функции. Москва: Наука, 1965. 391 с.

Надійшла до редакції 18.07.2017

В.Ю. Мейтус

ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ. РІВНІ ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Описано розроблення теорії побудови інтелектуальних систем, створених для розв’язання задач у довільних предметних областях. Розглянуто процеси моделювання предметної області на основі використання онтологічного подання, що включає логіку, і визначення окремих елементів моделі як триад, які складаються з екстенціонала, інтенціонала і конотації. Запропоновано означення рівнів інтелекту, кожний з яких відповідає рівню можливостей інтелектуальної системи.

Ключові слова: інтелект, інтелектуальна система, рівень інтелекту, предметна область, онтологія, онтологічна модель.

V. Meytus

PROBLEMS OF CONSTRUCTING INTELLIGENT SYSTEMS. LEVELS OF INTELLIGENCE

Abstract. The study is devoted to the development of the theory of construction of intelligent systems, created to solve problems in arbitrary subject areas. The decision process consists of modeling the subject area based on the use of an ontological representation, involving logic, and assigning individual elements of the model as triads consisting of an extensional, intensional, and connotation. The paper proposes definitions of the levels of intelligence. Each such level determines its level of capabilities of the intelligent system.

Keywords: intellect, intelligent system, intelligence level, subject area, ontology, ontological model.

Мейтус Владимир Юльевич,

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