Методы искусственного интеллекта

Лекция 2. Методы, основанные на знаниях. Онтологии

Тема 4. Методы, основанные на знаниях

Агенты, основанные на знаниях

- **Идея**: представлять имеющуюся информацию о задаче (наблюдаемом состоянии и закономерностях) в таком виде, чтобы можно было *осуществлять преобразования* этой информации, в том числе, получая *новую информацию, явным образом не заданную*
  - Вывод (логический?)
  - Характер этих *преобразований* зависит от *способа представления знаний*
    - Та или иная формальная модель
      - Логика высказываний (пропозициональная логика)
      - Логика предикатов (первого порядка)
      - Дескрипционные логики
      - …
- Достоинства:
  - Способны принимать к исполнению новые задачи
  - Способны получать новые инструкции и усваивать новые знания
  - Способны приспосабливаться к изменениям в среде, обновляя знания

Агенты, основанные на знаниях

База знаний – множество высказываний на языке представления знаний.

Интерфейс:
Tell – пополнение базы знаний
Ask – запрос к базе знаний

В *логических агентах* ответ на запрос, переданный с помощью Ask, *должен следовать* из того, что было сообщено базе знаний посредством Tell.

Схема агента, основанного на знаниях

```
function KB-AGENT(percept) returns an action
  persistent: KB, a knowledge base
              t, a counter, initially 0, indicating time

  TELL(KB, MAKE-PERCEPT-SENTENCE(percept, t))
  action ← ASK(KB, MAKE-ACTION-QUERY(t))
  TELL(KB, MAKE-ACTION-SENTENCE(action, t))
  t ← t + 1
  return action
```

Общие термины

Синтаксис языка представления – правила формирования высказываний.

Семантика определяет истинность каждого из высказываний применительно к каждому из *возможных миров*.

- Модель – сопоставление конкретных значений компонентам высказывания.
  - Высказывание α является истинным в модели *m*
  - *m является моделью* высказывания α

$\alpha \models \beta$ – **“**высказывание α *влечет за собой* высказывание β”
Тогда и только тогда, когда в любой модели, в которой высказывание α является истинным, β также истинно.

$KB \vdash_i \alpha$ - “высказывание α получено путем логического вывода из базы знаний *KB* с помощью алгоритма *i*” или "алгоритм *i* позволяет вывести логическим путем высказывание α из базы знаний KB".

модели

A	B	$A \rightarrow B$
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

$(A \rightarrow B) \wedge A \models B$

Важные свойства алгоритма вывода

Алгоритм логического вывода, позволяющий получить только такие высказывания, которые действительно *следуют* из базы знаний, называется **непротиворечивым**, или **сохраняющим истинность**.

Алгоритм логического вывода называется **полным**, если позволяет вывести *любое* высказывание, которое *следует* из базы знаний.

Необходимое допущение (адекватность модели)

Если база знаний является истинной в реальном мире, то любое высказывание α, полученное логическим путем из этой базы знаний с помощью непротиворечивой процедуры логического вывода, является также истинным в реальном мире.

Логика первого порядка

Структура:

- Объекты
  - John, Mary, Jacob, Jane, …
- Отношения (множество кортежей)
  - Friend = {<John, Jacob>, <Mary, Jane>}
- Функции
  - Mother = {<John, Mary>} или Mother(John) = Mary

Синтаксис

```
Sentence –> AtomicSentence
                | ( Sentence Connective Sentence )
                | Quantifier Variable, ... Sentence
                | ¬Sentence
AtomicSentence –> Predicate (Term, ...) | Term = Term
          Term –> Function (Term, ...)
                | Constant
                | Variable
Connective –> ⇒ | ∧ | ∨ | ⇔
    Quantifier –> ∃ | ∀
      Constant –> A | X | John | ...
      Variable –> a | x | s | ...
     Predicate –> Before | HasColor | Raining | ...
      Function –> Mother | LeftLeg | ...
```

Терм - обозначение объекта (прямое или косвенное). Терм без переменных – базовый терм.

Примеры синтаксически корректных высказываний:

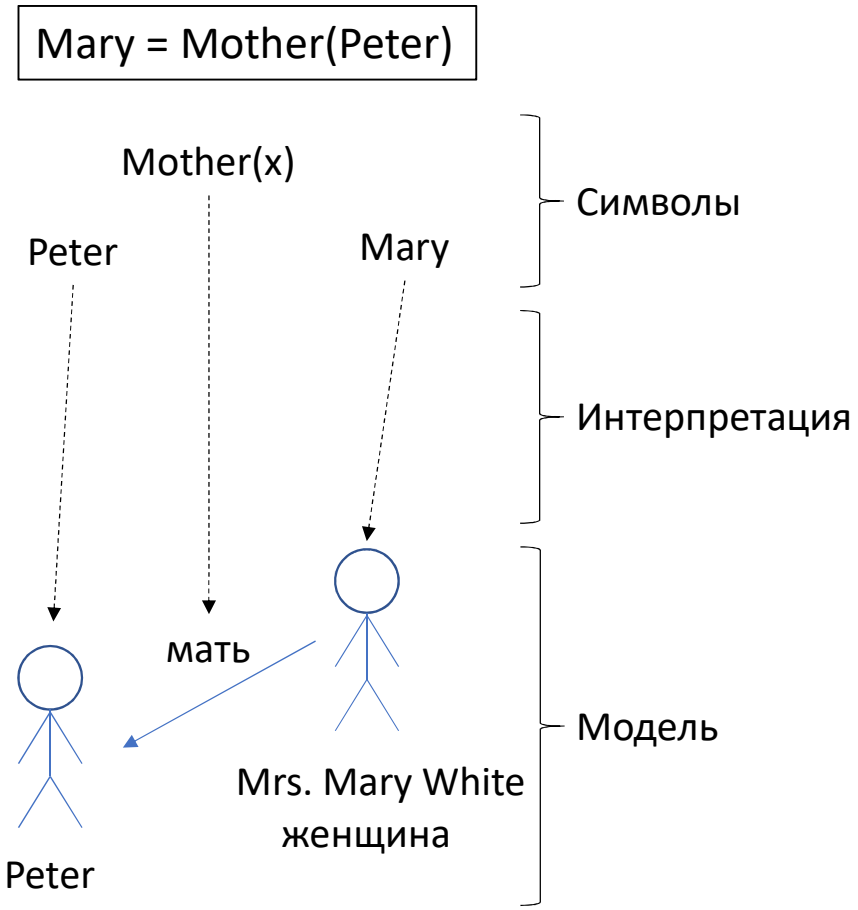
$\forall x, y\big(y = Mother(x)\big) \Rightarrow Woman(y)$

$LeftLeg(John) = Mary$

Семантика

Семантика связывает высказывания с объектами и отношениями реального мира, для того чтобы можно было определить истинность. Чтобы иметь возможность решить такую задачу, требуется **интерпретация**, которая определяет, на какие именно объекты, отношения и функции ссылаются те или иные константные, предикатные и функциональные символы.

Пример интерпретации:
Woman(*x*) – «быть женщиной»
Mother(*x*) – «мать объекта x»
LeftLeg(*x*) – «левая нога объекта x»
John – Mr. John White, садовник
Mary – Mrs. Mary White, жена John White



Кванторы

$\forall \boldsymbol{x}$ **- квантор всеобщности** («Для всех x»)

$\forall x King(x) \Rightarrow Person(x)$ – *«Для всех x, если x – король, то x – человек».*

Высказывание $\forall xP$ истинно в данной модели при данной интерпретации, если выражение *P* истинно при всех возможных **расширенных интерпретациях**, сформированных из данной интерпретации, где каждая расширенная интерпретация задает элемент проблемной области, на которую ссылается объект *x*.

$\exists \boldsymbol{x}$ **- квантор существования** («Существует x, такой, что …», или «Для некоторого x...»)

Высказывание $\exists xP$ истинно в данной конкретной модели при данной конкретной интерпретации, если выражение *P* истинно по меньшей мере в одной **расширенной интерпретации**, в которой присваивается *x* одному из элементов проблемной области.

Использование логики первого порядка. Утверждения и запросы

Высказывания вводятся в базу знаний с помощью операции Tell. Такие высказывания называются **утверждениями**. Например, можно ввести утверждения, что Джон — король и что короли — люди:

Tell(KB, $King(John)$)

Tell(KB, $\forall x King(x) \Rightarrow Person(x)$)

Мы можем задавать вопросы о содержимом базы знаний с использованием операции Ask:

Ask(KB, $King(John)$)

Вопросы, заданные с помощью операции Ask, называются **запросами**, или **целями**. На любой запрос, который логически следует из базы знаний, *должен* быть получен утвердительный ответ:

Ask(KB, $Person(John)$) --- True

Ask(KB, $\exists x Person(x)$) --- True (**И???...**)

Подстановка (список связывания)

Подстановка, или **список связывания** – множество пар "переменная—терм".

То есть:

Ask(KB, $\exists x Person(x)$) --- **{x/John}**

Пример: проблемная область родства

Объекты: люди.

Предикаты: (унарные) Male, Female;

(бинарные) Parent, Sibling, Brother, Sister, Child, Daughter, Son,

Spouse, Wife, Husband, Grandparent, Grandchild,

Cousin, Aunt, Uncle.

Функции: Father, Mother.

Пример: проблемная область родства

Мать — это родитель женского пола:

$$\forall x, y\ Mother(x) = y \Leftrightarrow Female(y) \wedge Parent(y, x)$$

Муж — это супруг мужского пола:

$$\forall w, h\ Husband(h, w) \Leftrightarrow Male(h) \wedge Spouse(h, w)$$

Мужчины и женщины — непересекающиеся категории людей:

$$\forall x\ Male(x) \Leftrightarrow \neg Female(x)$$

Отношения между родителями и детьми являются взаимно противоположными:

$$\forall p, c\ Parent(p, c) \Leftrightarrow Child(c, p)$$

Дедушка или бабушка — это родитель родителя:

$$\forall g, c\ Grandparent(g, c) \Leftrightarrow \exists p\ Parent(g, p) \wedge Parent(p, c)$$

И т.д.

Аксиомы и теоремы

- Каждое из этих высказываний может рассматриваться как одна из **аксиом** в проблемной области родства. Аксиомы предоставляют основную фактическую информацию, на основании которой могут быть получены логическим путем полезные заключения.
- **Теоремы** – высказывания, которые следуют из аксиом.
- С логической точки зрения в базе знаний должны содержаться только аксиомы, но не теоремы, поскольку теоремы не увеличивают множество заключений, которые следуют из базы знаний. Но с практической точки зрения важным свойством теорем является то, что они *уменьшают вычислительные издержки* на логический вывод новых высказываний.

Вывод в логике первого порядка

1. Прямой логический вывод (дедуктивные базы знаний, продукционные системы).
2. Обратный логический вывод (системы логического программирования).
   - Prolog
3. Системы доказательства теорем на основе резолюций.

Хорновские выражения

Хорновское выражение представляет собой дизъюнкцию литералов, среди которых положительным является не больше чем один. Например:

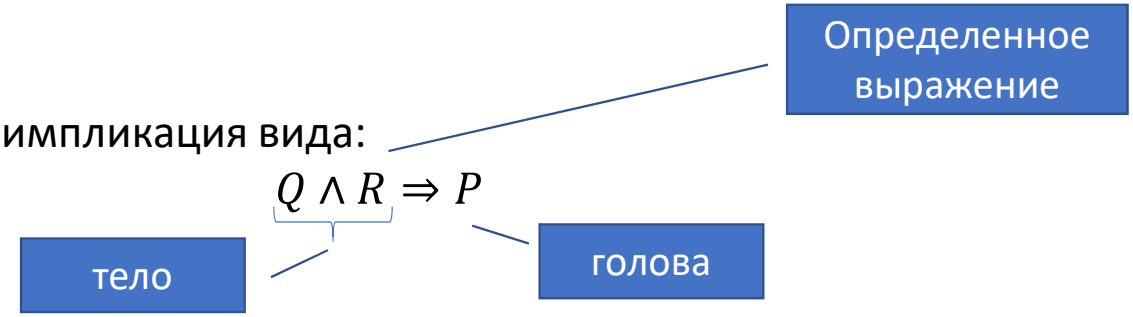
$\mathrm{P} \vee \neg Q \vee \neg R$ – хорновское

$\neg Q \vee \neg R$ – хорновское

$\mathrm{P} \vee Q$ – *не* хорновское

Зачем они нужны:

1) Может быть записано как импликация вида:



2) Логический вывод может осуществляться с помощью алгоритма прямого логического вывода и обратного логического вывода.

3) Получение логических следствий может осуществляться за время, **линейно зависящее от размера БЗ** (для пропозициональной логики).

Хорновские выражения

$\mathrm{P} \vee \neg Q \vee \neg R$	$Q \wedge R \Rightarrow P$		**Определенное выражение**
P	$\mathrm{T}rue \Rightarrow P$	Факт	
$\neg Q \vee \neg R$	$Q \wedge R \Rightarrow False$	Ограничение	

В логике первого порядка:

$\mathrm{King(x)} \wedge \mathrm{Greedy(x)} \Rightarrow \mathrm{Evil(x)}$ соответствует $\forall x\ \mathrm{King(x)} \wedge \mathrm{Greedy(x)} \Rightarrow \mathrm{Evil(x)}$

Обобщенное правило отделения (modus ponens)

Для атомарных высказываний p_i, p_i' и q, если существует подстановка θ, такая, что Subst(θ, p_i') = Subst(θ, p_i), то для всех *i* имеет место следующее:

$$\frac{p_1', p_2', \ldots, p_n', (p_1 \wedge p_2 \wedge \cdots \wedge p_n \Rightarrow q)}{Subst(\theta, q)}$$

Например:

$King(x) \wedge Greedy(x) \Rightarrow Evil(x)$
$Greedy(m)$
$King(John)$

Тогда:

p_1' - $King(John)$; p_2' - $Greedy(m)$
p_1 - $King(x)$; p_2 - $Greedy(x)$; q - $Evil(x)$
θ - $\{x/John, m/John\}$
$Subst(\theta, q)$ - $Evil(John)$

Унификация

Применение обобщенного М.Р. связано с поиском подстановок, в результате которых различные логические выражения становятся идентичными. Этот процесс называется **унификацией** и является ключевым компонентом любых алгоритмов вывода в логике первого порядка.

Unify принимает на входе два высказывания и возвращает для них **унификатор**, если таковой существует:

$$Unify(p, q) = \theta, \text{ где } Subst(\theta, p) = Subst(\theta, q)$$

Например:

$Unify(Knows(John, x), Knows(John, Jane)) = \{x/Jane\}$

$Unify(Knows(John, x), Knows(y, Bill)) = \{x/Bill\,, y/John\}$

$Unify(Knows(John, x), Knows(y, Mother(y))) = \{y/John\,, x/Mother(John)\}$

$Unify(Knows(John, x), Knows(y, z)) = \{y/John\,, x/z\}$

Алгоритм унификации

- **Идея:** рекурсивно исследовать два выражения одновременно, "бок о бок", наряду с этим формируя унификатор, но создавать ситуацию неудачного завершения, если две соответствующие точки в полученных таким образом структурах не совпадают.

- **Особый случай:** если переменная согласуется со сложным термом, необходимо провести проверку того, встречается ли сама эта переменная внутри терма; в случае положительного ответа на данный вопрос согласование оканчивается неудачей, поскольку невозможно сформировать какой-либо совместимый унификатор.

- **Детально:** Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход

Простой алгоритм прямого логического вывода

- **Идея:** В каждой итерации добавлять к базе знаний КВ все атомарные высказывания, которые могут быть выведены за один этап из импликационных высказываний и атомарных высказываний, которые уже находятся в базе знаний.

- **N.B.: Для хорновских баз знаний**!

Простой алгоритм прямого логического вывода

function FOL-FC-ASK(KB, α) **returns** a substitution or *false*
  inputs: KB, the knowledge base, a set of first-order definite clauses
    α, the query, an atomic sentence

  while *true* **do**
    new $\leftarrow \{\}$ // *The set of new sentences inferred on each iteration*
    for each *rule* **in** KB **do**
      $(p_1 \wedge \ldots \wedge p_n \Rightarrow q) \leftarrow$ STANDARDIZE-VARIABLES(*rule*)
      for each θ such that SUBST($\theta, p_1 \wedge \ldots \wedge p_n$) = SUBST($\theta, p'_1 \wedge \ldots \wedge p'_n$)
          for some $p'_1, \ldots, p'_n$ in KB
        $q' \leftarrow$ SUBST(θ, q)
        if q' does not unify with some sentence already in KB or *new* **then**
          add q' to *new*
          $\phi \leftarrow$ UNIFY(q', α)
          if ϕ is not *failure* **then return** ϕ
    if *new* $= \{\}$ **then return** *false*
    add *new* to KB

Простой алгоритм прямого логического вывода

function FOL-FC-ASK(KB, α) **returns** a substitution or *false*
  inputs: KB, the knowledge base, a set of first-order definite clauses
    α, the query, an atomic sentence

  while *true* **do**
    new $\leftarrow \{\}$ // *The set of new sentences inferred on each iteration*
    for each *rule* **in** KB **do**
      $(p_1 \wedge \ldots \wedge p_n \Rightarrow q) \leftarrow$ STANDARDIZE-VARIABLES(*rule*)
      for each θ such that SUBST($\theta, p_1 \wedge \ldots \wedge p_n$) = SUBST($\theta, p'_1 \wedge \ldots \wedge p'_n$)
          for some $p'_1, \ldots, p'_n$ in KB
        $q' \leftarrow$ SUBST(θ, q)
        if q' does not unify with some sentence already in KB or *new* **then**
          add q' to *new*
          $\phi \leftarrow$ UNIFY(q', α)
          if ϕ is not *failure* **then return** ϕ
    if *new* $= \{\}$ **then return** *false*
    add *new* to KB

База знаний:

1. little(Cat)
2. medium(Tiger)
3. big(Elephant)
4. strong(Tiger)

} Факты (p_i)

5. medium(x) $\wedge$ strong(x) => powerful(x)
6. big(x) => powerful(x)
7. powerful(x) => dangerous(x)

Запрос:
ASK(dangerous(Tiger))

Свойства рассмотренного алгоритма прямого логического вывода

1. **Непротиворечив,** поскольку каждый этап представляет собой применение обобщенного М.Р., которое само по себе непротиворечиво.
2. **Полон**, применительно к базам знаний с *определенными выражениями*, то есть, способен ответить на любой запрос, ответы на который следуют из БЗ.

Однако в приведенной реализации:

- возможна генерация бесконечного числа фактов;
- внутренний цикл связан с поиском всех возможных унификаторов, что может быть дорогостоящей операцией;
- повторная проверка каждого правила в каждой итерации для определения того, выполняются ли его предпосылки;
- может вырабатывать много фактов, не имеющих отношения к текущей цели.

Улучшения: например, Rete-алгоритм

Обратный логический вывод

Идея: Алгоритмы обратного логического вывода действуют в обратном направлении, от цели, проходя по цепочке от одного правила к другому, чтобы найти известные факты, которые поддерживают доказательство.

Простой алгоритм обратного логического вывода

```
function FOL-BC-ASK(KB, query) returns a generator of substitutions
  return FOL-BC-OR(KB, query, { })

function FOL-BC-OR(KB, goal, θ) returns a substitution
  for each rule in FETCH-RULES-FOR-GOAL(KB, goal) do
    (lhs ⇒ rhs) ← STANDARDIZE-VARIABLES(rule)
    for each θ' in FOL-BC-AND(KB, lhs, UNIFY(rhs, goal, θ)) do
      yield θ'

function FOL-BC-AND(KB, goals, θ) returns a substitution
  if θ = failure then return
  else if LENGTH(goals) = 0 then yield θ
  else
    first, rest ← FIRST(goals), REST(goals)
    for each θ' in FOL-BC-OR(KB, SUBST(θ, first), θ) do
      for each θ'' in FOL-BC-AND(KB, rest, θ') do
        yield θ''
```

Обратный логический вывод и логическое программирование

Обратный логический вывод находит широкое применение, например, в системах логического программирования, одним из ярких представителей которого является язык **Prolog**.

Выполнение программ Prolog осуществляется по принципу обратного логического вывода, при котором попытка применения выражений выполняется в том порядке, в каком они записаны в базу знаний. Но некоторые описанные ниже особенности языка Prolog выходят за рамки стандартного логического вывода:

- встроенные функции для выполнения арифметических операций;
- встроенные предикаты, вызывающие побочные эффекты (ввод-вывод, модификация БЗ);
- допускается определенная форма отрицания (как невозможность доказательства).

Метод резолюции

- **Полная** процедура вывода для **логики первого порядка**
  - Не обязательно хорновские правила!

- **Общая схема:**

1) Приведение БЗ к конъюнктивной нормальной форме (конъюнкции выражений, каждое из которых представляет собой дизъюнкцию литералов):
   - $\forall x A(x) \wedge W(x) \wedge S(x,y,z) \Rightarrow C(x)$ --- $\neg A(x) \vee \neg W(x) \vee \neg S(x,y,z) \vee C(x)$

2) Использование правила резолюции:

$$\frac{l_1 \vee \cdots \vee l_k, m_1 \vee \cdots \vee m_n}{Subst(\theta, l_1 \vee \cdots \vee l_{i-1} \vee l_{i+1} \vee \cdots \vee l_k \vee m_1 \vee \cdots \vee m_{j-1} \vee m_{j+1} \vee \cdots \vee m_n)}$$

где $Unify(l_i, \neg m_j) = \theta$

- **Применение**: системы автоматического доказательства теорем.

Тема 5. Онтологии

Понятие онтологии

Онтоло́гия (новолат. ontologia от др.-греч. ὄν, род. п. ὄντος — сущее, то, что существует + λόγος — учение, наука) — учение о сущем; учение о бытии как таковом; раздел философии, изучающий фундаментальные принципы бытия, его наиболее общие сущности и категории, структуру и закономерности.

Понятие онтологии

Онтоло́гия (новолат. ontologia от др.-греч. ὄν, род. п. ὄντος — сущее, то, что существует + λόγος — учение, наука) — учение о сущем; учение о бытии как таковом; раздел философии, изучающий фундаментальные принципы бытия, его наиболее общие сущности и категории, структуру и закономерности.

Онтоло́гия в информатике — это попытка всеобъемлющей и подробной формализации некоторой области знаний с помощью *концептуальной схемы*. Обычно такая схема состоит из структуры данных, содержащей все релевантные классы объектов, их связи и правила (теоремы, ограничения), принятые в этой области.

- Составляющие:
  - Терминология, словарь предметной области, описывающий взаимосвязь между терминами (T-Box)
    - *Протон* является *элементарной частицей*
  - Утверждения, касающиеся конкретных объектов (A-Box)
    - У *наблюдаемого объекта* нулевой заряд, полуцелый спин и большое время жизни

Пример онтологии и рассуждений с ее помощью

- Терминология (T-Box)
  1. «*быть родителем*» означает либо «*быть отцом*», либо «*быть матерью*»
  2. если *a* является *родителем b*, то *b* является *потомком a*
  3. *сын* – это *потомок* мужского пола
  4. *дочь* – это *потомок* женского пола
- Описания объектов (A-Box)
  - Евграф – мужского пола
  - Фёкла – мать Евграфа
- Возможный вывод
  - 1: Фёкла – *родитель* Евграфа
  - 2: Евграф – *потомок* Фёклы
  - 3: Евграф – *сын* Фёклы

Язык OWL 2

- **OWL 2 Web Ontology Language** (язык веб-онтологий или онтологий для веб) – это формальный язык онтологий, предназначенный (в первую очередь) для использования в стеке технологий *Семантического Веб* (Semantic Web).
- Онтологии OWL 2 определяют классы, свойства, индивиды и значения, которые могут сохраняться как документы Семантического Веб.
- Синтаксис:
  - *Функциональный*
  - Манчестерский
  - Диктуемые местом в стеке Семантического Веб:
    - RDF/XML
    - OWL XML

OWL 2. Базовые понятия

- **Аксиомы** (Axioms) – базовые высказывания, которые выражает онтология
- **Сущности** (Entities) – элементы, используемые для обозначения объектов реального мира
  - Индивиды, свойства, классы
- **Выражения** (Expressions) – комбинации сущностей для формирования сложных определений из простых
  - Пересечение, объединение
- Все знания (с которыми имеет дело онтология) состоят из *высказываний*:
  - «идет дождь», «ласточка – птица»
- Набор высказываний может *влечь за собой* (entail) другое высказывание

OWL 2. Базовые понятия

Высказывание
(если прямо содержится в онтологии – то еще и **аксиома**)

- **Сущности** (Entities) – элементы, используемые для обозначения объектов реального мира
  - Индивиды – объекты реального мира
  - Классы, концепты – категории объектов
  - Свойства – отношения между объектами
    - Объектные свойства (object properties)
    - Свойства-данные (datatype properties)
    - Свойства-аннотации (annotation properties)

OWL 2. Классы

`ClassAssertion( :Person :Mary )`	Аксиома, утверждающая, что именованная сущность Mary относится к классу Person
`ClassAssertion( :Woman :Mary )`	Аксиома, утверждающая, что именованная сущность Mary относится к классу Woman
`SubClassOf( :Woman :Person )`	Аксиома, утверждающая, что класс Woman является подклассом класса Person (т.е. любой индивид, который относится к классу Woman также относится и к Person)
`EquivalentClasses( :Human :Person )`	Аксиома эквивалентности классов (синонимы)
`DisjointClasses( :Woman :Man )`	(Принципиально) отсутствуют индивиды, которые могут относиться к перечисленным классам

OWL 2. Объектные свойства

```
ObjectPropertyAssertion( :hasWife :John :Mary )
```

Значением объектного свойства hasWife для индивида John является индивид Mary

```
NegativeObjectPropertyAssertion( :hasWife :John :Mary )
```

Значением объектного свойства hasWife для индивида John **НЕ** является индивид Mary

```
SubObjectPropertyOf( :hasWife :hasSpouse )
```

«Подсвойство», конкретизирующее другое свойство

```
ObjectPropertyDomain( :hasWife :Man )
```

Область определения свойства (экземпляры каких классов могут иметь свойство)

```
ObjectPropertyRange( :hasWife :Woman )
```

Область значений свойства (экземплярами каких классов может быть значение свойства)

OWL 2. Свойства-данные

```
DataPropertyAssertion(
    :hasAge :John "51"^xsd:integer )
```

Значением свойства hasAge для индивида John является целое число 51

```
NegativeDataPropertyAssertion(
    :hasWife :Jack "53"^xsd:integer )
```

Значением свойства hasAge для индивида Jack **НЕ** является 53

```
DataPropertyDomain( :hasAge :Person )
```

Область определения свойства (экземпляры каких классов могут иметь свойство)

```
DataPropertyRange(
    :hasAge xsd:nonNegativeInteger)
```

Область значений свойства (тип данных)

OWL 2. Ещё о классах

```
EquivalentClasses(
  :Mother
  ObjectIntersectionOf( :Woman :Parent )
)

EquivalentClasses(
  :Parent
  ObjectSomeValuesFrom( :hasChild :Person )
)

EquivalentClasses(
  :JohnsChildren
  ObjectHasValue( :hasParent :John )
)

ClassAssertion(
  ObjectMaxCardinality( 4 :hasChild :Parent )
  :John
)
```

«Сложные» классы. А также ObjectUnionOf, ObjectComplementOf

Existential quantification. Также может быть universal quantification – ObjectAllValuesFrom

А также минимальная кардинальность свойства (ObjectMinCardinality), точная кардинальность (ObjectExactCardinality)

OWL 2. Ещё о свойствах

```
InverseObjectProperties( :hasParent :hasChild )

SymmetricObjectProperty( :hasSpouse)
```

А также асимметричные, транзитивные, рефлексивные, антирефлексивные, функциональные

```
SubObjectPropertyOf(
   ObjectPropertyChain( :hasParent :hasParent )
   :hasGrandparent
)
```

Т.н. «цепочки свойств» - property chains.

OWL 2. Управление онтологиями

```
Prefix(:=<http://example.com/owl/families/>)
Prefix(otherOnt:=<http://example.org/otherOntologies/families/>)
Prefix(xsd:=<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>)
Prefix(owl:=<http://www.w3.org/2002/07/owl#>)

Ontology(<http://example.com/owl/families>
   ...

   SameIndividual( :John otherOnt:JohnBrown )
   SameIndividual( :Mary otherOnt:MaryBrown )
   EquivalentClasses( :Adult otherOnt:Grownup )
   EquivalentObjectProperties( :hasChild otherOnt:child )
   EquivalentDataProperties( :hasAge otherOnt:age )

)
```

Профили OWL 2

- **Профиль OWL 2 (фрагмент)** – «урезанная» разновидность языка, жертвующая частью выразительных возможностей в пользу эффективности вывода.
- Профили:
  - OWL 2 EL – полезен в приложениях, где онтологии содержат очень большое число классов и/или свойств. Основные задачи вывода имеют полиномиальное время от размера онтологии.
    - EL-логики, только existential qualification
  - OWL 2 QL – очень много индивидов, ответ на запросы (поиск индивидов по ограничениям) – самая важная задача вывода.
    - Переписывание на query language
  - OWL 2 RL – наиболее выразительный профиль, сохраняющий, однако полиномиальность базовых алгоритмов вывода (алгоритмов проверки согласованности, допустимость класса, проверки принадлежности классу и ряда других)
    - Вывод может быть реализован на языке правил – rule language

Основные задачи онтологического вывода

- Согласованность онтологий (ontology consistency)
- Допустимость определения класса(class expression satisfiability)
  - Возможен ли класс с заданным определением, могут ли у него быть индивиды?
- Проверка отношения между классами (class expression subsumption)
  - Является ли один класс подклассом другому
- Проверка индивидов (instance checking)
  - Является ли заданный индивид экземпляром заданного класса
- Обработка запросов ((Boolean) conjunctive query answering)
  - Поиск всех индивидов, удовлетворяющих заданным условиям

Онтологии и логика

- **Логика первого порядка**

- Синтаксис логики первого порядка предназначен для упрощения процедуры формирования высказываний об объектах, а **описательные логики** представляют собой системы обозначений, которые предназначены для упрощения процедуры описания определений и свойств категорий. **Разрешимые фрагменты** логики первого порядка.

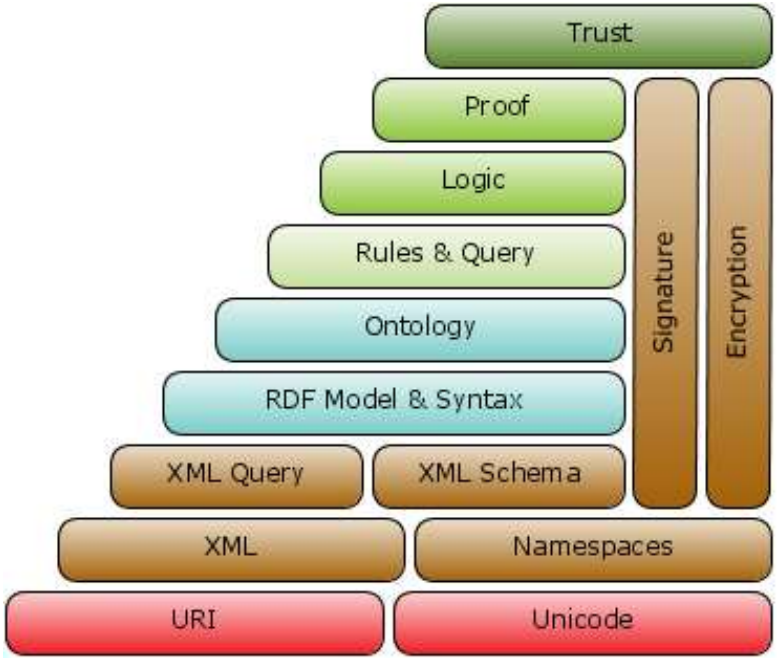
Онтологии и логика

Описательная логика *(ALC)*	Теоретико-множественная семантика	Логика первого порядка
Концепт *A*	Множество $A \subseteq \Delta^{\mathcal{I}}$	Одноместный предикат *A*
Роль *R*	Множество кортежей $R \subseteq \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}$	Бинарный предикат *R*
Индивид *d*	Элемент множества $\Delta^{\mathcal{I}}$	Объект *d*
$Doctor \sqcup Lawyer$	$Doctor \cup Lawyer$	$Doctor(x) \vee Lawyer(x)$
$Rich \sqcap Happy$	$Rich \cap Happy$	$Rich(x) \wedge Happy\ (x)$
$Cat \sqcap \exists sitsOn.Mat$	$Cat \cap \{x \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists d \in \Delta^{\mathcal{I}}: (e,d) \in sitsOn \wedge d \in Mat\}$	$\exists y.(Cat(x) \wedge sitsOn(x,y))$
$Peter : Doctor$ $Doctor(Peter)$	$Peter \in Doctor$	$Doctor(Peter)$
$sitsOn(Tom, Mat1)$	$(Tom, Mat1) \in sitsOn$	$sitsOn(Tom, Mat1)$

Онтологии в контексте Семантического веб

- **Семантический веб (Semantic Web)** – предложенная в 1998 г. Тимом Бернерсом-Ли концепция, в соответствии с которой «человекочитаемая» Всемирная паутина (World Wide Web) будет дополнена «машиночитаемой», основанной на наборе стандартов семантической разметки:
  - Гигантский граф
  - Запросы к графу, ответ на которые получается с помощью вывода и рассуждений

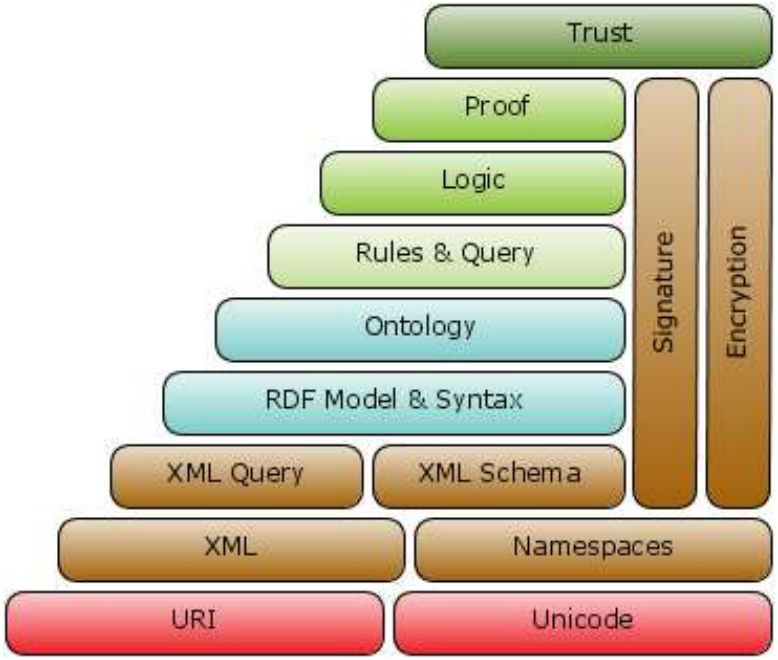
Онтологии в контексте Семантического веб. URI



URI для уникальных идентификаторов всего – объектов, понятий, свойств в целях разрешения неоднозначности.

- Лук у специалистов по метательному оружию:
  - http://archery.su/ontology/Лук
    - Длина плечей, фунтаж и пр.
- Лук у специалистов по сельскому хозяйству:
  - http://mcx.gov.ru/ontology/Лук
    - Семейство, типовой вид и пр.

Онтологии в контексте Семантического веб. XML



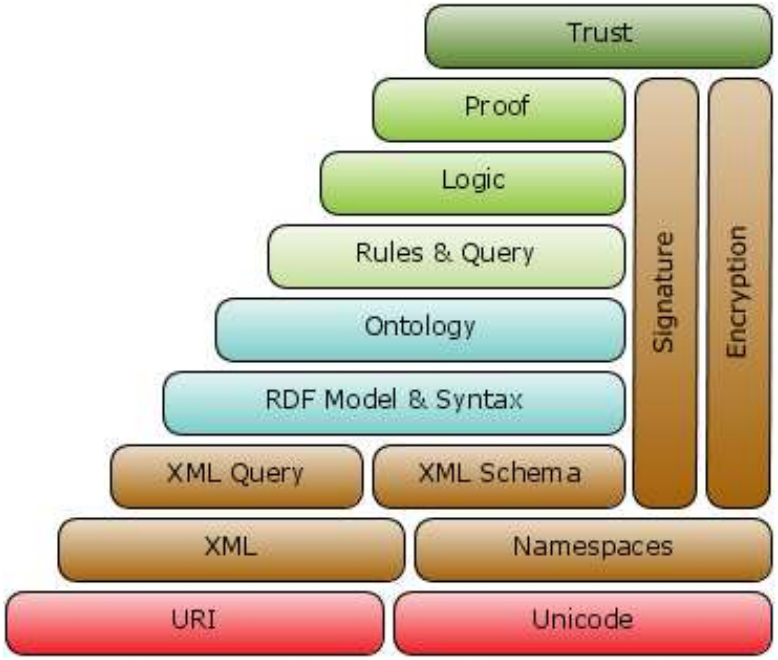
XML (eXtensible Markup Language) – исключительно *синтаксис.* Предназначен для создания *расширений* – конкретных грамматик, представленных словарем тегов и атрибутов и набором правил.

```
<?xml version="1.0">
<Human name="John">
    <height>182</height>
</Human>
```

или

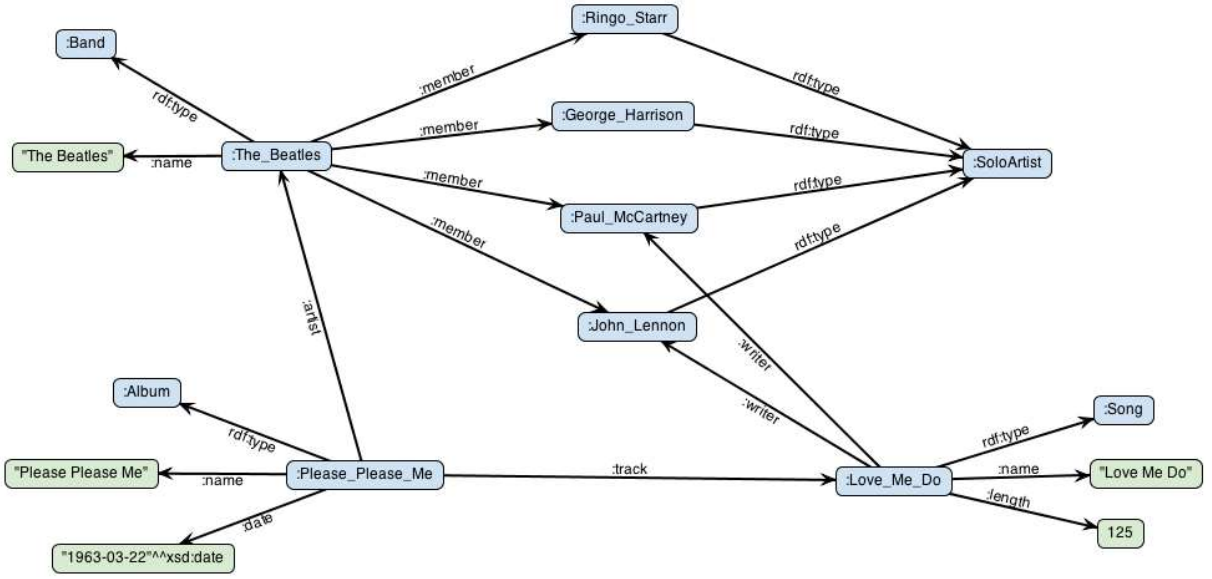
```
<?xml version="1.0">
<Human name="John" height="182" />
```

Онтологии в контексте Семантического веб. RDF



RDF (Resource Description Framework) – модель представления данных. В основе модели – тройки (триплеты), состоящие из:

- субъекта
- предиката
- объекта



Онтологии в контексте Семантического веб. OWL

```
Prefix(:=<urn:webprotege:ontology:4512c73f-900e-414e-9c54-7194715ef272#>)
Prefix(owl:=<http://www.w3.org/2002/07/owl#>)
Prefix(rdf:=<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>)
Prefix(xml:=<http://www.w3.org/XML/1998/namespace>)
Prefix(xsd:=<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>)
Prefix(rdfs:=<http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>)

Ontology(<urn:webprotege:ontology:4512c73f-900e-414e-9c54-7194715ef272>

Declaration(Class(<http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/Human>))
Declaration(DataProperty(<http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/height>))
Declaration(NamedIndividual(<http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/John>))

AnnotationAssertion(rdfs:label
   <http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/height> "height")
SubDataPropertyOf(<http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/height>
   owl:topDataProperty)
DataPropertyDomain(<http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/height>
 <http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/Human>)
DataPropertyRange(<http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/height>
  xsd:positiveInteger)

AnnotationAssertion(rdfs:label
  <http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/Human> "Human")

 AnnotationAssertion(rdfs:label
   <http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/John> "John")
DataPropertyAssertion(<http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/height>
   <http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/John> "182"^^xsd:integer))
```

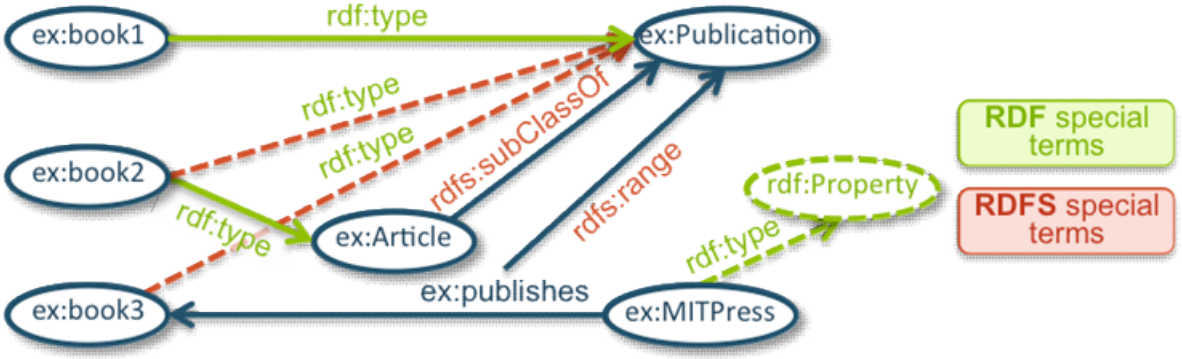
```
<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF xmlns="urn:webprotege:ontology:4512c73f-900e-414e-9c54-7194715ef272#"
  xml:base="urn:webprotege:ontology:4512c73f-900e-414e-9c54-7194715ef272"
  xmlns:aim="http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontologies/"
  xmlns:owl=http://www.w3.org/2002/07/owl#
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  xmlns:ontology="http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/">

  <owl:Ontology rdf:about="urn:webprotege:ontology:4512c73f-900e-414e-9c54-7194715ef272"/>

  <owl:DatatypeProperty rdf:about="http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/height">
   <rdfs:subPropertyOf rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#topDataProperty"/>
   <rdfs:domain rdf:resource="http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/Human"/>
   <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#positiveInteger"/>
   <rdfs:label>height</rdfs:label>
  </owl:DatatypeProperty>

  <owl:Class rdf:about="http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/Human">
     <rdfs:label>Human</rdfs:label>
  </owl:Class>

  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://avponomarev.bitbucket.io/aim/ontology/John">
     <ontology:height rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">182</ontology:he
     <rdfs:label>John</rdfs:label>
  </owl:NamedIndividual>
</rdf:RDF>
```

Язык запросов SPARQL

```
PREFIX mo: <http://purl.org/ontology/mo/>
PREFIX foaf:  <http://xmlns.com/foaf/0.1/>
SELECT ?name ?img ?hp ?loc
WHERE {
  ?a a mo:MusicArtist ;
     foaf:name ?name .
  OPTIONAL { ?a foaf:img ?img }
  OPTIONAL { ?a foaf:homepage ?hp }
  OPTIONAL { ?a foaf:based_near ?loc }
}
```

Язык запросов SPARQL и логические следствия (entailment regimes)

```
(1) ex:book1 rdf:type ex:Publication .
(2) ex:book2 rdf:type ex:Article .
(3) ex:Article rdfs:subClassOf ex:Publication .
(4) ex:publishes rdfs:range ex:Publication .
(5) ex:MITPress ex:publishes ex:book3 .
```



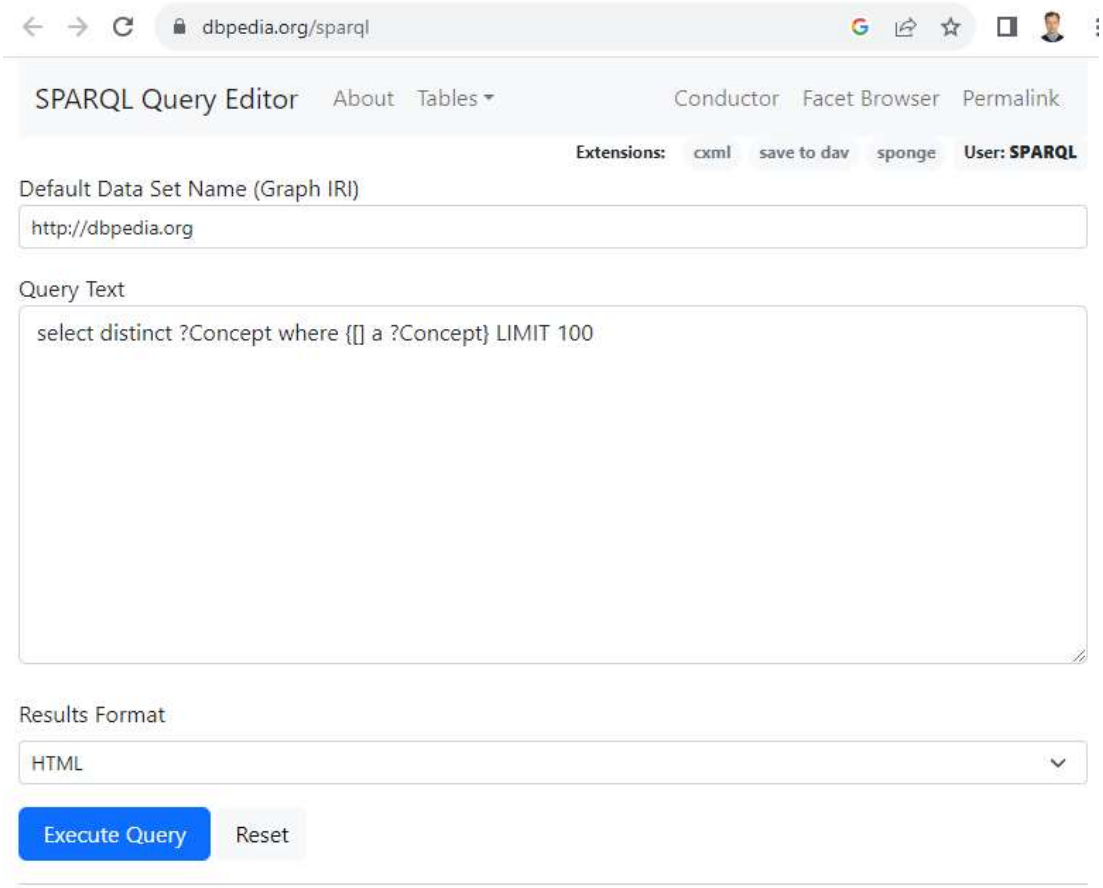
Запрос:

```
SELECT ?pub
WHERE {
    ?pub rdf:type ex:Publication
}
```

Результат:

- «Простой» режим
  - ex:book1
- RDF
  - ex:book1
- RDFS
  - ex:book1, ex:book2

Язык запросов SPARQL. Применения



Semantic Web Rule Language (SWRL): Правила

- **Классификация:**

  hasParent(?x1, ?x2) ^ hasBrother(?x2, ?x3) -> hasUncle(?x1, ?x3)

  hasParent(?x1, ?x2) -> Parent(?x2)

- Задание значения атрибуту:

  hasParent(?x1, ?x2) ^ was_born(?x1, ?x3) -> became_parent(?x2, ?x3)

- Вычисления:

  start_study(?x1, ?x2) ^

  study_duration(?x1, ?x3) ^

  swrlb:add(?x4, ?x2, ?x3) -> end_study(?x1, ?x4)

Применение онтологий

- Семантический веб в изначальном понимании (глобальная машиночитаемая сеть знаний), скорее мертв (и никогда не был жив)
- Онтологии ≠ Семантический веб
- Локальные применения:
  - Производственные компании:
    - Festo (свойства компонентов и конфигурирование изделий)
    - Космическая отрасль (German Aerospace Center (DLR), European Space Agency, NASA, ЦНИИмаш)
  - Исследования
    - Gene Ontology
    - OBO Foundry

Ограничения OWL

- Невозможность выполнять вычисления на основе нечеткой логики (и вообще, неопределенности)
  - Действительно, мы можем напрямую записать в модели факт «В Петербурге часто идет дождь», но это не позволит автоматически в одних случаях получать вывод о том, что дождь идет, а в других – нет.
- Невозможность использования модальных логик, позволяющих описывать не только фактическое состояние систем, но и выражать суждения о том, что может, должно, могло бы быть
- Невозможность выражать сведения о субъективной точке зрения: «Иван считает, что пингвины живут в Арктике». Иван, конечно, ошибается, но инструментальных средств для выражения этого в OWL, казалось бы, нет
  - Однако никто не мешает в модели создать класс объектов «Мнение», который будет связывать субъекта с теми фактами, которые он считает истинными.
- Трудноразрешимой проблемой для OWL является представление утверждений о классах.
  - Если «Собака» - класс, то выразить напрямую сведения о том, что все собаки умеют лаять, будет сложно. Для этого потребуется создать класс «Умение», один из объектов которого будет соединять класс Собаки и умение лаять. ПО, использующее модель, сможет интерпретировать эту информацию, но задействовать её в получении логических выводов средствами reasoner'a не получится. Другой вариант решения проблемы – создание правила, которое гласит, что если X – собака, то X умеет лаять. Это сработает, но большими массивами правил трудно управлять, особенно если онтология подвергается рефакторингу.

Онтологическое моделирование. Методология для новичков (Ной и МакГиннесс)

1. Определение области и масштаба онтологии
   - Какую область будет охватывать онтология?
   - Для чего собираемся ее использовать?
   - На какие типы вопросов должна давать ответы онтология?
   - Кто будет использовать и поддерживать онтологию?
2. Рассмотрение вариантов повторного использования существующих онтологий
3. Перечисление важных терминов в онтологии
   - Просто список, без какого-то первоначального отсеивания
4. Определение классов и иерархии классов
   - Нисходящая разработка (от самых общих понятий)
   - Восходящая (от самых конкретных классов, обобщая их)
   - Комбинированная
5. Определение свойств классов
6. Определение ограничений на значения свойств
7. Создание экземпляров

Литература

- Методы на основе знаний (в целом):
  - С. Рассел, П. Норвиг Искусственный интеллект: современный подход, 4-е изд.
- Онтологии:
  - Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, Д.И. Муромцев Инженерия знаний. Модели и методы: учебник. – СПб., 2016.
  - OWL 2 Primer. URL: https://www.w3.org/TR/owl2-primer/
  - С. Горшков Введение в онтологическое моделирование. URL: https://trinidata.ru/files/SemanticIntro.pdf
  - Миф семантического веба. URL: https://habr.com/ru/articles/502628/