

Abstract: In this paper, we overview meaning, definition, and applications of ontology on Artificial Intelligence field. Ontology on AI stems from knowledge representation, in particular, knowledge sharing problems, because the traditional ways of knowledge representation lacks completeness, exhaustiveness, and systematicness for sharing and re-use of knowledge. Ontology is therefore expected to be a base of knowledge sharing and reuse. Ontologies have some types, i.e., top-level, domain, task, and application ontologies, and some levels from one providing names and relations to one providing a model for behavior. We also show typical applications of ontologies, i.e., use of ontologies for inter-agent, human-system, and inter-human communication.

1. はじめに

AIにおけるオントロジーはいまや大変幅広い文脈をもっている。AIにおいてオントロジーという用語が受け入れられたのは直接的には知識表現（KR）の分野での知識共有プロジェクトが大きな役割を担ったが、自然言語分野での大規模シソーラスや知識システム開発などとむすびつき、多様な文脈が生まれている。近年はWWWや電子商取引の基礎技術になると注目されている。本稿ではAIの視点からオントロジーについての研究の現状と応用の可能性について述べる。

2. オントロジーとは何か

まず知りたいのはオントロジーが何か、ということであろう。これに関しては唯一の答えを出すことは困難である。AIの中での歴史的にみれば Gruber の定義[1]がある。Gruber は Ontolingua を提唱した人物であり、このころのオントロジー研究推進のシンボリック的役割を果たした。彼によれば「オントロジーとは概念化の仕様である」(An ontology is a specification of a conceptualization) [1]。伝統的な AI において概念化とは計算機で対象とする世界の事物や事物を記号で表現する過程のことである。その概念化の結果とは概念とその関係ということになる。

システム構築ということ念頭に置くともうすこし具体的にいうことができる。溝口[2]は「人工システムを構築する際のビルディングブロックとして用いられる基本概念 / 語彙の体系」となる。

これだけの説明では抽象的で理解が難しいであろう。またあとで述べるように実際の“オントロジー記述言語”は伝統的な AI の知識表現言語と一見して同じように見え、差異がわ

わからないであろう。そこでまず AI におけるオントロジー研究がなぜできてきたかということについてさきに述べる。

3. なぜ知識表現ではいけなかったか

人工知能では論理やフレームやルールといった知識表現の方式とその言語を提案してきた。これらはエキスパートシステムの構築で盛んに使われてきた。しかし、その後エキスパートシステムのシステムとしての拡張性やメンテナンス性において問題があるといわれるようになった。すなわち知識の共有や再利用が困難であることが指摘された。これらではなぜ不十分であったのだろうか。共有可能あるいは再利用可能な知識とはどんなものであるか。一般性、普遍性の欠如といえれば簡単であるが、もう少し問題を絞り込む必要がある。例えば以下のような点である¹。

- ・ 全体性への無配慮
- ・ 網羅性への無配慮
- ・ 体系性への無配慮

特定のシステムは特定の目的のために構築される。当然のことながらシステム構築にあたってはその目的に直接関係ない情報は記述されない。例えば“りんご選別機”の知識においてはりんごのサイズや色、硬さ、重量などは（その機械のセンサが可能ならば）記述される。しかし“りんご”を表現するときにはまだ他の情報（例えばだれが作ったかとか収穫後何日目か）があるであろう。対象を表現しているつもりでもきわめて限定された表現になっている（全体性への無配慮）。

今述べたのは個々の対象表現に関してであったが、表現される対象の範囲という意味でも不十分である。システム構築にあたっては自分が扱わない他の対象との関わりなども記述する必要はない。たとえばこの“りんご選別機”は日本産のりんごの品種に関しては表現されているかもしれないが、外国産のりんご品種は表現されていないかもしれない（網羅性への無配慮）。

さらに重要なのは対象表現自身もつ構造が明示化されていないことが多いことである。我々が個々の対象を記述する上で、我々のもつ基本的な概念やその関係を利用している。これが知識を理解可能にしているひとつの源泉である。しかし特定のシステムのための知識ベースはこのような知識を欠くことが多い。たとえばりんごは果物の一種であるということは“りんご”という概念の基本的性質として不可欠であろう。しかし、“りんご選別機”がそのような知識をもつことはまれであろう。

このような点を考え、知識の共有と再利用を実現するには対象をなるべく包括的かつ体系をもって表現する必要があるということが認識された。このような知識を実現するひとつのテーマとしてオントロジーが提案された。もうひとつは大規模知識ベースの構築である。オントロジーは知識表現や知識ベースのあり方に再考を促すものであり、大規模知識ベースはむしろ方法よりも実際に知識を集めることで共有や再利用可能な知識を実現しようい

¹ もう一点、変化可能性への無配慮もあるが、ここでの筋道とすこしずれるので議論はしない。

うものであった²。

すなわち、オントロジーは従来の知識表現や知識利用に欠けていた共有可能性や再利用性の視点を実現するものであり、具体的には全体性や体系性をもった知識表現や知識運用を実現するものである。ここで単に知識表現だけでなく知識運用まで含めているのは、オントロジーは表現の問題だけにとどまらないからである。むしろ記述された知識をどう使うかまで考える必要があることを意味している。

ではそのようなオントロジーを実現するにあたって考慮すべきことはなんだろうか。

知識表現の手法から継承すべき点は

- ・ 形式性、推論可能性

という点である。知識表現の研究では長年、対象をいかに形式性をもって表現するかについて考察してきた。またその目的としてはその表現を使って推論をさせたいということがあった。この性質は当然オントロジーも継承すべきであろう。

また知識ベースシステムは先に述べたように目的依存性を当然としており、これが3つの視点で問題があり、知識の共有や再利用を実現するにあたって障害になっているということは先に述べた。しかし、逆にまったく目的に依存しない表現というものも想定しがたい。むしろ、対象表現の目的を表現することで他の対象表現との関係が明示されるようにすることが現実の方策である。これを合意可能性と呼ぶことにする。

以上をまとめると、

1. 形式性、推論可能性
2. 全体性
3. 網羅性
4. 体系性
5. 合意可能性

をもった対象表現がオントロジーであるといえる。

2,3,4については Terminology(用語論)、Vocabulary(語彙)、Taxonomy(分類学)が近い概念である。Terminology は概念に対して適切な用語を当てはめることが目的であり、ある種の全体性を考慮しているといえる。Vocabulary は使われている用語を収集しており、網羅性のひとつの実現である。しかし語であって必ずしも概念ではない。Taxonomy は用語間あるいは概念間の関係をつけることが主な目的であり、これは体系性の実現である。しかし、これら3つとも 2,3,4の性質を満たしているわけではなく、ましては1や5の性質については考慮されていない。

4. 形式オントロジー

もうすこし形式的なオントロジーの説明として Guarino[3]による説明を紹介する。

² ただし、この両方のアプローチは何を第一義に置くかの違いで結局同じことを研究している。オントロジーからのアプローチも大規模なオントロジーをつくる必要であり、大規模知識ベースも知識表現の方法にコミットする必要がある。

1. Ontology as a philosophical discipline
2. Ontology as a an informal conceptual system
3. Ontology as a formal semantic account
4. Ontology as a specification of a conceptualization"
5. Ontology as a representation of a conceptual system via a logical theory
 - 5.1 characterized by specific formal properties
 - 5.2 characterized only by its specific purposes
6. Ontology as the vocabulary used by a logical theory
7. Ontology as a (meta-level) specification of a logical theory

図 1 オントロジーの多様な解釈

Guarino は図 1 に挙げるような可能なオントロジーの解釈をみせ、まず多様性をしめし、その上でこれら（特に 2-5）を包括するような定義を試みている。2 と 3 はオントロジーを形式的あるいは非形式的な意味論(semantic)として解釈しており、5 は形式論(syntax)として解釈している。4 はその中間的解釈で conceptualization(概念化)という言葉で semantics と syntax を融合しようとした解釈ということができる。

Guarino はオントロジーをオントロジー制約(ontological commitment)とオントロジー理論(ontological theory)と分けている。

オントロジー理論とは特定の状況ではなくそれぞれの状況でも成り立つような論理的理論である。これは純粋に syntax である。例えば、

T1:

```
x.apple(x) fruit(x)
x.pear(x) fruit(x)
apple(a1)
red(a1)
```

という状況を考えてとき、特定の状況依存性を排した部分 T2 がオントロジー理論といえる。

T2:

```
x.apple(x) fruit(x)
x.pear(x) fruit(x)
```

オントロジー制約とは概念化の背後にあるのはその“概念”がどのような性質（永続的なのか否かなど）を定めるものである。これは様相論理で表現している。たとえばあるもの（りんご）がある状況についての知識を書こうとする。このときりんごが色をもつとかの以前に「りんごというものは存在すれば存在しつづけるものである」という性質をもつ概念であるはずである。そこで

```
( x.apple(x) apple(x))
```

とかける。 は様相論理の記号で必然記号と呼ばれるものである。様相論理は可能世界による解釈ができ、これは直感的には「どこの可能世界でもあるりんごがあればそこからみえる世界でもそのりんごは存在するということは成り立つ」ということである。これはあたりまえのように聞こえるが、すべての概念がこのような性質をもつわけではない。たと

例えば“赤色である”という概念では上の式は成り立たないであろう。すると T2 は次のよう書くべきであろう。

T3:

$$\begin{aligned} & (x.\text{apple}(x) \text{ fruit}(x)) \\ & (x.\text{pear}(x) \text{ fruit}(x)) \\ & (x.\text{apple}(x) \text{ apple}(x)) \\ & (x.\text{pear}(x) \text{ pear}(x)) \\ & (x.\text{fruit}(x) \text{ fruit}(x)) \\ \neg & (x.\text{red}(x) \text{ red}(x)) \end{aligned}$$

T2 と T3 は通常の論理による知識表現は同一なものになって差がない。しかし、背後にこのおうな制約があると考えerことは重要である。この制約は通常の知識表現においてはその利用や変更のときに顕在化する。すなわち知識の運用の段階まで考慮することによって明らかになる差である。これが前節で知識の運用まで考える必要がということのひとつの理論的説明である。

5. オントロジーの実現

ここではオントロジーを実際的に構築するという面からオントロジーを考察する。

5.1 オントロジーのレベル

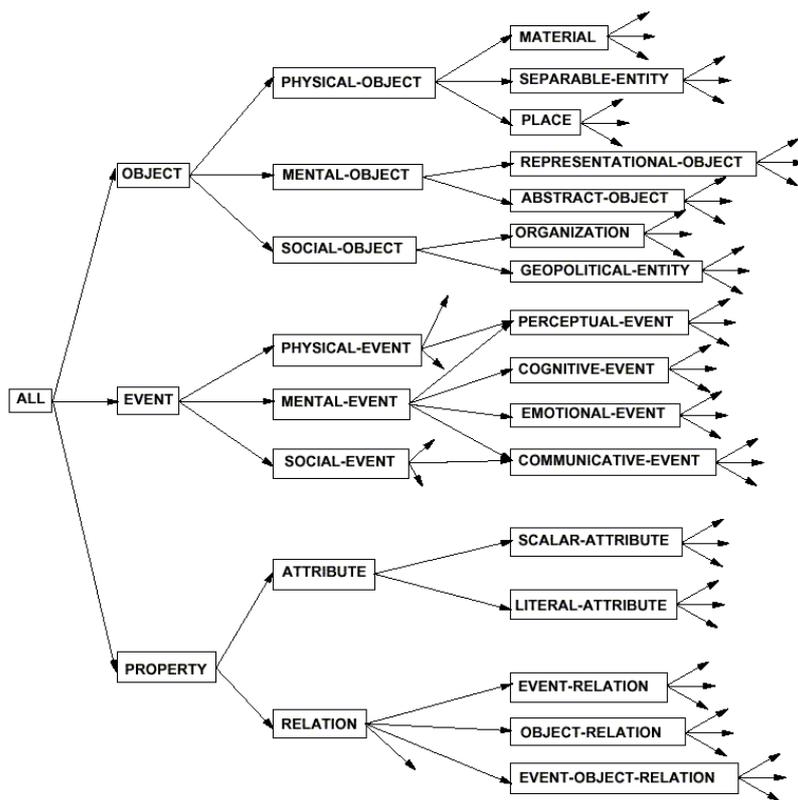
オントロジーには知識表現へのコミットの深さからレベルに分けることができる[4][5]。

- ・ レベル1：概念の切り出しと階層関係化ぐらいまでの対象表現。概念の意味は概念の名前などに暗に含まれていることが多い。例えば検索サービスのディレクトリなどはこの典型例である。
- ・ レベル2：各概念の意味記述や関係記述が加わったもの。多くの場合、このレベルをオントロジーと呼んでいる。オントロジー自身に対する質問への回答など、自身の性質に関する推論が可能になる。
- ・ レベル3：実行可能なモデルとしてのオントロジー。振る舞いなどに関する推論も可能になる。

5.2 オントロジー構築のガイドライン

先に Gruber によるオントロジーの簡明な定義を挙げたが、これではあまりに抽象的過ぎる。エージェントの仕様に関する団体である FIPA(Foundation for Intelligent Physical Agents) はもうすこし具体的な定義を与えている[6]。

- ・ 特定のドメインの構造の明示的な仕様。
- ・ 対象領域を参照するための語彙（論理定数と述語記号）と領域に存在する制約の表現と語彙の解釈を制限する論理的言明。



- ・ あるトピックに関する知識の表現と通信のための語彙とその語彙で示される実在物 (entity) の関係と属性の集合である。

また構築のガイドラインとしては次のようなことを挙げている。

- ・ 明瞭性と客観性
- ・ オントロジーは客観的な定義と言語による正確な意味をもった語彙を提供すべき
 - 完全性：定義はなるべく必要十分条件がよい
 - 一貫性：定義に無矛盾な推論ができること
- ・ 単調的拡張：既定義の用語を変更せずに新たな一般語や特殊語が導入できること
- ・ 最小のオントロジー・コミットメント：モデル対象をできるだけ少ない公理で表現すること

5.3 オントロジーの種類

また構築するオントロジーはその対象領域と目的によって次のように大別できる。

- ・ 対象オントロジー：もの、ことを表現するオントロジー
 - Top-level オントロジー：すべての概念に関わる最上位の概念の構造。この部分が共通化されるとそれより下位のレベルのオントロジー構築が容易になるので重要なオントロジーであるが、それゆえ最も議論が一致しない部分でもある。
 - 領域オントロジー：例えば機械のオントロジー、旅行のオントロジーなど、具体的な領域を決めて構築するもの。専門領域などでは比較的議論が収束しやすいの

でこのオントロジーは Top-level オントロジーよりは構築されやすく、多く存在する。本来上の top-level オントロジーの下に作られるものであるが、実際には独立して作られることが多い。

- ・ タスク・オントロジー：対象オントロジーが「もの」的存在を記述するの対して行為やプロセスを表現するオントロジー。本来対象と行為の両方を記述することによって対象世界を記述することになるのだが、タスク・オントロジーは多くの場合対象オントロジーを前提とする上に共通の抽象化が難しいため、構築が容易でない。
- ・ アプリケーション・オントロジー：特定のシステムなどで使われるオントロジー。これは対象オントロジーやタスクオントロジーを取捨して構成されることが期待される。

5.4 オントロジーの構築例³

いくつかのオントロジーが WWW を通じて公開されている。Cyc Project⁴は元々は大規模知識ベースを構築することが目的であったが、その成果のうち、上位部分（抽象的部分）は CYC オントロジーとしてフリーではないが、プロジェクトのページから WWW で入手可能である。約 3 0 0 0 個の用語が含まれている。Ontolingua で作られたオントロジーはスタンフォード大学 KSL の ontology server を利用して蓄積され、利用可能である⁵。SENSUS は WordNet などさまざまなシソーラスを元にそれらを再構成して利用可能にしようするプロジェクトであり、WEB 用のインタフェース(Ontosaurus)を通じてアクセスすることができる⁶。イタリアの CNR-ITBM のオントロジーグループによる ON9⁷は主に医療分野のための基礎概念を提供している。これも WWW で公開されている。自然言語におけるシソーラスについては様々あるが、オントロジー研究者になじみ深い WordNet⁸はデータファイルあるいは WWW から利用することができる。Mikrokosmos も言語系のプロジェクトであるが、この中のオントロジーも参照可能である⁹。Mikrokosmos の最上位の部分を図 2 に示す[8]。これがこの top-level オントロジーである。

6. オントロジー記述言語

オントロジーに関係するフォーマットあるいは規格に関わる情報は多数存在する。オントロジーそのものを記述するフォーマットである Ontolingua[9]やその中で使われている知識表現記法 KIF[10]は初期のころからよく使われたフォーマットである。

例えば図 3 のようにかかれる。これは

³ 本章の一部は[7]を利用している。URL などは[Takeda 00a]の方が詳しいので参照されたい。

⁴ <http://www.cyc.com/>

⁵ <http://www-ksl-svc.stanford.edu/>

⁶ http://mozart.isi.edu:8003/sensus/sensus_frame.html. この原稿を執筆している時点ではアクセスできなかった。

⁷ <http://saussure.irmkant.rm.cnr.it/onto/ON9.2a/index.html>

⁸ <http://www.cogsci.princeton.edu/~wn/>

⁹ <http://crl.nmsu.edu/Research/Projects/mikro/htmls/ontology-htmls/onto.index.html> この原稿を執筆している時点ではアクセスできなかった。

```
(define-class AUTHOR (?author)
  "An author is a person who writes things.
  An author must have created at least one document.
  In this ontology, an author is known by his or her real name."
  :def (and (person ?author)
            (= (value-cardinality ?author author.name) 1)
            (value-type ?author author.name biblio-name)
            (>= (value-cardinality ?author author.documents) 1)
            (<=> (author.name ?author ?name)
                (person.name ?author ?name))))
```

?author が著者であるとは、?author が person であり、関係 author.name で規定される、ちょうど 1 つの対象が存在し、それはクラス biblio-name のインスタンスでなければならず、author.documents で関係づけられる少なくとも 1 つの対象が存在し、author.name という関係と person.name という関係が同値であることである。

というようなことを意味する。

OKBC(Open Knowledge Base Connectivity)¹⁰では、KIF + Ontolingua Frame Ontology を知識交換言語の protocols として提案している。これは FIPA でも採用されている。FIPA(The Foundation for Intelligent Physical Agents)はマルチエージェントシステムの標準化を提案する団体であるが、この中でオントロジーマシンのための protocols の標準も提案している。OIL(Ontology Interchange Language)¹¹は KR にも WWW にもなじみやすいオントロジーマシンの記述方法を提供するプロジェクトであり、XML と RDF に基づく構文でかかれている。OIL の構文は XOL(XML Ontology Exchange Language)¹²を元としている。これは生物学の研究者の情報交換のニーズから始まったのものであるが、仕様は一般性がある。

図 4 に OIL のかかれたオントロジーマシンの例を示す(概念定義の本体の部分だけ)。OKBC-lite のセマンティックスを XML のシンタックスで書いている。

オントロジーマシンの内容の方に関しては IEEE Standard Upper Ontology (SUO) Study Group¹³が一般目的用上位レベルオントロジーマシンの標準化を提案している。ここではオントロジーマシンを自然言語と論理で記述しようとしている。

なお、上記のものは基本的にフレームを知識表現の基本としているが、これとは別に John Sowa が提唱する Conceptual Graph もオントロジーマシンの記述のフォーマットのひとつである¹⁴。OML(Ontology Markup Language)¹⁵は OIL や XOL と同様に XML のシンタックスを用いている記法であるが、セマンティックスは Conceptual Graph を利用している。これは HTML そのもののタグにオントロジーマシンを埋め込むという SHOE プロジェクト¹⁶の流れを汲んでいる。

¹⁰ <http://www.ai.sri.com/~okbc/>

¹¹ <http://www.ontoknowledge.org/oil/>

¹² <http://www.ai.sri.com/pkarp/xol/>

¹³ <http://ltsc.ieee.org/suo/index.html>

¹⁴ <http://www.bestweb.net/~sowa/cg/>

¹⁵ <http://wave.eecs.wsu.edu/CKRMI/OML.html>

¹⁶ <http://www.w3.org/DesignIssues/Semantic>

ontology-definitions	<rdf:Property rdf:ID="eats">
slot-def eats	<oil:inverseRelationOf rdf:resource="#is-eaten-by"/>
inverse is-eaten-by	</rdf:Property>
slot-def has-part	<rdf:Property rdf:ID="is-eaten-by">
inverse is-part-of	<rdf:Property rdf:ID="has-part">
properties transitive	<oil:inverseRelationOf rdf:resource="#is-part-of"/>
class-def animal	</rdf:Property>
class-def plant	<rdf:Property rdf:ID="is-part-of">
subclass-of NOT animal	<rdfs:Class rdf:ID="animal"/>
class-def tree	<rdfs:Class rdf:ID="plant">
subclass-of plant	<rdfs:subClassOf>
class-def branch	<oil:NOT>
slot-constraint is-part-of	<oil:hasOperand rdf:resource="#animal"/>
has-value tree	</oil:NOT>
class-def leaf	</rdfs:subClassOf>
slot-constraint is-part-of	<rdfs:Class rdf:ID="tree">
has-value branch	<rdfs:subClassOf rdf:resource="#plant"/>
class-def defined carnivore	</rdfs:Class>
subclass-of animal	<rdfs:Class rdf:ID="branch">
slot-constraint eats	<oil:hasSlotConstraint>
value-type animal	<oil:has-value>
class-def defined herbivore	<oil:hasProperty rdf:resource="#is-part-of"/>
subclass-of animal	<oil:hasClass rdf:resource="#tree"/>
slot-constraint eats	</oil:has-value>
value-type plant OR	</oil:hasSlotConstraint>
(slot-constraint is-part-of	</rdfs:Class>
has-value plant)	<rdfs:Class rdf:ID="leaf">
class-def herbivore	<oil:hasSlotConstraint>
subclass-of NOT carnivore	<oil:has-value>
class-def giraffe	<oil:hasProperty rdf:resource="#is-part-of"/>
subclass-of animal	<oil:hasClass rdf:resource="#branch"/>
slot-constraint eats	</oil:has-value>
value-type leaf	</oil:hasSlotConstraint>
class-def lion	</rdfs:Class>
subclass-of animal	<rdfs:Class rdf:ID="carnivore">
slot-constraint eats	<rdfs:subClassOf rdf:resource="#animal"/>
value-type herbivore	<oil:hasSlotConstraint>
class-def tasty-plant	<oil:valueType>
subclass-of plant	<oil:hasProperty rdf:resource="#eats"/>
slot-constraint eaten-by	<oil:hasClass rdf:resource="#animal"/>
has-value herbivore, carnivore	</oil:valueType>
	</oil:hasSlotConstraint>
	</rdfs:Class>

7. オントロジーの利用例

オントロジーの一つの重要な役割は人間が理解できるメディアと計算機が理解できるメディアの中間に位置することである。人間にもある程度理解されるが、一方計算機処理可能でもあるということである。自然言語を人間と計算機の共通のメディアとするとどうしても特有の曖昧性、多義性をもたざるを得ない。一方完全に意味を捨象した計算言語では人間による理解や表現に負担がかかる。オントロジーは(どこまで意味を入れるかというところでは議論があるものの)人間にとって理解可能であるということが前提となっている。そこで、人間とシステムの係わり合いから3つの視点に分けることができる。むしろ基本的な技術はどれも共通である。例えば、XMLやOILといった言語はこのようなエージェント間のコミュニケーションでもあるし、人間とシステムの間でのコミュニケーションを促進する役割でもあるし、人間間の情報伝達を円滑にする役割もある。ここではどこに力点をおくかによって分けている。

またこの他オントロジーの構築や利用といった視点から分けることも可能であろう。

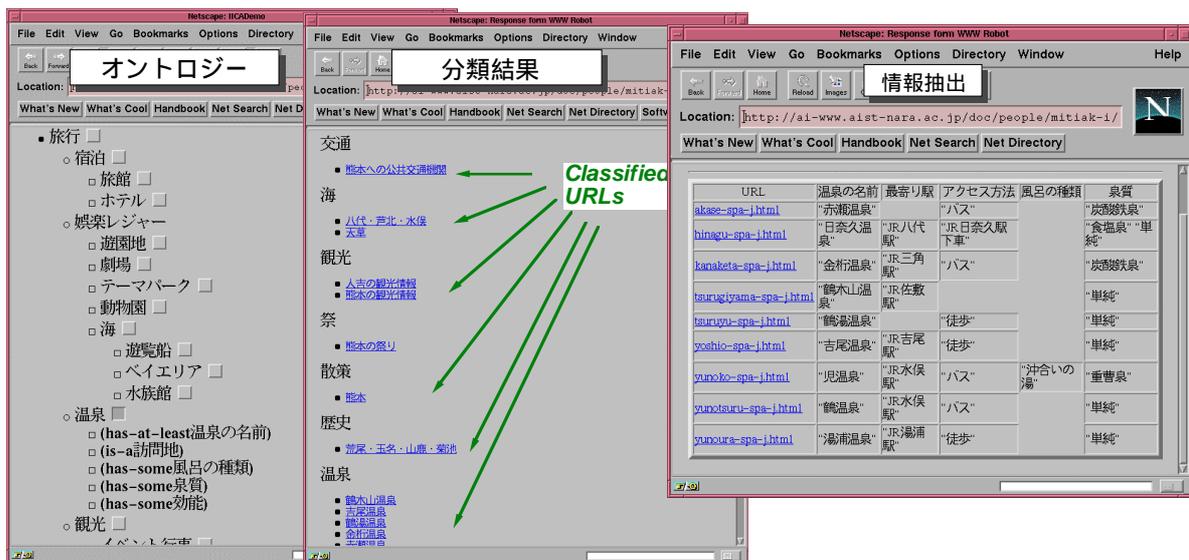


図5 オントロジーに基づく情報収集

7.1 エージェント間コミュニケーションのためのオントロジーの利用

マルチエージェントシステムで問題解決を行う場合、それぞれのエージェントがどのように対象を表現しているかが共通化されていないとエージェント同士のコミュニケーションが成立しない。DARPA の Knowledge Sharing Effort[11]ではこのため、エージェント間コミュニケーションに次のような構造を導入している。まず第1層はメッセージの種類を示すもので KQML[12]では performative と呼ばれるものである。この performative は ask-if や reply などである。その中で内容を記述する言語が指定される。またその内容に基づくオントロジーが指定される。そのうえで実際のメッセージの内容が書かれる。

このように書いた場合でも実はあるエージェントがコミュニケーションしたいと思っても相手が自分のオントロジーを理解してくれるかどうかは保証されない。このため、仲介 (mediation) といった機能がマルチエージェントシステムとして必要となってくる。例えば TSIMMIS ではデータベースのスキーマ間の変換にあたるような記述をもとに変換を行う[13]。あるいはルールによる論理的なオントロジー変換を行うこともできる[14]。またオントロジーとエージェントの関係を使うことで適切なエージェントの発見も可能になる。

7.2 人間とシステムの間でのコミュニケーションのためのオントロジーの利用

人間がもっている概念をうまく伝えることによってシステムがより適切に動作することが期待される。例えば検索においては一般に単語あるいは文章で内容を指定しているが、自然言語には曖昧性や多義性があるので適切な指示が難しい。例えば概念で検索できればより明確な指示が可能であるし、また検索するほうも適切な処理が可能になる。例えば IICA[15]ではオントロジーを用いてインターネット検索の支援をしている(図5参照)。この場合、単に検索の明確化だけでなく、オントロジーに基づいて収集ページの分類をあらかじめしておくことで関連概念を含むページなども見つけることができる。

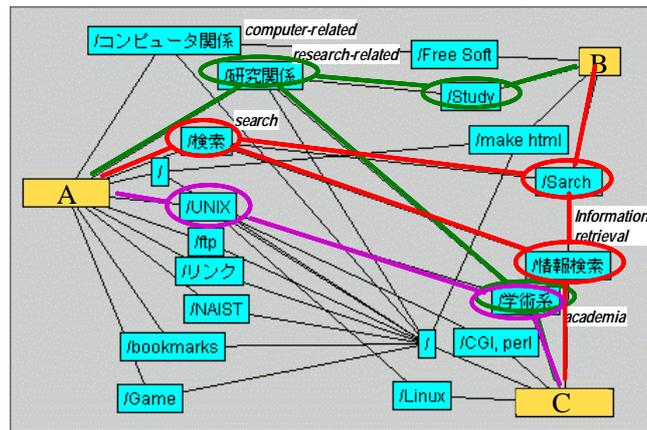


図6 ブックマーク間の関係の発見

教育支援などの各種システム運用における利用者の理解支援などにも利用される。

7.3 人間間のコミュニケーション支援

概念体系を明示的に利用することで人間間のコミュニケーションを促進することも可能である。共有の概念体系があればより適切なコミュニケーションが可能になるのはもちろんであるが、概念体系同士の間を知ることでより深いコミュニケーションが可能になると思われる。kMedia[16]では WWW ブラウザのブックマーク間の関係を明示化することで興味を共有を発見するというシステムである(図6参照)。

8. おわりに

本稿では人工知能の研究におけるオントロジーについて概観した。この人工知能におけるオントロジーはまださほど安定した概念とはいえないが、多様な可能性があることは確かである。とくに計算機ネットワークが我々の日常の隅々まで関係してくる現在、我々がもっている情報の意味的側面を計算機に理解させることは重要なことである。オントロジーという概念はその一つの橋渡しの役割を担うものと考えられる。

9. 参考文献

- [1] T.R.Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition 5(2):199-220,1993.
- [2] Riichiro Mizoguchi. Knowledge acquisition and ontology In Proceeding of the KB&KS '93 pages 121-128,1993.
- [3] Nicola Guarino and Pierdaniele Giaretta. Ontologies and knowledge. In N.J.I.Mars, editor, Towards Very Large Knowledge Bases IOS Press,1995.
- [4] 溝口理一郎, 池田満. オントロジー工学序説 内容指向研究の基盤技術と理論の確立を目指して. 人工知能学会誌, 12(4):559-569, 1997.

- [5] 溝口理一郎. オントロジー研究の基礎と応用. 人工知能学会誌, 14(6):977-988, 1999.
- [6] Fipa 98 part 12 version 1.0: Ontology service specification, 1998.
<http://www.pa.org/repository/pa98.html>.
- [7] 武田英明. 私のブックマーク : オントロジー人工知能学会誌, 15(6):1130-1133, 2000.
- [8] K.Mahesh and S.Nirenburg. A situated ontology for practical NLP. In Proceeding of Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95), 1995.
- [9] T.R.Gruber. Ontolingua: A mechanism to support portable ontologies. Technical Report KSL 91-66, Stanford University, Knowledge Systems Laboratory, 1992.
- [10] M.R.Genesereth and R.E.Fikes. Knowledge interchange format, version 3.0 reference manual. Technical Report Technical Report Logic-92-1, Computer Science Department, Stanford University, June 1992.
- [11] R.S.Patil, R.E.Fikes, P.F.Patel-Schneider, D.McKay, T.Finin, T.R.Gruber, and R.Neches. The DARPA knowledge sharing effort: Progress report. In Charles Rich, Bernhard Nebel, and William Swartout, editors, Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Third International Conference Morgan Kaufmann, 1992.
- [12] Tim Finin, Don McKay, Rich Fritzson, and Robin McEntire. KQML: An information and knowledge exchange protocol. In Kazuhiro Fuchi and Toshio Yokoi, editors, Knowledge Building and Knowledge Sharing Ohmsha and IOS Press, 1994.
- [13] K.Ireland, Y.Papakonstantinou, J.Ullman, H.Garcia-Molina, J.Hammer and Jennifer Widom. Integrating and accessing heterogeneous information sources in TSIMMIS. In Working notes of 1995 AAAI Spring Symposium on Information Gathering in distributed environments pages 61-64, 1995.
- [14] 武田英明, 飯野健二, 西田豊明. 知識コミュニティにおける仲介機能. マルチエージェントと協調計算 III, pages 49-58. 近代科学社, 1994.
- [15] 岩爪道昭, 白神謙吾, 畑谷和右, 武田英明, 西田豊明. オントロジーに基づく広域ネットワークからの情報収集・分類・統合化. 情報処理学会論文誌, 38(3):606-615, 1997.
- [16] Hideaki Takeda, Takeshi Matsuzuka, and Yuichiro Taniguchi. Discovery of shared topics networks among people — a simple approach to find community knowledge from WWW bookmarks —. In Proceedings of the Pacific Rim International Conference of Artificial Intelligence (PRICAI 00), pages 668-678, 2000.