

知識共有のためのオントロジーの構成的構築

武田英明 西田豊明

{takeda, nishida}@is.aist-nara.ac.jp

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

〒 630-01 生駒市高山町 8916-5

本研究では異種分散知識システムのためのオントロジーのモデルについて考察する。まず、ここではオントロジーをそれぞれが一つの概念化に対応するアスペクトという単位を用意して、それから構成的に全体のオントロジーを定義する。組合せの方法としては、単に違う領域のアスペクトを合わせる組合せアスペクトと、同じ領域の違う概念化のアスペクトを合わせるカテゴリ・アスペクトがある。次にこの方法によるオントロジーに基づくマルチエージェントシステムでは、アスペクトの変換が可能であることを示す。さらに実世界エージェントにおけるオントロジーの多重性について述べる。実世界エージェントはそれぞれの物理的能力に依存してオントロジーが異なる。共有オントロジーは個々のエージェントの共通する概念を表現すると共に、異なる部分は概念の詳細度と概念の解釈の違いによって表現する。最後に、分散的にオントロジーを開発するために、異なるオントロジーの類似性や差異を統計的に調べ、支援する方法について述べる。

CONSTRUCTIVE APPROACHES TO BUILD ONTOLOGIES FOR KNOWLEDGE SHARING

Hideaki Takeda and Toyoaki Nishida

{takeda, nishida}@is.aist-nara.ac.jp

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

8916-5, Takayama, Ikoma, Nara 630-01, Japan

In this paper, we discuss multiple ontologies for distributed and heterogeneous knowledge-base systems from four different viewpoints. First, we model ontology as combination of aspects each of which can represent a way of conceptualization. Aspects are combined either as *combination aspect* which means integration of aspects or *category aspect* which means choice of aspects. Second, we show translation of messages as a way of interpreting multiple aspects in multi-agent systems. A translation agent can translate a message with an aspect into a message with the other aspect by analyzing dependency of aspects. Third, we show how multiple ontologies are represented and used in real-world agents. We provide three different ontologies, i.e., ontologies for object, space, and action. Since ontologies for real-world agents should be different because of their functions for sensing and acting, those ontologies are partially shared as shared ontologies. Finally, we show a statistical approach to aid ontology building which can detect similarity and difference among ontologies.

1 はじめに

知識システムが構築容易性や再利用性は、そこで使われる概念体系がどれだけ明示化かなされているかに依存する。すなわち、異なる知識システム間での知識の共有と再利用で重要になるのが、オントロジーの共有である。ここでいうオントロジーとは対象領域の概念化の結果であり、概念と概念間の関係によって構成される体系である。

共有オントロジーを研究する場合、主に単一オントロジーによって行うものが多い(例えば [2])。しかし、実際のシステムを構築する場合、対象は同一でも複数の概念化が行なわれていたり、逆に同一の概念に見えても、別のものを指していることも多い。すなわち、オントロジーが異なることがあり、また異なるオントロジーを同時に用いている。すなわち多重オントロジーの作成・利用を可能にすることが必要である。

本稿では多重オントロジーに関して行なった我々の4つの試みを説明する。まず最初に多重オントロジーを形式的な定義を論理的な枠組みで行なう。次に ontoligua の拡張として多重オントロジーを扱う言語 ASPECTOL の定義とマルチエージェント系での利用について述べる。次に、実世界エージェントにおけるオントロジーの多重性について考察する。また、人により異なるオントロジーを統計的に調べ、その統合を支援する方法についても述べる。

2 アスペクトによる形式化

2.1 アスペクト

オントロジーは対象世界を記述する体系であるが、それは対象世界の概念化 (conceptualization) の結果である。しかし、単一の概念化によって、記述の詳細度の幅のある記述や広範な対象世界の記述を行なうことは困難であり、実際的ではない。実際には、我々は複数の概念化を適宜組み合わせることによって、対象世界を、広い範囲を詳細度の幅がある形で、とらえている。オントロジーの構築においても、この複数の概念化の利用を反映した方法をとる必要がある。本研究では、一つ概念化による概念の体系をアスペクトと呼び、オントロジーをアスペクトの組み合わせによって構成する。

ここではアスペクトを基本 (atomic) アスペクトと複合 (composite) アスペクトに分けて定義する。基本アスペクトは、他のアスペクトとは独立に定義されるもので、アスペクトの名前と用いられる概念の定義および概念間の関係からなる。これに対して、複合アスペクトはアスペクトの組み合わせによる新たなアスペクトの構成を行なうもので、他のアスペクトを利用して定義される。複合アスペクトはさらに2種類あり、異なる対象領域のアスペクトを合わせることによって定義する組み合わせ (combination) アスペクト、対象領域が重なり合うアスペクト

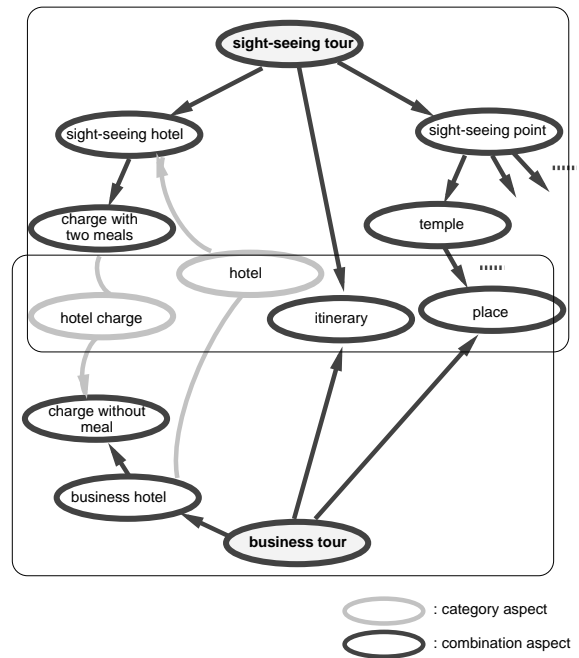


図 1: 共有可能な複数オントロジー

間の関係によって定義されるカテゴリー (category) アスペクトからなる。前者は基本的には二つのアスペクトの和を構成するものであるに対して、後者は異なる概念化の関係を記述している。例えば、旅行に関するオントロジー「旅行アスペクト」は「観光ホテル・アスペクト」と「行程アスペクト」などからなる組合せアスペクト、「ホテル・アスペクト」は「観光ホテル・アスペクト」、「ビジネスホテル・アスペクト」などからなるカテゴリー・アスペクトとして定義できる (図 1 参照)。

2.2 アスペクトの形式的定義

2.2.1 基本的定義

まず、他にアスペクトに依存しない基本アスペクトを定義する。

定義 1 基本アスペクト A の一階述語論理における理論を $T(A)$ とするとき、そのアスペクトの名前 $aspect(A)$ は次の式を満たす。

$$aspect(A) \leftrightarrow T(A)$$

次に、組合せアスペクトを定義する。

定義 2 アスペクト A_1, \dots, A_n の組合せアスペクトの理論 $T(A_{COM}(A_1, \dots, A_n))$ は次式を満たす無矛盾な理論である。

$$T(A_{COM}(A_1, \dots, A_n)) = aspect(A_1) \wedge \dots \wedge aspect(A_n) \wedge I(A_1, \dots, A_n)$$

ただし、 $I(A_1, \dots, A_n)$ はアスペクト A_1, \dots, A_n のアスペクト間理論である。

この場合、組み合わされるアスペクトの中に同名の述語があった場合、予期せぬ結果をもたらすことになる。ここでは同名の述語がある場合は、同一の意味を持つと仮定している。そうでないときは、以下でしめすカテゴリアスペクトで表現すべき場合だと考える¹。

次にカテゴリアスペクトを定義する。この場合、要素となるアスペクトの理論が常に正しいのではなく、状況に依存する。このため、様相論理を導入して形式化する。以下では様相論理 S4 を用い、直感的には \Box は必然を、 \Diamond は可能を示す様相記号である。

定義 3 アスペクト A_1, \dots, A_n のカテゴリアスペクトの理論 $T(A_{CAT}(A_1, \dots, A_n))$ は次式を満たす無矛盾な理論である。

$$T(A_{CAT}(A_1, \dots, A_n)) = \Diamond \text{aspect}(A_1) \wedge \dots \wedge \Diamond \text{aspect}(A_n) \wedge I(A_1, \dots, A_n)$$

ここで、 $I(A_1, \dots, A_n)$ はアスペクト A_1, \dots, A_n のアスペクト間理論である。

組合せアスペクトやカテゴリアスペクトの要素として、また組合せアスペクトやカテゴリアスペクトを使うことができるので、アスペクトは階層的に定義することができる。いま、あるアスペクト A を $A = f(A_1, \dots, A_n)$ と表現したとき、 f は A_{COM} と A_{CAT} の組合せで記述できる。

2.2.2 アスペクト間の関係

アスペクト間の関係として、まず包含 (inclusion) と真包含 (strict inclusion) を定義する。

定義 4 アスペクト A はアスペクト B に包含されるときは、 $\text{aspect}(B) \vdash \Diamond \text{aspect}(A)$ が満たされるときである。

定義 5 アスペクト A はアスペクト B に真包含されるときは、 $\text{aspect}(B) \vdash \text{aspect}(A)$ が満たされるときである。

ここで包含関係とはアスペクト間の包含を意味しており、真包含関係とは論理的な包含関係を意味している。同様に論理式に対しても関係を定義できる。

定義 6 式 f はアスペクト B に包含されるときは、 $\text{aspect}(A) \vdash \Diamond f$ が満たされるときである。

定義 7 式 f はアスペクト B に真包含されるときは、 $\text{aspect}(A) \vdash f$ 。

この定義の意味するところは、アスペクト理論を解釈するには二つの方法があるということである。すなわち、真包含関係とは通常論理的解釈を意味し、包含関係とは、理論の代替をまで含めた解釈を意味している。

¹実際にはこの制約は厳しい過ぎるので、以下の表現言語においては置換えを許している。

定理 1 もしアスペクト A がアスペクト B に真包含されるならば、 A は B に包含される。

もう一つの関係は、代替 (compatible) 関係で、二つのアスペクトが関係しあっていることをしめす。

定義 8 アスペクト A と B が代替関係にある時は、以下の条件のどれかが満たされる時である。

1. A と B が同一アスペクトである。
2. A と B を要素として持つアスペクトが存在する。
3. A の要素 A' と B の要素 B' が代替関係にある。

定義 9 式 f がアスペクト A において代替関係であるとは、 f を含むアスペクト B が存在して、 A と B が代替関係であるときである。

代替関係は無矛盾性や、後で述べる変換可能性を意味するわけではなく、その前提としてアスペクト間に共通部分があることを指している。

2.2.3 アスペクト間理論 (1): アスペクトレベル関係

カテゴリアスペクトの特徴はアスペクト間理論にどのようなものがあるかに依存する。以下ではその特徴としてコンパクトというものを定義する。

定義 10 もしカテゴリアスペクトのアスペクト間理論 $I(A_1, \dots, A_n)$ が以下の式を満たす時、このアスペクトをコンパクトであると呼ぶ。

$$I(A_1, \dots, A_n) \vdash \Box(\text{aspect}(A_1) \vee \dots \vee \text{aspect}(A_n))$$

直感的には、コンパクトなカテゴリアスペクトは、その要素のアスペクト A_1, \dots, A_n で十分であることを意味している。

定理 2 コンパクトなカテゴリアスペクトが2つの要素アスペクト A_1, A_2 からなり、 A_1 が A_2 に真包含される時、 A_1 は A に真包含される。

実際にはこの A と A_1 の関係はもっと強く、 $\text{aspect}(A) \vdash \Box \text{aspect}(A_1)$ である。これを固定的 (rigid) 関係と定義する。

定義 11 式 f がアスペクト A において固定的である時は、 $\text{aspect}(A) \vdash \Box f$ のときである。

もつひとつの特徴は排他的 (exclusive) である。

定義 12 もしカテゴリアスペクトのアスペクト間理論 $I(A_1, \dots, A_n)$ が次式をみたすとき、そのアスペクトは排他的であるという。

$$I(A_1, \dots, A_n) \vdash \bigwedge_{k=1, \dots, n-1} \bigwedge_{l=k+1, \dots, n} \neg \Diamond(\text{aspect}(A_k) \wedge \text{aspect}(A_l))$$

基本アスペクト

```
(define-aspect <アスペクト名>
  (Ontolingua definitions are here
  ...
  )
```

組み合わせアスペクト

```
(define-aspect <アスペクト名>
  (:include <要素アスペクト名>*)
  (:rename (<要素アスペクト名>!<述語名>. <述語名>)
  *)
  (Ontolingua definitions are here
  ...
  )
```

カテゴリ・アスペクト

```
(define-category-aspect <アスペクト名>
  (:include <要素アスペクト名>*)
  (:category-type <カテゴリ・タイプ>)
  (:rename (<要素アスペクト名>!<述語名>. <述語名>)*
  (:default-aspect <デフォルト・アスペクト名>)
  (:translation
    (=> <変換前概念記述> <変換後概念記述>)
    ([:query-precedence <質問文変換時条件>]
     [:inform-precedence <伝達文変換時条件>]
     (> <変換前概念付帯記述> <変換後概念付帯記述>)+)*
  )
```

太字は予約語、[]は省略可能、+は一回以上の繰り返し、*は0回以上の繰り返しを示す。

図 2: ASPECTOL の文法

2.2.4 アスペクト間理論 (2): 対象レベル関係

また、個々の述語に対してアスペクト間理論を定義することができる。これを対象レベル関係と呼ぶ。例えば、アスペクト A の式 p がアスペクト B の q を含意するとは、

$$\diamond(\text{aspect}(A) \wedge p) \rightarrow \square(\text{aspect}(B) \rightarrow q)$$

と書くことができる。もっと一般的に “If アスペクト A_1 の式 f_1 が真ならば アスペクト A_2 の式 f_2 が真である” とは次式のように書ける。

$$\diamond(\text{aspect}(A_1) \wedge f_1) \rightarrow \square(\text{aspect}(A_2) \rightarrow f_2)$$

もし、アスペクト A の式 p とアスペクト B の q が同値ならば、次のようにかける。

定理 3 もし命題 p があるコンパクトなカテゴリアスペクト A の要素全てにおいて同値ならば、 p は A において固定的である。

3 マルチエージェント系における多重オントロジー

3.1 アスペクト記述言語

前節では論理的性質について述べたが、ここでは実際にアスペクトが記述可能な言語 ASPECTOL を定義する。ASPECTOL は Ontolingua[1] の拡張として定義される (図 2 参照)。基本アスペクトはアスペクト理論に相当する Ontolingua の定義文によって定義される。組み合わせアスペクトは利用するアスペクトの宣言をさらに含む (3.1(b)

```
(define-category-aspect FEE
  (:use fee/a fee/b)
  (:category-type nil)
  (define-translation FEE
    (=> (fee/A!fee ?fee) (fee/B!fee ?fee))
    ([:query-precedence nil
     :inform-precedence nil
     (-> (fee-value ?fee ?value)
        (and (adult ?fee ?fee1)
              (student ?fee ?fee2)
              (fee-value ?fee1 ?value)
              (fee-value ?fee2 ?value))))))
  ...
)
```

(a) Category Aspect **fee**

```
(define-aspect temple/A (TEMPLE)
  (:use fee/A)
  (define-class temple (?x)
    :def (and (has-one ?x name)
              (has-one ?x fee)))
  (define-function name (?x) :-> ?n
    :def (and (temple ?x) (string ?n)))
  (define-function temple-fee (?x) :-> ?f
    :def (and (temple ?x) (fee ?f)))
```

(b) Combination Aspect **temple/A**

図 3: アスペクト定義の例

参照)。カテゴリ・アスペクトは利用するアスペクトの宣言とアスペクトに含まれる概念間の関係が論理式として定義される (図 3.1(a) 参照)。

3.2 アスペクト間の変換

知識コミュニティ [3] によるエージェントに基づく分散協調システムでは、エージェントによって必ずしも同一のアスペクトに基づいているとは限らず、この場合異なるアスペクト間で知識 (ここではエージェント間のメッセージ) を変換する必要がある。

競合するアスペクトにおいては、一方のアスペクトに基づく知識を他方に変換することが可能な場合がある。可能である場合とは、知識に含まれているアスペクトに関連するカテゴリ・アスペクトに適用可能な論理式が含まれている時である。

例えば、図 4 に示すような、料金の概念化が異なる二つの「寺」エージェント間のコミュニケーションを考える。今、料金区分という概念があるエージェントが料金区分のないエージェントに質問をした場合、図 5 に示すような手順により、料金区分のないメッセージに直される。返答はこの逆の変換が行なわれる。

3.3 知識コミュニティ KC_0 における実装

知識コミュニティ KC_0 ではアスペクト間の変換機構を導入することで、メッセージ仲介機構 [5] をより効果的に利用することができる。仲介とアスペクト変換を組み合わせた場合のメッセージのやり取りの例を図 6 に示す。ここでは、前項で述べた変換機構は translator というエージェントによって行なわれる。また、オントロジーはアスペクトを単位として ontology server と呼ばれるエージェ

ントで管理され、概念の定義、そのアスペクト、それを用いるエージェントなどの情報を提供する。

4 実世界オントロジーにおける多重性

ここまでで議論してきたオントロジーは主に情報エージェントにおけるオントロジーであったが、これとは別にロボットなどの実世界に關係するエージェントにおけるオントロジーについても研究を行なっている ([4][7] 参照)。

実世界エージェントは共同して動作するためには情報を共有する必要がある。ここではそれを概念の共有として扱っている。概念とはある事象に関する認識、記号、行動をまとめたものと捉えている。共有すべき概念としては、対象、空間、行為の3種類の概念にわけることができる (図7参照)。すなわち、対象・空間・行為の3つの共有オントロジーが必要となる。

ところが各実世界エージェントはセンサの有無・性能、アクチュレータの有無・性能からくる物理的機能と情報処理における機能から、それぞれ理解可能な概念は異なる。ここでは、この共有性と個別性を以下の方法で実現した。

対象に関する概念 共有すべき対象に関する概念は対象の分類 (taxonomy) と対象の属性の概念の2種類である。しかし、エージェントの物理的構造や情報処理能力の違いによって、理解できる対象は異なってくる。対象分類においては is-a 関係を用いて対象を階層的に記述する。ここで抽象度の高い対象は多くのエージェントに共有されるが、より具体的な対象の理解はエージェントの能力に依存する。共通な対象の属性として、位置、色、重さなどがある。このうち位置としては現在位置とよくある

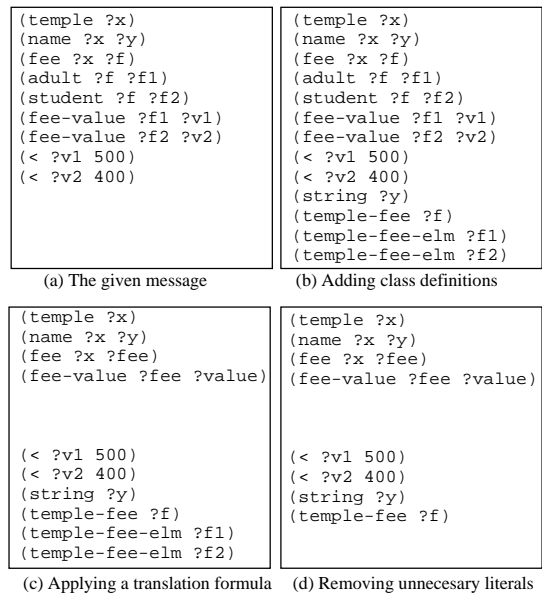


図 5: 変換例

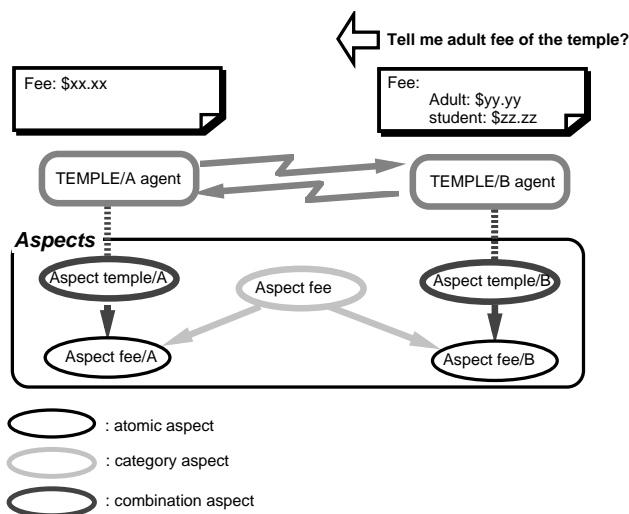


図 4: エージェント間コミュニケーションの例

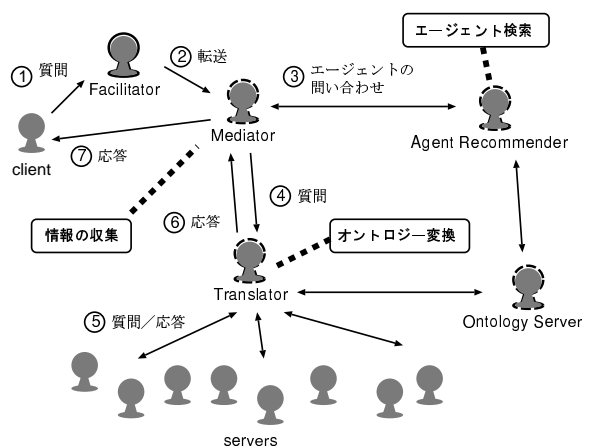


図 6: 質問の場合の仲介

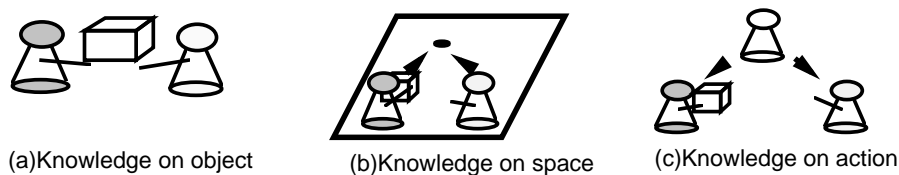


図 7: 3 種類概念の共有

場所 (デフォルト位置) がある。対象の属性も同様に異なる抽象度で記述する。

空間に関する概念 空間に関する概念も共有すべきものであるが、これもエージェントの能力によってその記述が異なってくる。例えば、地図示された経路をもとに移動するエージェントにとってはその経路が空間の記述であるし、相対的な位置しか理解しないエージェントもありうる。ここでは、共有のための空間概念として以下の2つを用意した。

- 前置詞表現：対象と前置詞で対象からの相対的位置を示す。ここでは、at, on, in, in-front-of, behind, to-the-right-of, to-the-left-of の7つを用意した。例えばエージェント A の前ならば (in-front-of agent-a) と表現する。
- 行為表現：特定の行為が実現できる位置を、行為と対象の組合せで表現する。例えばエージェント 1 とエージェント 2 が出会う場所を (meetpoint agent-1, agent-2) と表現する。実際の位置は行為の主体のエージェントによって異なるが、行為の達成という意味では十分である。

それぞれは各エージェントがその表現を解釈する時に実際の位置が決定される。エージェントの個別性はこのとき反映される。

行為に関する概念 行為概念は行為の名前と主体や起点や終点などの行為に関わる属性で定められる。また行為間の関係は行為の分解関係として記述される。同様にその表現をエージェントが解釈する時にそのエージェントの能力に合わせて行なうことにより、個別性を実現する。

実装においては、共有オントロジーから個別オントロジーへ変換を行なう処理をしてから、各エージェントに送っている。

以上のオントロジーを用いてタスクの仲介を行なう機構を作成している (図 8 参照)。

この結果の例を図 9 に示す。ここで、最終的には各エージェントのオントロジーになった行為 (タスク) がエージェントに渡される。

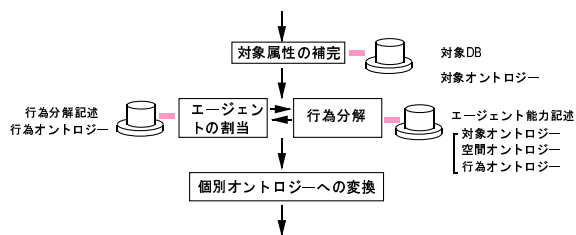


図 8: タスク仲介の流れ

ここでの多重性の表現と利用は次のようにまとめることができる。

- 個別オントロジーは共有オントロジーと概念を共有
- 個別性は詳細度と解釈によって実現
- 多重性の利用は共有オントロジーから個別オントロジーへ変換する形で利用
- 仲介は変換可能な部分だけを共有オントロジーから個別オントロジーへ変換

5 多重オントロジー作成の支援

ここでは別々に作られたオントロジーの共通性や差異を統計的に計算することで、多重オントロジーの作成を支援する方法について述べる [6]。

ここでは複数の人間が独自にオントロジーを書いた時に、いかに相互のオントロジー間の共通性や差異を発見できるかについて統計的方法を使って調べている。図 10 に例を示す。ここでは、各概念のスロットの類似性を用いて計算をしている。「移動経路」のように異なる同名の概念が近くなっている。また、名前の異なる概念 (例えば「行事」と「催し物」) が近くに配置される場合もある。このような類似性を調べることで、概念のカテゴリー化を進めることができると思われる。

6 まとめ

本研究では柔軟なオントロジー構築を目指して、アスペクトという単位によるオントロジーの構築とその利用について述べた。アスペクトによるオントロジー構築は (i) 範囲を明示的に限定したオントロジー構築による構築の容易性と信頼性の向上、(ii) 構成的にオントロジーが

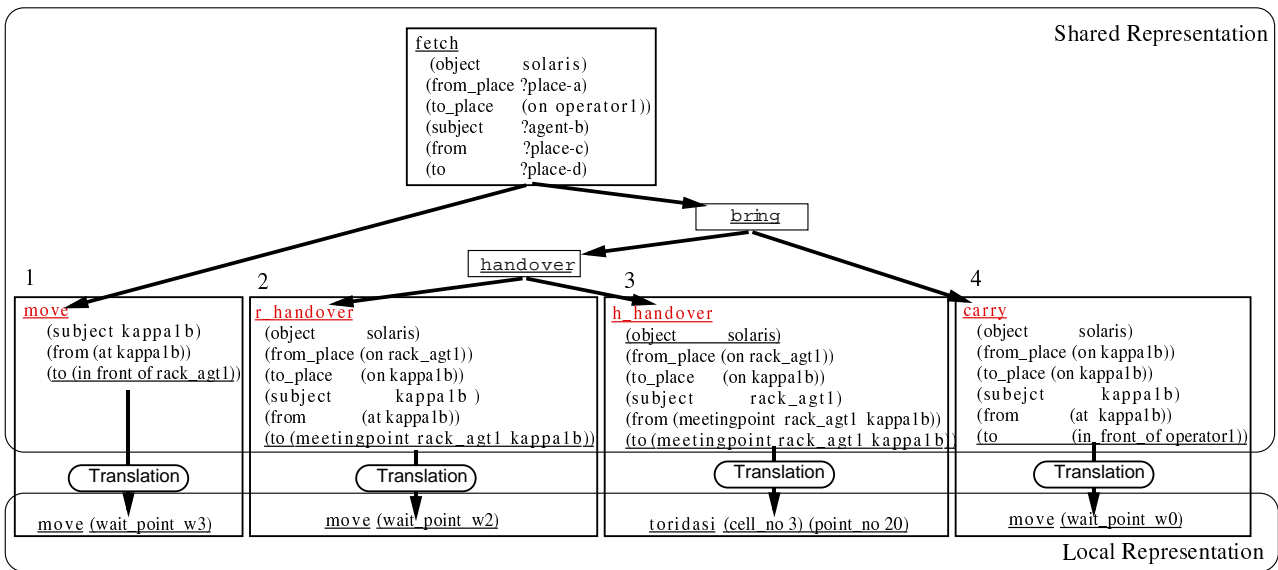


図 9: タスク仲介の例

構築可能、(iii) 例えば概略的定義と詳細定義の混在など、概念の多重性を許したオントロジーも可能、などの利点がある。

しかし、今回の研究では、(i) アスペクト変換記述および変換方法が必ずしも一般的ではない、(ii) 変換記述の作成が容易ではない、などの問題がある。今後はより一般的な変換記述やその自動獲得などを研究していく必要がある。

参考文献

- [1] T. R. Gruber. Ontolingua: A mechanism to support portable ontologies. Technical Report KSL 91-66, Stanford University, Knowledge Systems Laboratory, 1992.
- [2] Thomas R. Gruber. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. Technical Report KSL 93-04, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, August 1993.
- [3] T. Nishida and H. Takeda. Towards the knowledgeable community. In *Proceedings of International Conference on Building and Sharing of Very Large-Scale Knowledge bases '93*, pp. 157–166, Tokyo, 1993. Japan Information Processing Development Center.
- [4] 武田英明, 岩田浩司, 鷹合基行, 沢田篤史, 西田豊明. 共有知識に基づく実世界エージェントの協調機構. 人工知能学会全国大会 (第 10 回) 論文集, pp. 453–456, 1996.
- [5] 武田英明, 飯野健二, 西田豊明. 知識コミュニティ kc0 における知識共有メカニズム. 人工知能学会全国大会 (第 8 回) 論文集, pp. 279–282, 1994.
- [6] 鷹合基行, 武田英明, 西田豊明. マルチエージェント系のためのオントロジーの分散開発支援環境. 人工知能学会全国大会 (第 10 回) 論文集, pp. 139–142, 1996.
- [7] 寺田和憲, 武田英明, 西田豊明. 実世界エージェントのためのオントロジーの構築. 人工知能学会全国大会 (第 10 回) 論文集, pp. 203–206, 1996.

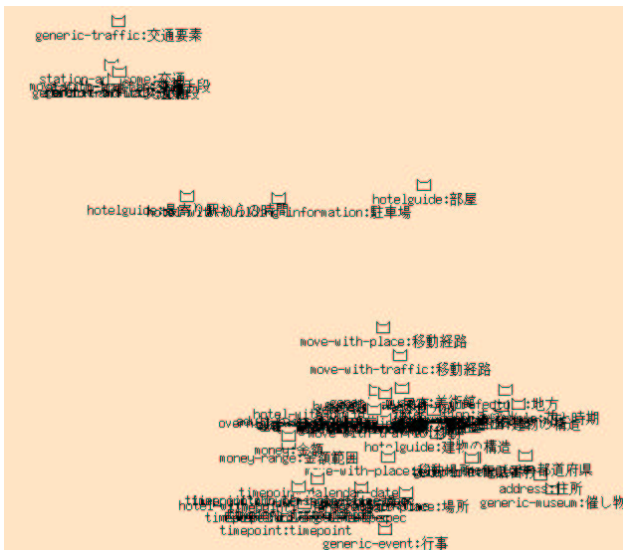


図 10: 多次元尺度構成法による統合