人工知能学会研究会資料
SIG-SW&ONT-A301-07

不均質なオントロジに対する問合せ近似変換

赤埴 淳一　　平松 薫　　佐藤 哲司
日本電信電話株式会社　NTT コミュニケーション科学基礎研究所
〒 619-0237　京都府相楽郡精華町光台 2-4
{akahani, hiramatu, satoh}@cslab.kecl.ntt.co.jp

セマンティックウェブにおいて意味的相互運用性を実現するには，不均質なオントロジを統合する必要がある．オントロジを統合する際，対応するオントロジが存在しない場合が多いため，近似処理が必要である．しかし，従来のオントロジ統合の研究は，近似処理に対する明確な意味論を与えていなかった．そこで，本稿では，不均質なオントロジの近似統合に対し明確な意味論をもつ問合せ近似変換手法を提案する．

1　はじめに

セマンティックウェブにおいて，オントロジは重要な役割を果たす．しかし，ウェブは非集中的な性質をもっているため，全世界で一つのオントロジを構築あるいは標準化するのは困難である．例えば，文化の差違により，オントロジは地域によって異なる．また，オントロジは時間により変化する．あるオントロジは，独立に更新あるいはカスタマイズされる可能性がある．このようなオントロジの時間的・空間的な拡がりに対処するためには，不均質なオントロジを統合する必要がある．

複数のオントロジを統合する際，各オントロジが完全に対応しない場合が多い．例えば，米国のケイジャンレストランに対応するクラスが，日本のオントロジに存在しないかもしれない．このような場合，米国料理店に対応するクラスに近似することが考えられる．しかし，従来のオントロジ統合の研究では，近似処理に対する明確な意味論が与えられていなかった．

このような観点から，われわれは，オントロジ写像に基づく問合せの近似変換手法を提案している [1]．本手法では，オントロジ間の対応関係を表したオントロジ写像に基づいて，あるオントロジで表現された問合せが，別のオントロジで表現された問合せに変換される．より近い変換を特徴づけるために，最小包含 (minimally-containing) と最大包含 (maximally-contained) の 2 種類の近似問合せを定義し，これらの近似問合せに変換するオペレータを提案している．しかし，これらの変換オペレータはクラスやプロパティの包摂関係のみが記述可能な単純なオントロジ記述言語を対象にしたものであった．

W3C で標準化が進められている OWL DL[2] 等のオントロジ記述言語では，値域制限 (value restrictions，例えば，`allValuesFrom` や `someValuesFrom`) や否定 (例えば，`disjointWith` や `complementOf`) など高い記述能力をもっている．例えば，`allVauesFrom` を用いて，フランスワインだけをワインリストにもつレストランを問合せることが可能である．問合せ対象のオントロジにワインリストのプロパティがなく，白ワインリストのプロパティが存在する場合には，問合せの近似変換が必要である．また，否定も実応用では有用である．上の例で，日本のオントロジに，米国料理店に対応するクラスは存在しないが，米国料理店と排反の関係にあるフランス料理店やイタリア料理店に対応するクラスが存在する場合を考える．このような場合，ケイジャンレストランに関する問合せを，フランス料理店でもイタリア料理店でもないレストランに関する問合せに近似変換することが考えられる．

そこで，オントロジ写像に基づく問合せの近似変換手法を，値域制限や否定を記述可能なオントロジ記述言語に対して拡張する．本稿では，最小包含問合せに変換するための最小汎化オペレータに焦点をあてる．これは，記述論理の非標準的な推論機構が

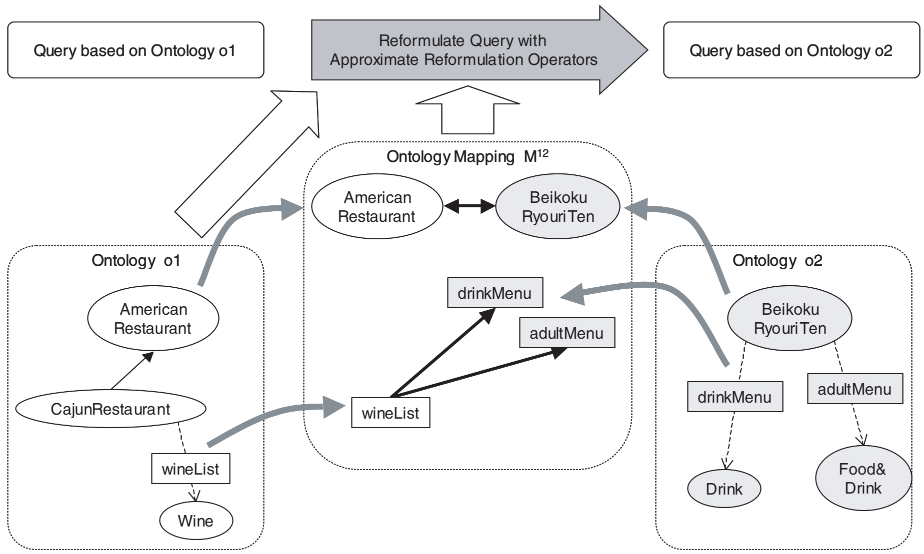

図 1: オントロジ写像に基づく問合せの近似変換

必要になるからである.

本稿では，まずオントロジ写像に基づく問合せの近似変換手法について述べる．次に，値域制限と否定に対する近似変換手法を与える．最後に，他の研究との関連について述べる.

2 オントロジ写像に基づく近似問合せ

オントロジ写像に基づく問合せの近似変換手法 [1] では，図 1 に示すように，オントロジ間の対応関係を表したオントロジ写像に基づいて，あるオントロジで表現された問合せが，別のオントロジで表現された問合せに変換される．本節では，本近似変換手法の形式的枠組について述べる.

2.1 オントロジに基づく問合せ

本稿では，OWL DL [2] のサブセットとなるオントロジ記述言語を対象とする．具体的には，OWL DL から，クラスの無名の連言 (unnamed conjunctions: `intersectionOf`)，クラスの選言 (`unionOf`)，および値の個数制限 (number restrictions: `cardinality` 等) を除いたものである．簡単化のため，記述論理の記述法を用いる.

本稿のオントロジ記述言語では，クラス記述の構成子として，値域制限 (`allVauesFrom` に対応する $\forall P.C$ と `someValuesFrom` に対応する $\exists P.C$) および否定 (`complementOf` に対応する $\neg C$) を提供する．各オントロジにおけるクラスとプロパティを以下のように明確に区別する.

定義 1 (クラス記述) オントロジ O^i における原子クラスの集合 $\mathcal{C}_0^i$ とプロパティの集合 $\mathcal{P}^i$ が与えられたとき，オントロジ O^i におけるクラスの集合 $\mathcal{C}^i$ は以下のクラス記述から構成される.

- C^i，ただし $C^i \in \mathcal{C}_0^i$.
- $\forall P^i.C^i$，$\exists P^i.C^i$，$\neg C^i$ ただし $C^i \in \mathcal{C}^i$，$P^i \in \mathcal{P}^i$.

オントロジは，クラス間およびプロパティ間の包摂関係 (`subClassOf`，`subPropertyOf`)，クラス間の排反関係 (`disjointWith`)，各クラスおよび各プロパティのインスタンスで記述される．OWL では個体 (individual) とデータリテラルを区別しているが，ここでは簡単化のため，両者を区別せずに扱う.

定義 2 (オントロジ記述) オントロジ O^i におけるクラスの集合 $\mathcal{C}^i$，プロパティの集合 $\mathcal{P}^i$，および個体とデータリテラルの集合 $\mathcal{L}$ が与えられたとき，オントロジ O^i におけるオントロジ記述 $\mathcal{O}^i$ は以下から構成される.

- $C_1^i \sqsubseteq C_2^i$，$P_1^i \sqsubseteq P_2^i$，$C_1^i \sqsubseteq \neg C_2^i$
- $a : C^i$，$\langle a, b \rangle : P^i$

ただし $C_1^i, C_2^i, C^i \in \mathcal{C}^i$．$P_1^i, P_2^i, P^i \in \mathcal{P}^i$，$a, b \in \mathcal{L}$.

OWL 構成要素	統語論	意味論
allValuesFrom	$\forall P^i.C^i$	$\{x \mid \forall y.\langle x,y\rangle \in \mathcal{I}(P^i) \supset y \in \mathcal{I}(C^i)\}$
someValuesFrom	$\exists P^i.C^i$	$\{x \mid \exists y.\langle x,y\rangle \in \mathcal{I}(P^i) \wedge y \in \mathcal{I}(C^i)\}$
complementOf	$\neg C^i$	$\mathcal{I}(\Delta) \setminus \mathcal{I}(C^i)$
subClassOf	$C_1^i \sqsubseteq C_2^i$	$\mathcal{I}(C_1^i) \subseteq \mathcal{I}(C_2^i)$
subPropertyOf	$P_1^i \sqsubseteq P_2^i$	$\mathcal{I}(P_1^i) \subseteq \mathcal{I}(P_2^i)$
disjointWith	$C_1^i \sqsubseteq \neg C_2^i$	$\mathcal{I}(C_1^i) \cap \mathcal{I}(C_2^i) = \phi$
(individual axioms)	$a : C^i$	$\mathcal{I}(a) \in \mathcal{I}(C^i)$
(individual axioms)	$\langle a,b\rangle : P^i$	$\mathcal{I}(\langle a,b\rangle) \in \mathcal{I}(P^i)$

表 1: オントロジ記述言語の統語論と意味論

例えば，図 1 のオントロジ o1 におけるオントロジ記述 $\mathcal{O}^1$ は，以下を含む．(図では，クラスやプロパティの包摂関係を，矢印付きの実線で表記している)

- $\texttt{CajunRestaurant}^1 \sqsubseteq \texttt{AmericanRestaurant}^1$.

本オントロジ記述言語の意味論は，解釈領域 Δ と解釈関数 $\mathcal{I}$ を用いて定義される．表 1 に，本オントロジ記述言語の統語論と意味論を示す．式 A が式の集合 S の論理的帰結であることを，$S \models A$ と表す．

次に，オントロジに基づく問合せを定義する．本稿では，クラスに関する問合せとプロパティに関する問合せの連言を対象とする．

定義 3 (問合せ) 変数の集合を，集合 $\mathcal{L}$ と排反な集合 $\mathcal{V}$ とする．オントロジ O^i に基づく問合せ Q^i は，以下で記述される．

$$Q_C^i \wedge Q_P^i$$

ここで，

- Q_C^i は $C^i(x)$ の連言．ただし，$C^i \in \mathcal{C}^i$ かつ $x \in \mathcal{L} \cup \mathcal{V}$.
- Q_P^i は $P^i(x,y)$ の連言．ただし，$P^i \in \mathcal{P}^i$ かつ $x, y \in \mathcal{L} \cup \mathcal{V}$.

例えば，オントロジ o1 において，メルローをワインリストにもつケイジャンレストランに関する問合せは，以下のように記述される．

$$\texttt{CajunRestaurant}^1(x) \wedge \texttt{wineList}^1(x, \text{"}\texttt{Merlot}\text{"})$$

問合せ Q^i に対する解は，Q^i に含まれる変数 $v_1, \cdots, v_n$ に個体あるいはデータリテラルの組 $\langle a_1, \cdots, a_n\rangle$ を代入することにより得られる．このような代入を σ で表す．問合せ Q^i の解集合 $A(Q^i)$ を，$\mathcal{O}^i \models Q^i\sigma$ を満たす代入の集合とする．複数の問合せ間の包含関係は，以下で定義される．

定義 4 (問合せの包含関係) 問合せ Q_1 と Q_2 に対して，$A(Q_1) \subseteq A(Q_2)$ が成立するとき，問合せ Q_1 は問合せ Q_2 に包含されると呼び，$Q_1 \sqsubseteq Q_2$ と表記する．

2.2 オントロジ間の写像

本近似変換手法では，オントロジ間の対応関係を記述したオントロジ写像に基づいて，問合せを近似変換する．本稿では，上記のオントロジ記述言語で記述されたオントロジ写像を対象とする．

定義 5 (オントロジ写像) オントロジ O^i と O^j の間のオントロジ写像 M^{ij} は，以下から構成される集合である．

- $C^i \sqsubseteq C^j$, $C^j \sqsubseteq C^i$, $C^i \sqsubseteq \neg C^j$, $C^j \sqsubseteq \neg C^i$
- $P^i \sqsubseteq P^j$, $P^j \sqsubseteq P^i$

ただし $C^i \in \mathcal{C}^i$，$P^i \in \mathcal{P}^i$ 等とする．

また，オントロジ写像 M^{ij} の値域 $R(M^{ij})$ を，M^{ij} に現れるオントロジ O^j のクラスおよびプロパティの集合と定義する．

例えば，図 1 のオントロジ o1 と o2 の間のオントロジ写像 M^{12} は，以下を含む．

- $\texttt{AmericanRestaurant}^1 \sqsubseteq \texttt{BeikokuRyouriTen}^2$.

- $\texttt{BeikokuRyouriTen}^2 \sqsubseteq \texttt{AmericanRestaurant}^1$.
- $\texttt{wineList}^1 \sqsubseteq \texttt{drinkMenu}^2$.
- $\texttt{wineList}^1 \sqsubseteq \texttt{adultMenu}^2$.

われわれの目標は，オントロジ写像 M^{ij} に基づいて，オントロジ O^i における問合せをオントロジ O^j における問合せに近似変換することである．一般に，ある問合せを近似変換した問合せは複数存在するが，元の問合せにより近い方が望ましい．そこで，データベースの問合せ変換で提案されている最大包含 (maximally-contained) 変換 [3] の考え方を拡張する．具体的には，元の問合せを最小限に包含する最小包含 (minimally-containing) 問合せと，元の問合せに最大限包含される最大包含問合せを導入する．

各オントロジ記述 $\mathcal{O}^i$ および $\mathcal{O}^j$ とオントロジ写像 M^{ij} が無矛盾であると仮定し，これらをマージしたオントロジ記述 $\mathcal{O}^i \cup M^{ij} \cup \mathcal{O}^j$ における問合せの包含関係で近似問合せを特徴づける．解集合 $A(Q^i)$ の定義を，$\mathcal{O}^i \cup M^{ij} \cup \mathcal{O}^j \models Q\sigma$ を満たす代入 σ の集合と拡張し，近似問合せを以下のように定義する．

定義 6 (近似問合せ) Q^i をオントロジ O^i に基づく問合せ，Q^j をオントロジ写像 M^{ij} の値域 $R(M^{ij})$ に現れるクラスおよびプロパティで記述されたオントロジ O^j の問合せとする．このとき，

- $Q^j \sqsubseteq Q^i$ かつ $Q^i \sqsubseteq Q^j$ であるとき，Q^j を Q^i の等価問合せとよぶ．
- $Q^i \sqsubseteq Q^j$ であり，$Q^i \sqsubseteq Q^j_1$ かつ $Q^j_1 \sqsubseteq Q^j$ なる問合せ Q^j_1 が存在しないとき，Q^j を Q^i の最小包含問合せとよぶ．
- $Q^j \sqsubseteq Q^i$ であり，$Q^j \sqsubseteq Q^j_1$ かつ $Q^j_1 \sqsubseteq Q^i$ なる問合せ Q^j_1 が存在しないとき，Q^j を Q^i の最大包含問合せとよぶ．

例えば，上述の問合せの例に対して，オントロジ o2 における以下の問合わせは，最小包含問合せではない．

$$\texttt{BeikokuRyouriTen}^2(x) \wedge \texttt{drinkMenu}^2(x, \texttt{"Merlot"})$$

これは，最小包含問合せとなる以下が存在するからである．

$$\texttt{BeikokuRyouriTen}^2(x) \wedge \texttt{drinkMenu}^2(x, \texttt{"Merlot"}) \\ \wedge \texttt{adultMenu}^2(x, \texttt{"Merlot"})$$

3 近似変換オペレータ

本節では，最小包含問合せを求めるための最小汎化オペレータについて述べる．

変換された問合せは，オントロジ写像の値域に現れるクラスおよびプロパティで構成される．直感的には，最小包含問合せに現れるクラス (あるいはプロパティ) は，元の問合せに現れるクラス (あるいはプロパティ) を最小限に包含すべきである．したがって，クラスやプロパティの最小上界 (および，後述のように最大下界) が必要となる．以下の定義は，文献 [4] の拡張版である．

定義 7 (最小上界と最大下界) C をクラス，O をオントロジ記述，TC をクラスの集合とする．クラス C の最小上界 $LUB(C, O, TC)$ と最大下界 $GLB(C, O, TC)$ を以下で定義する．

- $LUB(C, O, TC) = \{C' \mid C' \in TC,\ O \models C \sqsubseteq C'$ であり，$O \models C \sqsubseteq C'_1$ かつ $O \models C'_1 \sqsubseteq C'$ なる $C'_1 \in TC$ は存在しない $\}$.
- $GLB(C, O, TC) = \{C' \mid C' \in TC,\ O \models C' \sqsubseteq C$ であり，$O \models C' \sqsubseteq C'_1$ かつ $O \models C'_1 \sqsubseteq C$ なる $C'_1 \in TC$ は存在しない $\}$.

プロパティに対する最小上界と最大下界も同様に定義する．

最小包含問合せを計算するには，各オントロジ記述およびオントロジ写像をマージしたオントロジ記述に関して元の問合せのクラスやプロパティの最小上界を計算する必要がある．例えば，上述の例で，マージされたオントロジ $\mathcal{O}^1 \cup M^{12} \cup \mathcal{O}^2$ とオントロジ写像の値域 $R(M^{12})$ に関する $\texttt{CajunRestaurant}^1$ クラスの最小上界は，以下の集合となる．

- $LUB(\texttt{CajunRestaurant}^1, \mathcal{O}^1 \cup M^{12} \cup \mathcal{O}^2, R(M^{12})) = \{\texttt{BeikokuRyouriTen}^2\}$.

同様に，マージされたオントロジ $\mathcal{O}^1 \cup M^{12} \cup \mathcal{O}^2$ とオントロジ写像の値域 $R(M^{12})$ に関する $\texttt{wineList}^1$ プロパティの最小上界は，以下の集合となる．

- $LUB(\texttt{wineList}^1, \mathcal{O}^1 \cup M^{12} \cup \mathcal{O}^2, R(M^{12})) = \{\texttt{drinkMenu}^2, \texttt{adultMenu}^2\}$.

定義 8 (最小汎化オペレータ) オントロジ O^i と O^j のオントロジ記述をそれぞれ $\mathcal{O}^i$ と $\mathcal{O}^j$，M^{ij} をオントロジ写像とする．

クラスに関する問合せ $C^i(x)$ に対する最小汎化オペレータは，$LUB(C^i, \mathcal{O}^i \cup M^{ij} \cup \mathcal{O}^j, R(M^{ij})) = \{C_1^j, \cdots, C_n^j\}$ に対し，以下で与えられる．

$$MSG(C^i(x), \mathcal{O}^i, \mathcal{O}^j, M^{ij}) = C_1^j(x) \wedge \cdots \wedge C_n^j(x)$$

同様に，プロパティに関する問合せ $P^i(x,y)$ に対する最小汎化オペレータは，$LUB(P^i, \mathcal{O}^i \cup M^{ij} \cup \mathcal{O}^j, R(M^{ij})) = \{P_1^j, \cdots, P_n^j\}$ に対し，以下で与えられる．

$$MSG(P^i(x,y), \mathcal{O}^i, \mathcal{O}^j, M^{ij}) = P_1^j(x,y) \wedge \cdots \wedge P_n^j(x,y)$$

上記の最小上界の例から，最小汎化オペレータの適用例は以下のように得られる．

$$MSG(\mathtt{CajunRestaurant}^1(x), \mathcal{O}^1, \mathcal{O}^2, M^{12}) = \mathtt{BeikokuRyouriTen}^2(x).$$

$$MSG(\mathtt{wineList}^1(x, \text{"}\mathtt{Merlot}\text{"}), \mathcal{O}^1, \mathcal{O}^2, M^{12}) = \mathtt{drinkMenu}^2(x, \text{"}\mathtt{Merlot}\text{"}) \wedge \mathtt{adultMenu}^2(x, \text{"}\mathtt{Merlot}\text{"}).$$

したがって，最小汎化オペレータにより，オントロジ o1 に基づく問合せ

$$\mathtt{CajunRestaurant}^1(x) \wedge \mathtt{wineList}^1(x, \text{"}\mathtt{Merlot}\text{"})$$

は，オントロジ o2 に基づく以下の問合わせに近似変換できる．

$$\mathtt{BeikokuRyouriTen}^2(x) \wedge \mathtt{drinkMenu}^2(x, \text{"}\mathtt{Merlot}\text{"}) \wedge \mathtt{adultMenu}^2(x, \text{"}\mathtt{Merlot}\text{"}).$$

本方式の正当性は，次の定理により保証される [1]．

定理 1 $\mathcal{O}^i$ と $\mathcal{O}^j$ をオントロジ O^i と O^j それぞれのオントロジ記述，M^{ij} をオントロジ写像とする．オントロジ O^i に基づく問合せ Q^i に最小汎化オペレータを適用して得られるオントロジ O^j に基づく問合せ $MSG(Q^i, \mathcal{O}^i, \mathcal{O}^j, M^{ij})$ は，Q^i の最小包含問合せである．

4 クラス記述の最小上界

本近似変換手法では，クラスやプロパティの最小上界を計算する必要がある．オントロジ記述言語の記述能力により，これらの計算手法は異なる．本稿で対象としているオントロジ記述言語では，プロパティに対しては，OWL など通常のオントロジ記述言語と同様に包摂関係だけが記述可能である．したがって，プロパティの最上上界は，包摂関係から容易に計算することができる．

しかし，クラスに対しては，値域制限や否定が記述可能である[1]ため，これらのクラス記述に対する計算手法が必要となる．そこで，本節では，値域制限および否定に対する最小上界の計算手法を構成的に与える．以下では，簡単化のため，$LUB(C, \mathcal{O}^i \cup M^{ij} \cup \mathcal{O}^j, R(M^{ij}))$ を $LUB(C)$ と略記する．

4.1 値域制限

$\forall P^i.C^i$ などの値域制限の最小上界は，変換先のオントロジにおける値域制限の集合となる．値域制限は，クラスとプロパティから構成されるため，この両者の包摂関係を考慮しなければならない．

値域制限の意味論から以下が成立する．

- $P_1 \sqsubseteq P_2$ かつ $C_1 \sqsubseteq C_2$ であるとき，$\forall P_2.C_1 \sqsubseteq \forall P_1.C_2$ および $\exists P_1.C_1 \sqsubseteq \exists P_2.C_2$．

例えば，白ワインリストがワインリストのサブプロパティであり，ボルドーワインがフランスワインのサブクラスとする．

- $\mathtt{whiteWineList}^2 \sqsubseteq \mathtt{wineList}^1$,
- $\mathtt{BordeauxWine}^1 \sqsubseteq \mathtt{FrenchWine}^2$,

このとき，以下が成立する．

- $\forall\mathtt{wineList}^1.\mathtt{BordeauxWine}^1 \sqsubseteq \forall\mathtt{whiteWineList}^2.\mathtt{FrenchWine}^2$

直感的には，ボルドーワインをワインリストにもつクラスは，フランスワインを白ワインリストにもつクラスのサブクラスであることを意味する．これは，後者がイタリアのロゼワインをもつインスタンスを含む可能性があるからである．

[1] OWL DL では，さらに，クラスの連言や選言が記述可能である

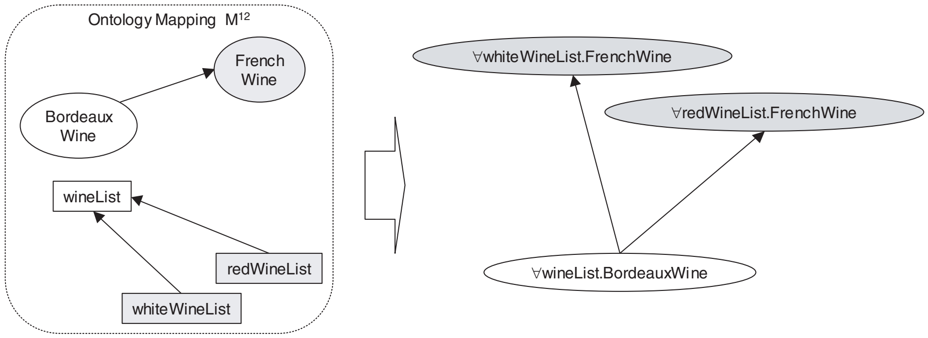

図 2: 値域制限に対する最小上界

このように，値域制限 $\forall P^i.C^i$ をサブクラスにもつ値域制限は，プロパティ P^i (例えば，$\texttt{wineList}^1$) のサブプロパティ (例えば，$\texttt{whiteWineList}^2$) から構成される．したがって，値域制限 $\forall P^i.C^i$ の最小上界の計算には，プロパティの最大下界の計算が必要になる．意味論的には，最大下界はその各要素の選言である．しかし，$\forall P.C$ の意味論においてプロパティは否定的に現れるので，最大下界の否定は各要素の否定の連言となる．厳密には，値域制限の意味論から以下が成立する．

命題 1 (値域制限に対する最小上界) 値域制限に対する最小上界は，以下で与えられる．

- $LUB(\forall P^i.C^i) = \{\forall P^j_k.C^j_l \mid P^j_k \in GLB(P^i), C^j_l \in LUB(C^i)\}$.
- $LUB(\exists P^i.C^i) = \{\exists P^j_k.C^j_l \mid P^j_k \in LUB(P^i), C^j_l \in LUB(C^i)\}$.

例えば，図 2 のオントロジ写像から，以下が得られる．

- $GLB(\texttt{wineList}^1) = \{\texttt{whiteWineList}^2, \texttt{redWineList}^2\}$.
- $LUB(\texttt{BordeauxWine}^1) = \{\texttt{FrenchWine}^2\}$.

したがって，値域制限に対する最小上界は以下のようになる (図 2 参照).

- $LUB(\forall \texttt{wineList}^1.\texttt{BordeauxWine}^1 = \{\forall \texttt{whiteWineList}^2.\texttt{FrenchWine}^2, \forall \texttt{redWineList}^2.\texttt{FrenchWine}^2\}$.

これは，ボルドーワインをワインリストにもつクラスは，フランスワインを白ワインリストと赤ワインリストの両方にもつクラスのサブクラスであることを意味する．

4.2 否定

クラスの否定は，実応用において有用である．例えば，図 3 のオントロジ記述とオントロジ写像を考えてみる．例えば，オントロジ o2 において，ケイジャンレストランに関して問合せたいとする．オントロジ o2 には，ケイジャンあるいは米国料理店に対応するクラスが存在しない．しかし，オントロジ o1 で米国料理店の排反クラスとして欧州料理店が定義されており，欧州料理店のサブクラス (フランス料理店，イタリア料理店) に対応するクラスがオントロジ o2 に存在する．これらのクラスを用いて，近似問合せを構成することができる．

オントロジ o1 は，以下を含む．

$$\texttt{AmericanRestaurant}^1 \sqsubseteq \neg\texttt{EuropeanRestaurant}^1.$$

したがって，ケイジャンレストランの最小上界の計算には，欧州料理店の否定クラスの最小上界 $LUB(\neg\texttt{EuropeanRestaurant}^1)$ の計算が必要になる．

- $C_1 \sqsubseteq C_2$ であるとき，$\neg C_2 \sqsubseteq \neg C_1$ である

ことから，$\neg\texttt{EuropeanRestaurant}^1$ クラスはその各サブクラスの否定に包摂される．

上記の議論から，オントロジ記述言語の意味論に基づいて，以下を示すことができる．

命題 2 (否定に対する最小上界) 否定に対する最小上界は，以下で与えられる．

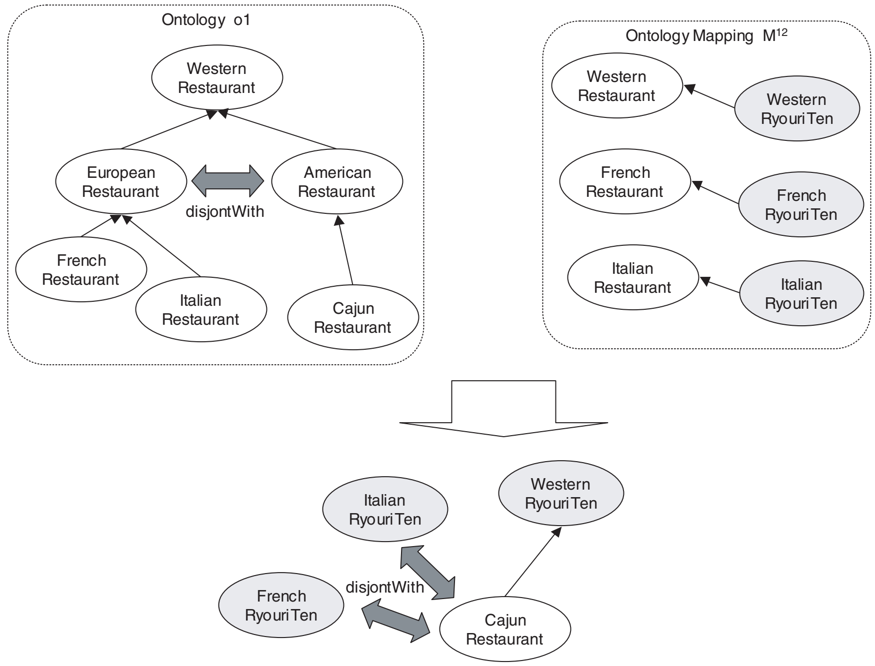

図 3: 否定に対する最小上界

- $LUB(\neg C^i) = \{\neg C_k^j \mid C_k^j \in GLB(C^i)\}$.

この命題を上述の例に適用すると，以下が得られる．

- $LUB(\neg\mathtt{EuropeanRestaurant}^1) = \{\neg\mathtt{FrenchRyouriTen}^2, \neg\mathtt{ItalianRyouriTen}^2\}$.

したがって，図 3 に示すように，ケイジャンレストランの最小上界は，フランス料理店およびイタリア料理店を除く西洋料理店のクラスとなる．

- $LUB(\mathtt{CajunRestaurant}^1) = \{\mathtt{WesternRyouriTen}^2, \neg\mathtt{FrenchRyouriTen}^2, \neg\mathtt{ItalianRyouriTen}^2\}$.

最大下界を計算する際，値域制限に対する最大下界の計算が必要になる場合がある．次の命題は命題 1 の双対である．

命題 3 (値域制限に対する最大下界) 値域制限に対する最大下界は，以下で与えられる．

- $GLB(\forall P^i.C^i) = \{\forall P_k^j.C_l^j \mid P_k^j \in LUB(P^i), C_l^j \in GLB(C^i)\}$.
- $GLB(\exists P^i.C^i) = \{\exists P_k^j.C_l^j \mid P_k^j \in GLB(P^i), C_l^j \in GLB(C^i)\}$.

5 関連研究

Approximate terminological query framework [5] は，問合せの近似に対する形式的枠組を与えている．この枠組は，一つのオントロジ内での推論を効率化するために，問合せを段階的に近似するものである．問合せの包含関係を導入しているが，問合せの近似の尺度に用いているだけである．それに対し，本稿ではオントロジ間の問合せ変換を対象とし，最小包含および最大包含という近似問合せを導入している．

また，近似情報フィルタリング [4] でも問合せの近似変換が提案されている．しかし彼らは，クラス階層のみを対象とした最大包含問合せしか扱っていない．本稿では，プロパティの包摂関係をも対象とし，記述論理に対する非標準な推論機構が要求される最小包含問合せに対する変換を可能としている．

文献 [6] でサーベイされているように，従来のオントロジ統合に関する研究では，オントロジ間のアドホックな変換規則が用いられてきた．このアプローチでは，柔軟なオントロジ統合が可能であるが，変換規則に明確な意味論がほとんど与えられていなかった．オントロジ統合システム [7] では，変換規則に対し，健全あるいは完全というラベルを付与することにより，近似変換に明確な意味論を定義している．しか

し，利用者が個々の変換規則に対して，このようなラベルを付けなければならないため，変換規則の整合性を保証するのが困難である．それに対し，われわれの手法では，変換オペレータによって変換規則の自動生成を可能としている．

6 おわりに

本稿では，オントロジ写像に基づく問合せの近似変換手法を，値域制限や否定を記述可能なオントロジ記述言語に対して拡張した．最小包含問合せに変換するための最小汎化オペレータに焦点をあて，値域制限や否定に対する最小上界の計算法を構成的に与えた．最小包含問合せを対象としたのは，記述論理の非標準的な推論機構が要求されるからである．

本稿で対象としたオントロジ記述言語は，OWL DL のサブセットであり，クラスの選言等の記述を許していない．クラスの選言を許すと，変換された問合せが連言に閉じなくなる可能性が生じる．このような課題を解決し，より高い記述能力をもつオントロジ記述言語に対する問合せ変換を実現する必要がある．

本手法では，オントロジ記述言語でオントロジ写像が記述される．したがって，オントロジを更新あるいはカスタマイズした際，その差分をオントロジ写像として記述することにより，オントロジの時間的な変化に容易に対応可能である．

本稿で提案した手法は実装されており，その一部は GeoLinkAgent プロトタイプ [8] に組込まれている．本プロトタイプでは，時空間に基づく地域情報検索システム [9] を連携するために，問合せの近似変換が用いられている．デジタルシティ[10] に関する研究が示すように，情報空間における異文化性はますます進展すると考えられる．このようなオントロジの空間的な拡がりに対しても，本手法は有効である．

参考文献

[1] Akahani, J., Hiramatsu, K. and Satoh, T.: Approximate Query Reformulation based on Hierarchical Ontology Mapping, in *Proc. of International Workshop on Semantic Web Foundations and Application Technologies (SWFAT)*, pp. 43–46 (2003).

[2] Patel-Schneider, P. F., Hayes, P. and Horrocks, I.: OWL Web Ontology Language Semantics and Abstract Syntax, http://www.w3.org/TR/2003/WD-owl-semantics-20030331/ (2003).

[3] Halevy, A. Y.: Theory of answering queries using views, *SIGMOD Record*, Vol. 29, No. 4, pp. 40–47 (2000).

[4] Stuckenschmidt, H.: Approximate Information Filtering with Multiple Classification Hierarchies, *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, Vol. 2, No. 3, pp. 295–302 (2002).

[5] Stuckenschmidt, H. and Harmelen, van F.: Approximating Terminological Queries, in *Proc. of the 4th International Conference on Flexible Query Answering Systems (FQAS'02)*, Springer-Verlag (2002).

[6] Wache, H., Voegele, T., Visser, U., Stuckenschmidt, H., Schuster, G., Neumann, H. and Huebner, S.: Ontology-Based Integration of Information – A Survey of Existing Approaches, in *Proc. of IJCAI 2001 Workshop on Ontologies and Information Sharing* (2001).

[7] Calvanese, D., De Giacomo, G. and Lenzerini, M.: A Framework for Ontology Integration, in *The Emerging Semantic Web*, pp. 201–214, IOS Press (2002).

[8] Akahani, J., Hiramatsu, K. and Kogure, K.: Coordinating Heterogeneous Information Services based on Approximate Ontology Translation, in *Proc. of AAMAS-2002 Workshop on Agentcities: Challenges in Open Agent Systems*, pp. 10–14 (2002).

[9] 平松薫，赤埴淳一，佐藤哲司：時空間構造に基づく Web 検索の拡張, 人工知能学会研究会資料 SIG-SW&ONT-A201-08 (2002).

[10] Ishida, T. and Isbister, K.: *Digital Cities: Technologies, Experiences, and Future Perspectives*, Springer-Verlag (2000).