

RDF 意味論と OWL 意味論の統合

Integration of RDF and OWL Semantics

小出 誠二*1

Seiji Koide

武田 英明*2

Hideaki Takeda

*1総研大情報科学専攻

The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

*2国立情報学研究所

National Institute of Informatics

There are several semantic gaps between RDF semantics and OWL semantics, whereas OWL is placed on top of RDF in the Semantic Web Layer Stack. In this paper, we see an overview of basic assumptions of RDF and OWL, and then point out several basic and problematic issues of OWL, which are captured by our own experience of developing a language processor called SWCLOS, the first OWL Full processor developed on top of Common Lisp Object System (CLOS), and the successive applications. Then, we address our approach to integrate RDF semantics and OWL semantics and solve the problems of OWL. This approach includes explicit descriptions of role concepts, auto-epistemic local closed world assumption, ternary truth values, and unique name assumption for atomic objects.

1. はじめに

OWL はセマンティックウェブ分野のみならず、オントロジー、言語学、ソフトウェア工学、ビジネスパターン記述など、幅広い分野において、事実上の標準としての地位を確立したように見える。我々は OWL Full レベルの OWL 処理系 SWCLOS を開発したが [Koide 06] *1, RDF と OWL を統合した SWCLOS の開発過程およびその後の応用において、微妙なしかし根本的に重要ないくつかの解決されるべき問題を発見した。たとえば、OWL においては owl:sameAs や owl:differentFrom が用意されているように、非唯一名仮説を前提としているが、RDF 意味論において非唯一名仮説にかかわる記述はなく、RDF においてこの問題をどう取り扱うべきか問題となった。同様に、owl:equivalentOf や owl:disjointWith と RDF 意味論におけるクラスの disjointness との関係も問題となった。

セマンティックウェブで前提とされる非唯一名仮説や開世界仮説は、実際にはそれを完全に実施すると常識的な知識を細部にわたって書き表さなければ有意な解を得ることができず、実用上問題がある。本論文ではこれらの問題について議論し、SWCLOS 実装において採用された解決方法について述べる。それは「非唯一名仮説下での原子オブジェクトのための唯一名仮説」、「自己認識論的局所閉世界仮説」、未知を許容する「3 値論理」、そして「文脈依存ロールと実質クラス disjointness」などである。

2. 知識表現の意味論

2.1 RDF 意味論

今日の Tarski 流モデル理論では、宣言文の語や文構成の表現と、語句や文が指示する意味の領域を区別して考え、文中の語は論議の領域中のエンティティを指示し、文は語の指示物および文の構造に依存して、真偽値を指示するものとする、ある知識表現文を今問題とする仮想現実世界において事実とするには、それがモデル理論において真となるように公理系と推論

規則が与えられるが、知識表現の真偽を論ずるための対象となる場や設定をモデルと呼び、モデルに対して与えられた公理と推論規則にしたがって真偽値を判定することを解釈とよぶ。与えられたモデルにおいて明示的には記述されていない命題を公理と推論規則にしたがって導くことまたは導かれた表現を伴意と呼ぶ。

RDF のモデルはラベルつき有向グラフである。RDF 意味論 [Hayes 04] では集合論的指示の意味論により、Tarski 流のモデル理論において語彙 \mathcal{V} に対して RDF グラフの単純解釈が定式化される。ここで、 $EXT^{\mathcal{I}}(p)$ は p のプロパティ外延と呼ばれ、プロパティ p は RDF ユニバース中のエンティティ間で 2 項関係を作り、プロパティ外延 $EXT^{\mathcal{I}}(p)$ は p に関する RDF ユニバース中のすべての関係を含んでいる。

二つの語彙 `rdf:Property` と `rdf:type` が `rdf` 語彙として次のように導入される。

公理 1. もしあるエンティティが解釈 \mathcal{I} においてプロパティ集合 $P^{\mathcal{I}}$ の要素ならば、そのときに限って、そのエンティティは `rdf:Property` ^{\mathcal{I}} とペアを形成し、そのペアはプロパティ外延 $EXT^{\mathcal{I}}(\text{rdf:type}^{\mathcal{I}})$ の要素となる。

$$x \in P^{\mathcal{I}} \text{ iff } \langle x, \text{rdf:Property}^{\mathcal{I}} \rangle \in EXT^{\mathcal{I}}(\text{rdf:type}^{\mathcal{I}})$$

プロパティ p に関するある特定のペア $\langle x, y \rangle$ はトリプルとも呼ばれ、中置形式で $x p y$ と書かれる。この表記において、 x は主体、 y は客体、そして p はプレディケイトと呼ばれる。トリプル集合は全体として論議の領域において RDF グラフを形成し、すべてのトリプルが真であればそのときに限って RDF グラフは真である。RDF グラフには URI 参照のないノード、すなわちブランクノードがあってよく、トリプル表記する場合には URI 参照のかわりにブランクノード識別子が用いられる。グラフ中のブランクノードに URI 参照を割り当てられたトリプルを、もとのトリプルの例文 (instance) と言い、ブランクノードのないグラフを基底グラフ (ground graph) と言う。基底グラフの真偽値は RDF 単純解釈 \mathcal{I} を基底グラフ全体に再帰的に適応して与えられるが、非基底グラフの解釈は RDF 単純解釈を拡張して行われる (詳細は [Hayes 04] 参照)。

クラスに関連して、クラス外延という概念が次のように与えられる [Hayes 04]。

連絡先: 小出誠二, 総研大, 101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2, koide@nii.ac.jp

*1 <http://www-kasm.nii.ac.jp/~koide/SWCLOS2.files/Page408.htm> より利用可能

公理 2 . もしあるエンティティが他のエンティティのクラス外延の要素ならば、そのときに限って、両者のペアは $rdf:type$ のプロパティ外延の要素である。 $CEXT^{\mathcal{I}}(y)$ は y のクラス外延と呼ばれ、 y のインスタンス集合を表し、 y はクラスと呼ばれる。

$$x \in CEXT^{\mathcal{I}}(y) \text{ iff } \langle x, y \rangle \in EXT^{\mathcal{I}}(rdf:type^{\mathcal{I}})$$

公理 1 と 2 から、 $P^{\mathcal{I}}$ が $rdf:Property^{\mathcal{I}}$ のクラス外延となることは明らかである。そのほか、RDF 単純解釈におけるいくつかの用語の概念がクラス外延として再定義される。

$$\begin{aligned} P^{\mathcal{I}} &= CEXT^{\mathcal{I}}(rdf:Property^{\mathcal{I}}) \\ R^{\mathcal{I}} &= CEXT^{\mathcal{I}}(rdfs:Resource^{\mathcal{I}}) \\ C^{\mathcal{I}} &= CEXT^{\mathcal{I}}(rdfs:Class^{\mathcal{I}}) \\ DC^{\mathcal{I}} &= CEXT^{\mathcal{I}}(rdfs:Datatype^{\mathcal{I}}) \\ LV &= CEXT^{\mathcal{I}}(rdfs:Literal^{\mathcal{I}}) \end{aligned}$$

サブクラス概念とメタクラス概念については [Hayes 04] および [Koide 09] を参照されたい。

2.2 OWL 意味論

2.2.1 OWL の RDF 適合性

オントロジー記述に有用な特徴を豊富に備えている OWL は、RDF の拡張と見なされているが、現在の OWL 仕様は RDF というよりも記述論理 (Description Logic, DL) をもとに作られているため、実際に OWL を RDF の拡張とするにはいくつかの問題を解決しなければならない。

OWL と RDF の適合性は [Patel-Schneider 04] において議論されている。そこでは最初 OWL ユニバースは RDF ユニバースに含まれると定義されている。

$$\begin{aligned} OC^{\mathcal{I}} &= CEXT^{\mathcal{I}}(owl:Class^{\mathcal{I}}) \subseteq C^{\mathcal{I}} \\ OT^{\mathcal{I}} &= CEXT^{\mathcal{I}}(owl:Thing^{\mathcal{I}}) \subseteq R^{\mathcal{I}}. \end{aligned}$$

ところが、同文書の OWL Full に関する記述部では $OC^{\mathcal{I}} = C^{\mathcal{I}}$ および $OT^{\mathcal{I}} = R^{\mathcal{I}}$ と述べられている。実際には、RDF 意味論が成立する RDF ユニバース中で OWL 定義ファイル^{*2}を読み込めば上記 1 番目の公理はファイルに書かれているし、さらに RDF 意味論を適応すれば、2 番目の公理は自動的に RDF 推論規則 $rdfs4a$ ^{*3} から伴意される。しかしそれだけでは、OWL クラスは RDF ユニバース $R^{\mathcal{I}}$ にあっても OWL ユニバース $OT^{\mathcal{I}}$ には所属しない。そこで SWCLOS においては以下の命題を追加した。

命題 1 . $owl:Class^{\mathcal{I}}$ は $owl:Thing^{\mathcal{I}}$ のサブクラスであり、 $owl:Class^{\mathcal{I}}$ のクラス外延は $owl:Thing^{\mathcal{I}}$ のクラス外延に含まれる。すなわち、

$$OC^{\mathcal{I}} \subseteq OT^{\mathcal{I}}. \quad (1)$$

詳細は [Koide 06] あるいは SWCLOS ドキュメント類^{*4}を参照されたい。

この追加命題は同時に、OWL ユニバース中でクラスが $owl:sameAs$ や $owl:differentFrom$ など、OWL 個物としてのロールも持つことを SWCLOS において可能にした。

*2 <http://www.w3.org/2002/07/owl.rdf>

*3 <http://www.w3.org/TR/rdf-nt/#rulerdfs4>

*4 <http://www-kasm.nii.ac.jp/~koide/SWCLOS2.files/Page408.htm>

3. 非唯一名仮説と同一性問題

3.1 個物の同一性

通常の論理システムや言語で前提となっている唯一名仮説では、異なる名前は必ず異なるエンティティを指示する。しかし、OWL や後述する Common Logic では異なる名前が必ず異なるエンティティを指示するとは限らない。異なる URI 参照が $owl:sameAs$ 関係であったときに初めて両者が同一物を指示すると分かるし^{*5}、 $owl:differentFrom$ 関係であったときに初めて異なる個物を指示すると分かる^{*6}。かくして、何も情報が得られなかったとき、OWL 意味論では同一性の判定ができない。

一方、RDF 意味論も非唯一名仮説であることは RDF 文書に明確には述べられていないが、RDF 意味論の拡張として OWL 意味論を議論する立場に立てば、RDF 意味論においても非唯一名仮説とせざるを得ない^{*7}。あるエンティティ s が他のエンティティ s' と等しいかどうかを RDF 意味論において議論するためには、それらをトリプルの主体とするグラフ間でグラフの同一性を議論するのが妥当である。RDF グラフの同一性については次のように定義されている^{*8}。

二つの RDF グラフ G と G' は、両者のトリプル集合間で以下のような双射 \mathcal{M} があったとき、等価である。

1. \mathcal{M} はブランクノードをブランクノードに写像する。
2. G のノードを指示するすべての RDF リテラル lit に対して、 $\mathcal{M}(lit) = lit$ 。
3. G のノードを指示するすべての URI 参照 uri に対して、 $\mathcal{M}(uri) = uri$ 。
4. もしトリプル $s/p/o$ に対して $s^{\mathcal{I}}, p^{\mathcal{I}}, o^{\mathcal{I}}$ が G 中にあるならば、そしてその時に限って、 G' のトリプルについて $\mathcal{M}(s)/p/\mathcal{M}(o)$ 。

そこでこのアルゴリズムに OWL 意味論における $owl:sameAs$ や $owl:differentFrom$ を重畳することにする。ここで非唯一名仮説と OWL 意味論を踏まえて $s/p/o$ と $\mathcal{M}(s')/p/\mathcal{M}(o')$ の比較が議論されなければならない。 $\mathcal{M}(s')$ と s がブランクノードならば^{*9} $\mathcal{M}(o')$ と o が OWL 意味論において等価であれば両者は等価である。 $\mathcal{M}(s') \neq s$ かつ OWL 意味論で何の情報も得られないときには、もし $\mathcal{M}(o')$ と o が OWL 意味論において等価であれば、二つのトリプルは等価であることにする^{*10}。ある主体を中心としたトリプル集合において、グラフ構造が異なれば両者は異なる。グラフ構造が同じ (p の構成が同じ) 場合には、合致する両者の客体について再帰的に客体の同一性判定が実施される。したがって、このアルゴリズムが客体として参照されるのみで主体としては出現しない個物 (これを原子オブジェクトと呼ぶ) にまでたどりついたときには、

*5 $owl:FunctionalProperty$ や $owl:InverseFunctionalProperty$ でも指定可能

*6 $owl:AllDifferent$ と $owl:distinctMembers$ の組み合わせでそう指定されてよい

*7 さもないと、唯一名仮説の RDF ユニバース中に非唯一名仮説の世界を置くことになる。

*8 <http://www.w3.org/TR/rdf-concepts/#section-graph-equality>

*9 s' と s がブランクノード識別子ならば、

*10 オントロジーをオブジェクト中心で捉えたと、すなわち客体 s をオブジェクトとしたとき、ロール p とフィルラー o はそのオブジェクトのスロットとすると、ここでの意味は、簡単に名前から同一性判定ができなかった場合には、スロットが等しいオブジェクトは等しいとすることと同意。

やっかいなことになる。たとえば、トリプル $ex:Y/ex:p/ex:A$ と $ex:Z/ex:p/ex:B$ の比較において、 $ex:A$ と $ex:B$ がともに原子オブジェクトの場合には、完全な非唯一名仮説に立つと我々は $ex:Y$, $ex:Z$ あるいは元のエンティティの同一性を判定することはできない。有意な解を得るためには、原子オブジェクトについて $owl:sameAs$ か $owl:differentFrom$ を定義しなければならない。

この問題を解決するために、SWCLOS では唯一名仮説 / 非唯一名仮説条件フラグを導入し、規定値では唯一名仮説条件とした。それぞれの条件において以下のようにした。

1. 唯一名仮説条件ではブランクノードについてのみ上記アルゴリズムによる判定を行い、それ以外では $owl:sameAs$ や $owl:differentFrom$ などの情報が得られない場合に、唯一名仮説に従った判定を行う。
2. 非唯一名仮説条件ではブランクノード以外においても上記アルゴリズムによる判定を行い、原子オブジェクトについては唯一名仮説に従った判定を行う。これを「非唯一名仮説下での原子オブジェクトのための唯一名仮説」と呼ぶ。

3.2 クラスの等価性と Disjointness

3.2.1 クラス等価性の完全関係

RDF および OWL 意味論では二つのクラスのクラス外延が等しいクラスは、たとえ異なるエンティティであってもクラスとしては等価である。OWL ではクラスの等価性を明示的に述べる $owl:equivalentClass$ のほかにも、 $owl:intersectionOf$, $owl:unionOf$, $owl:oneOf$ の三つの関係がクラスを決定する完全関係として定義されている^{*11}。

一方、RDF 意味論では OWL のような特殊な完全関係のプロパティがなく、 $rdfs:subClassOf$ 関係のみ^{*12}からクラス等価性を判定することになる。たとえば、たとえ異なるエンティティであっても両者のサブクラス集合が等しければクラスとして等価である。

3.2.2 クラスの明示的 / 暗黙的 Disjointness

OWL では積極的に disjoint 関係^{*13}を宣言する $owl:disjointWith$ と $owl:complementOf$ があるが、そのような明示的な disjoint 関係のみでなく、前述の完全関係によっても $owl:disjointWith$ 宣言と同等な関係が暗黙に計算可能である。たとえばワインオントロジーでは $vin:RedWine$ と $vin:WhiteWine$ は disjoint とは明示的には宣言されていない。しかし、両者は $owl:intersectionOf$ の値として $owl:hasValue$ 制約値にそれぞれ $vin:Red$ と $vin:White$ を持ち、 $vin:Red$ は明示的に $vin:White$ と別物と宣言されているため、結果として $vin:RedWine$ と $vin:WhiteWine$ は共通の個物を持たないため、互いに disjoint と計算できる。また、 $vin:CaliforniaWine$ と $vin:ItalianWine$ については $vin:CaliforniaRegion$ と $vin:ItalianRegion$ が $owl:differentFrom$ とは宣言されていないが、前述の個物に対する同一性判定において非唯一名仮説においても別物と計算されるため、結果的に disjoint と計算できる。

しかし、そのような完全関係も明示的 disjointness 宣言もないクラスにおいては、二つのクラスが disjoint なのかあるいは等価なのかを OWL 意味論で判定することができず、その場合には $rdfs:subClassOf$ 関係のみから判断しなければならない。

すなわち、もし二つのクラスが間接的にでも上位下位クラス関係にあるか、あるいは共通するサブクラスを持てば、その二つのクラスは disjoint ではない。ではそうではない場合、はたして二つのクラスは disjoint としてよいだろうか。

ANSI Common Lisp ではもし二つのクラスがある共通のサブクラスを共有しなければ、あるいはひとつのクラスが他のクラスのサブクラスでなければ、それらは暗黙の内に互いに disjoint である。この原則は CLOS におけるインスタンスが所属するクラスは 1 個であり、複数のクラスに所属することはないという原則から来ている^{*14}。したがって SWCLOS においても、互いに独立な CLOS クラスは disjoint 状態ではあるが、それは意味的に将来サブクラスを共有することを禁止するものではなく、 $owl:disjointWith$ による明示的な disjoint とは異なる。実際、SWCLOS でも $owl:disjointWith$ の役割はそのような制約を設けてユーザ定義のオントロジーにおいて制約違反を検知することである。RDF や OWL において、エンティティは複数のクラスに所属することができるため、原理的にはクラスは規定値として disjoint ではない。その結果、分類学のような本来 disjoint なクラス階層を記述して積極的に disjoint 関係を述べたい場合には、それらのすべてに $owl:disjointWith$ 記述をしなければならない。

4. 実質クラスと Disjoint 問題

W3C は OWL の新仕様 OWL2 を勧告したが^{*15}、上記問題について何ら本質的な議論も解決も示していない。OWL2 仕様においては $owl:disjointUnionOf$ を用いてヒトは男と女の disjoint であるクラスの合併と定義できるが、disjoint 関係についての明示的な記述が要求されることには変わりはない。これは DL の流れを汲んだ OWL がオントロジーの学問進歩の結果を取り入れていないことに起因すると考える。

Sowa [Sowa 95, Sowa 99] はものの自立性と関係性の観点から、上位オントロジー [武田 04] を基本カテゴリーの束として提案したが、そこでは他の存在に独立に存在するものと、独立存在物間の関係と、関係についての知識が区別されている。Guarino [Guarino 98] はオントロジーを本質存在とそれ以外のユニバーサルに分けた。溝口らはオントロジー構築ツール「法造」において、オントロジーを本質的なソートと非本質的なロールの複合として表現した [溝口 05][古崎 06]。溝口流オントロジーは一種の文脈依存のオントロジー記述と捉えることができるが、武田は文脈依存とならざるを得ないエージェント同士の会話を支えるものとして、オントロジーを細分化されたアスペクトの集合とするアスペクト理論を提案した [Takeda 95]。

上記 disjoint 問題を解決するためには、現在の SWCLOS においては、クラスを本質存在とそれ以外（ロール概念）に分け、暗黙に disjoint となる本質存在（例えば、ヒト、男、女）は $rdfs:subClassOf$, $owl:intersectionOf$, $owl:unionOf$ を用いてクラス分けし、それに従属するクラス（例えば、父、母、教師）は名前つき $owl:Restriction$ として記述すればよい^{*16}。しかし、溝口流と異なってロール概念に上位下位関係を定義したい場合には $owl:Restriction$ では対応できない。オントロジー利用の

*11 <http://www.w3.org/TR/owl-ref/#DescriptionAxiom>

*12 OWL の場合と同様に TBox のみを考えている。

*13 クラス外延が共通部分を持たない

*14 SWCLOS ではすべての RDF(OWL) クラスは CLOS クラスとして実現されており、複数のクラスに所属する RDF エンティティはそれらの複数 RDF クラスを上位クラスとする CLOS クラスを仮想的に生成し、そのインスタンスとすることで擬似的に複数クラスのインスタンスとしている。

*15 <http://www.w3.org/TR/owl2-rdf-based-semantics/>

*16 ロール概念の disjoint について議論することは意味がない。なぜならば、ロール概念それ自体で個物を持つことはないからである。

現場においては、本質存在のみで活用されることはなく、かならず本質存在とロール概念の複合概念（ロールホルダー）として知識は記述される。ロール概念は知識の活用される文脈に依存するが、OWL を無理やり適応するよりも文脈を明示的に意に含んだ構文で記述するほうが望ましい。

5. 開世界仮説と3値論理

5.1 3値論理

失敗による否定 (Negation as Failure, NaF) は閉世界仮説に基づく、推論効率化のための便法として知られている。しかし、この便法は開世界仮説に基づくセマンティックウェブにおいては当てはまらない。したがって、通常質問応答システムに“P?” と “not P?” の両方が与えられて、両方において真が得られない場合があり、これを不定あるいは未知という。

ANSI Common Lisp の `cl:subtypep` は、表 1^{*17} に示すように計算結果として二つの値を返す。

表 1: `cl:subtypep(type1, type2)` の返す値

value1	value2	意味
true	true	<code>type1</code> は <code>type2</code> のサブタイプ。
false	true	<code>type1</code> は <code>type2</code> のサブタイプではない。
false	false	<code>subtypep</code> は関係を決定できなかった。 <code>type1</code> は <code>type2</code> のサブタイプかも知れないし、そうでないかも知れない。

返値が $\langle t, \text{nil} \rangle$ であることはない。SWCLOS ではこの表記方法をそのまま RDFS と OWL に拡張した。すなわち、 $\langle t, t \rangle$ は真を意味し、 $\langle \text{nil}, t \rangle$ は偽を意味し、 $\langle \text{nil}, \text{nil} \rangle$ は未知を意味する。このような3値の真偽値表が SWCLOS のいたるところの計算に用いられている。詳細は [Koide 06] および SWCLOS 文書を参照されたい。

5.2 自己認識論的局所閉世界仮説

論理における存在限量子に相当する `owl:someValuesFrom` に関して、完全な開世界仮説はオントロジー構築時に問題がある。すなわち、`owl:someValuesFrom` 制約を満足しないオントロジー条件であっても、世界のどこかで誰かがその制約を満足するオントロジー記述をしているかも知れないことを理由に、それは許容される。しかし実際にはオントロジー構築者がこれで構築完了としたい場合にも `owl:someValuesFrom` 制約が満足されない状態のままということは不合理である。つまり、構築対象であるオントロジーの扱いと WWW 上の知識の扱いは当然のことながら区別されるべきである。そこで SWCLOS では自己認識論的局所閉世界仮説 (autoepistemic local closed world assumption) を導入した。この考えでは、エージェントは自分の手の内の知識については内省的にすべてを知ることができる。SWCLOS においてデフォルトでは閉世界仮説で推論し、自己認識論的局所閉世界仮説用フラグを偽と設定することで、開世界仮説に基づいて推論を行う。

6. おわりに

SWCLOS 開発と利用の経験をもとに、RDF と OWL の統合について述べた。W3C の OWL は各種応用からのフィードバックを入れて OWL2 となったが、その対応がオントロジー工学に基づかないため、オントロジー記述言語として袋小路に入りつつあるように思える。一方、ISO 標準となった Common

Logic^{*18}の仕様を見ると、セマンティック Web 用言語としての潜在的可能性は OWL を超えるものがある。Common Logic の実現系はまだ出現していないが、OWL を超えるオントロジー記述言語とその処理系の実現が待たれるところである [Koide 10]。

参考文献

- [Guarino 98] Guarino, N.: Some Ontological Principles for Designing Upper Level Lexical Resources, in Rubio, A., Gallardo, N., Castro, R., and Tejada, A. eds., *the First International Conference on Lexical Resources and Evaluation*, pp. 527–534, Granada, Spain (1998), ELRA - European Language Resources Association
- [Hayes 04] Hayes, P. and McBride, B.: RDF Semantics, W3C Recommendation (2004), <http://www.w3.org/TR/rdf-mt/>
- [Koide 06] Koide, S. and Takeda, H.: MetaModeling in OOP, MOF, RDFS, and OWL, in *2nd International Workshop on Semantic Web Enabled Software Engineering (SWESE 2006) at the 5th International Semantic Web Conference (ISWC 2006)*, Athens, GA, U.S.A. (2006)
- [Koide 09] Koide, S. and Takeda, H.: Meta-circularity and MOP in Common Lisp for OWL FULL, in *ELW '09: Proceedings of the 6th European Lisp Workshop*, pp. 28–34, New York, NY, USA (2009), ACM
- [Koide 10] Koide, S. and Takeda, H.: Common Languages for Semantic WWW – Beyond RDF and OWL –, in *5th Int. Conf. Evaluation of Novel Approaches to Software Eng. (ENASE2010)* (2010), to appear
- [Patel-Schneider 04] Patel-Schneider, P. F., Hayes, P., and Horrocks, I.: OWL Web Ontology Language Semantics and Abstract Syntax Section 5. RDF-Compatible Model-Theoretic Semantics., W3C Recommendation, <http://www.w3.org/TR/owl-semantics/rdfs.html> (2004)
- [Sowa 95] Sowa, J. F.: Top-level ontological categories, *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Vol. 43, No. 5-6, pp. 669–685 (1995)
- [Sowa 99] Sowa, J. F.: *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*, Brooks Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA. (1999)
- [Takeda 95] Takeda, H., Iino, K., and Nishida, T.: Agent Organization and Communication with Multiple Ontologies, *Int. J. Cooperative Inf. Syst.*, Vol. 4, No. 4, pp. 321–338 (1995)
- [古崎 06] 古崎 晃司, 來村 徳信, 笹島 宗彦, 溝口 理一郎: オントロジー構築入門, オーム社 (2006)
- [溝口 05] 溝口 理一郎: オントロジー工学, オーム社 (2005)
- [武田 04] 武田 英明: 上位オントロジー, 人工知能学会誌, Vol. 19, pp. 172–186 (2004)

*17 <http://www.franz.com/support/documentation/8.1/ansicl/dictentr/subtypep.htm>

*18 <http://common-logic.org/>