

OWLにおける明示的閉世界と局所閉世界仮説

Explicit Closed World and Local Closed World Assumption in OWL

小出 誠二*1

Seiji Koide

武田 英明*2

Hideaki Takeda

*1国立情報学研究所総研大

National Institute of Informatics, Sokendai

*2国立情報学研究所

National Institute of Informatics

After OWL matured at the Semantic Web Stack, logic programming on the layer of OWL has emerged as an open issue to be solved. To build the logic programming framework on the OWL layer, the semantic gap between logics and OWL such as Closed World Assumption in logics and Open World Assumption in OWL must be bridged. On the other hand, efforts toward real Semantic Web applications revealed the problem of Open World Assumption, that is, it requires complete ontology descriptions including negative assertions in ABox and richer disjunctive knowledge in TBox that fall into common sense knowledge. In this paper, we discuss this problem in the integration of logics and OWL. Then, we insight the fulfillment of web service description in logics on top of the OWL layer.

1. はじめに

セマンティックウェブでは、セマンティックウェブ・スタックの OWL 層の上に論理層を実現するにあたって、意味論的かつ推論的のどのように論理層を OWL 層に接続するかが問題とされた [Grosz 03, Motik 04, Horrocks 05b]. 特に、OWL における開世界仮説と従来の論理で前提となっている閉世界仮説を、どう折り合いをつけるかが議論となっていたが、Motik らはこの問題について検討し、ハイブリッド MKNF (Minimal Knowledge and Negation as Failure) 論理を提唱した [Motik 06a, Motik 06b]. それはセマンティックウェブ・コミュニティの外ですでに古典的論理の拡張として存在していた、自己認識論的知識オペレータ (autoepistemic knowledge operator) K とデフォルト否定 (default negation) not を記述論理 (DL) の開世界に持ち込むことであった.

自己認識論的知識オペレータ K を DL に導入したのは Motik が初めてではない。それはすでにセマンティックウェブというよりも DL をフレームベースシステムのような実用システムと統合することを目的に、Donini らによって行われていた [Donini 98]. また Grimm と Motik はサービスの意味的発見のために、自己認識論的 (autoepistemic) 局所閉世界仮説 (local closed-world assumption) を DL に持ち込んだ [Grimm 06].

一方、研究開発が進むにつれて、開世界仮説の非実用性がセマンティックウェブ研究者にも広く周知されるようになってきた。OWL およびその理論的基礎である DL では、通常の述語論理と異なり開世界仮説を前提としているが、純粋に開世界仮説に基づく、時に過剰と思えるほどのオントロジー記述がないと、有効に推論を進めることができない。そこでこれまで明言されずとも現実的には色々な場所で、暗黙の内に閉世界が導入されてきた。例えば、DL の充足性判定に標準的に用いられるタブロー法では、`someValuesFrom` の変換 (\rightarrow -rule) において ABox 中に条件を満たす個物がなければ、充足性判定のために存在限量された概念の個物が ABox に追加される [Baader 01, Baader 03]. もし完全な開世界仮説に立て

ば、どこかほかに条件を満たす個物があるかも知れないと考えよう。

セマンティックウェブの原則は開世界仮説ではあるが、オントロジー構築時には限られた状況において一時的に閉世界仮説に依って推論を進めることが現実的には必要となる。たとえば、オントロジー開発途中では、`owl:someValuesFrom` によるプロパティ制約を有するプロパティの値に、制約クラスに所属しない個物を設定してもシステムはそれを直ちに誤りと指摘することはできないが (なぜならばオントロジー開発途中では明日制約を満足する値を自分が言明するかも知れないし、共同開発者から言明されるかも知れない)、オントロジー開発終了時には、たとえ開世界仮説的には開発者のあずかり知らぬ世界のどこかで制約を充足する可能性があるにせよ、オントロジー開発の実効性からは `owl:someValuesFrom` の制約を充足しないのなら、いまここでシステムはプロパティ値の制約について充足不能を指摘することが望ましい。

また、OWL 本来の機能として、明示的 / 暗黙的に世界が閉じられる場合もある。たとえば、`owl:oneOf` 制約で述べられる個物の名前は、OWL の原則から離れて名前の唯一性仮説 (*Unique Name Assumption*, UNA) に基づいているとすることが妥当であるが (なぜならばオントロジー開発者が `owl:oneOf` 制約を書き下したときに、それらのメンバーがひょっとして同じオブジェクトを指していることを前提としていると考えることは不自然である)、それに密接に関連して、`owl:oneOf` 制約の意味は有限個の閉世界を提供するというにほかならない。

我々はすでに OWL-Full レベルの推論処理系を開発し [Koide 06], OWL を前提とした型付き単一化についても報告している [小出 08]. 本論文では、Motik らの導入した自己認識論的局所閉世界仮説を紹介し、OWL に基づくウェブサービス合成・分解の実現を目標に、考察の結果を報告する。

2. 述語論理による論理プログラミング

2.1 セマンティックウェブ・スタックのアーキテクチャ

ティム・バーナーズ＝リーによるセマンティックウェブの言語スタックモデル [Berners-Lee 03] では、OWL 層の上位にルール層があり、その上に論理層が来るようになっていた。これに対して Kifer らから意味論の違いを考慮した強い反論が加えられ、

RDF 層の上に薄い DLP (Description Logic Programming) 層を設けて、その上に OWL 層と Rule 層を並列して置き、それらの上の論理層が両者を融合するモデルが主張された [Kifer 05]. Horrocks らはその主張を DLP の誤解によるものだとし、Datalog スタイルでは融合することができず、DLP 層も論理層も分かれた二つのタワーになってしまうと批判して、一階述語論理による単一のスタックタワーを主張した [Horrocks 05a]. これらの論争は閉世界仮説の違いや失敗に基づく否定 (Negation as Failure, NaF) など、これまでに一階述語論理に採用されてきた前提と DL あるいは OWL との意味論の違いから来るものであるが、Horrocks らの主張するように単一のスタックタワーを可能にするためには、閉世界仮説や NaF の意味論と、OWL や DL で前提とされていた閉世界仮説の意味論をどう統一するかが問題となる。

2.2 閉世界仮説の問題点

OWL-DL は記述論理の $SHOIN(D)$ に相当し、上記意味論の違いを別にすれば、DL によって記述された論理式を、単純に通常の一階述語論理式に変換することができる [兼岩 03]. オントロジー中で、すべてのアトミックな概念を一階述語論理式の単項述語、すべてのアトミックなロールを二項述語、すべての個物を定項とする。複合概念は述語論理式になる。したがって、閉世界仮説に立った述語論理を展開すればよいように思われるかも知れない。

しかし、OWL による実用システム研究が進むにつれて、完全な閉世界仮説に立つと過剰な知識記述をしないかぎり、推論が進まないということが広く周知されるようになった。たとえば、DL で注釈されたウェブサービスの発見において、閉世界仮説にたったマッチメイキングをしようとすると、常識に相当するような知識を過剰に記述しないと推論できないことがわかり、Grimm らは自己認識論的局所閉世界仮説を導入した [Grimm 06]. また、誰も明示的には指摘しないが、OWL ではすべての `xsd:Datatype` は互いに disjoint であるという当然の公理が必要となる。前述の `owl:oneOf` における UNA もその一例である。

3. 自己認識論的局所閉世界仮説とその OWL 意味論

3.1 極小知識と失敗による否定

極小知識と失敗による否定 (Minimal Knowledge and Negation as Failure, MKNF) [Lifschitz 91, Lifschitz 94] では、一階述語論理をモーダルオペレータ K とデフォルト否定 not を用いて、次のような文法により拡張する。ここで P は述語、 t_i は項で、 $P(t_1, \dots, t_n)$ は一階述語におけるアトムである。 $K\varphi$ はモーダル K アトム、 $not\varphi$ はモーダル not アトムと呼ばれ、両者をモーダルアトムと呼ぶ。

$$\varphi \leftarrow P(t_1, \dots, t_n) \mid \neg\varphi \mid \varphi_1 \wedge \varphi_2 \mid \exists x : \varphi \mid K\varphi \mid not\varphi$$

ここで表面的には選言と全称限量子が現れていないが、否定があるので・モルガンの式により暗にそれらも含まれていることを指摘しておく。

$K\varphi$ と $not\varphi$ が導入されていることが本質的である。たとえば、知識ベース \mathcal{O} に都市と都市を結ぶフライトが記述されているとしよう。もし都市 a と都市 b を結ぶフライト $flight(a, b)$ という知識が知識ベース中になければ、閉世界仮説においては $\neg flight(a, b)$ と帰結するが、閉世界仮説ではそのように帰結

することができない。

$$\mathcal{O} \not\models flight(a, b) \Rightarrow \mathcal{O} \models \neg flight(a, b) \quad (CWA)$$

$$\mathcal{O} \not\models flight(a, b) \not\Rightarrow \mathcal{O} \models \neg flight(a, b) \quad (OWA)$$

しかし、そうするとたとえば、もし $flight(a, b)$ が無かったら列車で行くというようなルール記述で推論を進めようとするとき、閉世界仮説に立つて推論結果を得るためには、否定も含めて必要となる情報をすべて知識ベースに記述しなくてはならないことになる。そこで自己認識論的オペレータ K を導入して知識ベースにない文を認識論的に偽と解釈する。

$$\mathcal{O} \not\models flight(a, b) \Rightarrow \mathcal{O} \models \neg Kflight(a, b)$$

式 $Kflight(a, b)$ は、知識ベース \mathcal{O} におけるすべてのモデル \mathcal{I} において、 $flight(a, b)$ が真ならば成立し、 K を直感的には「真であると分かっている」と読む。そして $\neg Kflight(a, b)$ は、「 a と b がフライトで結ばれているかどうかは分からない」と読む。

一方、デフォルト否定では知識ベース \mathcal{O} においてある言明が伴意されないことを次のように記述する。

$$\mathcal{O} \not\models flight(a, b) \Rightarrow \mathcal{O} \models notflight(a, b)$$

式 $notflight(a, b)$ では知識ベース \mathcal{O} におけるあるモデル \mathcal{I} において、 $flight(a, b)$ が偽となり [Knorr 07], これを直感的には「偽と成り得る」と読み、式 $notflight(a, b)$ は「 a と b がフライトで結ばれているということは偽と成り得る」と読む。 $\neg Kflight(a, b)$ と $notflight(a, b)$ は互いに書き換えてよい。

MKNF 論理式は $K\varphi$ と $not\varphi$ を用いて、以下のように定式化される。

$$KH_1 \vee \dots \vee KH_k \leftarrow KB_1^+ \wedge \dots \wedge KB_n^+ \wedge notB_1^- \wedge \dots \wedge notB_m^-$$

$KH_1 \vee \dots \vee KH_k$ はルールヘッド、 $KB_1^+ \wedge \dots \wedge KB_n^+$ はポジティブボディ、 $notB_1^- \wedge \dots \wedge notB_m^-$ はネガティブボディと呼ばれる。ルールヘッドが存在しない式は、ルールヘッドが $Kfalse$ と解釈される。

Motik らはこの MKNF 論理式と一階述語論理式との関係について詳細に報告している [Motik 06b]. 特に一階述語論理におけるモデル解釈は、UNA を前提としており、OWL をこれに適合させるものとして、シノニム関係にあるオブジェクト名を等価と宣言する *standard names assumption* を導入している。この仮説ではシノニム宣言のない異なるオブジェクト名は異なるものを指すと解釈される。

$$\mathcal{O} \models a \approx b \rightarrow a^{\mathcal{I}} = b^{\mathcal{I}}$$

$$\mathcal{O} \not\models a \approx b \rightarrow a^{\mathcal{I}} \neq b^{\mathcal{I}}$$

3.2 OWL と論理プログラミングの統合

OWL-DL による述語論理を意味的に同一な一階述語論理に書き換え、それに MKNF 論理式によるルールを統合する。統合されたものをハイブリッド MKNF 知識ベースと呼ぶ。その中でオントロジーに由来するアトムを DL アトムと呼び、そうでないアトムを非 DL アトムと呼ぶ。

$$K\pi(\mathcal{O}) \wedge \bigwedge_{r \in \mathcal{P}} \forall x : r$$

ここで、 $\pi(\mathcal{O})$ は OWL-DL によって記述されたオントロジーを一階述語論理に変換したものである。 r は MKNF 論理式である。

しかし, DL の内容を任意の一階のルールと組み合わせると決定不能 (undecidable) となることが知られている [Levy 98]. そこで Motik らは, 決定可能性 (decidability) を確保するために, 表現の自由度を犠牲にして, DL-safe なルールとすることにした. DL-safe とはルール r 中のどの変項も少なくとも 1 個の非 DL アトムに出現することをいう. すべてのルールが DL-safe であるハイブリッド MKNF 知識ベースは DL-safe である. DL-safe とするために具体的には, ABox にある個物にのみルールが適応できるとし, ABox 中のオブジェクト名とマッチする述語 O を用いて, すべてのルールの変項 x について, $O(x)$ をルールに追加することで, 一階述語論理計算において存在限量子によって生成される個物と単一化されることを防ぐ. 以下の例を参考にされたい. 式 (7) において変項, x, y, z についてそれぞれ $O(x), O(y), O(z)$ が追加されている.

$$\text{historicCity} \sqsubseteq \exists \text{hasChurch.church} \quad (1)$$

$$\text{church} \sqsubseteq \exists \text{designedBy.architect} \quad (2)$$

$$\exists \text{famousCitizen.T} \sqsubseteq \text{interestingCity} \quad (3)$$

$$\text{historicCity(Barcelona)} \quad (4)$$

$$\text{hasChurch(Barcelona, SagradaFamilia)} \quad (5)$$

$$\text{designedBy(SagradaFamilia, Gaudi)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K} \text{famousCitizen}(x, z) \leftarrow \mathbf{K} \text{hasChurch}(x, y), \\ \mathbf{K} \text{designedBy}(y, z), \\ \mathbf{K} O(x), \mathbf{K} O(y), \mathbf{K} O(z) \end{aligned} \quad (7)$$

たとえば, $\text{interestingCity(Barcelona)}$ を導出する過程では, 上記 (1) 式を MKNF 論理の節形式に変換すると $\mathbf{K} \text{hasChurch}(x, f(x))$ というスコレム関数を含む項が出てくるが, これと (7) 式から出てくる $\text{nothasChurch(Barcelona, } y)$ の融合が $\text{not}O(y)$ の存在によって抑制され, 結果的に決定可能性が保たれる.

4. ウェブサービス合成問題への考察

状態空間 (state space) に基づくにせよ, 計画空間 (plan space) に基づくにせよ, プランニングは一階述語論理の特殊な応用形態と捉えることができる [Reiter 01]. ドメイン記述に TBox と ABox を含むオントロジーを用いたプランニングを考えると, これまでの議論と同様な閉世界仮説の統合問題を考慮しなければならない. ウェブサービスの合成・分解問題は一見一種のプランニングのように見えるかもしれないが, はるかに難しい問題である.

今簡単のために複合サービスは考えず, サービスはすべてアトミックであるとしよう. アトミックサービスの定義を以下に示す [Koide 07].

定義 1 アトミックなウェブサービス as は次のような 5 タプルである.

$$\begin{aligned} as = \langle \text{name}(as), \text{inputs}(as), \text{outputs}(as), \\ \text{precond}(as), \text{effects}(as) \rangle. \end{aligned}$$

- $\text{name}(as)$ はサービス名で, $n(x_1, \dots, x_k)$ と表記される. ここで n はサービス名シンボル, x_i は $\text{precond}(as)$ と $\text{effects}(as)$ のみならず, $\text{inputs}(as)$ や $\text{outputs}(as)$ にも現れる変項である. これは一見関数呼び出しのような形式に見えるが, 単なる文字列と見るべきである.

- $\text{inputs}(as)$ はウェブサービス as の入力, $\text{outputs}(as)$ は出力であり, それぞれ一階述語論理の変項の並びに相当する.
- $\text{precond}(as)$ はウェブサービス as が適応可能であるための維持条件, あるいは サービス実行時に状態空間から削除される因果関係条件であり, 一階述語論理のリテラルの並びである.
- $\text{effects}(as)$ にはサービス実行時に副作用として変化する条件が記述され, 一階述語論理のリテラルの並びである. 正リテラルは状態空間に追加される条件を, 負リテラルは状態空間から削除される条件を示す.

さて, ここで簡単のために前向き推論によりサービスを合成する場合を考えよう. $\text{inputs}(as)$ と $\text{precond}(as)$ 中にある変項はすべて初期状態中の個物に適応されるものとする. 初期状態では状態空間はすべて名前つきの個物で記述され, ブランクノードはないとする. $\text{precond}(as)$ 中のすべての正リテラルの集合 $\text{precond}(as)^+$ が状態空間中のどれかのリテラルと単一化でき, 負リテラルの集合 $\text{precond}(as)^-$ のすべての要素が状態空間中のリテラルと単一化できなかったとき, このサービスは適応可能 (applicable) である. ここで状態空間を ABox と見なせば, この操作は $\text{precond}(as)^+$ の各要素を $\text{precond}(as)_i^+$ としたとき $\mathbf{K} \text{precond}(as)_i^+$, $\text{precond}(as)^-$ の各要素を $\text{precond}(as)_j^-$ としたとき $\text{notprecond}(as)_j^-$ と考慮していることに等しい. ブランクノードの存在は一階述語論理における存在限量子を意味するため, スコレム関数と同じく決定不能となる. また $\text{precond}(as)$ に一階述語論理における関数シンボルがある場合にも決定不能となる [Ghallab 04].

合成計画時に実際にウェブサービスを実行できるか (情報収集のみで世界状態を変更しないサービスであれば実行可能) (レベル I), 実行できないか (世界に対する副作用があるため, 計画時にサービス実行できない) 場合 (レベル II) で, 計画の難しさが異なる. 前者の場合には, コストの問題が発生しないとして, 実際にウェブサービスを呼び出して結果を得て, それを状態空間に追加することができる. 後者の場合には, 一般には入力に部分的に個物が代入されたサービスの出力を, 状態空間に書き込むことになる. 出力が空集合であればウェブサービスを実行する必要はなく, それはレベル I に相当する. レベル I のウェブサービス合成問題は通常のプランニング問題に帰着する.

5. まとめ

ウェブサービス合成・分解問題では, OWL で記述されたドメイン記述を用いることが自然である. しかしその場合, 一階述語論理の特殊なサブセットである通常のプランニングと同様に, 一階述語論理が前提とする閉世界仮説や否定に基づく失敗の意味論と, OWL における開世界仮説との整合性が問題となる. Motik らは一階述語論理の開世界仮説や否定に基づく失敗を OWL の世界に持ち込むためにハイブリッド MKNF 論理を提唱した. この教えるところは, 関数シンボルがなく (Datalog は関数シンボルがない) 論理変項は ABox 中の個物に適応されなければならないということである. Motik の提唱するような述語 O を導入せずとも, 導出 (resolution) 過程や単一化操作においてそのような制約を埋め込みで実現すれば, 外見上は通常の一階述語論理のようにして OWL 記述のオントロジーを論理プログラミングすることができる.

ウェブサービスの合成問題について考察し、問題が簡単な場合には上記意味論の違いに整合性を持たせることができることを確認した。ちなみに、我々の知る限りにおいて、実際には閉世界仮説による推論を実施していても、ウェブサービス合成・分解において開閉世界仮説の整合性について明確に述べた研究はこれまで見当たらない。引き続き研究を進め、OWLを用いたウェブサービス合成・分解問題を解決したい。

参考文献

- [Baader 01] Baader, F. and Sattler, U.: An Overview of Tableau Algorithms for Description Logics, *Studia Logica*, Vol. 69, pp. 5–40 (2001)
- [Baarder 03] Baarder, F. and Nutt, W.: *The Description Logic Handbook*, chapter 2. Basic Description Logics, pp. 43–95, Cambridge (2003)
- [Berners-Lee 03] Berners-Lee, T.: WWW past & future (2003)
- [Donini 98] Donini, F. M., Lenzerini, M., Nardi, D., Nutt, W., and Schaerf, A.: An epistemic operator for description logics, *Artificial Intelligence*, Vol. 100, No. 1-2, pp. 225–274 (1998)
- [Ghallab 04] Ghallab, M., Nau, D., and Traverso, P.: *Automated Planning Theory and Practice*, Morgan Kaufmann (2004)
- [Grimm 06] Grimm, S., Motik, B., and Preist, C.: Matching Semantic Service Descriptions with Local Closed-World Reasoning, in *The Semantic Web: Research and Applications, 3rd European Semantic Web Conference, ESWC 2006 Budva, Montenegro*, Vol. 4011/2006 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 575–589, Springer Berlin / Heidelberg (2006)
- [Grosf 03] Grosf, B. N., Horrocks, I., Volz, R., and Decker, S.: Description Logic Programs: Combining Logic Programs with Description Logic, in *12th International Conference on the World Wide Web (WWW-2003)*, ACM (2003)
- [Horrocks 05a] Horrocks, I., Parsia, B., Patel-Schneider, P., and Hendler, J.: Semantic Web Architecture: Stack or Two Towers?, in Fages, F. and Soliman, S. eds., *Principles and Practice of Semantic Web Reasoning (PPSWR 2005)*, No. 3703 in LNCS, pp. 37–41, Springer (2005)
- [Horrocks 05b] Horrocks, I., Patel-Schneider, P. F., Bechhofer, S., and Tsarkov, D.: OWL rules: A proposal and prototype implementation, *Journal of Web Semantics*, Vol. 3, pp. 23–40 (2005)
- [Kifer 05] Kifer, M., Bruijn, de J., Boley, H., and Fensel, D.: A Realistic Architecture for the Semantic Web, in *Rules and Rule Markup Languages for the Semantic Web (RuleML 2005)*, Vol. 3791/2005 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 17–29, Springer Berlin / Heidelberg (2005)
- [Knorr 07] Knorr, M., Alferes, J. J., and Hitzler, P.: Towards Tractable Local Closed World Reasoning for the Semantic Web, in *Proceedings of 13th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, Guimarães, Portugal (3rd–7th December 2007)*, Vol. 4874 of LNAI, pp. 3–14 (2007)
- [Koide 06] Koide, S. and Takeda, H.: OWL-Full Reasoning from an Object Oriented Perspective, in *Asian Semantic Web Conf., ASWC2006*, pp. 263–277, Springer (2006)
- [Koide 07] Koide, S. and Takeda, H.: Formulation of Hierarchical Task Network Service (De)composition, in *First International Joint Workshop SMR2 2007 on Service Matchmaking and Resource Retrieval in the Semantic Web, Workshop at ISWC2007+ASWC2007*, pp. 107–121 (2007)
- [Levy 98] Levy, A. Y. and Rousset, M.-C.: Combining Horn rules and description logics in CARIN, *Artificial Intelligence*, Vol. 104, No. 1-2, pp. 165–209 (1998)
- [Lifschitz 91] Lifschitz, V.: Nonmonotonic Databases and Epistemic Queries, in *Proc. of the 12th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI'91)*, pp. 381–386 (1991)
- [Lifschitz 94] Lifschitz, V.: Minimal Belief and Negation as Failure, *Artificial Intelligence*, Vol. 70, No. 1–2, pp. 53–72 (1994)
- [Motik 04] Motik, B., Sattler, U., and Studer, R.: Query Answering for OWL-DL with Rules, in *ISWC2004*, LNCS 3298, pp. 549–563, Springer-Verlag (2004)
- [Motik 06a] Motik, B., Horrocks, I., Rosati, R., and Sattler, U.: Can OWL and Logic Programming Live Together Happily Ever After?, in *ISWC2006*, Vol. LNCS 4273, pp. 501–514, Springer-Verlag (2006)
- [Motik 06b] Motik, B. and Rosati, R.: Closing Semantic Web Ontologies, Technical report, University of Manchester, UK (2006)
- [Reiter 01] Reiter, R.: *Knowledge in Action*, MIT Press (2001)
- [兼岩 03] 兼岩 憲, 佐藤 健: DL: Description Logic, *人工知能学会誌*, Vol. 18, No. 1, pp. 73–82 (2003)
- [小出 08] 小出, 武田: OWLによる型付き単一化代入 (2008), SIG-SWO-A702-01, <http://sigsw.org/papers/SIG-SWO-A702/SIG-SWO-A702-01.pdf>