

# 非公理的項論理に基づく推論システムに向けた検討

## Toward a Reasoning System Based on Non-Axiomatic Term Logic

船越 孝太郎<sup>1\*</sup>  
Kotaro Funakoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所  
<sup>1</sup> FIRST, IIR, Tokyo Institute of Technology

**Abstract:** This paper discusses an approach to realizing a human cognition-oriented reasoning system that tries to integrate a non-axiomatic logic with recent advances in neural networks.

### 1 はじめに

本稿では項論理に基づく非公理的 [16] な推論システムを検討する（非公理的であることの定義と意義は次節で述べる）。本研究が対象とする「推論」とは、一杉ら [5] が例にあげるような<sup>1</sup>、常に正しいとは限らないが特定の状況においては一定の有用性を持つ規則をもとにして人間が日常的に行っているものである。

項論理 (term logic) とは、アリストテレスの三段論法 (syllogism) に遡る論理の一種で、述語と個体変数の区別を持たず、2つの項をつなぐ形で文 (命題) を表現する。伝統論理 (traditional logic) ともよばれる。伝統論理は、近代にフレーゲにより発明された述語論理 (これ自体が既に古典論理ともよばれる古さをもつのであるが) により事実上駆逐された状態にある。

一方で、少数ながら、項論理の持つ簡素さや直感的な理解のしやすさなどに惹かれた内外の研究者らによって、述語論理に代わる独自の論理・推論法が、現代においても時折提案されてきた [12, 9, 11, 15, 4, 10]。しかしながら、それらが十分な有用性を示せていないことは、これらの研究の追従者がほとんどいないことから明らかともいえる。このことは、項論理という枠組みに、有用となる余地が残されていないことを既に示しているのかもしれない。

それでも本研究は、近年の深層学習による情報処理技術との融合により、前述のような人間の日常的推論に対し、項論理が有用性を示す可能性が残されていると考える立場をとり、Wang [15, 16] が提唱する非公理的論理を出発点としたアプローチを試みる。

項論理が (少なくとも工学的には) 有意な有用性をほとんど示せていない一方で、述語論理もまた、数学的な問題の厳密な記述という清浄な神的領域を離れ、人工知能研究の中で人間の混濁した日常の世界を扱おう

とすれば、かつて期待されたほどの有用性を示せていないことも事実であろう。述語論理を基本とした記号中心のアプローチを離れ、統計・確率論に重きを置くことで「妥協すれば有用に使えるケースもある」というレベルにどうにか至っていた多くの人工知能関連技術を、発展目覚ましい深層学習/ニューラルネットワーク関連技術は、人間並みかそれ以上の精度をもつ実用レベルにまで一気に押し上げた。それでも、冒頭で触れたような「推論」の領域では未だ道半ばである。

本研究では、人間的な思考と親和性がより高いと思われる離散的な項論理を骨格とし、データから暗黙的・経験的に構成した多次元空間内における連続的知識表象に基づく情報処理技術を血肉とすることで、人間が行うような日常的推論、創造的な記号処理を行うシステムの実現を目指す。このようなシステムは、特定のタスクに対する性能だけを考えれば、深層学習のみに基づきそのタスクに特化して大量のデータで訓練されたシステムにおそらく劣るであろう。特に人間の存在とは独立して定義できるタスクにおいては、その差はより顕著になると予想される。しかしながら、物語の解釈や会話など人間の思考との類似性・親和性が求められる場面、推論の過程・根拠を人に示さなくてはならない場面、人間的な錯誤を予知しなければならない場面、記号的に与えられる極少数のアドホックな知識・規則をその場で運用することが求められる場面などで、独自の有用性を確立できる可能性がある。

まず次節では項論理と述語論理の関係を整理し、項論理を発展させようとしたこれまでの研究のそれぞれの立場・目論見を整理する。ついで Wang による非公理的論理の枠組みの概要を説明する。その上で本研究がとる立場や今後の方向性を議論する。

### 2 項論理と述語論理, 非公理的論理

アリストテレスに遡る三段論法は、大雑把に言えば、

\*連絡先: funakoshi@lr.pi.titech.ac.jp

<sup>1</sup> 「きのう戸棚にチョコレートがあった。ということは、きょうもあるはず。」

A: all  $X$  are  $Y$ .  
I: some  $X$  are  $Y$ .  
E: all  $X$  are not  $Y$ .  
O: some  $X$  are not  $Y$ .

の4つの型のいずれかを持つ文(命題)を考え、2つの命題から1つの命題を結論する型の推論について、妥当な推論と妥当でない推論を区別するものである<sup>2</sup>。このとき命題文に現れる記号  $X$  と  $Y$  が項(名辞)とよばれ、「人間」「動物」「不死」など特定のカテゴリや性質を表す。例えば、A1:「全ての人間は哺乳類である」、A2:「全ての哺乳類は動物である」の2つの命題から、A3:「全ての人間は動物である」を結論する。このように、項論理は命題の中の一定の構造を表現することができる。Lukasiewicz[6]の形式化においては、命題間の論理はいわゆる命題論理(propositional logic)に従う。

述語論理も命題の内部構造・命題間の内容的異同を、形式的に記述することを可能にする道具立てである。例えば「全ての人間は哺乳類である」という命題は、 $(\forall x)(\text{Human}(x) \Rightarrow \text{Mammal}(x))$  のように述語 Human と Mammal を用いて記述できる<sup>3</sup>。述語論理においては、集合論に基づく「存在」の規定、任意の数の変数をとることで様々な関係を定義できる述語、より柔軟なスコープの記述が可能な限量子( $\forall$ と $\exists$ )により、伝統論理が分析した2項間の4つの文型に囚われることなく、多様な命題、特に数学的な定義・定理を、自然言語によらず厳密に表現することが可能になった。

その代償として、述語論理で命題を表現するにあたっては、必ずしも直感的とは言い難い変換が要求される。述語論理では必ず個別の存在に立ち戻ってそれらの存在間の関係として命題を記述しなければならず、先の例で言えば、人間と哺乳類という概念間の関係を記述するにあたって、「全ての  $x$  について、それが人であるならばそれは哺乳類である」というような翻訳を要する。

Sommers [12, 13] はこのような不自然さを嫌い、述語論理における個体変数を使用せずに、より自然に自然言語の中にある論理関係を形式的に表現できる枠組みを提案した。これとは独立に、森田ら [9] も、述語論理が外延的であり項論理が内包的であることを強調した上で、内包的な記述が直接可能な知識表現のための論理体系の構築を目指し、西原ら [11] はさらに動詞の取り扱いを導入して表現力を高めた。Moss [10] は西原らの提案に対しいくつかの改良を試みている。

これらの項論理研究者の主な関心は自然言語の意味表示にある。一方で、彼らが提示するものが論理体系として健全性と完全性を備えることにも関心を向けている。つまり自然言語を扱いつつも、公理主義の立場

であり、論理体系が少数の公理から出発して妥当な結論のみを推論でき(健全性)、妥当な結論を全て推論できる(完全性)ことを求める。これは数理論理あるいは計算機科学の立場としては真っ当である<sup>4</sup>。

これに対し Wang [15, 16] は、知能とはなにかという考察から出発し<sup>5</sup>、数理論理の有用性を認めた上で<sup>6</sup>、汎用的な知能としての推論に対して非公理主義の立場を取る<sup>7</sup>。すなわち、完全な知識とリソースの存在を前提とする公理主義に基づくアプローチは、知能のモデルとはなりえないという立場であり、その視点から有用な推論の実現に取り組む上で、項論理的な知識表現方法が持つ特性の有用性に着目している<sup>8</sup>。

Wangが提案する非公理的論理(Non-Axiomatic Logic; 以下NAL)は、汎用的な推論システムの実現を念頭に設計されており、Sommersや森田・西原らのように自然言語の意味表示に焦点を合わせているわけではない。NALでは、推論規則は与えられるものの、公理(絶対的な命題)は存在しない。同じ有限の知識源を元に推論しても、時間というリソースも制限されているため、得られる推論結果は異なりうるし、更新され得る。加えて、演繹以外の「弱い推論規則」が用意されており、妥当ではない結論を導く可能性がはじめから許容されている。命題論理にも従わない。NALにおける命題間の含意関係( $P \Rightarrow Q$ )は、 $P$ という命題から $Q$ という命題を導出できること(つまり $P \vdash Q$ )と同義と定義され、 $\neg P \vee Q$ と同値ではない。NALにおける「真」の概念は、過去の経験に照らして妥当といえること、である。したがって、「人が人でないなら私は神である」というような無意味な命題は、命題論理では恒真であるが、NALではそうではない。

<sup>4</sup>彼らは自然言語の曖昧性や漠然性を認めつつも、基本的に論理的・理性的な言語使用を想定し(それが自然言語現象の一部分でしかないとしても)、数理論理による自然言語の有用な意味記述の可能性を信じたのであろう。このような言語観は、自然言語処理においても多次元潜在空間への記号の埋め込みに基づく深層学習アプローチ全盛となった現在から見れば賛同され難くなりつつあるように思うが、少し前(統計的機械学習によるアプローチが全盛となったものの、依然として記号間の関係を人が論理的に理解できる次元で計量して特徴量としていたころ)まではそれほど疑問視される考え方はなかったように思われる。その頃であっても、かつて「生物の個体発生や遺伝、そして分類階層などの生物現象を論理記号による定義と演算によって表現しようとした」『公理的な生物学』を構築する試みがあった[8]と聞けば、多くはその成功を疑ったのではないだろうか。しかしそうだとしたら自然言語という優れた生物学的な現象もその例外とはならないのではないだろうか。

<sup>5</sup>Wangは、知能を「不十分な知識とリソースの元で環境に適応しうまく機能するための能力」として定義している。

<sup>6</sup>NAL自体は数理論理で記述されている。

<sup>7</sup>物理学と生物学ではそれぞれの世界の法則・原理が異なるように、計算機科学と(汎用)人工知能もそれぞれ異なる法則・原理に基づく、という立場を取る。

<sup>8</sup>アリストテレスを始め論理学者が解明しようとしたものは経験世界から独立した理性の法則(狭義の論理)であり、Wangが示そうとしたものは経験世界に依拠する知性の原理といえる。そう考えるとWangの非公理的論理が「アリストテレスの論理学を継承し発展させている」と捉えるのは適切でなく、あくまで項論理の構文論を借用していると考えべきだろう。また、「狭義の論理(数理論理)のみが論理とよぶに値するという立場をとるならば、非公理的論理は論理ではなく、非公理的推論法または非論理的推論法ともよぶべきであろう。

<sup>2</sup>この説明はアリストテレス自身のものよりは伝統論理的である。アリストテレスと伝統論理の違いについては[6, 3]を参照されたい。

<sup>3</sup>命題論理における含意には $\rightarrow$ を用いるのが一般的と思われるが、本稿では $\Rightarrow$ を用いる。

### 3 非公理的論理の枠組み

NAL[16] の枠組みの概要を、構文論、意味論、推論規則の3つの側面から説明する。

#### 3.1 構文論

$S \rightarrow P$  という形式で項  $S$  と  $P$  を接辞 (copula)  $\rightarrow$  で結ぶことにより、「 $S$  は  $P$  である」という命題を表す。Wang はこの形の命題を陳述 (statement) とよんでいる。この陳述構文を基本とし、NAL 言語 (Narses) の表現能力を高めるための多数の拡張がなされているが、本稿での議論に関係するものだけを以下に取り上げる。

前述のように、陳述  $P$  が  $Q$  を含意するとき  $P \Rightarrow Q$  と書く。  $P \Rightarrow Q$  も (高階の) 陳述である。

3項以上の関係を表現したいときは、 $U \times V \rightarrow R$  のように記述する。例えば “water resolves salt” は、 $\text{water} \times \text{salt} \rightarrow \text{resolve}$  と表現できる。  $U \times V$  も1つの項 (積項) として扱われ、 $R$  は関係項とよばれる。

#### 3.2 意味論 (経験接地意味論)

接辞  $\rightarrow$  が項  $S$  と  $P$  の間の継承関係 (上位下位関係) を表すという考えを基本に<sup>9</sup>、陳述の意味論 (真偽) が、項の外延 (下位の項) と内包 (上位の項) の集合で定義される。すなわち、 $S \rightarrow S$  が常に成り立つと定めた上で、ある項  $T$  の外延集合  $T^E$  を  $T^E = \{x | (x \in V_K) \wedge (x \rightarrow T)\}$ 、内包集合  $T^I$  を  $T^I = \{x | (x \in V_K) \wedge (T \rightarrow x)\}$  としたとき、 $S \rightarrow P$  の真偽は、 $S^E \subseteq P^E$  かつ  $P^I \subseteq S^I$  であるかどうかと同値であるとされる。つまり  $|S^E - P^E| + |P^I - S^I| = 0$  であれば真である。陳述の一つ一つが観測 (経験) であるという意味で、これを経験接地意味論とよぶ。

ただし前述の真偽の定義は、Wang が継承論理 (inheritance logic; IL) とよぶ理想状況 (不確実性が存在しない状況) においてのみ成り立つ。NAL では不確実性を前提としているため、前記の同値関係を不確実性を取り込むようにこれを以下のように一般化している。すなわち NAL における真理値は、以下のように定義される3つの量  $w^+, w^-, w$  により計量される2つの値の組  $\langle f, c \rangle$  として表現される。 $f$  は真である程度を、 $c$  はその確信度を表す<sup>10</sup>。 ( $k$  は正值のシステムパラメー

タで、大きい値を持つほど確信度を慎重に評価することになる。)

$$\begin{aligned} w^+ &= |S^E \cap P^E| + |P^I \cap S^I|, \\ w^- &= |S^E - P^E| + |P^I - S^I|, \\ w &= w^+ + w^- = |S^E| + |P^I|, \\ f &= w^+ / w, \quad c = w / (w + k). \end{aligned}$$

例えば「鳥は空を飛ぶ生き物である」という陳述の真偽は、「鳥」を表す項の下位にある「カラス、ハト、ペンギン、…」といった鳥の外延項がどれくらい「空を飛ぶ生き物」という鳥の内包項をその上位項として持つか、「空を飛ぶ生き物」を表す項が持つ上位の内包項を鳥という外延項がどれくらいその内包項として共有しているかにより定まる。

#### 3.3 推論規則

主な NAL の推論は2つの前提から1つの結論を導く三段論法的規則によって行われるが、他に、否定や転換など1つの陳述だけを取る規則、積項と関係項の間の構造変換を行う規則なども定義されている。ここでは NAL における三段論法的規則の中でも、演繹 (deduction)、帰納 (induction)、アブダクション (abduction) の3規則だけを取り上げる。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{deduction} &: \{S \rightarrow M, M \rightarrow P\} \vdash S \rightarrow P, \\ \text{induction} &: \{S \rightarrow M, S \rightarrow P\} \vdash M \rightarrow P, \\ \text{abduction} &: \{M \rightarrow P, S \rightarrow P\} \vdash S \rightarrow M. \end{aligned}$$

帰納とアブダクションは、演繹の前提と結論を入れ替えた形になっている。Wang はそれぞれの規則ごとに、2つの前提陳述の真理値から結論陳述の真理値を与える関数を提示している。

アブダクションは、パースが見出した「経験から知識を得る」ための推論である。誤った推論結果を容易に導きうるが、それが人間の思考の柔軟性・創造性にも寄与していると指摘されている。パース自身が示したアブダクションの例は以下のようなものである [1]。

規則 : この袋から出る豆は全て白い。  
結果 : ここにある豆は白い。  
仮説 : ここにある豆はこの袋から出たものだ。

これは、 $M$ :この袋から出る豆、 $P$ :白い、 $S$ :ここにある豆、という対応において、まさに  $\{M \rightarrow P, S \rightarrow P\} \vdash S \rightarrow M$  の形になっている。

この3つの規則は、継承接辞  $\rightarrow$  を含意接辞  $\Rightarrow$  に置き換えても成立する。アブダクションの説明はしばしば事態間の因果 (含意) 関係の例でもなされる。例え

<sup>9</sup>後に述べる転換の推論規則により、NAL では  $S \rightarrow P$  から  $P \rightarrow S$  も推論できる。この際に、 $\rightarrow$  が継承を表すといえるのかは疑問が残る。伝統論理において、転換は  $I, E$  型の陳述への適用は妥当であるが、他の2つへの適用は妥当ではない。

<sup>10</sup>Goertzel らが提案する PLN[4] は、項論理を用いる Wang のアイデアを継承しつつ、真理値  $\langle f, c \rangle$  を確率として定式化している。また NAL が外延と内包を対称的に扱うのに対し、PLN は外延に重きをおく設計になっている。本稿では NAL の枠組みをより単純化する方向に考察をすすめるので PLN を一旦考慮の外におく。

ば、「風が吹くと木が揺れる」という因果的知識をもって、「木が揺れている」という結果の観測から「風が吹いている」という原因を推測をする、というものである。 $\{M \Rightarrow P, S \Rightarrow P\} \vdash S \Rightarrow M$  という推論形式は、一見この例にうまく当てはまらないように見えるが、 $S \Rightarrow$  の部分を文脈条件として背景化すると、 $\{M \Rightarrow P, P\} \vdash M$  となり、所与の文脈のもとで観測した結果から原因を推定（解釈）する形になっていることがわかる。

## 4 NAL から NATL へ

Wang が提示した非公理的論理 NAL は、直感的な簡潔性を持ち人間的な内包的記述が容易（述語論理の適用に際して求められる「何を個別存在とし何を述語とするか」の判断はそれほど自明ではない）、アブダクションなどの非演繹的（非単調）推論を行う枠組みを備えている、など、本研究の目的である「常に正しいとは限らないが特定の状況においては一定の有用性を持つ規則をもとにして人間が日常的に行っている」推論のモデル化にあたって望ましいと思われる特徴を備えている。また、自然論理 [14] とは異なり、あくまで記号推論のモデルであって、自然言語のみを対象とするものではない。

一方で NAL に内在するいくつかの課題も指摘できる。本節では、それらの課題とそれに対する解決のアプローチを提示する。あくまでアプローチの提示であり、具体的な計算手法の開発は今後の課題である。

アプローチの先にあるものを本稿では仮に非公理的項論理 NATL をよんで、元の NAL と区別する。

### 4.1 潜在空間意味表象の項への付与

NAL の推論過程はある項を別の項に代入あるいは置換する過程とみることができる ([16] p.22)。NAL におけるこの代入処理は、項つまり記号の表層的一致や、記号間の類似性の知識 ( $S \Leftrightarrow T$ ) によって導かれることになるが、表層的一致による処理は精度を担保できるものの実用的な頑健性を得る点で問題があることは従来からの記号処理 AI に共通する課題であったし、記号間の類似性を評価する関数を問題領域の特性を十分考慮して適切に設計することも容易ではなかった。

近年、記号の集合を特定の制約の下で多次元連続空間内の点に写像する「埋め込み」(embedding) によって、空間内の位置関係で記号間の意味的關係性・類似性を評価することにより、自然言語処理や知識グラフ処理のタスクをより高精度かつ頑健に行うことができるようになってきている (例えば [7, 2])。NATL においても各項に埋め込み表象を付与することで、推論の精度と頑健性を高めることが期待できる。

### 4.2 強化学習による推論アルゴリズムの訓練

NAL を元にして Wang が提案する推論システム NARS の推論アルゴリズム [16] は非常にナイーブなものであり、無駄な推論を省き、有意な推論結果を実効性のある時間内に得ることは困難である。NAL における推論は処理対象となる陳述と適用する規則の選択の繰り返しであるが、これはある種の暗黙知的な技能であり、強化学習による推論エンジンの訓練が有効であると思われる。この点については、記号推論と強化学習の組み合わせに関する先行研究 (一杉ら [5] など) で得られた知見を援用できるだろう。前述した項別の潜在空間意味表象や、それらを Graph Convolution などで集約したものには、強化学習における状態空間表現としての利用価値もあるだろう。

### 4.3 接辞の連続性／プロトタイプ仮説

NAL では、継承接辞・含意接辞の他にも、主に表現能力上の要請から 8 つの接辞が導入されている。工学的な立場から見ればシステムを複雑化してしまっている懸念があり、一方で科学的な立場からみればこれだけで十分なのかという疑念がある。

例えば  $S \rightarrow P$  は  $S$  が  $P$  の個体事例 (固有名詞を持つもの) であること、つまり  $S$  が下位の項を 1 つも持たないことと定義されている (例: *Tweety*  $\rightarrow$  *bird*)。しかし無生物の場合、名称を持つ個体的なものがその下位に個体的な亜種を持つと考えることが自然な場合がしばしばある (例えば、特定の楽曲が多く編曲を持ち、それらがさらに個々の演奏を持ち、さらにその演奏の録音の編集があり、等)。 $\rightarrow$  が必要だとする Wang の説明も理解できる一方、線引後の両側に静的・決定的な質の違いを定めながら、境界線の引きどころが曖昧な区別を要請することは、Wang が批判した述語論理の述語と個体の区別に通じるものを自ら再導入して、項論理の簡潔性を損なっているように思われる。

一方で、経験的な意味とそれに依拠する推論能力を重視する時に、「麺類が好きならばうどんが好き」というような論理包含的關係と、「風が吹くならば木が揺れる」というような因果的關係を同じ接辞で一括に扱ってよいのかは、自明ではないように思える。先にも触れた変換規則で  $S \rightarrow P$  を  $P \rightarrow S$  に変換したときの変換後の接辞も、もはや継承接辞ではなく連想接辞や代表性接辞とよぶべき異質の接辞ではないか。継承接辞はアリストテレスの A 型の接辞のように (暗黙的に) 説明される一方、 $I, E, O$  については議論されないが、 $I, E, O$  型の接辞も必要ではないか。そもそも人間の日常的な推論においては、「全ての (all)」と「とある (some)」の間には、「ほとんどの」「多くの」「少しの」など連続的で多様な量化の認識があるのではないか。

以上を総合すると、接辞も連続的な空間の中でプロトタイプ的なカテゴリをなすと考えるのが良いように思える。先験的に与える接辞はせいぜい  $\rightarrow$  と  $\Rightarrow$  で留め、その他のニュアンスは経験的に学習させる、つまり接辞についても 4.1 節で述べたように連続的な表象を与えられる枠組みにし、それを経験的に学習させ、状況に応じた接辞のニュアンスの区別を推論エンジンに任せる（ある場面では区別するし別の場面では区別しないということがおきる）、というアプローチである。ただしこの場合には、真理値関数の設計方法が大きな課題となる。

#### 4.4 推論と言語処理の分離と連携

推論システムが形態素単位で解析した自然言語文の意味を論理言語で表示しその上で妥当な推論を行えることは、システムの原理実証・汎用性の観点からは望ましいかもしれないが、目的と実態に照らせば必ずしも必要なことではないだろう。3.3 節で示したパースの例を見ても、個々の単語が個別の項となるまで文構造を解体しないと推論ができないわけではない。必要なことは、状況に応じて適当な粒度の意味・概念を表す項同士の類似性・置換可能性の認識である。かつては形式記号の単一化しかその手段がなく、最小粒度での文の解体が必要不可欠だったかもしれないが、今はそうではない。

人間は必ずしも事態／状況を言語的に表示しなくても前述のパースの例が示すような推論は行えるように思えるし、日常の言語使用はかなりの部分が自動的・反射的で、熟考的な記号推論が理解と応答のためにその都度行われているようにも見えない。子供の発達を見れば、人間は論理的思考ができるようになってから言葉が話せるようになるのでもないし、流暢に会話できるからといって論理的な思考ができるのでもない。

その一方で、必要に応じて、必要な粒度で、表現の意味するところを論理的に思慮したり、複雑な状況を言語化することでより妥当な推論を行うことも、人間はできているように見える。人間の「推論のシステム」と「言語のシステム」はそれぞれにあり、相互依存していると捉えるのが妥当なアプローチではないだろうか。それぞれだけでも機能するが、より効率的・効果的であるためには、相互の活用・連携が鍵となる。

前述の反射的・自動的な言語能力については、近年の深層学習技術によって、かなりの部分が既に十分に人間を近似できるレベルでモデル化されているように思われる。これを「言語のシステム」とし、それを所与として、残りの「推論のシステム」の実現を考えることが、NATL の実現にむけてとるべきアプローチと考える。

積項と関係項で文法構造の細かな表現を行うのは、不可能ではないかもしれないが、無駄に複雑な仕組みの導入を必要とするだろう。文法的な要素の処理は「言語のシステム」に任せることができれば、「推論のシステム」の構成は簡潔に保つことができる。

## 5 おわりに

本稿では、人間が行う日常的な推論の計算機モデルの実現という目標に対し、非公理的論理とそれに基づく推論システムの枠組み [16] の課題を定性的に検討し、改良の指針を示した。今後は、本稿で示した指針のもとで実装可能な手法を開発し、具体的なタスクで有効性の検証を進めていきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20K21812 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] 有馬. 改訂版 パースの思想. 岩波書店, 2014.
- [2] A. Bordes, N. Usunier, A. Garcia-Durán, J. Weston, and O. Yakhnenko. Translating embeddings for modeling multi-relational data. In *Proc. NIPS*, 2013.
- [3] G. Englebretsen. *Something to Reckon with the Logic of Terms*. University of Ottawa Press, 1996.
- [4] B. Goertzel, M. Iklé, I. Lyon, F. Goertzel, and A. Heljakka. *Probabilistic Logic Networks*. Springer, 2008.
- [5] 一杉, 中田, 高橋, 佐野. 推論規則の価値を階層型強化学習 RGoal を用いて学習する手法の提案. 人工知能学会研究会資料, 第 SIG-AGI-014-09 巻, pp. 1-10.
- [6] J. Lukasiewicz. *Aristotle's Syllogistic*. Clarendon Press, Oxford, 1951.
- [7] T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. Corrado, and J. Dean. Distributed representations of words and phrases and their compositionality. In *Proc. NIPS*, 2013.
- [8] 三中. 分類思考の世界. 講談社, 2014.
- [9] 森田, 西原, 江村. Syllogism (三段論法推論) の効率化と知識処理への応用. 電子情報通信学会論文誌, J70-D(2):405-414, 1987.
- [10] L. S. Moss. Syllogistic logics with verbs. *Journal of Logic and Computation*, 20(4):947-967, 2010.
- [11] 西原, 森田, 齊藤. 名辞論理体系に基づく自然言語文に対する推論法. 人工知能学会誌, 9(4):537-547, 1994.
- [12] F. Sommers. *The Logic of Natural Language*. Clarendon Press, Oxford, 1982.
- [13] F. Sommers and G. Englebretsen. *An Invitation to Formal Reasoning: The Logic of Terms*. Ashgate, Aldershot, 2000.
- [14] J. van Benthem. A brief history of natural logic. In M. Chakraborty, B. Löwe, M. Nath Mitra, and S. Sarukki eds., *Logic, Navya-Nyaya and Applications*. College Publications, 2008.
- [15] P. Wang. From inheritance relation to non-axiomatic logic. *International Journal of Approximate Reasoning*, 7:1-37, 1994.
- [16] P. Wang. *Non-Axiomatic Logic*. World Scientific, 2013.