2E1-R-1-5

量化動的論理による組み合わせ範疇文法の意味表示の記述とその実装に向けて

Toward descriptions and implementation of semantic representations for Combinatory Categorial Grammar by Quantified Dynamic Logic

石下 裕里　　戸次 大介
Yuri Ishishita　　Daisuke Bekki

お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科 理学専攻 情報科学コース
Ochanomizu University, Graduate School of Humanities and Sciences, Faculty of Science, Department of Information Science

Recently, it has been shown that combinatory categorial grammar (CCG) is useful to describe grammar for robust parsers. Meanwhile, in semantic analysis, a framework for semantic representations is expected to be designed for calculation in language processing. In this paper, we propose a framework for semantic composition of representations for CCG, based on Quantified Dynamic Logic (QDL), which can be converted into formulae of first-order predicate logic (FOL), and a technology to implement semantic composition by logic programming language LiLFeS.

1. はじめに

近年、言語処理の分野において、組み合わせ範疇文法（CCG: [Steedman 00]）が頑健なパーザのための文法記述に有用だということが示されつつあり、深い言語処理のためのツールとなることが期待されている。一方、深い言語処理には意味解析が必須であるが、言語処理の観点からは記述言語が計算機上で扱いやすい性質を持っていることが期待される。[戸次 10] では CCG の意味表示に高階動的論理に基づいた証明論的意味論が与えられている。しかし、高階論理によって記述されているため、計算機上で扱いやすいとは言い難い。

本研究では、言語処理の意味との対応が明らかになりつつあり、一階述語論理（FOL）に変換可能な量化動的論理（QDL: [van Eijck 06] ）に基づいた CCG の意味記述について提案し、論理型言語 LiLFeS によってその意味合成を実装するための技術について述べる。

2. 組み合わせ範疇文法 (CCG)

CCG の最も基本的な組み合わせ規則は、以下の関数適用規則である。“:” の左側は統語範疇と呼ばれ、言語学における品詞、プログラミング言語における型に相当する。一方、右側は意味表示を表している。

$$>\frac{X/Y:\ f \qquad Y:\ a}{X:\ fa} \qquad <\frac{Y:\ a \qquad X\backslash Y:\ f}{X:\ fa}$$

3. 量化動的論理 (QDL)

3.1 統語論

QDL の統語論は、以下のように項 t・式 ϕ・プログラム π の 3 つから定義されている。ただし v は変項、f は n 項演算子、R は n 項述語とする。[van Eijck 06] の QDL では、π^*（プログラムの反復）が定義に含まれるが、ここでは割愛する。

$$\begin{array}{lll} t & ::= & v \mid ft_1 \dots t_n \\ \phi & ::= & \top \mid Rt_1 \dots t_n \mid t_1 = t_2 \mid \neg\phi \mid \phi_1 \vee \phi_2 \mid \exists v \phi \mid \langle\pi\rangle\phi \\ \pi & ::= & \varepsilon v \mid v := t \mid ?\phi \mid \pi_1 ; \pi_2 \mid \pi_1 \cup \pi_2 \end{array}$$

連絡先: 石下裕里, お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科 理学専攻情報科学コース戸次研究室, 東京都文京区大塚 2-1-1, ishishita.yuri @ is.ocha.ac.jp

また、今回使用する演算子を以下のように定義する。

$$\begin{array}{rcl} [\pi]\phi & :\equiv & \neg\langle\phi\rangle\neg\phi \\ \forall v \phi & :\equiv & \neg\exists v \neg\phi \\ \phi_1 \wedge \phi_2 & :\equiv & \neg(\neg\phi_1 \vee \neg\phi_2) \end{array}$$

3.2 意味論

QDL の意味論は、M : 任意のモデル、g, h :M における任意の変数の割り当てとするとき、以下のように定義される。

項に対する意味論

$$\begin{array}{lcl} [\![v]\!]_g^{\mathrm{M}} & = & g(v) \\ [\![ft_1 \dots t_n]\!]_g^{\mathrm{M}} & = & f^{\mathrm{M}}([\![t_1]\!]_g^{\mathrm{M}}, \dots, [\![t_n]\!]_g^{\mathrm{M}}) \end{array}$$

式に対する意味論

$\mathrm{M} \vDash_g$	$\top$		常に成り立つ
$\mathrm{M} \vDash_g$	$Rt_1 \dots t_n$	*iff*	$([\![t_1]\!]_g^{\mathrm{M}}, \dots, [\![t_n]\!]_g^{\mathrm{M}}) \in R^{\mathrm{M}}$
$\mathrm{M} \vDash_g$	$t_1 = t_2$	*iff*	$[\![t_1]\!]_g^{\mathrm{M}}$ は $[\![t_2]\!]_g^{\mathrm{M}}$ と同じ
$\mathrm{M} \vDash_g$	$\neg\phi$	*iff*	$\mathrm{M} \vDash_g \phi$ ではない
$\mathrm{M} \vDash_g$	$\phi_1 \vee \phi_2$	*iff*	$\mathrm{M} \vDash_g \phi_1$ または $\mathrm{M} \vDash_g \phi_2$
$\mathrm{M} \vDash_g$	$\exists v \phi$	*iff*	ある h に対し、$g \sim_v h, \mathrm{M} \vDash_h \phi$ が成り立つ
$\mathrm{M} \vDash_g$	$\langle\pi\rangle\phi$	*iff*	ある h に対し、${}_g[\![\pi]\!]_h^{\mathrm{M}}, \mathrm{M} \vDash_h \phi$ が成り立つ

プログラムに対する意味論

${}_g[\![\varepsilon v]\!]_h^{\mathrm{M}}$	*iff*	g と h は変数 v についてのみ異なる割り当てである
${}_g[\![v := t]\!]_h^{\mathrm{M}}$	*iff*	$h = g[v \mapsto [\![t]\!]_g^{\mathrm{M}}]$
${}_g[\![?\phi]\!]_h^{\mathrm{M}}$	*iff*	$g = h$ かつ $\mathrm{M} \vDash_g \phi$
${}_g[\![\pi_1 ; \pi_2]\!]_h^{\mathrm{M}}$	*iff*	${}_g[\![\pi_1]\!]_f^{\mathrm{M}}$ かつ ${}_f[\![\pi_2]\!]_h^{\mathrm{M}}$ となるような割り当て f が存在する
${}_g[\![\pi_1 \cup \pi_2]\!]_h^{\mathrm{M}}$	*iff*	${}_g[\![\pi_1]\!]_h^{\mathrm{M}}$ または ${}_g[\![\pi_2]\!]_h^{\mathrm{M}}$

3.3 QDL の簡約規則

QDL の式は、意味論的に等価な FOL の式に簡約することができる。QDL から FOL への簡約を行うには、表 1 の簡約規則を用いる。これらの規則は QDL の定理として導くことができる。[van Eijck 06]

表 1 の diamond と box の間には $\langle\phi\rangle\psi \ \equiv\ \neg[\phi]\neg\psi$ という関係が成り立っており、様相論理と対応づけて考えることが可能である（e.g. 表 2）。

	diamond			box		
Test (T)	$\langle ?\phi_1\rangle\phi_2$	$\leftrightarrow$	$\phi_1 \wedge \phi_2$	$[?\phi_1]\phi_2$	$\leftrightarrow$	$(\phi_1 \to \phi_2)$
Random Assignment (RA)	$\langle \varepsilon v\rangle\phi$	$\leftrightarrow$	$\exists v\phi$	$[\varepsilon v]\phi$	$\leftrightarrow$	$\forall v\phi$
Dynamic Negation (DN)	$\langle \sim \pi\rangle\phi$	$\leftrightarrow$	$\neg\langle\pi\rangle\top \wedge \phi$	$[\sim \pi]\phi$	$\leftrightarrow$	$([\pi]\bot \to \phi)$
Sequence (S)	$\langle \pi_1;\pi_2\rangle\phi$	$\leftrightarrow$	$\langle\pi_1\rangle\langle\pi_2\rangle\phi$	$[\pi_1;\pi_2]\phi$	$\leftrightarrow$	$[\pi_1][\pi_2]\phi$
Choice (C)	$\langle \pi_1 \cup \pi_2\rangle\phi$	$\leftrightarrow$	$\langle\pi_1\rangle\phi \vee \langle\pi_2\rangle\phi$	$[\pi_1 \cup \pi_2]\phi$	$\leftrightarrow$	$[\pi_1]\phi \wedge [\pi_2]\phi$

表 1: 簡約規則

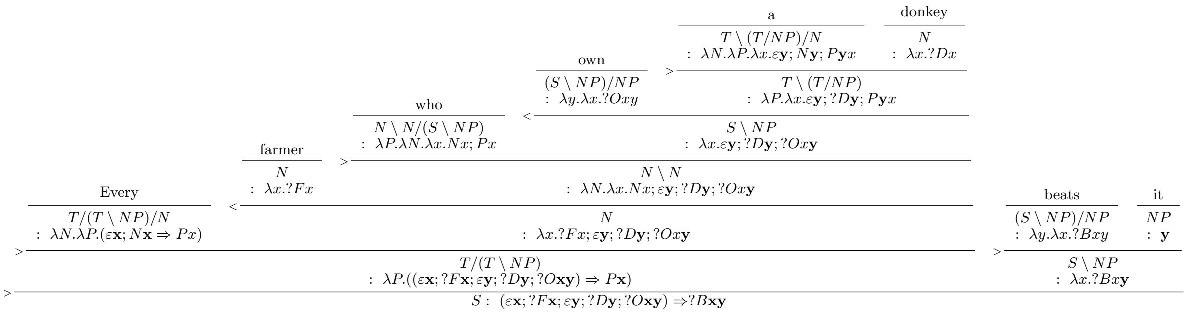

図 1: 文 a の意味計算

	公理 K	汎化
様相論理	$\Box(\phi \to \psi) \to (\Box\phi \to \Box\psi)$	$\dfrac{\phi}{\Box\phi}$
QDL	$[\pi](\phi \to \psi) \to ([\pi]\phi \to [\pi]\psi)$	$\dfrac{\phi}{[\pi]\phi}$

表 2: QDL と様相論理の関係性

含意の定義

$$\phi \Rightarrow \psi \ :\equiv \sim(\phi; \sim\psi)$$

演繹定理

簡約公理を用いることで、以下の演繹定理を証明できる。

$$(\phi;\psi) \vdash \chi \quad \equiv \quad \phi \vDash (\psi \Rightarrow \chi)$$

Proof.

$$\begin{aligned}
\phi \vDash (\psi \Rightarrow \chi) \quad &\equiv \quad \phi \vdash \sim(\psi; \sim\chi) \\
&\equiv \quad [\phi]\langle \sim(\psi; \sim\chi)\rangle\top \\
&\leftrightarrow \quad [\phi](\neg\langle\psi; \sim\chi\rangle\top \wedge \top) \\
&\equiv \quad [\phi]\neg\langle\psi; \sim\chi\rangle\top \\
&\leftrightarrow \quad [\phi]\neg\langle\psi\rangle\langle\sim\chi\rangle\top \\
&\equiv \quad [\phi]\neg\langle\psi\rangle\neg(\langle\chi\rangle\top \wedge \top) \\
&\leftrightarrow \quad [\phi]\neg\langle\psi\rangle\neg\langle\chi\rangle\top \\
&\equiv \quad [\phi][\psi]\langle\chi\rangle\top \\
&\leftrightarrow \quad [\phi;\psi]\langle\chi\rangle\top \\
&\equiv \quad (\phi;\psi) \vdash \chi \qquad \Box
\end{aligned}$$

4. QDL による意味表示の語彙化

[van Eijck 06] の QDL では、意味表示の語彙化 (lexicalization) はなされておらず、QDL が意味合成において有用である、ということは示唆に留まっている。

本研究では、λ 演算子によって拡張された QDL によって、以下のような意味表示を与えることを提案する。

$$\begin{aligned}
\text{every} \ &\vdash \ T/(T \setminus NP)/N: \ \lambda N.\lambda P.\lambda\vec{y}(\varepsilon\mathbf{x}; N\mathbf{x} \Rightarrow P\mathbf{x}\vec{y}) \\
\text{farmer} \ &\vdash \ N: \ \lambda x.?Fx \\
\text{who} \ &\vdash \ N \setminus N/(S \setminus NP): \ \lambda P.\lambda N.\lambda x.Nx; Px \\
\text{own} \ &\vdash \ (S \setminus NP)/NP: \ \lambda y.\lambda x.?Oxy \\
\text{a} \ &\vdash \ T/(T \setminus NP)/N: \ \lambda N.\lambda P.\lambda\vec{x}.(\varepsilon\mathbf{y}; N\mathbf{y}; P\mathbf{y}\vec{x}) \\
\text{donkey} \ &\vdash \ N: \ \lambda x.?Dx \\
\text{beats} \ &\vdash \ (S \setminus NP)/NP: \ \lambda y.\lambda x.?Bxy \\
\text{it} \ &\vdash \ NP: \ \mathbf{y} \\
\text{man} \ &\vdash \ N: \ \lambda x.?man(x) \\
\text{walkedin} \ &\vdash \ S \setminus NP: \ \lambda x.?walk(x) \\
\text{He} \ &\vdash \ NP: \ \mathbf{x} \\
\text{whistled} \ &\vdash \ S \setminus NP: \ \lambda x.?whistle(x) \\
\text{everybody} \ &\vdash \ T/(T \setminus NP): \ \lambda P.(\varepsilon\mathbf{x} \Rightarrow P\mathbf{x}) \\
\text{John} \ &\vdash \ NP: \ j \\
\oslash \ &\vdash \ S \setminus S/S: \ \lambda P.\lambda Q.Q; P
\end{aligned}$$

5. 検証

本節では、前節で定義した QDL を用いて、実際に文の意味を記述する。その後、その意味が 2.3 節の簡約規則によって FOL へ正しく変換されることを示す。例文として以下の 3 つの文を使用する。これらは静的論理で直接記述を試みると、束縛変数とスコープの問題が発生するため記述するのが困難であると言われている。

a. Every farmer who own a donkey beats it.
b. A man walked in. He whistled.
$\vDash$ A man walked in.
c. Every body walked in. $\vDash$ John walked in.

簡約の手順

1. 文の意味を CCG で計算する。
2. 1 で生成された意味に対し、次の操作を行う。
   - 単文の意味を判定する場合：$\langle\rangle\top$の中に埋め込む
   - 含意関係（$\phi \vDash \psi$）を判定する場合：$[\phi]\langle\psi\rangle\top$ とする。
3. 簡約公理に従い、FOL に変換する。

5.1 文 a について

まず、CCG で計算を行うと（図 1）QDL で書かれた以下のプログラムが生成される。

$$(\varepsilon\mathbf{x}; ?F\mathbf{x}; \varepsilon\mathbf{y}; ?D\mathbf{y}; ?O\mathbf{xy}) \Rightarrow ?B\mathbf{xy}$$

このプログラムは含意の定義より

$$\sim(\varepsilon\mathbf{x}; ?F\mathbf{x}; \varepsilon\mathbf{y} :?D\mathbf{y}; ?O\mathbf{xy}; \sim ?B\mathbf{xy})$$

と変換でき、これを簡約公理に従って FOL に書き換えると以下のようになる ([van Eijck 06])。

$$
\dfrac{
\dfrac{
\dfrac{\dfrac{\text{A}}{NP/N \;:\; \lambda N.\lambda P.\varepsilon\mathbf{x};N(\mathbf{x});P(\mathbf{x})} \quad \dfrac{\text{man}}{N \;:\; \lambda x.?man(x)}}{NP \;:\; \lambda P.\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})}{>}
\quad
\dfrac{\text{walked in.}}{S\setminus NP \;:\; \lambda x.?walk(x)}
}{S:\ \varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})}{<}
\quad
\dfrac{
\dfrac{\varnothing}{(S\setminus S)/S \;:\; \lambda P.\lambda Q.Q;P}
\quad
\dfrac{\dfrac{\text{He}}{NP \;:\; \mathbf{x}} \quad \dfrac{\text{whistled.}}{S\setminus NP \;:\; \lambda x.?whistle(x)}}{S \;:\; ?whistle(\mathbf{x})}{<}
}{S\setminus S:\ \lambda Q.Q;?whistle(\mathbf{x})}{>}
}{S:\ \varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x});?whistle(\mathbf{x})}{<}
$$

図 2: 文 b の意味計算（最初の 2 文）

$$
\dfrac{\dfrac{\text{Everybody}}{T/(T\setminus NP):\ \lambda P.(\varepsilon\mathbf{x}\Rightarrow P\mathbf{x})} \quad \dfrac{\text{walked in.}}{S\setminus NP:\ \lambda x.?walk(x)}}{S:\ \varepsilon\mathbf{x}\Rightarrow ?walk(\mathbf{x})}{>}
\qquad
\dfrac{\dfrac{\text{John}}{NP:\ j} \quad \dfrac{\text{walked in.}}{S\setminus NP:\ \lambda x.?walk(x)}}{S:\ ?walk(j)}{<}
$$

図 3: 文 c の意味計算

$$
\begin{array}{cl}
 & \langle\sim(\varepsilon x;?Fx;\varepsilon y;?Dy;?Oxy;\sim ?Bxy)\rangle\top \\
\xleftrightarrow{DN} & \neg\langle\varepsilon x;?Fx;\varepsilon y;?Dy;?Oxy;\sim ?Bxy\rangle\top\wedge\top \\
\xleftrightarrow{S} & \neg\langle\varepsilon x\rangle\langle ?Fx;\varepsilon y;?Dy;?Oxy;\sim ?Bxy\rangle\top \\
\xleftrightarrow{RA} & \neg\exists x\langle ?Fx;\varepsilon y;?Dy;?Oxy;\sim ?Bxy\rangle\top \\
\xleftrightarrow{S} & \neg\exists x\langle ?Fx\rangle\langle\varepsilon y;?Dy;?Oxy;\sim ?Bxy\rangle\top \\
\xleftrightarrow{T} & \neg\exists x(Fx\wedge\langle\varepsilon y;?Dy;?Oxy;\sim ?Bxy\rangle\top) \\
\xleftrightarrow{S,RA} & \neg\exists x(Fx\wedge\exists y\langle ?Dy;?Oxy;\sim ?Bxy\rangle\top) \\
\xleftrightarrow{S,T} & \neg\exists x(Fx\wedge\exists y(Dy\wedge\langle ?Oxy;\sim ?Bxy\rangle\top)) \\
\xleftrightarrow{S,T} & \neg\exists x(Fx\wedge\exists y(Dy\wedge(Oxy\wedge\langle\sim ?Bxy\rangle\top))) \\
\xleftrightarrow{DN} & \neg\exists x(Fx\wedge\exists y(Dy\wedge(Oxy\wedge(\neg\langle ?Bxy\rangle\top\wedge\top)))) \\
\xleftrightarrow{T} & \neg\exists x(Fx\wedge\exists y(Dy\wedge(Oxy\wedge(\neg(Bxy\wedge\top))))) \\
\equiv & \neg\exists x(Fx\wedge\exists y(Dy\wedge(Oxy\wedge\neg Bxy))) \\
\equiv & \forall x(Fx\rightarrow\forall y(Dy\rightarrow(Oxy\rightarrow Bxy)))
\end{array}
$$

5.2 文 b について

図 2 より導出された意味には以下のような含意関係が成り立つと考えられるため、簡約は手順 2 の含意関係を判定する場合を適用する。

$$
\begin{array}{l}
\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x});?whistle(\mathbf{x}) \\
\quad\vDash\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})
\end{array}
$$

$$
\begin{array}{cl}
 & [\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x});?whistle(\mathbf{x})]\langle\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});walk(\mathbf{x})\rangle\top \\
\xleftrightarrow{S} & [\varepsilon\mathbf{x}][?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x});?whistle(\mathbf{x})]\langle\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})\rangle\top \\
\xleftrightarrow{RA} & \forall\mathbf{x}([?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x});?whistle(\mathbf{x})]\langle\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})\rangle\top) \\
\xleftrightarrow{S} & \forall\mathbf{x}([?man(\mathbf{x})][?walk(\mathbf{x});?whistle(\mathbf{x})]\langle\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})\rangle\top) \\
\xleftrightarrow{T} & \forall\mathbf{x}(man(\mathbf{x}) \\
 & \rightarrow([?walk(\mathbf{x});?whistle(\mathbf{x})]\langle\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})\rangle\top)) \\
\xleftrightarrow{T^*,S^*} & \forall\mathbf{x}(man(\mathbf{x}) \\
 & \rightarrow(walk(\mathbf{x})\rightarrow(whistle(\mathbf{x})\rightarrow(\langle\varepsilon\mathbf{x};?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})\rangle\top)))) \\
\xleftrightarrow{S,RA} & \forall\mathbf{x}(walk(\mathbf{x})\rightarrow(whistle(\mathbf{x})\rightarrow\exists\mathbf{x}(\langle ?man(\mathbf{x});?walk(\mathbf{x})\rangle\top))) \\
\xleftrightarrow{S^*,T^*} & \forall\mathbf{x}(walk(\mathbf{x})\rightarrow(whistle(\mathbf{x})\rightarrow\exists\mathbf{x}(man(\mathbf{x})\wedge walk(\mathbf{x}))))
\end{array}
$$

5.3 文 c について

文 b と同様に、図 3 より導出された意味は次のような含意関係が成立すると考えられるため、簡約は以下のようになる。

$$
\sim(\varepsilon\mathbf{x};\sim ?walk(\mathbf{x}))\vDash ?walk(j)
$$

$$
\begin{array}{cl}
 & [\sim(\varepsilon\mathbf{x};\sim ?walk(\mathbf{x}))]\langle ?walk(j)\rangle\top \\
\xleftrightarrow{DN} & ([\varepsilon\mathbf{x};\sim ?walk(\mathbf{x})]\perp)\rightarrow\langle ?walk(j)\rangle\top \\
\xleftrightarrow{S,RA} & \forall\mathbf{x}([\sim ?walk(\mathbf{x})]\perp)\rightarrow\langle ?walk(j)\rangle\top \\
\xleftrightarrow{DN} & \forall\mathbf{x}([?walk(\mathbf{x})]\perp\rightarrow\perp)\rightarrow\langle ?walk(j)\rangle\top \\
\xleftrightarrow{T} & \forall\mathbf{x}((walk(\mathbf{x})\rightarrow\perp)\rightarrow\perp)\rightarrow\langle ?walk(j)\rangle\top \\
\xleftrightarrow{T} & \forall\mathbf{x}((walk(\mathbf{x})\rightarrow\perp)\rightarrow\perp)\rightarrow(walk(j)\wedge\top) \\
\equiv & \forall\mathbf{x}(walk(\mathbf{x}))\rightarrow walk(j)
\end{array}
$$

6. まとめと今後の課題

本論文では、CCG の意味表示として QDL を導入した。この分析によって、統語解析からスタートし、文間照応を含む文章の意味を、QDL による意味表示を経由して、最終的には FOL の式に変換できることを示した。

今後、本論文で提案した意味表示とそれを合成するシステムを論理型言語 LiLFeS を用いて実装する予定である。さらに、合成後の QDL のプログラムを FOL の式へ変換するシステムを実装することが本研究の目標である。

参考文献

[Steedman 00] Steedman, M.J.: The Syntactic Process (Language, Speech, and Communication). The MIT Press, Cambridge (2000)

[van Eijck 06] van Eijck, J. and M. Stokhof.: The Gamut of Dynamic Logics, In: Gabbay, D.M. and J. Woods (eds.) Handbook of the History of Logic, vol.7, pp.499-600., North Holland (1974)

[戸次 10] 戸次 大介.: 「日本語文法の形式理論－活用体系・統語構造・意味合成－」, 日本語研究叢書 24, くろしお出版 (2010)