モデル理論的意味論に基づく漸進的意味解釈の定式化

加藤 芳秀　　松原 茂樹

名古屋大学情報連携統括本部
yoshihide@icts.nagoya-u.ac.jp

1　はじめに

漸進的な意味解析とは，自然言語文を単語の出現順序に従って解析し，文を途中まで読んだ段階でその意味を捉える枠組みであり，実時間音声処理システムの実現に必要不可欠な技術の一つである．漸進的意味解析に関するこれまでの研究の多くは，文の断片に対する意味表現をどのように構成するかをその中心課題としており，構成された意味表現をどのように解釈するかについての理論の整備は十分とは言い難い．

形式意味論において，文に対して命題的な解釈（例えば真理条件）を与えることが多いが，漸進的な解釈における困難の一つは，文の断片は補文などの特殊なケースを除き基本的には命題を表しておらず，命題としての解釈を与えることができない点にある [2].

本稿では，モデル理論的意味論に基づき文の断片に対する意味表現を解釈する一つの試みとして，談話表示理論（Discourse Representation Theory, DRT）[3] の意味論を拡張した漸進的な意味解釈を提案する．DRT において意味表現は談話表示構造 (Discourse Representation Structure, DRS) と呼ばれるが，その解釈は，割当（DRS 中に出現する談話指示子と呼ばれる変項に個体を与える関数）の（非決定的な）更新に基づき定義される．本稿では，文の断片に対する部分 DRS の解釈を，割当の更新を規定する二つの集合として定義する．一方の集合は，その部分 DRS を基に構成される任意の DRS が定める更新の下限を表し，もう一方は上限を表す．提案する意味解釈は，漸進的に意味解釈がなされる過程を情報の単調性として説明できるとともに，文に対する DRS の解釈との整合性が保たれているといった性質を備えている．

以下では，まず 2 節において本手法のベースとなる DRT について説明し，3 節で DRT に基づく漸進的な意味解釈を提案する．

2　談話表示理論

本節では，準備として談話表示理論について説明する．

2.1　談話表示構造

談話表示理論において，文の意味表現は**談話表示構造 (DRS)** と呼ばれる構造として表現される．DRS は，**談話指示子 (discourse referent)** の集合と**条件**の集合の対として定義される．談話指示子は，文において導入された個体を示す変項である．条件は，それらの個体が満たさなければならない制約を表す．本稿では，以下のような記法により DRS を記述する．

$$[x_1, \dots x_n \mid c_1, \cdots c_m]$$

ここで，$x_1, \dots, x_n$ は談話指示子，$c_1, \dots, c_m$ は条件である．例えば，以下の DRS は，直感的には,「学生」である個体 $\mathtt{x}_1$，及び「ノート PC」である個体 $\mathtt{x}_2$ が存在し，$\mathtt{x}_1$ が $\mathtt{x}_2$ を「使用する」といった状況を表している．

$$[\mathtt{x}_1, \mathtt{x}_2 \mid \mathtt{student}(\mathtt{x}_1), \mathtt{laptop}(\mathtt{x}_2), \mathtt{use}(\mathtt{x}_1, \mathtt{x}_2)]$$

以下では，Bos[1] の定義をベースに DRS を定義する．Bos[1] では，タイプの概念を導入しており，基本タイプとして 2 つのタイプ $\mathtt{e}$ と $\mathtt{t}$ を用いる．これらはそれぞれ個体と DRS に対応する．α と β をタイプとするとき，$\langle\alpha\beta\rangle$ もタイプであり，タイプ α からタイプ β への関数タイプを表す．DRS を構成する表現は以下のように再帰的に定義される．

1. タイプ α の変項は，タイプ α の表現である．
2. 談話指示子はタイプ $\mathtt{e}$ の表現である．
3. P を n 項述語記号，$x_1, \dots, x_n$ をタイプ $\mathtt{e}$ の表現とする．このとき，$P(x_1, \dots, x_n)$ は基本条件である．
4. x_1 と x_2 をタイプ e の表現とする．このとき，$x_1 = x_2$ は基本条件である．
5. 基本条件は条件である．
6. $\mathcal{X}$ を談話指示子の集合，$\mathcal{C}$ を条件の集合とする．このとき $[\mathcal{X} \mid \mathcal{C}]$ はタイプ $\mathtt{t}$ の表現である．
7. E_1 と E_2 をタイプ $\mathtt{t}$ の表現とする．このとき，$(E_1; E_2)$ はタイプ $\mathtt{t}$ の表現である．

単語	表現	タイプ
a	$\lambda PQ.(([x \mid\ ]; Px); Qx)$	$\langle \mathtt{p}\langle \mathtt{pt}\rangle\rangle$
every	$\lambda PQ.[\ \mid ([x \mid\ ]; Px) \Rightarrow Qx]$	$\langle \mathtt{p}\langle \mathtt{pt}\rangle\rangle$
student	$\lambda X.[\ \mid \mathtt{student}(X)]$	$\mathtt{p}$
laptop	$\lambda X.[\ \mid \mathtt{laptop}(X)]$	$\mathtt{p}$
blue	$\lambda PX.([\ \mid \mathtt{blue}(X)]; PX)$	$\langle \mathtt{pp}\rangle$
red	$\lambda PX.([\ \mid \mathtt{red}(X)]; PX)$	$\langle \mathtt{pp}\rangle$
use	$\lambda PQ.Q(\lambda X.P(\lambda Y.[\ \mid \mathtt{use}(X,Y)]))$	$\langle\langle \mathtt{pt}\rangle\langle\langle \mathtt{pt}\rangle \mathtt{t}\rangle\rangle$

$\mathtt{p} = \langle \mathtt{et}\rangle$ とする．

表 1: 単語に対する意味表現

8. E をタイプ $\mathtt{t}$ の表現とする．このとき，$\neg E$ は条件である．

9. E_1 と E_2 をタイプ $\mathtt{t}$ の表現とする．このとき，$E_1 \vee E_2$，及び $E_1 \Rightarrow E_2$ は条件である．

10. X をタイプ α の変項，E を β の表現とする．このとき，$(\lambda X.E)$ はタイプ $\langle\alpha\beta\rangle$ の表現である．

11. E_1 をタイプ $\langle\alpha\beta\rangle$ の表現，E_2 をタイプ α の表現とする．このとき，(E_1E_2) はタイプ β の表現である．

すべての表現は，以下の制約を満たすものとする．

- 談話指示子は，高々一回しか宣言されない．ここで談話指示子 x が宣言されるとは，表現 $[\ldots, x, \ldots \mid \mathcal{C}]$ の形で x が出現することを意味する．
- 任意の関数タイプ $\langle\alpha\beta\rangle$ について，$\beta \neq \mathtt{e}$.

タイプ $\mathtt{t}$ の β 正規形[1]の表現のうち，変項を含まないものを DRS とし，変項を含むものを部分 DRS とする．

文に対する DRS は,（1）単語に対して表現を与え,（2）それらを関数適用により組み合わせ,（3）組み合わせた結果を β 簡約し β 正規形を得る，ことにより与えられる．例として，表 1 のように単語に対して表現が与えられているものとして，以下の文に対して，どのように DRS が構成されるかについて説明する．

A student uses every laptop.

A student に対する表現は，以下のように構成される[2].

$$\Big(\lambda PQ.\big(([\mathrm{x} \mid\ ]; P\mathrm{x}); Q\mathrm{x}\big)\Big)(\lambda X.[\ \mid \mathtt{student}(X)])$$
$$\twoheadrightarrow_\beta \lambda Q.([\mathrm{x} \mid \mathtt{student}(\mathrm{x})]; Q\mathrm{x})$$

同様に，every laptop に対しては，以下の表現が構成される．

$$\lambda P.[\ \mid [\mathrm{y} \mid \mathtt{laptop}(\mathrm{y})] \Rightarrow P\mathrm{y}]$$

[1] $(\lambda X.E_1)E_2$ の形の表現を含まない表現を β 正規形と呼ぶ．

[2] 表記を簡単にするために，以下ではマージ操作，すなわち，$([\mathcal{X}_1 \mid \mathcal{C}_1]; [\mathcal{X}_2 \mid \mathcal{C}_2])$ の $[\mathcal{X}_1 \cup \mathcal{X}_2 \mid \mathcal{C}_1 \cup \mathcal{C}_2]$ への置き換えを許すことにする．マージ操作を許しても，以下で展開される議論に本質的な影響はない．

最終的に，文に対しては以下の DRS が得られる．

$$[\mathrm{x} \mid \mathtt{student}(\mathrm{x}), [\mathrm{y} \mid \mathtt{laptop}(\mathrm{y})] \Rightarrow [\ \mid \mathtt{use}(\mathrm{x},\mathrm{y})]] \tag{1}$$

2.2 談話表示構造の解釈

本節では，Muskens[5] に基づき，DRS の解釈を定義する．DRS の解釈は，モデル M，及び割当 a に対して相対的に定義される．モデル M は 2 項組 (D, I) により定義される．D は議論領域であり，モデルが取り扱う個体の集合である．I は n 項述語記号に対して個体の n 項組の集合を返す関数である．$\langle d_1, \ldots, d_n\rangle \in I(P)$ ならば，個体 $d_1, \ldots, d_n$ が P の関係にあるということを意味する．割当 a は談話指示子に対して個体を割り当てる部分関数である．すなわち，a が談話指示子 x に対して個体 d を割り当てるとき，$a(x) = d$ である．以下では，$[x \mapsto d, \ldots]$ という表記でこのような割当を表現するものとする．M 及び a が与えられたとき，DRS（及び条件）に対する解釈関数 $[\![\cdot]\!]$ は以下のように定義される．

$$[\![P(x_1, \ldots, x_n)]\!] = \{a \mid \langle a(x_1), \ldots, a(x_n)\rangle \in I(P)\}$$

$$[\![x_1 = x_2]\!] = \{a \mid a(x_1) = a(x_2)\}$$

$$[\![[\mathcal{X} \mid \mathcal{C}]]\!]_a = \{a' \mid a \subseteq_{\mathcal{X}} a' \wedge a' \in \bigcap_{c \in \mathcal{C}} [\![c]\!]\}$$

ここで，$a \subseteq_{\mathcal{X}} a'$ は，$Dom(a') = Dom(a) \cup \mathcal{X}$（$Dom(\cdot)$ は定義域を表す．また $Dom(a) \cap \mathcal{X} \neq \emptyset$ とする）であり，任意の $x \in Dom(a)$ に対して，$a(x) = a'(x)$ が成り立つことを表す．$a \subseteq_{\mathcal{X}} a'$ であるような $\mathcal{X}$ が存在するとき，a' を a の**拡張 (extension)** と呼び，$a \subseteq a'$ と書く．

$$[\![(E_1; E_2)]\!]_a = \{a'' \mid \exists a' \in [\![E_1]\!]_a (a'' \in [\![E_2]\!]_{a'})\}$$

$$[\![\neg E]\!] = \{a \mid [\![E]\!]_a = \emptyset\}$$

$$[\![E_1 \vee E_2]\!] = \{a \mid [\![E_1]\!]_a \cup [\![E_2]\!]_a \neq \emptyset\}$$

$$[\![E_1 \Rightarrow E_2]\!] = \{a \mid \forall a' \in [\![E_1]\!]_a ([\![E_2]\!]_{a'} \neq \emptyset)\}$$

$[\![E]\!]_\phi \neq \emptyset$ のとき，DRS E はモデル M のもとで真であるという．ここで，ϕ は空関数である．

例として，図 1 に示すようなモデルのもとでの DRS(1) の解釈を考えると，

$$[\![(1)]\!]_\phi = \{[\mathrm{x} \mapsto d_1]\}$$

であるため，このモデルのもとで DRS(1) は真である．

$D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7\}$
$I(\texttt{student}) = \{\langle d_1\rangle, \langle d_2\rangle\}$
$I(\texttt{laptop}) = \{\langle d_3\rangle, \langle d_4\rangle\}$
$I(\texttt{tablet}) = \{\langle d_5\rangle, \langle d_6\rangle, \langle d_7\rangle\}$
$I(\texttt{red}) = \{\langle d_3\rangle, \langle d_5\rangle, \langle d_6\rangle\}$
$I(\texttt{blue}) = \{\langle d_4\rangle, \langle d_7\rangle\}$
$I(\texttt{use}) = \{\langle d_1, d_3\rangle, \langle d_1, d_4\rangle, \langle d_1, d_5\rangle, \langle d_1, d_6\rangle, \langle d_2, d_7\rangle\}$

図 1: モデルの例

3　漸進的な意味解釈

3.1　部分 DRS の漸進的な構成

文の断片に対する意味表現は，欠けている部分の意味表現を変項とすることにより構成できる．意味表現の漸進的な構成方法については，文献 [4] を参照されたい．例えば，以下の文の断片は，名詞，あるいは形容詞＋名詞といった表現が欠けている．

$$\text{A student uses every} \ldots \tag{2}$$

欠けている部分に対する意味表現としてタイプ $\langle \texttt{et}\rangle$ の変項 U を割り当て，意味表現を構成すると，次のような部分 DRS が得られる．

$$[\texttt{x} \mid \texttt{student}(\texttt{x}), ([\texttt{y} \mid\ ]; U\texttt{y}) \Rightarrow [\ \mid \texttt{use}(\texttt{x}, \texttt{y})]] \tag{3}$$

文献 [4] の手法に従えば，変項を具体的な表現に置き換えることにより DRS は漸進的に構成されるが，このような具体化の過程を，関係 $\rhd$ として次のように定義する．

- E_1 を部分 DRS，E_2 を部分 DRS あるいは DRS とする．U を E_1 に出現する任意の自由変項とする．このとき，ある E' が存在し，$E_1[U := E'] \twoheadrightarrow_\beta E_2$ ならば，$E_1 \rhd E_2$ である．ここで，$E[U := E']$ は E に出現する自由変項 U を E' に置き換えた結果を表す．

例えば，(3)$\rhd$(1) が成り立つ．

3.2　部分 DRS の解釈

本節では，部分 DRS に対する解釈を提案する．部分 DRS 中に含まれる変項がどのような表現で置き換えられるかは不明であるが，その表現がどのようなものであれ意味解釈に必ず含まれる割当の集合（$[\![\cdot]\!]^{min}$）と，含まれる可能性のある割当の集合（$[\![\cdot]\!]^{max}$）を求めることにより，その部分 DRS を具体化した DRS の解釈がどのようなものとなりうるかを計算するのが基本的なアイデアである．以下がその定義である．

E が基本条件のとき，

$$[\![E]\!]^{min} = [\![E]\!]$$

$$[\![E]\!]^{max} = [\![E]\!]$$

$$[\![[\mathcal{X} \mid \mathcal{C}]]\!]^{min}_a = \{a' \mid a \subseteq_{\mathcal{X}} a' \wedge a' \in \bigcap_{c \in \mathcal{C}} [\![c]\!]^{min})\}$$

$$[\![[\mathcal{X} \mid \mathcal{C}]]\!]^{max}_a = \{a' \mid a \subseteq_{\mathcal{X}} a' \wedge a' \in \bigcap_{c \in \mathcal{C}} [\![c]\!]^{max})\}$$

$$[\![(E_1; E_2)]\!]^{min}_a = \{a'' \mid \exists a' \in [\![E_1]\!]^{min}_a (a'' \in [\![E_2]\!]^{min}_{a'})\}$$

$$[\![(E_1; E_2)]\!]^{max}_a = \{a'' \mid \exists a' \in [\![E_1]\!]^{max}_a (a'' \in [\![E_2]\!]^{max}_{a'})\}$$

$$[\![\neg E]\!]^{min} = \{a \mid [\![E]\!]^{max}_a = \emptyset\}$$

$$[\![\neg E]\!]^{max} = \{a \mid [\![E]\!]^{min}_a = \emptyset\}$$

$$[\![E_1 \vee E_2]\!]^{min} = \{a \mid [\![E_1]\!]^{min}_a \cup [\![E_2]\!]^{min}_a \neq \emptyset\}$$

$$[\![E_1 \vee E_2]\!]^{max} = \{a \mid [\![E_1]\!]^{max}_a \cup [\![E_2]\!]^{max}_a \neq \emptyset\}$$

$$[\![E_1 \Rightarrow E_2]\!]^{min} = \{a \mid \forall a' \in [\![E_1]\!]^{max}_a ([\![E_2]\!]^{min}_{a'} \neq \emptyset)\}$$

$$[\![E_1 \Rightarrow E_2]\!]^{max} = \{a \mid \forall a' \in [\![E_1]\!]^{min}_a ([\![E_2]\!]^{max}_{a'} \neq \emptyset)\}$$

E がタイプ t の変項，あるいは $E = (E_1 E_2)$ で E_1 がタイプ $\langle \alpha \texttt{t}\rangle$ の変項（α は任意のタイプ）のとき，

$$[\![E]\!]^{min}_a = \emptyset$$

$$[\![E]\!]^{max}_a = \{a\}$$

この定義において注目すべき点は，$[\![\cdot]\!]^{min}$ 及び $[\![\cdot]\!]^{max}$ が相互再帰により定義されている点である．すなわち，$[\![\cdot]\!]^{min}$ と $[\![\cdot]\!]^{max}$ は相補的な関係にあり，2 種類の解釈を同時に考慮しなければならないことを示唆している．

$[\![\cdot]\!]^{min}$ 及び $[\![\cdot]\!]^{max}$ について次が成り立つ．

単調性 E_1 を部分 DRS，E_2 を部分 DRS あるいは DRS とし，$E_1 \rhd^* E_2$ とする．任意のモデル M 及び割当 a のもとで，以下が成り立つ．

- 任意の $b_1 \in [\![E_1]\!]^{min}_a$ に対して，ある $b_2 \in [\![E_2]\!]^{min}_a$ が存在し，$b_1 \subseteq b_2$.
- 任意の $b_2 \in [\![E_2]\!]^{max}_a$ に対して，ある $b_1 \in [\![E_1]\!]^{max}_a$ が存在し，$b_1 \subseteq b_2$.

整合性 E を任意の DRS とする．任意のモデル M 及び割当 a のもとで，以下が成り立つ．

$$[\![E]\!]^{min}_a = [\![E]\!]^{max}_a = [\![E]\!]_a$$

3.3 例

以下では例として，図 1 のモデルと割当 ϕ のもとでの DRS(3) の解釈について考える．任意の $d_i(1 \leq i \leq 7)$ に対して，

$$[\![[\mathtt{y} \mid\ ]]\!]^{max}_{[\mathtt{x} \mapsto d_i]} = \{[\mathtt{x} \mapsto d_i, \mathtt{y} \mapsto d_j] \mid 1 \leq j \leq 7\}$$

である．また，任意の割当 a について $[\![U\mathtt{y}]\!]^{max}_a = \{a\}$ である．したがって，; の解釈関数の定義より，

$$[\![([\mathtt{y} \mid\ ]; U\mathtt{y})]\!]^{max}_{[\mathtt{x} \mapsto d_i]} = \{[\mathtt{x} \mapsto d_i, \mathtt{y} \mapsto d_j] \mid 1 \leq j \leq 7\}$$

である．一方，$\langle d_i, d_1 \rangle \notin I(\mathtt{use})$ であるので，

$$[\![[\ \mid \mathtt{use}(\mathtt{x}, \mathtt{y})]]\!]^{min}_{[\mathtt{x} \mapsto d_i, \mathtt{y} \mapsto d_1]} = \emptyset$$

が成り立つ．$\Rightarrow$ の解釈関数の定義より，

$$[\mathtt{x} \mapsto d_i] \notin [\![([\mathtt{y} \mid\ ]; U\mathtt{y}) \Rightarrow [\ \mid \mathtt{use}(\mathtt{x}, \mathtt{y})]]\!]^{min}$$

である．したがって

$$\begin{aligned} &[\![[\mathtt{x} \mid \mathtt{student}(\mathtt{x}), ([\mathtt{y} \mid\ ]; U\mathtt{y}) \Rightarrow [\ \mid \mathtt{use}(\mathtt{x}, \mathtt{y})]]]\!]^{min}_{\phi} \\ &\quad = \emptyset \end{aligned}$$

である．一方，

$$\begin{aligned} &[\![[\mathtt{x} \mid \mathtt{student}(\mathtt{x}), ([\mathtt{y} \mid\ ]; U\mathtt{y}) \Rightarrow [\ \mid \mathtt{use}(\mathtt{x}, \mathtt{y})]]]\!]^{max}_{\phi} \\ &\quad = \{[\mathtt{x} \mapsto d_1], [\mathtt{x} \mapsto d_2]\} \end{aligned}$$

である．以上のことから，図 1 のモデルのもとでは文の断片 (2) がそれに続く入力によっては真とならない可能性が残されているが，それが真となるとすれば，談話指示子 $\mathtt{x}$ に対して個体 d_1 か d_2 を割り当てるような更新となることを表している．

別の例として，文の断片 (2) に “red” が後続する場合，すなわち次の文の断片について考える．

$$\text{A student uses every red } \ldots \tag{4}$$

この断片に対する部分 DRS は以下の通りである．

$$\begin{aligned} &[\mathtt{x} \mid \mathtt{student}(\mathtt{x}), \\ &\quad ([\mathtt{y} \mid\ ]; ([\ \mid \mathtt{red}(\mathtt{y})]; U'\mathtt{y})) \Rightarrow [\ \mid \mathtt{use}(\mathtt{x}, \mathtt{y})]] \end{aligned} \tag{5}$$

その解釈は以下の通りである．

$$[\![(5)]\!]^{min}_{\phi} = \{[\mathtt{x} \mapsto d_1]\}$$

$$[\![(5)]\!]^{max}_{\phi} = \{[\mathtt{x} \mapsto d_1], [\mathtt{x} \mapsto d_2]\}$$

ここでのポイントは，文の断片 (4) に後続するものが何であれ，その DRS の解釈は，単調性の性質から必ず $[\mathtt{x} \mapsto d_1]$ の拡張を要素として持つ，すなわち真となることが保証されていることである．この例は，提案する意味論が，文だけでなく文の断片の真偽について議論することが可能なことを示している．

4 おわりに

本稿では，談話表示理論のモデル理論的意味論を拡張した漸進的意味解釈について提案した．本手法により，否定，存在量化，普遍量化といった現象を含む文のモデル理論的な解釈について，漸進性の観点から議論することが可能となる．本手法を実装して，具体的な文に対してどのような解釈がなされるかの検証などが今後の課題である．

謝辞

本研究は一部，科研費基盤研究 (C)(No. 17K00303) により実施した．

参考文献

[1] Johan Bos. Towards a large-scale formal semantic lexicon for text processing. In *Proceedings of the Biennal GSCL Conference From Form to Meaning: Processing Texts Automatically*, pp. 3–14, 2009.

[2] Nick Chater, Martin Pickering, and David Milward. What is incremental interpretation? *Edinburgh Working Papers in Cognitive Science*, Vol. 11, pp. 1–23, 1995.

[3] Hans Kamp and Uwe Reyle. *From Discourse to Logic: Introduction to Modeltheoretic Semantics of Natural Language, Formal Logic and Discourse Representation Theory.* Kluwer Academic, 1993.

[4] Yoshihide Kato and Shigeki Matsubara. Incremental semantic construction based on combinatory categorial grammar. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, Vol. 99, No. 9, pp. 2368–2376, 2016.

[5] Reinhard Muskens. Combining montague semantics and discourse representation. *Linguistics and philosophy*, Vol. 19, No. 2, pp. 143–186, 1996.