論理的意味論に基づく説明テキストの文脈理解

8B－4

高松 忍　和泉憲明　凌 雲飛

大阪府立大学工学部

1．まえがき

従来より，記号論理などに基づく自然言語の形式意味論として，[1]Montague 意味論，[2]Kamp のディスコース表示理論，[3]Barwise&Perryの状況意味論があり，これらの意味論をベースとした自然言語理解システムの研究が国内外で行われてきた．[1]は，真理条件的・モデル理論的意味論であり，高階論理（タイプ理論）と様相論理を融合した内包論理による定式化を行っている．[2]と[3]では，文の意味を解釈前の状況（文脈）と解釈後の状況（文脈）の間の関係とみる文脈論的・状況論的意味論であり，従来の述語論理の他に集合論や代数構造などの道具を用い，独自の形式体系として定式化を行っている．しかし，以上の意味論は，論理体系が一階論理より高次であったり，発展段階の基礎的な理論であることなどから，現在のところこれらの意味論に基づく有効で充分な言語理解システムは実現されていない．

一方，人工知能の知識工学分野特に記号論理による知識表現と推論機構の最近の研究には次のような有効な成果がえられている．

(1) 可能世界モデル，メタレベル推論やリフレクションに基づく様相論理，認識論理の一階論理による形式化
(2) 高階論理（タイプ理論）の一階論理による証明法
(3) デフォルト推論と信念修正機構

本論文では，最近の知識工学の研究成果に基づき，これらを融合して拡張・発展させ，文脈論的・状況論的，動的解釈の機構を形式化する論理的意味論を与え，これにより説明テキストにおける因果関係，理由づけや論理的関係などの文脈理解を行う手法を提案している．ここでは，ハードウエア及びソフトウエアの開発のための仕様記述言語，自然言語インタフェース，技術文書の知識ベース化などを目的として，ハードウエアシステムやリアルタイムシステムなどの人工システムに関する説明テキストを対象としている．本手法では，時間・動作・認識の様相論理とタイプ理論に基づく高階論理の意味論に基づいて対象世界の構造を設定する．そして、これを効率的な推論法が確立している一階論理により定式化し，さらにラムダ計算ならびにデフォルト推論とメタレベル推論の信念修正機構により状況論的・動的な文脈理解の定式化を行い，これをＰｒｏｌｏｇ言語のシステムにより実現している．

2．理解システムの概要

先ず，テキスト文を言語解析して格構造表現を構成し，続いて高階様相論理式，一階論理式に順次変換し，知識ベースを用いた推論により文脈理解を行なう．図1に，対象とする説明テキスト（日本語）のシンタクスを示す．テキスト文の言語解析は，従来の格フレームを用いる上昇型構文・意味解析法により行なう．

＜テキスト＞：：＝＜文＞*
＜文＞：：＝＜単文＞｜＜複文＞
＜単文＞：：＝＜状態文＞｜＜動作文＞
＜複文＞：：＝＜文＞＜接続詞＞＜文＞
＜接続詞＞：：＝＜時間関係接続詞＞｜＜条件・含意接続詞＞
｜＜目的・手段接続詞＞｜＜原因・結果接続詞＞
｜　…………
＜状態文＞：：＝＜存在＞｜＜属性＞｜＜関係＞｜＜所有＞
｜＜認識＞｜＜意図＞
＜動作文＞：：＝＜位置移動＞｜＜属性変化＞｜＜所有移動＞
｜＜情報伝達＞｜＜思考＞

図1．テキストのシンタクス（一部）

3．格構造表現の高階様相論理式への変換

変換すべき高階様相論理式の基本表現ならびにシンタクスを図2に示す．

(a) 基本表現
項…. 個体定項，個体変項，
ラムダ表現　λｘ（＜式＞），イオタ表現　ιｘ（＜式＞），
関数表現　ｆ（ｔ1,ｔ2, … ,ｔｎ）ｆ：ｎ項関数記号，
状態表現…. ｐ（ｔ1,ｔ2, … ,ｔｎ）　ｐ：ｎ項状態述語記号
動作表現…. ａ（ｔ1,ｔ2, … ,ｔｎ）ａ：ｎ項動作記号，
但し，ｔi(i=1,2,…,n)は項または式
限定演算子….　EVERY, SOME, ONLY
単項様相演算子…. FUTsome（未来のいつか），
NEXT, PERFect, OCCUR など
二項様相演算子….　UNTIL, CAUSE, KNOW, など

(b) 高階様相論理式
＜式＞：：＝＜状態表現＞｜～＜式＞｜＜式＞&＜式＞｜
＜式＞∨＜式＞｜＜式＞→＜式＞｜
∀ｘ（＜式＞）｜∃ｘ（＜式＞）｜
EVERY（λｘ（＜式＞），λｙ（＜式＞））｜
FUTsome（＜式＞）｜OCCUR（＜動作表現＞）｜
UNTIL（＜式＞，＜動作表現＞）｜
CAUSE（＜動作表現＞，＜式＞）｜
KNOW（＜項＞，＜式＞）｜　……..

図2．高階様相論理式のシンタクス（一部）

格構造表現は，次式に示すような格構造パターンに基づく変換規則を用いて高階様相論理式に変換する．

Ｐ（MODAL:(TENSE:future), …… ,TIME:いつか）
⇒　FUTsome（Ｐ（……））
Ｐ（…… , CAUSE:Q）⇒　CAUSE（Q，Ｐ（……））
Ｐ（…. , C:n(DET:すべての，PMOD:Q[*]))
⇒　EVERY（λｘ（ｎ（ｘ）&Q[x]），λｙＰ（…，ｙ））
ここで，Q[*]は中心名詞語nの連体修飾部を示す．

4．高階様相論理式の一階論理式への変換

説明テキストの対象世界には，時間，状態，動作，状態変化，対象の性質や対象間の関係，関数など動的・静的対象，具体的レベルから抽象的レベルまで種々のものが存在する．ここでは対象世界の構造Mを以下のように

Contextual Understanding of Expository Texts Based on Logical Semantics

Shinobu TAKAMATSU　Noriaki IZUMI　LIN Yun Fei

University of Osaka Prefecture

与える．

$M : \langle S, D, F, P, \leqq, \{Ei \mid i \in Act\}, \{Ki \mid i \in Agent\}, \{Ii \mid i \in Agent\}, \Psi \rangle$

S：状態を表す個体（定項，変項）の集合
D：S以外の個体（定項，変項）の集合
F：$D^n \times S$上で定義される(n+1)項関数記号の集合
Act：動作表現の集合
Agent：エージェントの集合（$\subset D$）
$\leqq$, Ei, Ki, Ii：$S \times S$上で定義される状態間の到達可能関係を表す述語記号（$\leqq$：時間，Ei：動作，Ki：認識，Ii：意図）
P：$D^n \times S$上で定義される(n+1)項述語記号の集合
Ψ：S, D, F, P, $\leqq$, Ei, Ki, Ii, Actから構成される一階論理式の集合

構造Mは文を解釈する状況（文脈）を与え，Mにおいて高階様相論理式Aが状態sで充足されることを

$$M, s \models A \ \text{ iff } \ \Psi \vdash T('A', s)$$

により定義する．ここで，$\Psi \vdash T('A', s)$ は，Aがsで真であることを示す一階論理式 $T('A', s)$ がΨの論理的帰結（Ψから$T('A', s)$が証明可能）であることを表す．ここで，$T('A', s)$の形をメタレベル表現と呼ぶ．図3にメタレベル表現に関する変換規則を示す．ここで

$$\text{Revise}(\Psi, s, act, s', \Psi')$$

は前提状態sと結果状態s'間で起こる動作actによる状態変化に対する論理式集合ΨからΨ'への修正を表す．この計算は後述する動作に関する規則と状態変化に関するデフォルト推論により行なう．また，動作以外の場合のReviseについても信念修正（belief revision）の考え方により同様に定義される．

(a)基本状態表現

$T('p(t_1, t_2, \ldots, t_n)', s)$
$\equiv p(t_1, t_2, \ldots, t_n, s)$

(b)時間表現

$T('\text{FUTsome}(A)', s)$
$\equiv \exists s' (\leqq(s, s') \,\&\, T('A', s'))$

(c)認識表現

$T('\text{KNOW}(a, A)', s)$
$\equiv \forall s' (Ka(s, s') \rightarrow T('A', s'))$

(d)基本動作表現

$T('\text{OCCUR}(act)', s)$
$\equiv \exists s'\, T('\text{OCCUR}(act)', s, s')$
$T('\text{OCCUR}(act)', s, s')$
$\equiv E_{act}(s, s')$

(e)条件動作関係

$T('\text{OCCUR}(\text{IF } p \text{ THEN } act1 \text{ ELSE } act2)', s, s')$
$\equiv (T('p', s) \rightarrow T('\text{OCCUR}(act1)', s, s'))$
$\quad \& (\sim T('p', s) \rightarrow T('\text{OCCUR}(act2)', s, s'))$

(f)因果関係

$\{\Psi \vdash T('\text{CAUSE}(act, A)', s)\}$
$\equiv \exists s' \{(\Psi \vdash T('\text{OCCUR}(act)', s, s'))$
$\quad \& \ \text{Revise}(\Psi, s, act, s', \Psi')$
$\quad \& \ (\Psi' \vdash T('A', s'))\}$

図3．変換規則（一部）

5．知識ベース

システムやデバイスなどの説明文を専門分野の知識を用いて理解するために，時間，動作，認識に関する一般的規則や，基本デバイスの動作規則などを知識ベースに用意する．動作規則は，次式のような形式で記述する．

動作に関する規則

$T('\phi(X1, X2, \ldots, Xn)', s)$	前提状態
$\& \ T('\text{OCCUR}(act)', s, s')$	動作
$\rightarrow T('\psi(X1, X2, \ldots, Z1, Z2, \ldots)', s')$	結果状態
$\& \ T('\text{OCCUR}(component\_acts)', s, s')$	成分動作

また，動作によって変化しない状態を推論するため，状態制約規則と次式のデフォルト規則が必要である．

デフォルト規則

$T('\alpha(X1, X2, \ldots, Xn)', s)$	前提状態
$\& \ T('\text{OCCUR}(act)', s, s')$	動作
$\Rightarrow T('\alpha(X1, X2, \ldots, Xn)', s')$	結果状態

この規則により，'$\Rightarrow$' の左辺が状態sにおいて成り立つとき，動作（act）が起こった結果の状態s'で$T('\alpha(X1, X2, \ldots, Xn)', s')$が無矛盾（consistent）であるなら，状態s'でも$\alpha(X1, X2, \ldots, Xn)$が成り立つとして，$T('\alpha(X1, X2, \ldots, Xn)', s')$をデフォルト推論する．

6．文脈理解

説明テキストは前提文，前提結果文，結果文の繰り返しから構成される．説明テキストの文脈理解とは，これらの文の連鎖を知識ベースを用いた推論により検証し，テキスト全体の説明構造を抽出することである．上述の文脈理解を次のように定式化する．いま，テキストの文系列を　$\alpha 1, \ldots \alpha i\text{-}1, \alpha i, \alpha i+1, \alpha n$
とし，文αiの文脈的解釈を

$$\text{Interpret}(\Psi i, s, Ai, s', \Psi i+1)$$

で表す．ここで，Aiはαiの論理式表現を示す．上式は，文脈Ψi（$\alpha 1$から$\alpha i\text{-}1$までの解釈でえられた論理式の集合＋知識ベース）と状態sにおいてαiを解釈し，その結果えられる新たな文脈（$\alpha i+1$を解釈する文脈）と状態がそれぞれ$\Psi i+1$, s'であることを示す．Interpret を上述の文のタイプにより次のように定義する．

文αiが結果文 THEREFORE (Bi) の場合：

$\text{Interpret}(\Psi i, s, \text{THEREFORE}(Bi), s', \Psi i+1)$
$\equiv \{\Psi i \vdash T('Bi', s)\} \,\&$
$\quad \text{Revise}(\Psi i, s, Bi, s', \Psi i+1)$

文αiが前提文 PREMISE (Bi) の場合：

$\text{Interpret}(\Psi i, s, \text{PREMISE}(Bi), s', \Psi i+1)$
$\equiv \text{Revise}(\Psi i, s, Bi, s', \Psi i+1)$

文αiが前提結果文 (Bi1) THEREFORE (Bi2) の場合：

$\text{Interpret}(\Psi i, s, (Bi1)\ \text{THEREFORE}(Bi2), s'', \Psi i+1)$
$\equiv \text{Revise}(\Psi i, s, Bi1, s', \Psi i') \,\&$
$\quad \text{Interpret}(\Psi i', s', \text{THEREFORE}(Bi2), s'', \Psi i+1)$

以上からテキスト全体の解釈は次のように与えられる．

$\text{Interpret}(\Psi 1, s1, [A1, A2, \ldots, An], sn+1, \Psi n+1)$
$\equiv \text{Interpret}(\Psi 1, s1, A1, s2, \Psi 2) \,\&$
$\quad \text{Interpret}(\Psi 2, s2, [A2, \ldots, An], sn+1, \Psi n+1)$

参考文献

1) D.R.Dowty et al : Introduction to Montague Semantics, Reidel, Dordrecht (1981)
2) J.Barwise & J.Perry : Situations and Attitudes, MIT Press (1983)
3) 白井：自然言語の意味論，産業図書 (1991)
4) A.M.Frish & R.B.Scherl : A General Framework for Modal Deduction, KR' 91, pp.196-207 (1991)
5) N.Davies : A First Order Logic of Truth, Knowledge and Belief, Lecture Notes in AI, 478-Logics in AI, pp.170-179 (1990)
6) G.Attardi & M.Simi : Reflections about Reflection, KR' 91, pp.22-31 (1991)
7) M.Kerber : How to Prove Higher Order Theorems in First Order Logic, IJCAI-91, pp.137-142 (1991)
8) B.Nebel : Belief Revision and Default Reasoning : Syntax-Based Approaches, KR' 91, pp.417-428 (1991)
9) 西田・高松　他：知識を用いた説明テキストの理解と情報抽出，情報処理学会論文誌，Vol.31, No.3, pp.481-490 (1990)