7H－7

有限状態システムに関する説明テキストの一階論理に基づく文脈理解

井上 博明　谷 忠明　和泉 憲明　高松 忍　福永 邦雄
大阪府立大学工学部

1　まえがき

本論文では，構成的数学における証明可能性解釈の考え方[1]と，プロパティ理論[4]ならびに情報の論理[2, 3]に基づいた一階論理の形式化により，説明テキストの文脈理解を行う手法を提案する．ここでは，ハードウェアやソフトウェアの仕様記述言語，設計支援の自然言語インタフェースや仕様書の知識ベース化などを目的として，ハードウェアシステムやリアルタイムシステムなどの有限状態システムに関する説明テキストを対象としている．本研究では，文間の接続関係により与えられる二つの構造，すなわち，対象システムの状態と動作に関する推論構造とテキストの文章論的な階層構造の文脈理解を考える．そのため，推論構造を与える論理式表現と階層構造を与えるフレーム表現を統合的に表現し推論する枠組みを一階論理によって形式化する．そして，デフォルト推論，リフレクションと信念修正の機構を援用した一階論理の推論による状況的・動的な文脈理解の手法を与える．

2　言語解析と論理式への変換

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い，表１の格構造形式の意味表現に変換する．

表 1 格構造形式の意味表現

⟨意味表現⟩ ::= ⟨述語または名詞語⟩([$MODALITY$: (⟨様相⟩)], ⟨格$_1$⟩, ..., ⟨格$_n$⟩)
⟨様相⟩ ::= ⟨時制⟩[⟨時相⟩][$NEGATION$]
⟨時制⟩ ::= $TENSE$: (過去 | 現在 | 未来)
⟨時相⟩ ::= $ASPECT$: (完了 | 進行)
⟨格⟩ ::= ⟨格ラベル⟩-⟨意味タイプ⟩ : ⟨意味表現⟩
⟨格ラベル⟩ ::= $AGENT$(動作主) | $OBJECT$(対象) |
$SOURCE$(源泉) | $GOAL$(目標) |
$TIME$(時間) | $CAUSE$(原因) |
$UNTIL$(期限) | $PMOD$(述語節修飾) | ...

続いて，知識を用いた推論により文脈理解を行うため，格構造表現の標準化と論理式への変換を行う必要がある．本手法で設定する論理式は，一階述語論理式に時間・動作 ($FUTsome$: 未来のいつか，$OCCUR$: 動作の生起，...) や因果・条件 ($COND$: 条件関係，...) などの様相演算子を加えて拡張した多重様相述語論理式 (以下，様相論理式と呼ぶ) である．表２に，様相論理式の形成規則を示す．

言語解析により得られるテキスト文の格構造表現は標準化の後，表３に示すような格構造パターンに基づく変換規則により様相論理式に変換する．

表 2 様相論理式の形成規則

⟨項⟩ ::= ⟨個体定項⟩ | ⟨個体変項⟩ | ⟨関数表現⟩
⟨関数表現⟩ ::= ⟨n項関数記号⟩(⟨項$_1$⟩, ⟨項$_2$⟩, ..., ⟨項$_n$⟩)
⟨状態表現⟩ ::= ⟨n項状態述語記号⟩(⟨項$_1$⟩, ⟨項$_2$⟩, ..., ⟨項$_n$⟩) | ...
⟨動作表現⟩ ::= ⟨n項動作述語記号⟩(⟨項$_1$⟩, ⟨項$_2$⟩, ..., ⟨項$_n$⟩) | ...
⟨式⟩ ::= ⟨状態表現⟩ | ¬⟨式⟩ | ⟨式⟩&⟨式⟩ | ⟨式⟩ ∨ ⟨式⟩ |
$FUTsome$(⟨式⟩) | $UNTIL$(⟨式⟩, ⟨式⟩) |
$OCCUR$(⟨動作表現⟩) | $CAUSE$(⟨動作表現⟩, ⟨式⟩) |
$COND$(⟨式⟩, ⟨動作表現⟩, ⟨式⟩) | ...

表 3 変換規則 (一部)

$P(MODALITY : (TENSE : \text{未来}), C, TIME : \text{いつか})$
$\Rightarrow FUTsome(P(C))$
$P(C, UNTIL : Q) \Rightarrow UNTIL(P(C), Q)$
$P(C, CAUSE : Q) \Rightarrow CAUSE(Q, P(C))$
$P(C_1, K_1 : t(PMOD : Q(C_2, K_2 : *)))$
$\Rightarrow P(C_1, K_1 : t) \& Q(C_2, K_2 : t)$

本手法では，命題 (論理式) を抽象的な型である個体として扱えるプロパティ理論に基づいて，状態 s で様相論理式 A が成り立つことを表す一階述語: T('A', s) を導入する．そして，T('A', s) の充足性を，一階論理式の集合により与える状況記述 Ψ に対する証明可能関係:

$$\Psi \vdash \mathrm{T}(`A', s)$$

により定義する．上式は，表４の変換規則，時間・動作に関する一般的規則やデフォルト推論を用いた一階論理の推論により，T('A', s) が Ψ から証明可能であることを示す[6]．

表 4 T('A', s) に関する変換規則 (一部)

(a) 基本表現
$\mathrm{T}(`p(t_1, t_2, ..., t_n)', s) \equiv p(t'_1, t'_2, ..., t'_n, s)$
但し，$t'_i = t_i$: t_i が個体定項 (変項) のとき
$t'_i = f(..., s)$: t_i が関数表現 $f(...)$ のとき

(b) 時間表現
$\mathrm{T}(`FUTsome(A)', s_0) \equiv \exists s_1 \{\leq (s_0, s_1) \ \& \ \mathrm{T}(`A', s_1)\}$

(c) 動作表現
$\mathrm{T}(`OCCUR(act)', s_0) \equiv \exists s_1 \mathrm{T}(`OCCUR(act)', s_0, s_1)$
$\mathrm{T}(`OCCUR(act)', s_0, s_1) \equiv \mathrm{E}(act, s_0, s_1)$

(d) 因果・条件表現
$\mathrm{T}(`COND(A, act, B)', s_0)$
$\equiv \forall s_1 \{\mathrm{T}(`A', s_0) \ \& \ \mathrm{T}(`OCCUR(act)', s_0, s_1) \rightarrow \mathrm{T}(`B', s_1)\}$

3　文間の接続関係とスキーマ

文間の接続関係は，二つのグループに分類することができる[5]．一つは，前文が導入部で後文が本体部であるような前書き的関係 (INTRO)，前文が本体部で後文が補足部であるような補足的関係 (COMPLE)，後文が前文と同じ主題の異なる属性について記述する付加的関係 (ADDITIONAL) である．これらは，テキストの文章論的な階層構造を与える接続関係である．もう一つは，後続する文の前提部になるような前提的関係 (PREMISE)，前文

First-Order Logic Based Contextual Understanding of Expository Texts on Finite State Systems
Hiroaki Inoue, Tadaaki Tani, Noriaki Izumi, Shinobu Takamatsu, Kunio Fukunaga
University of Osaka Prefecture

の論理的帰結になるような推論的関係 (THEREFORE), 場合わけの記述や対比などの関係にある並列的関係 (PARALLEL) である. これらは, 対象システムの動作や状態に関する推論を必要とする接続関係である.

後者の接続関係の理解には2章で述べた手法が適用できるが, 前者の接続関係については従来のフレームのようなテキストの階層関係に関する規則が必要である. そこで, 本手法では, 従来のフレームの概念を表す文の意味タイプを抽象的な型である個体 (項) とみなし, これを次式のスキーマにより与える.

$$\mathcal{S}(K_1\text{-}C_1 : x_1, K_2\text{-}C_2 : x_2, ..., K_m\text{-}C_m : x_m)$$

ここで, $\mathcal{S}$ はスキーマ名を, K_i は格ラベルを示し, C_i は x_i の意味カテゴリを表すラムダ項で, x_i はパラメータである. 文の格構造表現 $\mathcal{A}$ とスキーマ $\mathbf{S}$ との帰属関係を $\mathcal{A} \sim \mathbf{S}$ で表し, 対応する格の意味表現と意味カテゴリの帰属関係により定義する. 次に, スキーマ間の意味的な階層関係を以下のように定式化する.

$$\lambda x_1 ... \lambda x_m \mathrm{S}_0 = \lambda x_1 ... \lambda x_m [\mathrm{S}_1 \& \mathrm{S}_2 \& ... \& \mathrm{S}_n]$$

上式は, スキーマ S_0 がスキーマ $\mathrm{S}_1, \mathrm{S}_2, ..., \mathrm{S}_n$ の連言により定義されることを示す. この階層関係からスキーマ間の関係を以下のように与える.

(a) 親子関係 (*child*)

$$\lambda x_1 ... \lambda x_m \mathrm{S}_0 = \lambda x_1 ... \lambda x_m [\mathrm{S}_1 \& \mathrm{S}_2 \& ... \& \mathrm{S}_n] \equiv \&_{i=1}^{n} child(\mathrm{S}_i, \mathrm{S}_0)$$

(b) 兄弟関係 (*brother*)

$$brother(\mathrm{S}_2, \mathrm{S}_1) \equiv \exists \mathrm{S}_0 [child(\mathrm{S}_1, \mathrm{S}_0) \& child(\mathrm{S}_2, \mathrm{S}_0)]$$

4 文脈理解

本章では, 情報の論理に基づいて, 文の理解過程における状況変化のモデルを一階論理により形式化し, 状況的・動的な文脈理解の機構を与える.

テキストの文系列を $a_1, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n$ とし, 文 a_i の文脈的解釈を

$$\mathrm{Interpret}(\langle \Phi_i, \Psi_i \rangle, s, \mathcal{A}_i, s', \langle \Phi_{i+1}, \Psi_{i+1} \rangle)$$

で表す. ここで, Φ はスキーマ間の階層関係に関する論理式の集合, Ψ は2章で述べた状況記述を表す. また, $\mathcal{A}_i$ は a_i の格構造表現を示す. 上式は, 文脈 $\langle \Phi_i, \Psi_i \rangle$ (a_1 から a_{i-1} までの解釈で得られた論理式の集合) と状態 s において a_i を解釈し, その結果得られる新たな文脈と状態が $\langle \Phi_{i+1}, \Psi_{i+1} \rangle, s'$ であることを示す. Interpret を, 3章で述べた文間の接続関係に対し, 以下のように定義する.

(a) 文 a_i が前提的関係 PREMISE($\mathcal{B}_i$) にある場合:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Interpret}(\langle \Phi_i, \Psi_i \rangle, s, \mathrm{PREMISE}(\mathcal{B}_i), s', \langle \Phi_i, \Psi_{i+1} \rangle) \\ &\quad \equiv \mathrm{transform}(\mathcal{B}_i, B_i) \\ &\quad\quad \& \mathrm{Revise}(\Psi_i, s, B_i, s', \Psi') \\ &\quad\quad \& \Psi_{i+1} = \Psi' \cup \{\mathcal{R}(\Psi_i, s, B_i, s', \Psi')\} \end{aligned}$$

(b) 文 a_i が推論的関係 THEREFORE($\mathcal{B}_i$) にある場合:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Interpret}(\langle \Phi_i, \Psi_i \rangle, s, \mathrm{THEREFORE}(\mathcal{B}_i), s', \langle \Phi_i, \Psi_{i+1} \rangle) \\ &\quad \equiv \mathrm{transform}(\mathcal{B}_i, B_i) \\ &\quad\quad \& \Psi_i \vdash \mathrm{T}(\text{'}B_i\text{'}, s) \\ &\quad\quad \& \mathrm{Revise}(\Psi_i, s, B_i, s', \Psi') \\ &\quad\quad \& \Psi_{i+1} = \Psi' \cup \{\mathcal{T}(\text{'}B_i\text{'}, s, \Psi_i, \Pi), \mathcal{R}(\Psi_i, s, B_i, s', \Psi')\} \end{aligned}$$

(c) 文 a_i が付加的関係 ADDITIONAL($\mathcal{B}_i$) にある場合:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Interpret}(\langle \Phi_i, \Psi_i \rangle, s, \mathrm{ADDITIONAL}(\mathcal{B}_i), s, \langle \Phi_{i+1}, \Psi_i \rangle) \\ &\quad \equiv \Phi_i \ni current(\mathrm{S}_{i-1}) \\ &\quad\quad \& \Phi_i \vdash \exists \mathrm{S}_i \{ brother(\mathrm{S}_i, \mathrm{S}_{i-1}) \& \mathcal{B}_i \sim \mathrm{S}_i \} \\ &\quad\quad \& \Phi_{i+1} = \Phi_i \cup \{current(\mathrm{S}_i), \mathcal{B}_i \sim \mathrm{S}_i\} \\ &\quad\quad\quad - \{current(\mathrm{S}_{i-1})\} \end{aligned}$$

(d) 文 a_i が補足的関係 COMPLE($\mathcal{B}_i$) にある場合:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Interpret}(\langle \Phi_i, \Psi_i \rangle, s, \mathrm{COMPLE}(\mathcal{B}_i), s, \langle \Phi_{i+1}, \Psi_i \rangle) \\ &\quad \equiv \Phi_i \ni current(\mathrm{S}_{i-1}) \\ &\quad\quad \& \Phi_i \vdash \exists \mathrm{S}_i \{ child(\mathrm{S}_i, \mathrm{S}_{i-1}) \& \mathcal{B}_i \sim \mathrm{S}_i \} \\ &\quad\quad \& \Phi_{i+1} = \Phi_i \cup \{current(\mathrm{S}_i), \mathcal{B}_i \sim \mathrm{S}_i\} \\ &\quad\quad\quad - \{current(\mathrm{S}_{i-1})\} \end{aligned}$$

ここで, transform($\mathcal{B}_i, B_i$) は格構造表現 $\mathcal{B}_i$ を論理式 B_i に変換する操作を表し, $current(\mathrm{S}_i)$ は現在の注目しているスキーマを表す. Revise(Ψ, s, B, s', Ψ') は論理式 B による状況記述 Ψ から Ψ' への修正手続きを表し, $\mathcal{T}$('B', s, Ψ, Π) と $\mathcal{R}(\Psi, s, B, s', \Psi')$ はそれぞれ, 証明手続き $\Psi \vdash \mathrm{T}$('B', s) と修正手続き Revise(Ψ, s, B, s', Ψ') からリフレクションにより得られる一階述語表現である [6]. 以上から, テキスト全体の解釈は次のように与えられる.

$$\begin{aligned} &\mathrm{Interpret}(\langle \Phi_1, \Psi_1 \rangle, s_1, [\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2, ..., \mathcal{A}_n], s_{n+1}, \langle \Phi_{n+1}, \Psi_{n+1} \rangle) \\ &\quad \equiv \mathrm{Interpret}(\langle \Phi_1, \Psi_1 \rangle, s_1, \mathcal{A}_1, s_2, \langle \Phi_2, \Psi_2 \rangle) \\ &\quad\quad \& \mathrm{Interpret}(\langle \Phi_2, \Psi_2 \rangle, s_2, [\mathcal{A}_2, ..., \mathcal{A}_n], s_{n+1}, \langle \Phi_{n+1}, \Psi_{n+1} \rangle) \end{aligned}$$

5 むすび

本論文では, 一階論理の枠組みにより, 対象システムに関する推論の構造とテキストの文章論的な階層構造を統合的に解釈する手法を提案した. ここでは, デフォルト推論, リフレクションと信念修正の機構を援用した一階論理の推論法により, 文間の接続関係を状況的・動的に解釈する文脈理解の機構を実現した. これにより, 従来の論理的手法による理解とフレーム論的手法による理解を融合し, 一つの枠組みで行う手法を与えた.

今後の課題として, 本枠組みによる意味的曖昧さの解消の論理的形式化やアブダクションによる推論機構の導入などが挙げられる.

参考文献

[1] Beeson M.J. :"Foundations of Constructive Mathematics", Springer-Verlag,1985

[2] Benthem J.VAN :"Language in Action : Categories, Lambdas and Dynamic Logic", Part-VI Toward a Logic of Information,North-Holland,1991

[3] Devlin K. :"Logic and Information", Cambridge Univ. Press,1991

[4] Turner R. :"A Theory of Properties", Journal of Symbolic Logic,Vol.52,No.2,pp.455-472,1987

[5] 高松忍, 西田富士夫 :"見出し情報を用いたテキスト解析と情報抽出", 情報処理学会論文誌,Vol.29,No.8,pp.760-769,1988

[6] 高松忍, 和泉憲明, 黄瀬浩一, 福永邦雄 :"ハードウェア設計仕様における自然言語記述の一階論理に基づく状況的・動的解釈", 人工知能学会誌,Vol.10,No.5,1995