線形論理による説明の再定式化 — 導入と初期結果 —

2P−7

有馬 淳、沢村 一

株) 富士通研究所 [1]

1 はじめに

「説明」の概念は現在AIのかなり広範な分野で用いられている - EBG、自然言語理解、アブダクション、類推など。しかしながらその一方で、「説明」概念の定式化は、それらが基本としている古典論理の性質からさまざまな制約や不満足な点が生じている。現在、我々はその不都合を回避し、古典論理の読みやすさを残し、AIで調べられてきた「説明」特有の基準を内包する「説明のための論理」を線形論理 [2] の *resource-sensitive* な性質を使って構成する試みを行なっている [1]。

この予稿では簡単にAIで現在一般的に見られる古典論理による「説明」の定義でどのような問題が生じているかを提起し、我々の研究の最初の結果を報告する。

2 「説明」の定義と古典論理の不適切さ

[本論文で使う用語]: 知識を論理式の集合 $\mathcal{K}$ 、(説明)対象を論理式 G で表す時、以下の性質を満たす論理式 $\mathcal{E}$ を知識 $\mathcal{K}$ に対する対象 G の説明因子と呼ぶ。

$\mathcal{K} \models k$、かつ、ある論理式の集合 $\mathcal{H}$ に対し、$\mathcal{E} = k \cup \mathcal{H}$ であり、かつ、$\mathcal{E} \models G$ である。

k は事実、$\mathcal{H}$ は仮説と呼ばれる。また、説明 とは 説明因子による説明対象の証明 ($\mathcal{E} \vdash G$) 過程のある表現と定義する。さらに基準 (*criteria*) と呼ぶ尺度を与えて「良い」説明 (or 説明因子) を選択する。

i) EBG、類推に見る「説明」

$\mathcal{K} \models G$ かつ $\mathcal{K} \models \mathcal{E}$ の場合を扱っている。「説明」とは「証明」であり、「基準」は操作性規範と呼ばれる。

[任意事実による説明の問題]: 操作性規範で制限したとしても任意の事実と目標概念が関係付けられ 、任意の事実 (内容的に全く関係ない任意の事実!) で目標概念を「説明」することが可能になる (任意の事実 $F(\mathcal{K} \models F)$ に対し、$\mathcal{E} = \{F, F \supset G\}$ とできる)。

この問題の要点はむしろ古典論理自身の問題であり、「関連性の違和」 ($\models_C p \supset (q \supset p)$, すなわち "If p is true, then any q implies p." という不可解な命題が定理である) と呼ばれる問題と直接関係する問題である。

ii) アブダクション、自然言語理解研究にみる「説明」

$\mathcal{K} \not\models G$ (従って、$\mathcal{K} \not\models \mathcal{E}$) の場合を扱っている。以下を満足する論理式の集合 (仮説集合) H を扱う。

$\mathcal{K} \models_C \mathcal{H} \supset G$, ここで $\mathcal{K} \cup H$ は無矛盾。

$\mathcal{E} = \{H, (H \supset G)\}$ を説明因子とする。

代表的な基準として次のものが提案されている : a) Occam's Razor: 仮説が少ない説明が良い (H を極小の集合とする) 。b) Coherence[5]: 複数の説明対象を関係づける説明が望ましい。c) Level of specificity: 説明の深さ、言語に関する尺度。領域に依存。

[古典論理の制約の問題]: 提案された基準は一般的であるのに対し、知っていること ($\mathcal{K} \models_C G$) に関する説明を扱わない ($\mathcal{H} = \phi$)。既知の対象に関する説明は関連性の違和に直面するのが主な原因と考えられる。

3 線形論理による「説明」の再定式化

3.1 EL^2 の特徴

EL^2 はAIで扱われてきた説明だけでなく、残された唯一の場合である $\mathcal{K} \models G$ かつ $\mathcal{K} \not\models \mathcal{E}$ の場合の「説明」に関しても統一的に扱うことができる。

i) 関連性の違和の回避

説明では、証明の最終式のみならず過程が重要である。証明に関与しない論理式がどこで現れるかを Gerntzen の LK (古典論理の体系) で調べた。これらの推論図式において、I) 上に現れて下に現れない論理式がでるものは *Cut* のみであり、II) 下に現れる論理式が上にないものは W (左右 *weakening*), 左 $\wedge$ (*and*)、右 $\vee$ (*or*) の3種である。LK の証明において *Cut* の証明は必ずそれなしの証明を構成できるので、I) の論理式は不要のものである。EL^2 ではこのようなケースを排除するため *Cut* を除く。II) の論理式はそれより上の証明で使われないことを意味し、証明にまったく関与しない不要のものである。しかし、and, (or) は説明には欠かせないものであり、weakening もまた説明に関与しない知識が知識にあっても良いと考えるため必要となり、対処は微妙なものになる。EL^2 では、weakening はそれが知識の要素である論理式に限り許される選択的なものである。また、and, (or) に関してはこれらの論理結合子から weakening の性格を取り除いた線形論理の *multiplicative* と呼ばれる結合子 $\otimes$, ($\wp$) と解釈される。

EL^2 では仮説の導入を許すため関連性の違和に関係してもう一つ重要な (なじみのしかし曖昧にされてき

---

[1] Reformulation of Explanation by Linear Logic – Introductory Results –
Jun ARIMA, Hajime SAWAMURA
Fujitsu Laboratories LTD.

た）制限が設けられる。それは、仮説を atom に限ることである。一般の論理式が許されれば任意の論理式どうしの関連づけを許してしまうからである。

ii) **良さの基準の取り込み**

EL^2 の構成は AI 分野で研究されてきた「良い説明」のための基準に関する成果を盛り込む形でなされている。Occam's Razor は部分的に上述の対処により内包される。しかし、EL^2 では説明対象が仮説なしで証明できる場合でも仮説を導入する「説明」を扱うため Occam's Razor を完全には受け入れない。Occam's Razor と独立だが多くの場合一致する基準、Coherence を採用している。Coherence は複数の対象が同じ説明因子により説明される基準として捉えることができる。このため、説明要素に関しては *contraction* が許される。上述の weakening を含め、このような選択的な扱いは線形論理の様相子によって実現される。

この他にも説明に関して言語制約を設ける工夫あるが本稿では説明を割愛する。

iii) **説明の抽出と検証**

EL^2 の扱う式は次のような形を持つ。

$$\Gamma \vdash^{\mathcal{K}}_{EL} \alpha ;\ \mathcal{F}$$

ここで α は説明対象であり、Γ はそれを説明するのに必要だった事実および仮説の集合、すなわち説明因子である。また、$\mathcal{F}$ は α に対する「説明」である。

EL^2 による証明は構成的な証明によってより自然な「説明」を抽出する試みであり、「説明」に対する検証と見ることもできる。EL^2 で扱った「自然な」説明とは、大変荒く言えば一度説明したことは同じ説明では省略することを許す（正確には下記 reduction rule c) に基づく）説明である。このような省略は会話の中ではよく見受けられるものであり、そのような説明も等しく「正しい」説明とする立場をここでは取ることにする。

3.2 説明のための論理: EL^2

$\Gamma, \Sigma, \mathcal{K}$: ホーン文の集合 ($A \Leftarrow A_1 \wedge \cdots \wedge A_n$ $(n \geq 0)$), α: atom の論理積, V: atom の集合, $[A]$: a 仮説 atom, $\mathcal{F}$: 説明林, $\mathcal{T}$: 説明木, $\bar{A}$: 説明 atom s.t.

$$\mathcal{F} = \mathcal{T} \mid \mathcal{T} + \mathcal{F} \quad \mathcal{T} = \bar{A} \mid \bar{A} \circ \mathcal{F} \quad \bar{A} = \hat{A} \mid \tilde{A} \mid \perp,$$

ここで $\hat{A}, \tilde{A}, \perp$ は atom。

---

i) $\mathcal{K}$ のもとでの EL^2: $\vdash^{\mathcal{K}}_{EL}$ (単に $\vdash$ と略す。)

A. Axioms

a) for $A \in \mathcal{K}$, $A \vdash A;\ \hat{A}$ $(A \in V)$,
b) for $A \notin \mathcal{K}$, $[A] \vdash A;\ \tilde{A}$ $(A \in V)$,

where, when $A \notin V$, $\hat{A}$ and $\tilde{A}$ are replaced with $\perp$ in a) and b).

B. Branching

$$\frac{\Gamma, \Sigma_1 \vdash A;\ \mathcal{T} \quad \Gamma, \Sigma_2 \vdash \alpha;\ \mathcal{F}}{\Gamma, \Sigma_1, \Sigma_2 \vdash A \wedge \alpha;\ \mathcal{T} + \mathcal{F}}\ \mathrm{B}$$

Especially, if $\Gamma \neq \phi$, this inference rule is called *Coherent Branching* and expressed by CB.

C. Expanding

For $(A \Leftarrow \alpha) \in \mathcal{K}$, if $A[t/x] \in V$,

$$\frac{\Gamma \vdash \alpha[t/x];\ \mathcal{F}}{\Gamma, (A \Leftarrow \alpha) \vdash A[t/x];\ \widehat{A[t/x]} \circ \mathcal{F}}\ \mathrm{E},$$

otherwise $\widehat{A[t/x]}$ is replaced with $\perp$ in the above rule.

Reduction Rules (to the Shortened Explanatory Forest): $+$ is commutative, while $\circ$ is not.

a) $\perp \circ \mathcal{F} \longrightarrow \mathcal{F}$, $\mathcal{F} \circ \perp \longrightarrow \mathcal{F}$
b) $\mathcal{F} + \perp \longrightarrow \mathcal{F}$, $\perp + \mathcal{F} \longrightarrow \mathcal{F}$
c) $\mathcal{T} + \mathcal{F}[\mathcal{T}] \longrightarrow \mathcal{F}[\mathcal{T}]$, where $\mathcal{F}[\mathcal{T}]$ is a forest where a tree $\mathcal{T}$ appears.

ii) 論理式に対する線形論理への変換 e、及び 説明木（林）に対する変換 ef : 以下において、$¡S = S \otimes !S$、$¿S = S \parr ?S$。

$$\begin{array}{llll}
(A)^e = A,\ (A \wedge \alpha)^e = (A)^e \otimes (\alpha)^e, & (\bar{A})^{ef} = ¿\bar{A}, & (\bar{A})^{ef'} = ?\bar{A}, \\
(A \Leftarrow \alpha)^e = (\alpha)^e \multimap (A)^{ehf}, & (\mathcal{T} + \mathcal{F})^{ef} = (\mathcal{T})^{ef} \parr (\mathcal{F})^{ef}, & (\mathcal{T} + \mathcal{F})^{ef'} = (\mathcal{T})^{ef'} \parr (\mathcal{F})^{ef'}, \\
(A)^{ehf} = A \parr \hat{A},\ ([A])^{ehf} = A \parr \tilde{A}, & (\bar{A} \circ \mathcal{F})^{ef} = ¿\bar{A} \parr (\mathcal{F})^{ef} \parr ?(¿\bar{A} \parr (\mathcal{F})^{ef'}), & (\bar{A} \circ \mathcal{F})^{ef'} = (\mathcal{F})^{ef'} \parr ?\bar{A},
\end{array}$$

[定理]$\mathcal{K}, \Gamma$ を Horn 文の集合、$\mathcal{H}$ を Γ 中の全仮説 atom の集合、α を atom の論理積、$\mathcal{F}$ を説明林とする時、

$$¡(\Gamma)^e \vdash_{\mathcal{L}} (\alpha)^e, (\mathcal{F})^{ef} \text{ and } !(\mathcal{K})^e, ¡(\mathcal{H})^e \vdash_{\mathcal{L}} (\alpha)^e, (\mathcal{F})^{ef},$$

$$\text{if } \ \Gamma \vdash^{\mathcal{K}}_{EL} \alpha;\ \mathcal{F}.$$

参考文献

[1] Arima J. and Sawamura H.: Reformulation of Explanation by Linear Logic, in *Proc. of Workshop on Algorithmic Learning Theory (ALT93)*, (LNCS, Springer-Verlag, Berlin, 1993) (To appear).

[2] Girard,J-Y: Lenear Logic, *Theoretical Computer Science 50*, Noth-Holland, pp. 1-102, (1987).

[3] Kedar-Cabelli,S.: Purpose-directed analogy, in *the 7th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, pp.150-159 (1985).

[4] Mitchell, T., Keller, R. & Kedar-Cabelli,S.: Explanation-Based Generalization: A Unifying View, in *Machine Learning 1*, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp.47-80 (1986).

[5] Ng,H.T. & Mooney,R.J.: On the Role of Coherence in Abductive Explanation, in *Proc. of the 8th National Conference on AI (AAAI-90)*, pp. 337-342 (1990).