3I3-5

不確実な信念を持つエージェントの確率的戦略と BDI モデル

Stochastic strategy of agents with uncertain beliefs and BDI model

新出 尚之[*1] 高田 司郎[*2]
NIDE, Naoyuki Shiro Takata

[*1]奈良女子大学 研究院 自然科学系
Faculty, Division of Human Life and Environmental Sciences, Nara Women's University

[*2]近畿大学 理工学部
Faculty of Science and Engineering, Kinki University

In multiagent environments, it is sometimes the case that each agent has to decide its strategy by making uncertain inferences about beliefs (or other mental states) of other agents. To handle such circumstances by BDI model, it is desirable that we can handle stochastic desires and intentions to describe uncertain strategies. We present a formalization of acts of agents based on such stochastic concepts using an extension of $\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$, a BDI logic that we proposed.

1. はじめに

自律エージェントが目的達成に向けて振る舞うには、目的を達成するための手段を選択し、その選んだ手段に沿って行為することが求められる。BDI モデルでは基本的に、目的達成の手段を 1 つ選んで特定し、これを「意図」として形成することによって、その手段での目的達成に専念することになる。また、BDI モデルの利点の 1 つとして、論理体系 BDI logic を用いた形式的な記述や推論が可能であることが挙げられる。

しかし、現実の応用では、環境などに関する情報が不確実であること、また、特にマルチエージェント環境では他のエージェントの信念や目標などの心的状態が必ずしも判明しないことなどから、目的を達成する手段を 1 つに特定することが難しい状況も考えられる。

そのような例として、コミュニケーションゲームの 1 つである「人狼」が挙げられる。人狼は以下のような設定のゲームである: 人間の中に人間と見分けのつかない人喰い人狼が紛れ込んでおり、毎夜人を 1 人ずつ襲う。人間側は人狼に対抗すべく、誰が人狼か推理しながら毎日 1 人を処刑していく——。

このゲームでは、各プレーヤの投票によって誰を処刑するかが決定される。人間側プレーヤの最終目的は人狼を全て処刑してゲームに勝利することであるが、人狼が誰であるかの信念は、他プレーヤとのコミュニケーション (話し合い) により、不確定あるいは確率的な形で決めていくことになり、したがって、目的達成の手段としての投票先の決定も (最終的には 1 つに決断するとしても)、ゲーム進行中の大半の時間にわたり、単一には行えないのが通常である。こうしたことは、目標から意図を 1 つに決定して実行することを基本とする従来の BDI モデルでは扱いにくい。一方、マルチエージェント環境で、入れ子の心的状態 (他のプレーヤの信念や意図などに関するプレーヤの信念など) を扱う必要があるという点については、BDI モデルの利点を生かせる課題とも考えられる。

こうした応用の存在を考えると、確率的な目標や意図を扱えるような BDI モデルの拡張と、それを形式的に記述できる BDI logic の拡張が望まれる。

既に大澤ら [大澤 14] によって、著者らが提案した BDI logic である $\mathfrak{TOMATO}$[新出 11b] に対し、BDI モデルで用いられる信念·目標·意図の 3 種の心的状態を確率的に表すオペレータを導入して拡張した体系を用いて、人狼を記述する試みが行われている。また彼らは、実際に行われたある人狼のプレーで、人狼が人間側の役職の 1 つである狩人の正体を見抜いた過程を、この体系を用いて導く事例を示している。

しかし、この事例ではせっかく導入した確率つきオペレータが使われていない。例えば「占い師 x が y を占って人間と宣言した場合、x は人間だとプレーヤは信じる」という規則は (占い師が嘘をつく可能性を考えると) 不確実なものだが、この事例では確率つきオペレータで表現されていない。さらに、この体系について意味論も推論規則も示されていないため、どのような推論が可能であるか正確に議論することができていない。

そこで我々は、信念を確率的に扱う BDI モデルの論理体系としてすでに我々が提案した $\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$[新出 15] に対し、目標と意図を確率的に扱えるよう拡張した論理体系を提案する。心的状態の確率的扱いを導入するという点では、大澤らの提案と同等の能力を持つが、正確な意味論 (紙面の都合で記述を簡略化するが) を提示し、また、論理体系の構築のアイデアについても述べる。さらに、簡単な事例にとどまるが、実際の人狼のプレイにおける、確率的な信念の形成とそれに伴う意図決定の過程の記述例を示し、一部についてはそれらを演繹により導く例も示す。

2. 拡張 $\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$

本節では、$\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$ を拡張した論理体系の導入を行う。

本論文では簡単のため、BDI モデルによる自律エージェントに必要な性質とされる、心的状態の整合性 [Rao 97] のうち、realism (と、それから導かれる非対称性テーゼなどの性質。例えば「達成可能だと信じていないことを達成しようと意図することはない」など) については考慮せず、内省 (心的状態に関する完全な信念を持つ) のみ考慮する。

2.1 構文

構文は、$\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$ のものに対し、DESIRE および INTEND オペレータも確率パラメータをとることができるようにしたのみの違いである。ただし本論文では簡単のため、確率パラメータは定数に限るものとする。

以下、単に「論理式」と言えば本論文で導入する拡張 $\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$ の論理式を指す。また、x, y などは一階述語論理の通常の変数記号として用い、$\mathfrak{X}, \mathfrak{Y}$ などは論理式を表す変数記号として用いる。後者は以降「論理式変数記号」と呼び、主に不動点オペレータ使用時の変数記号として用いる。

一階言語 $\mathcal{L}$、論理式変数記号の集合 $\mathcal{V}$、エージェント定数記

連絡先: 新出尚之, 奈良女子大学 研究院 生活環境科学系, 奈良市北魚屋西町, 0742(20)3555, nide@ics.nara-wu.ac.jp

号およびイベント定数記号の有限集合 $\mathcal{A}, \mathcal{E}$ を選んで固定しておく。論理式を以下のように定義する。

- $\mathcal{L}$ 上の (一階述語論理の) 原始論理式は論理式
- ϕ, ψ が論理式ならば $\phi \vee \psi, \neg\phi$ も論理式
- ϕ が論理式、x が ($\mathcal{L}$ の) 変数記号ならば $\forall x\phi$ も論理式
- $\mathfrak{X} \in \mathcal{V}$ ならば $\mathfrak{X}$ は論理式
- $e \in \mathcal{E}$ ならば $\mathsf{pos}(e)$ は論理式
- $\mathfrak{O}$ が X^e (ただし $e \in \mathcal{E}$), BEL^a, DESIRE^a, INTEND^a (ただし $a \in \mathcal{A}$) のいずれかのオペレータであり、かつ n が正整数、各 $i = 1, 2, \cdots, n$ に関して ϕ_i が論理式、$p_i \in [0, 1]$、$r_i \in \{\geqq, >\}$ ならば $\mathfrak{O}({}_{r_1 p_1}\phi_1 \mid \cdots \mid {}_{r_n p_n}\phi_n)$ も論理式。特に $n = 1$ の場合、最外の括弧を省いて書く。本項の p_i を「確率パラメータ」と呼ぶ
- ϕ が論理式、$\mathfrak{X} \in \mathcal{V}$ で、$\mathfrak{X}$ が ϕ の中で negative に出現しないならば $\mu\mathfrak{X}.\phi$ は論理式

以上の定義中、「$\mathfrak{X}$ が ϕ の中で negative に出現する」とは、論理式 ϕ の木構造の根から当該の $\mathfrak{X}$ の出現までの経路上に $\neg$ が奇数個あることをいう。μ は最小不動点オペレータである。

この他、$\wedge, \supset, \Leftrightarrow, \exists$ などを一般的な略記として導入し、オペレータ間に一般的な優先順位 (例えば $\wedge$ が $\vee$ より先に結合する、$\supset$ は右結合である、単項オペレータは優先順位最高、括弧で結合順序を変更できるなど) を導入する。

例えば $\mathsf{BEL}^a({}_{\geqq 0.3}\,\phi_1 \mid {}_{\geqq 0.5}\,\phi_2)$ は論理式である。この式は大まかには「エージェント a は ϕ_1 を 0.3 以上の確度で信じ、さらにそれとは別な可能性として ϕ_2 を 0.5 以上の確度で信じる」を表す。DESIRE^a (目標), INTEND^a (意図) についても同様の解釈を行う。また、X^e は時刻経過 (状態遷移) に関するオペレータであり、これの解釈も BEL^a と同様である。直感的には、$\mathsf{X}^e({}_{\geqq p_1}\,\phi_1 \mid {}_{\geqq p_2}\,\phi_2)$ は「イベント e を実行して次の時刻へ遷移すると、確率 p_1 以上で ϕ_1 が、それと別の可能性として確率 p_2 以上で ϕ_2 が成り立つ」を表す。この他、直感的には $\mathsf{pos}(e)$ は「イベント e が実行可能」を表す。

$\mathsf{BEL}^a_{<p}\,\phi$, $\mathsf{BEL}^a_{=p}\,\phi$ などは、$\mathsf{BEL}^a_{\geqq 1-p}\,\neg\phi$ や $\mathsf{BEL}^a_{\geqq p}\,\phi \wedge \neg\,\mathsf{BEL}^a_{>p}\,\phi$ の略記として扱う (X^e などについても同様)。

また、$\mathsf{BEL}^a_{\geqq 1}\,\phi$ を $\mathsf{BEL}^a\,\phi$ と略記すると、これはエージェント a の (確率を伴わない通常の) 信念を表す。さらに、$\mathsf{X}^e_{\geqq 1}\,\phi$ を $\mathsf{AX}^e\,\phi$ と、$\bigwedge_{e\in\mathcal{E}}(\mathsf{pos}(e) \supset \mathsf{AX}^e\,\phi)$ を $\mathsf{AX}\,\phi$ とそれぞれ略記すると、$\mathsf{AX}\,\phi$ は「現在可能なイベントによって遷移した次の時刻には必ず ϕ が成り立つ」を表し、CTL の AX に相当することを表現できる。AX と不動点オペレータ μ があることから、時相論理としては CTL*と同等以上の表現力を持つ。以後、CTL のオペレータは略記として導入済みとする。

2.2 意味論

2.2.1 BDI ストラクチャ

以下のものを定めておく。

- 可能世界の集合 $W (\neq \emptyset)$
- 領域集合 U
- W の各要素 w に対し、state の集合 $St_w (\neq \emptyset)$
- W の各要素 w と St_w の各要素 t に対し、$\mathcal{L}$ の項 τ ないしは原始論理式 ϕ を与えてその解釈を返す関数 $i_{w,t}$。これは通常の一階述語論理と同様に定める。ただし、項の解釈は w, t に関わらず一定とする
- W の各要素 w と St_w の各要素 $t \in St_w$ に対し、$\mathcal{E}$ の空でない部分集合 $pos_{w,t}$
- W の各要素 w と $\mathcal{E}$ の各要素 e に対し、$St_w{}^2$ から $[0, 1]$ への関数 R^e_w。ただし、任意の $t \in St_w$ に対し $\sum_{t' \in St_w} R^e_w(t, t') = 1$ であること
- $\mathcal{A}$ の各要素 a と $\bigcup_{w\in W} St_w$ の各要素 t に対し、(以後、集合 $\{w \mid t \in St_w\}$ を W_t と書く) $W_t{}^2$ から $[0, 1]$ への関数 $\mathcal{B}^t_a, \mathcal{D}^t_a, \mathcal{I}^t_a$ であって、以下を満たすもの
  - ⋆ 任意の $w \in W_t$ に対し $\sum_{w' \in W_t} \mathcal{B}^t_a(w, w') = 1$。$\mathcal{D}^t_a, \mathcal{I}^t_a$ についても同様
  - ⋆ $\mathcal{B}^t_a(w, w') > 0$ を満たす任意の $w, w' \in W_t$ と任意の $w'' \in W_t$ に対し、$\mathcal{B}^t_a(w, w'') = \mathcal{B}^t_a(w', w'')$, $\mathcal{D}^t_a(w, w'') = \mathcal{D}^t_a(w', w'')$, $\mathcal{I}^t_a(w, w'') = \mathcal{I}^t_a(w', w'')$

以上を組にしたものを、ここでは BDI ストラクチャと呼ぶ。大まかには、state は時相論理の「点時刻」で、1 つの可能世界は $\{(t, t') \mid$ ある $e \in pos_{w,t}$ に対し $R^e_w(t, t') > 0\}$ をエッジとする時刻の木であり、エッジは時刻の前後関係を表す。$pos_{w,t}$ は state t で実行可能なイベントの集合を表し、$R^e_w(t, t') = p$ は state t でイベント e を実行すると確率 p で次の時刻は state t' になることを表す。$\mathcal{B}^t_a$ は時刻 t におけるエージェント a の確度つき信念を与えるための、可能世界間の確度つき可視関係にあたるもので、$\mathcal{D}^t_a, \mathcal{I}^t_a$ は目標、意図に関する同様のものである。$\mathcal{B}^t_a(w, w') > 0$ であることは、通常の Kripke 意味論での「w' が w から関係 $\mathcal{B}^t_a$ で到達可能」にほぼ相当する。

2.2.2 論理式の解釈

以後、$\{(w, t) \mid w \in W, t \in St_w\}$ を Swt と書く。

BDI ストラクチャM、および $\mathcal{V}$ から 2^{Swt} への関数 $f_\mathcal{V}$ を 1 つ定めておく。論理式 ϕ に対し、その解釈 $[\![\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle}$ を以下のように定める ($[\![\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} \subseteqq Swt$ である)。$[\![\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} \ni (w, t)$ のとき、世界 w の state t で ϕ が成り立つという。

- ϕ が原始論理式なら $[\![\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = \{(w, t) \mid i_{w,t}(\phi)$ が真$\}$
- $[\![\phi \vee \psi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = [\![\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} \cup [\![\psi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle}$
- $[\![\neg\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = Swt \setminus [\![\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle}$
- $[\![\forall x\phi]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = \bigcap_{u\in U} [\![\phi]\!]_{\langle M[x:=u], f_\mathcal{V}\rangle}$ ただし $M[x := u]$ は M での x の解釈を u に変更して得られる BDI ストラクチャ
- $[\![\mathsf{pos}(e)]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = \{(w, t) \mid pos_{w,t} \ni e\}$
- $[\![\mathsf{X}^e({}_{r_1 p_1}\,\phi_1 \mid \cdots \mid {}_{r_n p_n}\,\phi_n)]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = \{(w, t) \mid$ 各 $i = 1, \cdots, n$ について以下を満たす互いに素な集合 $T_1, \cdots, T_n$ が存在する$\}$
  - ⋆ $T_i \subseteqq \{t' \mid (w, t') \in [\![\phi_i]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle}\}$
  - ⋆ $(\sum_{t' \in T_i} R^e_w(t, t'))\ r_i\ p_i$ (r_i は $>, \geqq$ のいずれかであることに注意)
- $[\![\mathsf{BEL}^a({}_{r_1 p_1}\,\phi_1 \mid \cdots \mid {}_{r_n p_n}\,\phi_n)]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = \{(w, t) \mid$ 各 $i = 1, \cdots, n$ について以下を満たす互いに素な集合 $W_1, \cdots, W_n$ が存在する$\}$
  - ⋆ $W_i \subseteqq \{w' \mid (w', t) \in [\![\phi_i]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle}\}$
  - ⋆ $(\sum_{w' \in W_i} \mathcal{B}^t_a(w, w'))\ r_i\ p_i$
- DESIRE^a, INTEND^a については同様
- $\mathfrak{X} \in \mathcal{V}$ のとき、$[\![\mathfrak{X}]\!]_{\langle M, f_\mathcal{V}\rangle} = f_\mathcal{V}(\mathfrak{X})$

また、以上の定義からは、論理式変数記号 $\mathfrak{X}$ の自由な出現を持つ (持たなくても) 論理式 ϕ を、$\mathfrak{X}$ の解釈を受け取って ϕ の解釈を返す関数 $f_\phi : 2^{Swt} \to 2^{Swt}$ と捉え直せる。そこで、

- $[\![\mu\mathfrak{X}.\phi]\!]_{\langle M,f_{\mathcal{V}}\rangle}$ は、f_ϕ の最小不動点である

と定義する。この場合、定義から f_ϕ は単調関数となるので、最小不動点の存在は保証される。以上で論理式の解釈の定義を終わる。$\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$ と比べ、DESIRE や INTEND の扱いが確率を考慮したものとなっている。また、realism を考慮しないため BDI ストラクチャに subworld の概念がない点と、確率パラメータを定数としている点も異なる。

2.3 演繹体系について

ここでは、本論文で提案する拡張 $\mathcal{B}$-$\mathfrak{TOMATOes}$ のシーケント計算による演繹体系について述べる。紙面の都合上、ここでは $\mathfrak{TOMATOes}$ のシーケント計算による演繹体系 [新出 11a] からの差分のみ述べる。

まず、$\mathfrak{TOMATOes}$ で X^e オペレータに対して導入している「本質的な要充足集合」と同じ概念を、BEL^a, DESIRE^a および INTEND^a にも導入する。論理式の集合 Ω が充足可能であることと、Ω の本質的な要充足集合が存在することとは同値である。

また、$\mathfrak{TOMATOes}$ の $\mathsf{X}_{\mathrm{excl}}$, $\mathsf{X}_{\geqq}$右, $\mathsf{X}_{>}$右 と、X^e を BEL^a に変更する以外は全く同じ形の規則を導入する (規則の名前は「$\mathsf{BEL}_{\mathrm{excl}}$」などとする)。$\mathsf{DESIRE}^a$, INTEND^a に変更したものも同様に導入する。これにより、トップレベルに心的状態オペレータを持つ論理式は (規則の逆向き適用で) 全てシーケントの $\rightarrow$ の左に移すことができる。

次に、今回は realism を考慮しないため、推論規則の結論の BEL を外す規則において、DESIRE や INTEND も外すことを考慮しなくてよい。従って、規則 BEL-KD45-DI は以下のものに変更する。ただし、Ω は $\mathsf{BEL}^a_{>p}\,\phi$ あるいは $\mathsf{BEL}^a_{\geqq p}\,\phi$ の形の論理式の multi set で、その本質的な要充足集合全ての列挙が $Z_1,\cdots,Z_k$ とし、$Q_i \in Z_i$ $(1 \leqq i \leqq k)$ とする。また、Σ はトップレベルのオペレータが DESIRE^a か INTEND^a である論理式の multi set とする。規則の前提に Ω, Σ が残るのは、内省公理を証明可能にするためである。

$$\frac{\Omega, Q_1, \Sigma \rightarrow \quad \cdots \quad \Omega, Q_k, \Sigma \rightarrow}{\Omega, \Sigma \rightarrow}\ \text{BEL-KD45-DI}$$

また、DESIRE を外す規則においても同じ理由で、INTEND を外すことを考慮しなくてよい、その代わり DESIRE に確率オペレータが付くため、規則 DESIRE-KD-DI は以下のものに変更する: $\dfrac{Q_1 \rightarrow \quad \cdots \quad Q_k \rightarrow}{\Omega \rightarrow}$ DESIRE-KD (名称も変更)。ここで Ω は $\mathsf{DESIRE}^a_{>p}\,\phi$ あるいは $\mathsf{DESIRE}^a_{\geqq p}\,\phi$ の形の論理式の multi set で、その本質的な要充足集合全ての列挙が $Z_1,\cdots,Z_k$ とし、$Q_i \in Z_i$ $(1 \leqq i \leqq k)$ とする。

さらに規則 INTEND-KD も、DESIRE-KD と同じ形で Ω のトップレベルオペレータのみ INTEND^a に置き換えたものに変更する。推論規則の変更は以上である。$\mathfrak{TOMATOes}$ の演繹体系が健全であること、置き換えた規則がシーケントの恒真性を保つことから、本体系の健全性は容易であろう。

3. 事例

ここでは、実際の人狼プレーの事例として、[人狼 16] に描かれているストーリーを対象とし、単純ながらその終盤の過程の一部をトレースする例を示す。このストーリーは人工知能同士の対戦を文章化したもので、人狼知能プロジェクトによって、「人工知能が執筆に関わった創作小説」として第 3 回日経新聞社「星新一賞」に応募されたものである。ただし、人狼の用語は他の語に置き換えられている (「人狼」→「AI」、「占い師」→「アナリスト」など)。ここでは人狼の用語に戻して説明する。なお以下、同小説のネタバレを含む。

3.1 状況設定

終盤、以下の 5 人が生存している。プレーヤ 1 (霊能者)、プレーヤ 2 (占い師宣言をしているが実際は狂人)、プレーヤ 4 (村人)、プレーヤ 6 (人狼)、プレーヤ 9 (村人)。これまでの経過からプレーヤは人狼が 1 匹のみ残っているという信念を得ている。正確にはこの信念も不確実なものだが、ここでは簡単のため、これは確実な信念として得られているとする。

この日、プレーヤ 2 はプレーヤ 4 を占って人狼だったと宣言する。しかし、既に処刑され退場している、占い師宣言していた人物 (プレーヤ 5、実際に占い師) が過去にプレーヤ 4 を人間と宣言していた。

このとき、村はプレーヤ 2 を占い師として信じ、プレーヤ 4 を処刑するか、プレーヤ 2 を占い師の騙りと疑って処刑するかの選択となった。この状況は以下のように表現できる。AX オペレータは翌日を表し、$executed$ は「前日に処刑された」を表す。式 (3) は、プレーヤ 2 が狂人ならば (この場合人狼はそのことを知っている可能性が高いため) 処刑しないと翌日に人狼と結託して人間側が負ける可能性が高いことを表す。確率 0.8 は実際に 0.8 であるとは限らないが、何らかの高めの値がここに入っているものと考える。

$$\begin{aligned}&\mathsf{BEL}^a(seer(player2) \supset \\ &\quad \mathsf{AX}(executed(player4) \supset village\_win)) \qquad (1)\\ &\mathsf{BEL}^a(wolf(player2) \supset \\ &\quad \mathsf{AX}(executed(player2) \supset village\_win)) \qquad (2)\\ &\mathsf{BEL}^a_{\geqq 0.8}(possessed(player2) \supset \\ &\quad \mathsf{AX}(\neg executed(player2) \supset village\_lose)) \qquad (3)\end{aligned}$$

3.2 確率つき心的状態オペレータを用いた推論

ここでプレーヤ 6 が「プレーヤ 2 が人狼であるなら、狂人が人狼をサポートする何らかの活動をしないとは考えづらいが、その様子が見られない」と発言した。その発言を決め手とし、プレーヤ 4 を処刑するという投票をしたプレーヤが多かったため、プレーヤ 4 が処刑されている。ここでは、「プレーヤ x が何らかの人狼サポートの活動をした」を $support(x)$ で表す。すると、「狂人のサポート活動が見られなかったことから、おそらくプレーヤ 2 は人狼でない」はこのように表現できる。

$$\begin{aligned}&\mathsf{BEL}^a_{\geqq .9}(wolf(player2) \supset \exists x\, support(x)) \wedge \\ &\mathsf{BEL}^a\, \neg\exists x\, support(x) \\ &\quad \supset \mathsf{BEL}^a_{\geqq .9}\, \neg wolf(player2) \qquad (4)\end{aligned}$$

この式は図 1 のように証明できる。ただし見やすさのため、一部の部分論理式を p や q などに置き換えているほか、いくつかの規則の適用をまとめて表示する (特に古典論理の推論規則の適用を一括して「classic」と表示) など簡略化を行っている (以後の証明でも同様)。BEL-KD45-DI の適用は、$\{\mathsf{BEL}^a_{\geqq .9}(p \supset q), \mathsf{BEL}^a_{\geqq 1}\, \neg q, \mathsf{BEL}^a_{>.1}\, \neg\neg p\}$ の本質的な要充足集合が $\{\{p \supset q, \neg q, \neg\neg p\}\}$ のみであることによる。

このプレーでは、前日までに占い師宣言していたプレーヤ 2 と 5 のどちらかが人狼の可能性が高いと目されていた流れから、この段階でもプレーヤ 2 は占い師か人狼のどちらかの可能性が高いという信念が、多くのプレーヤに生まれていたと考えられる。そのもとでは、上の結果と合わせるとプレーヤ 2 は占い師の可能性が高いという結果が得られる。この過程は以下の式で表現でき、図 2 のように証明できる。

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{p \to p \quad q \to q}{p \supset q, \neg q, \neg\neg p \to}\ \text{classic}}{\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}(p \supset q), \mathsf{BEL}^{a}\,\neg q, \mathsf{BEL}^{a}_{>.1}\,\neg\neg p \to}\ \text{BEL-KD45-DI} + \text{Weak}}{\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}(p \supset q), \mathsf{BEL}^{a}\,\neg q \to \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}\,\neg p}\ \mathsf{BEL}_{\geqq}\text{右}}{\to \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}(p \supset q) \wedge \mathsf{BEL}^{a}\,\neg q \supset \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}\,\neg p}\ \text{classic}$$

図 1: 式 (4) の証明

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{p \to p \quad q \to q}{p \vee q, \neg p, \neg q \to}\ \text{classic}}{\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .8}(p \vee q), \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}\,\neg p, \mathsf{BEL}^{a}_{>.3}\,\neg q \to}\ \text{BEL-KD45-DI} + \text{Weak}}{\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .8}(p \vee q), \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}\,\neg p \to \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .7}\,q}\ \mathsf{BEL}_{\geqq}\text{右}}{\to \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .8}(p \vee q) \wedge \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}\,\neg p \supset \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .7}\,q}\ \text{classic}$$

図 2: 式 (5) の証明

$$\begin{aligned}&\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .8}(\mathit{wolf}(\mathit{player2}) \vee \mathit{seer}(\mathit{player2})) \wedge \\ &\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .9}\,\neg \mathit{wolf}(\mathit{player2}) \\ &\quad \supset \mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .7}\,\mathit{seer}(\mathit{player2})\end{aligned} \tag{5}$$

また、人間側プレーヤの投票行動の一環を以下のように表現できる (誰を処刑するかが直ちに翌日の勝敗に結びつくと信じる場合、それに従って投票)。$\mathsf{pos\_only}(e)$ は $\mathsf{pos}(e) \wedge \bigwedge_{e' \neq e} \neg \mathsf{pos}(e')$ の略記で、「行動として e をとる」を表す。この場合、$\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .7}\,\mathit{seer}(\mathit{player2})$ と式 (1)、式 (6) が成り立つならば $\mathsf{INTEND}^{a}_{\geqq .7}\,\mathsf{pos\_only}(\mathit{vote\_for\_player4})$ が出ることも同様に (長くなるが) 証明できる。また、同時に $\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .2}\,\mathit{wolf}(\mathit{player2})$ も成り立つならば、$\mathsf{INTEND}^{a}_{\geqq .2}\,\mathsf{pos\_only}(\mathit{vote\_for\_player2})$ も出ることになり、このように、信念が確実に得られない場合は意図も単一に決めがたいという状況を表現できる。

$$\begin{aligned}&\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq p}\,\mathsf{AX}(\mathit{executed}(\mathit{playerN}) \supset \mathit{village\_win}) \supset \\ &\quad \mathsf{INTEND}^{a}_{\geqq p}\,\mathsf{pos\_only}(\mathit{vote\_for\_playerN})\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}&\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq p}\,\mathsf{AX}(\neg \mathit{executed}(\mathit{playerN}) \supset \mathit{village\_lose}) \supset \\ &\quad \mathsf{INTEND}^{a}_{\leqq p}\,\mathsf{pos\_only}(\mathit{vote\_for\_playerN})\end{aligned} \tag{7}$$

このプレーでは、実際はプレーヤ 2 は狂人だったため、式 (3) の経過で人間側が負けとなっている。もしあるプレーヤが、プレーヤ 2 が狂人の可能性を重視し、信念として $\mathsf{BEL}^{a}_{<.5}(\mathit{wolf}(\mathit{player2}) \vee \mathit{seer}(\mathit{player2}))$ のようなものを持っていたならば、図 2 と同様の過程を経て結果は占い師の可能性が低くなり、そのプレーヤは異なる投票の選択をしたかも知れない。

3.3 入れ子の心的状態オペレータ

例えば先述の「プレーヤ 2 が狂人の場合、人狼はそのことを知りうる」(というエージェントの信念) は、心的状態オペレータの入れ子を用いた式 (8) で表現できる。ここで $\phi \equiv \forall x(\mathit{wolf}(x) \supset \mathsf{BEL}^{x}\,\mathit{possessed}(\mathit{player2}))$ とする。これに加え「次の日に ϕ が成り立っていれば、プレーヤ 2 が処刑されていない限り人間側が負ける」という認識を式 (9) で表現すると、これと式 (8) から式 (3) が出ることを証明できる。紙面の都合で証明は省く。

$$\mathsf{BEL}^{a}_{\geqq .8}(\mathit{possessed}(\mathit{player2}) \supset \mathsf{AG}\,\phi) \tag{8}$$

$$\mathsf{BEL}^{a}\,\mathsf{AX}(\phi \wedge \neg \mathit{executed}(\mathit{player2}) \supset \mathit{village\_lose}) \tag{9}$$

また、他者の心的状態に関する目標や意図を扱うことも可能である。いま、人狼側が実際にこの段階でプレーヤ 2 が狂人であることを知っているならば、戦略としては、プレーヤ 2 に投票させないことで勝ちに持っていくことができる。前述の状況下では、そのためにはプレーヤ 2 が人狼でないことを主張するのが有効である。実際のプレーでのプレーヤ 6 の行動はそのためと考えられる。このことは以下の式で表現できる。

$$\mathsf{DESIRE}^{\mathit{player6}}\,\forall x(\mathit{human}(x) \supset \mathsf{BEL}^{x}\,\neg \mathit{wolf}(\mathit{player2})) \tag{10}$$

4. 考察

本論文では、「推論」に関しては、演繹規則の適用が可能であることを示したに止まる。一般には、演繹の存在は、ゴール (ここでいう「ゴール」は「目標」ではなく「導くべき論理式」を指す) を効率よく導くアルゴリズムの存在には必ずしも直結しない。例えば今回の事例のようなことを実用的に行う人狼エンジンの実現を目指すならば、導くべき候補のゴールの生成や、そのゴールの導出を、現実的な時間で行うアルゴリズムが必要となる。それには、必ずしも完全性を要求するのではなく、可能性の少ないゴールを導出対象から外すなどの能力も必要だろう。

人工知能による人狼エンジンとしては、既に統計的学習を使ったものが現れており、強いものも出現している。しかし、人狼の醍醐味は、勝敗よりも論理的な思考過程を楽しむことにあるという考え方もあろう。そのような立場からは、論理による人狼エンジンが十分な強さで実現すれば、その思考や行為決定の過程を後で出力することで、ゲーム後のエピソードを楽しむことができるという利点が得られることも期待できる。

5. おわりに

我々が提案した、確率的な信念を扱える拡張 BDI logic である $\mathcal{B}$-$\mathcal{TOMATOes}$ を、さらに拡張して目標と意図の確率的記述も可能とした体系を提案し、確率的な意思決定過程の記述や、演繹体系による演繹の事例を示した。今後は上に述べたように、候補ゴールの生成やその導出などを行うアルゴリズムの実現が課題となる。また、今回は省いた realism などの性質を改めて考慮することも課題である。

参考文献

[Rao 97] Rao, A. S. and Georgeff, M. P.: Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture, in Huhns, M. N. and Singh, M. P. eds., *Readings in Agents*, pp. 317–328, Morgan Kaufmann, San Francisco (1997)

[新出 11a] 新出 尚之, 高田 司郎, 藤田 恵：拡張 BDI 論理 $\mathcal{TOMATOes}$ による協調行為のモデル化と応用, 人工知能学会論文誌, Vol. 26, No. 1, pp. 13–24 (2011)

[新出 11b] 新出 尚之, 高田 司郎, 藤田 恵：拡張 BDI 論理 $\mathcal{TOMATO}$ を用いた確率的状態遷移のモデル化とその応用, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol. 4, No. 3, pp. 59–72 (2011)

[新出 15] 新出 尚之, 高田 司郎：信念と状態遷移を確率的に扱う合理的エージェント向け論理, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J98-D, No. 6, pp. 936–947 (2015)

[人狼 16] 人狼知能プロジェクト：汝は AI なりや? TYPE-S, `http://aiwolf.org/control-panel/wp-content/uploads/2016/03/YASAI20150930_Short.pdf` (2016)

[大澤 14] 大澤 博隆, 鳥海 不二夫, 稲葉 通将, 片上 大輔, 梶原 健吾, 篠田孝祐：人狼知能達成におけるエージェントの推論モデル, in *Proc. of 19th Game Programming Workshop*, pp. 157–161 (2014)