

# BDI エージェントの多様な行為決定のモデル化について

Modeling various action decision processes of BDI agents

新出尚之

NIDE, Naoyuki

奈良女子大学理学部

Faculty of Science, Nara Women's University

On the BDI model, we can model deliberations and action decisions of agents using a temporal logic named BDI logic as processes of narrowing down the time branches. We aim at modeling combinational works of BDI agents and other decision-making methods such as machine learning and automated planning using an extended BDI logic named  $\mathcal{TCMASITOCes}$ .

## 1. はじめに

BDI (Belief-Desire-Intention) エージェントとは、行動方針を定めるための「意図」を保持することによって、目標達成への一貫性を持つ行動をとることができる、自律エージェントの一形態である。

BDI エージェントの実現基盤は、BDI アーキテクチャ [Singh 99] と呼ばれる。これは、信念・目標 (願望)・意図の 3 つの心的状態を持ち、外部または内部からのイベントにより自身の目標を発生させ、目標と現在の信念に依存して、その目標を達成する手段 (プラン) を、プランライブラリから熟考によって選ぶ。そして、そのプランを実行する意図を形成し、その意図を保持しつつ行動することで、目標達成を目指す。

こうした BDI エージェントの動作は、上述の 3 つの心的状態やその時間的変化を表現できる時相論理体系、BDI logic [Rao 91, Rao 97] を用いて形式化できる (BDI モデル)。BDI logic は、時相論理体系 CTL\* を述語論理に拡張したうえ、3 つの心的状態を陽に表す様相オペレータを加えたものである。BDI logic では、行為の決定過程は、信念として持つ時間分岐の中から、願望する時間分岐、さらに意図する時間分岐を特定していくことで表現できる (2. 節の図 1 にて例示)。

しかし、柔軟な行為決定のためには、プランをプランライブラリとしてあらかじめ全て与えておくのでは限界がある。そこで、強化学習との結合 [高田 09] や、プランナとの結合 [藤田 09, Meneguzzi 07, Silva 07] など、外部の行為決定能力を導入する手法が提案されている。

ここで、BDI logic による形式化を持つという BDI エージェントの利点を保つには、新たに外部から導入した行為決定機構を、BDI logic による表現内に取り込める必要がある。

我々は、BDI logic に確率的状態遷移とイベント選択記述を追加して拡張した論理体系  $\mathcal{TCMASITOCes}$  [新出 09] を提案し、これによって上述のような多様な行為決定機構を BDI モデルに取り込むことを目指している。強化学習との結合のモデル化については [高田 09] で取り上げたためここでは割愛し、本論文では階層プランニングとの結合について、その基本的な考え方を  $\mathcal{TCMASITOCes}$  によるモデルで記述することを試みる。

## 2. $\mathcal{TCMASITOCes}$

本節では  $\mathcal{TCMASITOCes}$  の簡単な導入を行う。

連絡先: 新出尚之, 奈良女子大学理学部, 奈良市北魚屋西町, 0742(20)3555, nide@ics.nara-wu.ac.jp

$\mathcal{TCMASITOCes}$  は  $\vee$  (または),  $\wedge$  (かつ),  $\supset$  (ならば),  $\forall$  など古典オペレータを持つ他、「エージェント  $a$  が  $\phi$  を信じる/願望する/意図する」を各々  $BEL^a \phi$ ,  $DESIRE^a \phi$ ,  $INTEND^a \phi$  と書く。また、 $\mathcal{TCMASITOCes}$  は離散分岐時相論理で、1 つの時刻遷移 (状態遷移) には 1 つのイベント、およびそのイベントが実行された場合にその遷移をたどる確率が対応づけられており、「イベント  $e$  を実行すると 1 時刻後に  $p$  以上の確率で  $\phi$  が成り立つ」を  $X_{\geq p}^e \phi$  と書く ( $p = 1$  の場合  $X^e \phi$  と略記)。さらに、「イベント  $e$  が現時刻で実行可能である」を  $pos(e)$  と書く。

図 1 は、 $\mathcal{TCMASITOCes}$  の論理式の解釈に用いる構造 (BDI ストラクチャ) の例である。細矢印は時刻遷移、 $B_a^t$ ,  $D_a^t$ ,  $I_a^t$  はエージェント  $a$  の信念・願望・意図を表す可能世界への可視関係を表す。世界  $w_1$  の時刻  $t$  では  $X_{\geq 0.8}^{e_1} p$  や  $X^{e_1} f$  が成り立ち、世界  $w$  の時刻  $t$  でのエージェント  $a$  の信念として  $BEL^a X_{\geq 0.8}^{e_1} p$  や  $BEL^a X^{e_1} f$ 、願望・意図として  $DESIRE^a pos(e_1)$  や  $INTEND^a pos(e_1)$  などが成り立つ。

また図 1 ([Rao 91] による例を改変) は、1. 節で述べた BDI エージェントの行為決定過程の例でもある。エージェントは信念の可能世界  $w_1$  での時刻分岐から、願望する (歯の治療に伴って歯は痛むかもしれないが、歯を治せる) 時刻分岐を選択し ( $w_1$  の subworld = 部分木世界となる世界  $w_2$ )、さらに歯医者 A に行く行為 (イベント)  $e_1$  を選択して意図とする (世界  $w_4$ )。

$\mathcal{TCMASITOCes}$  には不動点オペレータもあり、これを用いて CTL\* の A (全ての未来で), F (未来のいつか), U (Until; ある条件が成り立つまで) などのオペレータも表現できる。

## 3. 階層プランニング

階層プランニング問題は、タスクのサブタスクへの分解を、アクション (基本行為) に分解し切るまで行う問題と捉えることができる。BDI モデルの行為決定においても、エージェントはまず大まかな計画を立てて目標を部分目標に分解し、各部分計画をさらに詳細な計画で置き換えていくので、階層プランニングの考え方は相性がよいと言える。

ここでは階層プランニング問題におけるドメイン (問題) 定義を以下のように捉える (簡単のためメソッドの本体の制約は半順序のみとし、[Ghallab 04] による STN の定義を若干簡略化したものを用いる)。メソッドの集合  $\mathcal{M}$  とアクションの集合  $\mathcal{A}$  が与えられており、1 つのメソッド  $m \in \mathcal{M}$  はタスク  $t^m$ 、前提条件  $\phi_m$ 、本体となるサブタスクまたはアクション  $t_1^m, \dots, t_{n_m}^m$  とその間の半順序 (実行順序に関する制約)  $\mathcal{R}_m$  の組、1 つのアクション  $e \in \mathcal{A}$  は前提条件  $\phi_e$  とその効果  $\xi_e$  の組とする

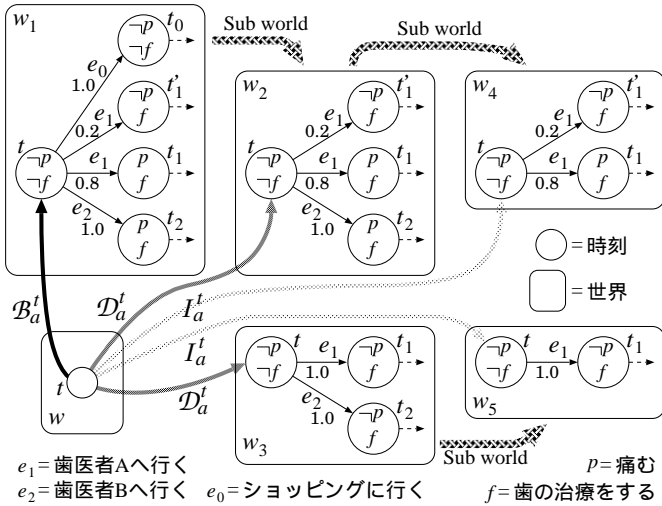


図 1: BDI ストラクチャ

(簡単のためここではタスクやアクションの引数は省いて書く)。

すると、各タスク (またはアクション)  $t$  に対し、 $t$  の開始・終了を示す新たな述語  $start\_t$ ,  $done\_t$  を導入することにより、タスクの実行過程は

$$\begin{aligned} & \neg\phi_m \supset \neg start\_t^m \\ start\_t^m & \supset \text{AF } start\_t_i^m \text{ (for } 1 \leq i \leq n_m) \\ done\_t_i^m & \supset \text{A}(done\_t_i^m \cup done\_t^m) \text{ (for } 1 \leq i \leq n_m) \\ & \bigwedge_{1 \leq i \leq n_m} done\_t_i^m \supset done\_t^m \\ \neg done\_t_i^m & \supset \neg start\_t_j^m \text{ (for } t_i^m \mathcal{R}_m t_j^m) \end{aligned}$$

のように書ける。これらは、タスク  $t_m$  の本体の全てのサブタスクを、実行順序の制約  $\mathcal{R}_m$  を満たした上で実行完了すれば、 $t_m$  の実行も完了することなどを記述している。また、アクションの実行過程は

$$\phi_e \supset \text{pos}(e) \wedge (start\_e \supset X^e(done\_e \wedge \xi_e))$$

のように書ける。

エージェント  $a$  がタスク  $t$  を達成するという目標を持ち、それに対する既存プランがプランライブラリ中にない場合、プランナは、目標  $\text{DESIRE}^a t$  と与えられて、これらの制約を満たすアクションの実行系列  $e_1, e_2, \dots, e_k$  を発見する制約充足器と捉えられ、その系列が見つければ、

$$\text{INTEND}^a(\text{pos}(e_1) \wedge X^{e_1}(\text{pos}(e_2) \wedge X^{e_2}(\dots X^{e_k}(t) \dots)))$$

という意図の生成によりそれを実行に移す。

但し、エージェントが行うプランニングの場合、タスクを初めから基本行為にまで分解し切らずに大まかなプランのみ生成し、実行の段階でより精密なプランに分解することも考えうる。例えば、タスク  $t$  に対するプランとして  $e_1; t_1; e_2$  という列 ( $e_1, e_2$  はアクション、 $t_1$  はサブタスク) を生成した場合、それを実行する意図は

$$\text{INTEND}^a(\text{pos}(e_1) \wedge X^{e_1}(start\_t_1 \wedge \text{A}(\text{pos}(e_2) \wedge X^{e_2}t) \text{N } done\_t_1)))$$

と書ける (ここで  $\text{N}$  は  $\text{atnext}$  オペレータで、 $\text{A}(\phi \text{N } \psi)$  は「次に  $\psi$  が成り立った時  $\phi$  も成り立つ」を表す)。

また、プランの実行途中で、このプランで  $t$  が将来達成できるという信念を失った場合、信念世界の subworld である意図の可能世界でも  $t$  は将来達成できないため、上述の式  $\text{INTEND}^a(\dots(t)\dots)$  は真でなくなる。すなわち、現在のプランを実行する意図を放棄することになる。

## 4. 考察とむすび

BDI モデルとプランナの結合の形式化には、[Sardina 06, Silva 07] などもある。こちらは CANPLAN という言語で操作的意味論を定義するもので、プランナの動作もその記述の一部としてある程度特定されて取り込まれる。一方、我々の形式化は公理的なもので、プランナの内部動作の特定を要しない。このため、プランナと BDI エージェントの疎な結合を扱える。

BDI エージェントと外部の行為決定機構の結合は、意図の保持による一貫した行動を保てる BDI の利点と、柔軟な行動決定の両立を期待できる点で有望である。我々の体系では、強化学習や外部プランナなど、さまざまな行為決定機構と BDI エージェントの結合を、1 つの枠組において形式化できる。今後は、実際の結合の実装を進めることや、我々の体系を用いたエージェントの性質の証明の実現などが主な課題である。

## 参考文献

- [Ghallab 04] Ghallab, M., Nau, D., and Traverso, P.: *Automated Planning: Theory & Practice*, Morgan Kaufmann Publishers Inc. (2004)
- [Meneguzzi 07] Meneguzzi, F. R., Zorzo, A. F., Móra, M. D. C., and Luck, M.: Incorporating planning into BDI systems, in *Proc. of SCPE 2007* (2007)
- [Rao 91] Rao, A. S. and Georgeff, M. P.: Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture, in *Proc. of International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pp. 473–484 (1991)
- [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., *Reading in Agents*, pp. 317–328, Morgan Kaufmann, San Francisco (1997)
- [Sardina 06] Sardina, S., Silva, de L., and Padgham, L.: Hierarchical planning in BDI agent programming languages: a formal approach, in *Proc. of AAMAS '06*, pp. 1001–1008 (2006)
- [Silva 07] Silva, de L., Dekker, A., and Harland, J.: Planning with time limits in BDI agent programming languages, in *Proc. of 13th Australasian symposium on Theory of computing*, pp. 131–139 (2007)
- [Singh 99] Singh, M. P., Rao, A. S., and Georgeff, M. P.: Formal Methods in DAI: Logic-Based Representation and Reasoning, in *Multiagent Systems*, pp. 331–376, The MIT Press (1999)
- [高田 09] 高田 司郎, 新出 尚之, 藤田 恵: 拡張 BDI 論理  $\mathcal{JGMSTG}$ es を用いた強化学習のモデル化について, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS2009) 論文集, pp. 131–138 (2009)
- [新出 09] 新出 尚之, 高田 司郎, 藤田 恵: 拡張 BDI 論理  $\mathcal{JGMSTG}$ es による協調行為のモデル化と応用, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS2009) 論文集, pp. 429–436 (2009)
- [藤田 09] 藤田 恵, 小島 侑子, 片山 寛子, 新出 尚之: 実世界での BDI ベースのロボットの柔軟な行為決定の実現に向けて, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS2009) 論文集, pp. 354–361 (2009)