

FIPA+BDIアーキテクチャ=合理的エージェントの実現方法

五十嵐 新女^{††} 高田 司郎[†] 新出 尚之^{††} 間瀬 健二[†]

[†] ATR 知能映像通信研究所 ^{††} 奈良女子大学大学院人間文化研究科

概要

本稿では、Bratman の意図の理論を応用して Rao と Georgeff が提案した BDI アーキテクチャと、FIPA に準拠した基本通信行為とプロトコルを用いた、合理的エージェントの実現方法を提案する。具体的には、言語行為を用いて遂行されるエージェント間のコミュニケーション実現方式に関する BDI アーキテクチャの問題点を挙げ、エージェント間のコミュニケーションを自然に表現できるプランを提案し、拡張 BDI アーキテクチャの実現手法を提案する。この提案手法を用いれば、権利委譲を受けた人間の目標を達成することを主眼において人間または他のエージェントと協調して問題解決を行う合理的エージェントのコミュニケーション実現方式として有効である。

FIPA + BDI Architecture = Implementation of Rational Agent

YOSHIME IGARASHI^{††} SHIRO TAKATA,[†] NAOYUKI NIDE,^{††} and KENJI MASE[†]

[†] ATR Media Integration & Communications Research Laboratories

^{††} Graduate School of Human Culture, Nara Women's University

Abstract

In this paper, we propose an implementation of rational agents using the BDI-architecture proposed by Rao and Georgeff based on Bratman's theory of intention, primitive communitive acts and protocols which conform to the FIPA specification ACL. We also propose extensions to the BDI-architecture which is able to naturally express communications between rational agents. We believe that our proposal is valid for implementations of rational agents which cooperatively execute jobs as human representatives with transferred authority.

1 はじめに

Bratman [1] の意図の理論によれば、意図は合理的行為者が自らの目標を達成するよう努力している期間の行為の決定に重要な役割を担っている。そして、意図は、その特性として、時が来れば予め意図したプランを実行するよう動機づける意欲的なコミットメントと、再考慮に抵抗し、意図したプランの空所を一貫性を持って埋めたり修正したりする実践的推論への入力として中心的な要素となるコミットメントを持っている。この意図の理論を合理的エージェントに適用すると、合理的エージェントは、人間から権利委譲された仕事に対して与えられた目標を達成するために、まず、熟考して選択したプランを意図として形成する。その後、どうにかして意図を持続しようとするコミットメントの支配の下に、そのプランを実施するための実践的な手段やサブプランを推論したり、その時が来ればそれらプランを意図的に実行する。Rao と Georgeff [4, 2] はこの意図の理論を熟考型エージェントの内部アーキテクチャに適用した BDI アーキテクチャを提案している。

本稿は、合理的エージェントの実現に BDI アーキテクチャを用いる場合、エージェント間のコミュニケーション実現方式に関する BDI アーキテクチャの問題点を挙げ、エージェント間のコミュニケーションを自然に表現できるプランを提案し、拡張 BDI アーキテクチャの実現手法を提案する。具体的には、BDI アーキテクチャのプラン本体は、2.2.2 節で述べるように、エージェント間のコミュニケーションを自然に記述することが出来ない。そこで、言語行為 [8] (たとえば、FIPA [9]) を用いて遂行されるエージェント間のコミュニケーションにおいて発生する条件分岐やメッセージを待つ同期などを自然に表現できるようにプラン本体の拡張を提案する。以下、2 章では BDI logic の概要と拡張 BDI アーキテクチャの提案手法を、3 章では FIPA の基本通信行為とプロトコルの概要と提案手法を用いたプラン記述例を、4 章では提案手法に対する考察を、それぞれ述べ、最後に 5 章でまとめる。なお、本稿を読むに当っては、一階述語論理と時相論理の初歩的な知識を仮定している。

2 BDI Logic/アーキテクチャ

本章では、まず、BDI logic と BDI アーキテクチャの概要をそれぞれ述べ、次に、拡張 BDI アーキテクチャを提案する。

2.1 BDI Logic

BDI logic [2, 7] は、エージェントの過去から未来に至る信念・目標（願望）・意図などの心的状態や行為などを自然に記述することができる時相論理体系の一つである。分岐時間命題時相論理の一つである CTL* [3] に、信念・目標・意図といった心的状態を表す様相オペレータ BEL, GOAL, INTEND を導入し、さらに、述語論理に拡張した体系である。時相オペレータとしては X (nexttime), F (sometime), U (until), E (ある未来で), A (あらゆる未来で) などを持つ。Rao と Georgeff は Bratman [1] が分析した心的状態の整合性に関する公理などを、以下のように BDI logic を用いて自然に表現している [2]。

- 心的状態の整合性公理

- (A1) $GOAL(\alpha) \supset BEL(\alpha)$
- (A2) $INTEND(\alpha) \supset GOAL(\alpha)$
- (A3) $INTEND(does(e)) \supset does(e)$
- (A4) $INTEND(\phi) \supset BEL(INTEND(\phi))$
- (A5) $GOAL(\phi) \supset BEL(GOAL(\phi))$
- (A6) $INTEND(\phi) \supset GOAL(INTEND(\phi))$
- (A7) $done(e) \supset BEL(done(e))$
- (A8) $INTEND(\phi) \supset AF(\neg INTEND(\phi))$

たとえば、(A5) は、直感的には「 ϕ という状態の達成が目標であるならば、 ϕ という状態の達成が目標であることを信じている」という意味である。

2.2 BDI アーキテクチャ

本章では、BDI アーキテクチャの概要とエージェント間のコミュニケーション実現方式に関する問題点を述べる。

2.2.1 BDI アーキテクチャの概要

BDI アーキテクチャ [4] は、限られた計算資源環境において動的に変化する環境を知覚し合理的に問題解決を行うために事前にプランを立てる熟考型エージェントの内部アーキテクチャである。エージェントの信念・目標・意図をそれぞれ陽に表現する動的なデータ構造 B, G, I やプランライブラリ、イベントキュー、およびそれらデータ構造を参照・更新するインタプリタから構成される。

プランライブラリは、複雑なプランに関する信念を B から分離したもので、タイプ、連想 (invocation) 条件 (プラン形成条件)、g 前提条件 (プラン実行条

件)、Add/Delete List (プラン実行の成功時に B に加除される信念)、本体 (実現手段)などをスロットとして持つプランの集合である。プラン本体は、基本行為 (実行可能な行為) とサブゴール (当プランの部分目標となるプラン) を辺に持つ木構造である。

2.2.2 従来のアーキテクチャの問題点

従来の BDI アーキテクチャ [4] のプラン本体には、基本行為とサブゴールしか記述できないため、これらの“条件分岐”¹や他のエージェントからのメッセージを待つ“同期”などを表現することができない。たとえば、エージェント間のコミュニケーションをプランとして記述しようとした場合、交換されるメッセージを連想条件に持つプランを複数に分けて記述するしかなく、エージェント間の本来連続した言語行為の関連が不明瞭となるばかりでなく不自然な記述になるという問題点がある。

そこで、エージェント間のコミュニケーションを自然に表現できるように、以下のような BDI アーキテクチャの拡張を提案する。

2.2.3 プラン本体の拡張

プラン本体は、以下の「文」を辺とする木構造に拡張する。

```
文 ::= 単文 [(add/delete-list)]
      | { 文 文 … 文 }
      | if 条件 then 文 [else 文]
      | (待ち条件1 ?; 文1 | … | 待ち条件n ?; 文n)
単文 ::= 基本行為 | サブゴール
待ち条件 ::= イベント
```

上記の文定義の最後の待ち条件などを記述する文は「待機文」と呼び、イベントキューに到着した他のエージェントからのメッセージなどの外部イベントまたは内部イベントと待ち条件_{1~n}の順に検査を行い、最初に真となった待ち条件_nに対応する文_nを選択して実行するという文である。拡張したプラン本体の記述例を下記に示す。

```
propose (done(propose))
(accept-proposal ?;
 if too-late then cancel
 else inform
 |reject-proposal ?; true)
```

2.2.4 アーキテクチャの拡張

まず、BDI アーキテクチャの構成要素に、プラン本体の待機文を登録する「待ちリスト」を追加する。次に、以下の3個の関数をそれぞれ次のように拡張する。option-generator は待ちリストに登録されている待機文の待ち条件と単一化できる外部イベントが来れば、その文をプラン本体に持つプランを実行

¹従来のプラン本体は木構造であるが、CTL* の未来への時間分岐を表現しているに過ぎない。

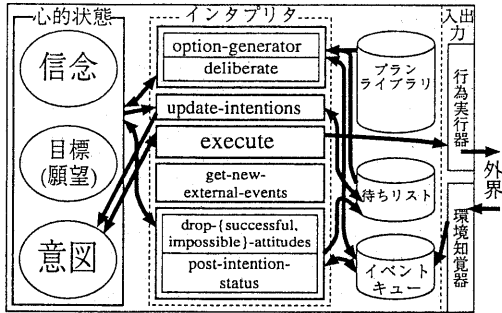


図 1: 拡張 BDI アーキテクチャ

可能な意図に加える。update-intentions はプラン本体の各文を以下のように評価する。

- 単文 (Add/Delete list が付いている文を含む) の場合は、その文を意図 I に加える。
- 複文の場合は、その各文を再帰的に評価する。
- if 文の場合は、条件の真偽に応じて、then 部/else 部のいずれかの文を再帰的に評価する。
- 待機文の場合は、単一化した待ち条件に対応する文を再帰的に評価する。そして、該当する待機文を待ちリストから削除する。また、全ての待ち条件に単一化しない場合は何もしない。

最後に、post-intention-status は実行中の意図の先頭に待機文が来ている場合、一回だけ待ちリストに登録する。ただし、その意図が達成不能になっている場合は、待ちリストから該当する待機文を削除する。

2.2.5 拡張後のアーキテクチャ

拡張後の BDI アーキテクチャを図 1 に示す。拡張後の BDI インタプリタは、下記のように、意図の形成、実行プランの選択、意図の更新、意図の実行、外部イベントの取得、心的状態の更新、意図の持続などを 1 サイクルとするループからなる。各関数の機能は 5 章の事例にて説明する。

```

initialize-state();
do
  options := option-generator(event-queue,
                              waiting-list, B, G, I);
  selected-options := deliberate(options,
                                B, G, I);
  update-intentions(selected-options,
                    B, G, I, waiting-list);
  execute(I);
  get-new-external-events();
  drop-successful-attitudes(B, G, I);
  drop-impossible-attitudes(B, G, I);
  post-intention-status(B, G, I,

```

until quit.

event-queue, waiting-list);

心的状態 B, G, I やプランの前提条件、Add/Delete List、および、プラン本体の if 文の条件などは BDI logic を用いて表現する。また、各関数は BDI logic を用いて推論する。たとえば、option-generator はプランの前提条件の真偽を B を参照して推論する。さらに、2.1 節の公理 (A5) を用いれば、この前提条件が真であるかどうかを B を参照することによって推論できる。

各機能は、2.1 節の公理を満足するように心的状態を更新する。ただし、信念管理については、TMS [5] または ATMS [6] を用いて行われるべきであるが今後の課題とする。

3 FIPA

本章では、FIPA の基本通信行為とプロトコルの概要を述べ、契約ネットワークプロトコルの拡張 BDI アーキテクチャを用いたプラン記述例を示す。

3.1 基本通信行為とプロトコルの概要

FIPA では、基本通信行為として、受理、同意、取り消し、実行の申し込み、確信の通知、否定の通知、失敗、通知、真偽の通知、参照の通知、理解不能、提案、真偽の質問、参照の質問、拒否、提案の却下、要求、条件を満たす時点で実施を要求、条件を満たす毎に実施を要求、および、登録の申し込みなどが、形式的に定義されている。また、上記の基本通信行為を組み合わせて、FIPA-request, FIPA-query, FIPA-request-when, FIPA-contact-net, FIPA-Iterated-Contact-Net, FIPA-Auction-English, および、FIPA-Auction-Dutch などのプロトコルが定義されている。本論文では、これら FIPA に準拠した基本通信行為とプロトコルを言語行為として採用する。

3.2 プラン記述例

契約ネットワークプロトコルの拡張 BDI アーキテクチャを用いたプラン記述例を図 2 に示す。本論文では、FIPA の言語行為は：で始まる基本行為とする。

プラン本体は、見学テーマ提案エージェントに :propose してそのエージェントから :accept-proposal か :reject-proposal のいずれかのメッセージを待つ。そして、イベントとして到着したメッセージが前者の場合は、見学テーマ提案エージェントに C-MAP 活用方法を通知し、プラン実行が成功したので、信念に、done(:propose(学芸員, C-MAP)) を追加する。後者の場合はこのプランを失敗させる、という他のエージェントとのコミュニケーションを表現している。

```

Type: 学芸員への見学対応交渉
Invocation: g-add(:propose(学芸員, C-MAP))
Form Condition: more_important(promote, discuss)
Precondition: received-cfp(見学テーマ提案AG,
学芸員への見学対応)
Add List: {done(:propose(学芸員, C-MAP))}
Body:
:propose(見学テーマ提案AG, 学芸員への見学対応)
(:accept-proposal ?; :inform(見学テーマ提案AG,
C-MAP 活用方法)
|:reject-proposal ?; fail)

```

図 2: 契約ネットプロトコルのプラン例

4 考察

Rao らも [4] にて, エージェント間の相互作用を課題としている。我々の提案はその課題に答えている。現在, 多重世界が容易に記述できる CGAEA [10] を用いて実装中である。また, プラン本体のみ動的論理に拡張したが実装上の問題はない。ただし, プランの拡張部分について, BDI logic での定義および解釈を与える必要がある。これは今後の課題である。

また, FIPA では KD45 の構造を持つ SL と呼ぶ様相論理を用いて, 基本通信行為の可能事前条件と効果期待を定義している。ただし, それら推論機構は定義されていない。拡張 BDI アーキテクチャのプランの連想条件と前提条件が FIPA の可能事前条件に当たり, add/delete list が効果期待に相当する。そこで, FIPA の基本通信行為を拡張アーキテクチャのプランとして記述することは FIPA に推論機構を与えたことになる。

5 まとめ

本稿は, 合理的エージェントの実現に Bratman [1] の意図の理論を応用して Rao と Georgeff [2, 4] が提案した BDI アーキテクチャを用いる場合, エージェント間のコミュニケーションの実現方式に関する BDI アーキテクチャの問題点を挙げ, FIPA など言語行為を用いて遂行されるエージェント間のコミュニケーションを自然に表現できるプランを提案し, これらの実現手法として拡張 BDI アーキテクチャを提案した。この提案手法を用いれば, 権利委譲を受けた人間の目標を達成することを主眼において人間または他のエージェントと協調して問題解決を行う合理的エージェントのコミュニケーション実現方式として有効である。

今後の課題としては, コミットメント戦略の決定メカニズム, 心的状態の信念管理, プロトタイプの構築・評価, プラン推論, および, 他のエージェントとの協調, 妥協, 拒否などに関する言語行為の選択などが挙げられる。

参考文献

- [1] Michael E. Bratman. *Intention, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987.
- [2] Anand S. Rao and Michael P. Georgeff. Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture. In *Proc. of International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pp. 473-484, 1991.
- [3] E. Allen Emerson and J. Srinivasan. Branching Time Temporal Logic. In J.W. de Bakker, W.P. de Roever, and G. Rozenberg, editors, *Linear Time, Branching Time and Partial Order in Logics and Models for Concurrency*, pp. 123-172. Springer-Verlag, 1989.
- [4] Munindar P. Singh, Anand S. Rao, and Michael P. Georgeff. Formal Methods in DAI: Logic-Based Representation and Reasoning. In *Multiagent Systems*, pp. 331-376. The MIT Press, 1999.
- [5] Jon Doyle. A Truth Maintenance System. *Artificial Intelligence*, Vol. 12, pp. 231-272, 1979.
- [6] Johan de Kleer. An Assumption-based TMS. *Artificial Intelligence*, Vol. 28, pp. 127-162, 1986.
- [7] Anand S. Rao and Michael P. Georgeff. Decision Procedures for BDI Logics. *Journal of Logic and Computation*, Vol. 8, No. 3, pp. 292-343, 1998.
- [8] John R. Searle. *Speech acts: An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge University Press, 1969. (坂本百大, 土屋俊 (訳), 言語行為—言語哲学への試論, 勁草書房, 1986).
- [9] <http://www.fipa.org>.
- [10] <http://www.aist.go.jp/ETL/etl/captain/gaea/>.