

信念の論理とチャンネルに基づいたエージェントコミュニケーションの表現

小林 幹門†

東条 敏†

†北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科

1 序論

マルチエージェントの分野において、モデルの論理的形式化を行う研究はシステムに検証可能性を与え、システム全体の信頼性の向上に寄与することが期待される。このようなエージェントモデルの形式化を行った有名な研究として Rao らによる BDI_{CTL} がある [Rao 98]。また、このような論理的形式化の中でエージェント間のコミュニケーションの研究を行った FIPA (The Foundation for Intelligent Physical Agents) [FIPA 00] がある。FIPA はエージェント間の行為を前提条件と通信結果からなる形式を提案し、モバイルエージェントシステムなどに利用するためのプラットフォームの構築を行った。

FIPA が形式化したエージェントコミュニケーションにエージェント間の通信チャンネル (経路; Communication Channel) という概念を加え形式化を行ったのが Van Eijk らの [Eijk 03] である。彼らは、エージェント間で行為が実行される時に通信チャンネルが存在しなければ通信できないという制約を加えた形式化を行っている。

以上のエージェントコミュニケーションの形式化の大まかな流れの中で、本稿が問題として提起するのは以下の点である。

- (i) 通信という行為が可能であることと、通時的に通信チャンネルがあることとは必ずしも一致しない。通信チャンネルは一時的にブラックアウトする可能性があり、また随時チャンネルは変更する可能性がある。
- (ii) もしチャンネルが変更可能であるならば、チャンネルに関する情報自身もエージェント間の通信のペイロード (payload) とすべきである。
- (iii) 通信が成功したという事態を表現するために、エージェントの認識状況を適切に更新するモデルの書き換えが必要である。

したがって、本研究においては通信という行為が行われることと通信チャンネルが存在することを分離した上に、チャンネルの形式化についてどのような方法が適切か議論する。さらに、エージェント間の通信により動的にモデルを書き換えられる更新論理と従来の信念の

論理、チャンネルを組み合わせた更新信念論理を提案し、 $SWI-Prolog^{TM}$ を用い計算機上へモデルチェッカーを実装する。

2 通信チャンネルの論理的形式化

通信チャンネルの形式化方法として、既存の論理へ与える影響がなるべく少なく、序論にて前述したようにエージェントがチャンネルそのものを信念に持つことが可能な形式が望ましい。チャンネルの形式化方法として考えられるのが、述語論理、様相論理または命題論理を用いる方法である。しかしながら、述語論理と様相論理を用いチャンネルを形式化した場合に以下のように既存の論理の複雑化を招く。ここで述語 $c(i, j)$ 、様相演算子 C_{ij} (エージェント i から j へ通信可能) を以下で用いる。

- (1) チャンネルを示す述語 $c(i, j)$ と他の述語を区別するために、 i, j などのエージェントに関わる変数と他の一般の述語のとり変数とを分ける必要がある。いくつかの型 (sort) とそれぞれの型に対する変数と定数を用意する多ソート論理を用いる必要がある。これは命題論理を述語論理化することと合わせて従来のエージェントの論理を大きく拡大することになる。
- (2) エージェント数を n 個とした場合に様相演算子 C_{ij} を自分と自分の間に存在するチャンネル (C_{ii}) を除いた $n(n-1)$ 個準備しなくてはならなくなる。このことは、不必要にクリプキモデルの複雑化をまねいてしまう。

こういったことから、上記の二つの形式化方法と比較して一番既存の論理への影響が少なくエージェント自身がチャンネルを信念として持つことが可能な命題論理を用いた形式化方法を採用する。ただし、従来の命題論理における一般の命題変数とチャンネル変数を区別する。また、命題により形式化した通信チャンネル c_{ij} は i から j へ通信可能であることを示し、その逆の j から i への通信可能性は述べていない。

3 信念更新論理 B_c^{inf}

B_c^{inf} は、信念の論理に命題として形式化したチャンネルと更新論理を組み合わせた論理体系である。本節では B_c^{inf} の構文論とクリプキ意味論を簡単に概説する。

Agent Communication by Update Belief Channel Logic
Mikito Kobayashi Satoshi Tojo
†School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

エージェントの集合 Ag , 命題の集合 P , チャンネルの集合 $C(P \supset C)$, 行為の集合 Ac の時, 信念更新論理の言語 \mathcal{L}_{B_c} における論理式の極小な集合 φ と ψ , 行為 π は以下のように与えられる.

$$\begin{aligned}\varphi &::= \top \mid p \mid c_{ij} \mid \neg\varphi \mid \varphi \wedge \psi \mid B_i\varphi \mid [\pi]\varphi \\ \pi &::= inf_{ij}^\varphi \mid \psi? \mid inf_{ij}^\varphi; \mid inf_{ij}^\varphi\end{aligned}$$

論理式 φ の枠組みで用いている記号は既存の信念の論理における記号と更新論理にて用いられている行為演算子 $[\pi]\varphi$ (行為 π 実行後に必ず φ が成り立つ) である. 次に π の枠組みで用いている記号は行為結合子 $?, ;$ と行為 inf_{ij}^φ (エージェント i から j へ p を伝える) である.

次に, \mathcal{L}_{B_c} のモデルは

$$M = \langle \mathcal{W}, \{\mathcal{T}_w \mid w \in \mathcal{W}\}, \{\mathcal{R}_w \mid w \in \mathcal{W}\}, \{\mathcal{B}_a \mid a \in Ag\}, \mathcal{V} \rangle$$

と定める. 各々は以下から構成される.

- \mathcal{W} は可能世界の集合.
- \mathcal{T}_w は各可能世界 w の状態の集合.
- \mathcal{R}_w は各状態 \mathcal{T}_w の二項関係 ' $<$ ' の集合, すなわち $\mathcal{R}_w \subseteq \mathcal{T}_w \times \mathcal{T}_w$.
- \mathcal{B}_a は \mathcal{W} 上の \mathcal{T}_w の要素により同期を取った世界間のアクセス関係, すなわち $\mathcal{B}_a \subseteq \mathcal{W} \times \mathcal{T}_w \times \mathcal{W}$.
- \mathcal{V} は各可能世界 $w \in \mathcal{W}$ の各状態 $t \in \mathcal{T}_w$ における変数に対する真偽値割当である. すなわち \mathcal{P} は命題変数, C はチャンネル変数の集合, $\Phi = \mathcal{P} \cup C$ とし, $\mathcal{V}(w, t) : \Phi \rightarrow \{t, f\}$.

B_c^{inf} の更新を行う前の状態のクリプキ意味論は通常のとおり付値 \models を用いて以下のように定義される. ここで, $a \in Agent$, $(M, w, t) \models \varphi$ はモデル M の可能世界 w の状態 t にて φ が成り立つことを表す.

更新を伴わない式に対する付値は以下のように行う.

- (1) $(M, w, t) \models p \Leftrightarrow v(w, t, p) \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}$
- (2) $(M, w, t) \models c_{ij} \Leftrightarrow v(w, t, c_{ij}) \in \mathcal{V}, c_{ij} \in C$
- (3) $(M, w, t) \models \neg\varphi \Leftrightarrow (M, w, t) \not\models \varphi$
- (4) $(M, w, t) \models \varphi \vee \psi \Leftrightarrow (M, w, t) \models \varphi$ または $(M, w, t) \models \psi$
- (5) $(M, w, t) \models B_a\varphi \Leftrightarrow \forall w' \in \{w' \mid (w, t, w') \in \mathcal{B}_a\}, (M, w', t) \models \varphi$

これに加え, FIPA の行為 *inform* の前提を改良した前提 FP と通信結果 RE を以下のように定める.

$$\begin{aligned}FP_{ij}^\varphi &: B_i\varphi \wedge B_i c_{ij} \wedge c_{ij} & (1) \\ RE_{ij}^\varphi &: B_j\varphi \wedge B_i B_j\varphi \wedge B_j B_i\varphi & (2)\end{aligned}$$

上記の FP と RE を含めた行為 inf_{ij}^φ を構文論で定めた論理式 φ と行為 π に従い, モデルの更新が適用される更新論理の付値 \models^* を用い以下のように意味論上で定義する.

$$(M, w, t) \models^* [FP?; inf]RE$$

$$\Leftrightarrow (M, w, t) \models^* [FP?][inf]RE$$

$$\Leftrightarrow \text{if } (M, w, t) \models^* FP \text{ then } (M^{inf}, w, t') \models^* RE.$$

次に, 更新以前のモデル $M = \langle \mathcal{W}, \mathcal{T}_w, \mathcal{R}_w, \mathcal{B}_a, \mathcal{V} \rangle$ が行為 inf によって $M^{inf} = \langle \mathcal{W}, \mathcal{T}_w^{inf}, \mathcal{R}_w^{inf}, \mathcal{B}_a^{inf}, \mathcal{V}^{inf} \rangle$ に更新されるとき, 各々は次の変更を受ける. 更新後のモデル M^{inf} は,

- (1) $\mathcal{T}_w^{inf} = \mathcal{T}_w \cup \{t'\}$
- (2) $\mathcal{R}_w^{inf} = \mathcal{R}_w \cup \{t < t'\}$
- (3) $\mathcal{B}_a^{inf} = \mathcal{B}_a \cup \{(w, t', w') \mid (w, t, w') \in \mathcal{B}_a\}$
- (4) $\mathcal{V}^{inf} = \{v(w, t', \psi) \mid v(w, t, \psi) \in \mathcal{V}\}^* \cup \{v(w, t', RE) \mid v(w, t, [inf_{ij}^\varphi]RE) \in \mathcal{V}\}$

4 まとめ

本稿では, 従来の命題論理を用い形式化したエージェント間のチャンネルを信念の論理と更新論理を組み合わせた信念更新論理を提案した. また, 更新論理における従来研究では一般的な行為として詳細な行為の性質を与えていなかったが, 本論理体系では FIPA に基づき行為 inf の性質を更新信念論理に従い形式化した B_c^{inf} を定めた. さらに, 本稿ではページの都合上詳細を述べることができなかつたが, SWI-Prolog を用い計算機上へ B_c^{inf} のモデルチェッカーも実装した. B_c^{inf} はエージェント間へチャンネルという新たな制約を加えたことで, 通信は常に確約されたものではなく, エージェントの信念更新に強い影響を及ぼすことは明らかである.

しかしながら, B_c^{inf} では行為 inf のみしか形式化できていないため, FIPA などにもとづき更なる行為の形式化が求められる. これに加え, 本稿では提案する論理体系のモデル論についての議論に留まっている. したがって, 今後は本論理体系の証明論における議論もする必要がある.

参考文献

- [Eijk 03] van Eijk, R. M., Boer, F. S. der, Hoek, W. van der, and Meyer, J-J. Ch. : Process algebra for agent communication: A general semantic approach. In Huet, M. P. (Ed.), *Communication in Multiagent Systems Agent Communication Languages and Conversation Policies*, Springer-Verlag (2003)
- [FIPA 00] Foundation for Intelligent Physical Agents(FIPA), Communicative act library specification, <http://www.fipa.org> (2000)
- [Rao 98] Rao, A. S. and Georgeff, P. M. : Decision procedures for BDI logics, *Journal of Logic and Computation*, vol. 8(3), pp.293 – 343 (1998)