

# 動的な論理に基づくエージェント間の通信可能性の形式化

## Communicability among Agents with Dynamic possible World Semantics

小林 幹門      萩原 信吾      東条 敏  
Mikito Kobayashi      Shingo Hagiwara      Satoshi Tojo

北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advanced Institute of Science and Technology

In this paper, we introduce communicability among agents into a multi-agent system. We formalize this communicability by Dynamic Logic, which is a logic to reason about an action of agents and to update model dynamically. Also, we combine the system of the logic with branching-time Belief Logic in order to describe what agents consider possible given their current information and changed states for per time-step. In addition, a communicative act *inform* is defined as an action operator in our logic. This logical model would be important for multi-agent systems since the coordination and collaboration between agents depends on effective inter-agent communication.

### 1. はじめに

ソフトウェアエージェントは、AI の分野において研究が進められ近年ではモバイルエージェントや電子取引支援などといったユーザとソフトウェアを仲介するエージェントミドルウェアとして広く応用されている。また、こういったユーザの要求に自律的に対応するエージェントの論理的形式化を行った研究として、古くは様相論理を拡張した認識論理に始まり現在までに様々な論理体系が提案されている [Meyer 98, Rao 98, Baltag 99, van Benthem 05]。さらに、こういった自律的なエージェントが複数存在する環境下で相互に作用するエージェントコミュニケーションの論理的形式化も行われている [FIPA 01]。[Hagiwara 06] では、[Rao 98] の  $BDI_{CTL}$  へエージェント間の通信可能性を示すチャンネルを追加し、さらに [FIPA 01] で提案された *inform* をこれに基づき形式化した。チャンネルの定義には不明瞭な点も多く、*inform* も提案した論理体系の意味論上で示していなかった。本稿では、従来研究によって提案された論理体系をエージェントの通信行為や動的なモデルの更新を表現可能な論理体系へ拡張し、この論理体系に基づいたエージェント間の通信可能性の論理的形式化を目的とする。

### 2. 関連研究

通信可能性の形式化を行った研究として現在までに [van Eijk 03], [Hagiwara 06] などがある。これらは、エージェント間の通信可能性をチャンネル '*c*' として形式化している。本節では、これら関連研究のチャンネルの形式について概説する。

[van Eijk 03] チャンネル  $c_j$  は、通信対象のエージェント  $j$  が通信時に受信可能な状態であることを示している。

$$c_j? \varphi_j \cdot \text{update}(\varphi_j)$$

ここで、 $c_j?$  ( $j$  が受信可能ならば)、 $\varphi_j$  ( $j$  に  $\varphi$  が伝わる)、 $\text{update}(\varphi_j)$  ( $j$  の知識ベースが更新される) と解釈される。

[Hagiwara 06] ここでのチャンネル ' $c_{ij}$ ' は、「エージェント  $ij$  間にチャンネル (例: 電話回線やネットワーク回線) がある」と

解釈され、命題として定義している。これを、FIPA の ACL で定められている通信行為 *inform* の前提条件へ以下のように用いている。

$$\begin{aligned} & \text{inform}(i, j, p) \\ & \text{前提条件: } B_i p \wedge \neg B_i (B_j p \vee B_j \neg p) \wedge B_i c_{ij} \\ & \text{通信結果: } B_i B_j p \text{ および } B_i B_j p \wedge B_j p \wedge B_j B_i p \end{aligned}$$

ここで、*inform* によって通信できるのは命題とチャンネルに限定している。そして、前提条件として、

- (i)  $B_i p$  (エージェント  $i$  が命題  $p$  を信じている)
- (ii)  $\neg B_i (B_j p \vee B_j \neg p)$  ( $i$  は  $j$  が命題  $p$  を信じているかはいかは信じていない)
- (iii)  $B_i c_{ij}$  ( $i$  は  $j$  へ通信可能だと信じている)

これらを満たした時、通信結果として、

- (a)  $B_i B_j p$  ( $i$  は  $j$  が命題  $p$  を信じていると信じる)
- (b)  $B_j p$  ( $j$  は命題  $p$  を信じる)
- (c)  $B_j B_i p$  ( $j$  は  $i$  が命題  $p$  を信じていると信じる)

と前提条件・通信結果は解釈される。*inform* は、エージェントが通信対象のエージェント間にチャンネルが存在していると信念を持った時のみ通信が実行され、実際のチャンネルの有無は考慮されていない。さらに、エージェントが通信可能であると認識したとしてもチャンネルは実際に存在しておらず通信不可能な場合もある。

上記の二つの通信可能性の形式は、[van Eijk 03] は通信時に通信対象のエージェントが受信可能な状態かどうかを議論しており、[Hagiwara 06] の形式は物理的なエージェント間のコネクションが存在するかどうかを議論している。

しかし、エージェント間の通信可能性を議論するならばこういった議論よりも通信は常に失敗するかもしれないというリスクを負うということを議論すべきである。さらに、上記で概説した通信可能性の形式はどちらも実際の通信において考慮すべきであり、本来なら分けて形式化すべきではない。したがって、本稿では従来研究によって形式化されたチャンネルの概念を包含した通信可能性の形式化を目指す。

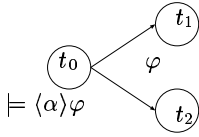


図 1:  $\langle \alpha \rangle \varphi$  実行後の例

### 3. 通信可能性の形式化

以下では, [Hagiwara 06] におけるチャンネルの問題点, そし  
て本稿で提案する通信可能性の形式について述べる.

[Hagiwara 06] では, 通信可能性をチャンネル ' $c_{ij}$ ' と表記し, 特殊な命題変数として定義した. しかし, 特殊な命題変数  $c_{ij}$  はエージェントの添字 ( $ij$ ) が常に付加され, このエージェントの添字によって  $c$  の真偽は変化し, 従来の命題論理と異なった論理へと変更している. また, 命題変数として定義するより, 述語とした方が適切だと考えられるが, この場合も既存の時相認識論理を述語も扱える論理体系へ拡張しなければならなくなる. 我々は通信可能性の形式化によってこういった既存の論理を不必要に複雑化してしまう手法は避けたい. よって, [Hagiwara 06] で提案されたチャンネルの形式には従わず, 独自の手法で通信可能性の形式化を試みる.

本稿では, ダイナミック認識論理 (*Dynamic Epistemic Logic* 以下, *DEL* と略す) [Gerbrandy 98] の行為演算子  $\langle \alpha \rangle$  を用いエージェント間の通信可能性を形式化していく.

まず, 行為演算子  $\langle \alpha \rangle$  を伴う論理式  $\langle \alpha \rangle \varphi$  は以下のような直感的な解釈が与えられている (詳細な論理体系の性質は次節で述べることとする).

行為  $\alpha$  の実行後, 少なくとも一つの状態で  $\varphi$  が成り立つ.

これは, 図 1 のように  $\alpha$  実行後の状態として成功した状態, 失敗した状態が存在することを示している. さらに, 上記の論理式  $\langle \alpha \rangle \varphi$  を用いて [van Eijk 03] と [Hagiwara 06] にて形式化された通信可能性と同じ解釈を以下のように与えることもできる.

- $\alpha$  の実行対象となるエージェントが受信可能ならば  $\varphi$  が得られ, でなければ  $\varphi$  が得られない.
- $\alpha$  の実行主と実行対象のエージェント間にチャンネルがあるならば  $\varphi$  が得られ, でなければ  $\varphi$  が得られない.

上記から従来研究による二つの通信可能性を行為演算子  $\langle \alpha \rangle$  を用い形式化可能であることが解る. しかし, このままではどのエージェント間で  $\langle \alpha \rangle$  が実行されるのか明らかではない. そこで,  $\alpha$  へ実行主と実行対象のエージェントの添字を加え,  $\alpha_{ij} (i, j \in Agent)$  とする. これにより, 各行為の各エージェント間での通信可能性を明らかにでき, 実問題に適用する際にその問題の性質に依存して本稿の通信可能性はその解釈を決めることができる. したがって, 本稿で形式化した通信可能性は上記二つの形式と比べ, 従来からの論理のみを用いることで形式化可能であり, [Hagiwara 06] のように命題論理へ変更を加えた論理体系よりシンプルな形式であるといえる. また, 一つの演算子で適用する問題に依存した解釈を与えられる点でも, 従来の形式のような固定した解釈を与えるより実問題へ適用しやすい.

### 4. 動的時相認識論理 $B_{CTL}^*$

本節では, [Hagiwara 06] で提案された時相認識論理  $B_{CTL}$  へ *DEL* と前節にて定められた行為演算子  $\alpha_{ij}$  を組み合わせた動的時相認識論理  $B_{CTL}^*$  の構文論と意味論を述べる. 以下は,  $B_{CTL}^*$  の構文論と意味論である.

[構文論] 動的モデルを扱う論理  $B_{CTL}^*$  にて扱う言語は以下から構成される.

- 命題変数の集合:  $P$
- 通信行為の集合:  $Action$
- 論理結合子:  $\wedge, \vee, \supset, \neg$
- 時相演算子:  $X, F, G, U$
- パス演算子:  $A, E$
- 認識演算子:  $B_i (i \in Agent)$
- 行為演算子:  $\langle \alpha_{ij} \rangle (\alpha \in Action, i, j \in Agent)$
- コンストラクタ:  $;;, ?, |, *$
- 補助記号:  $(, )$

$B_{CTL}^*$  の論理式は, 命題変数  $p$  に論理結合子, 時相演算子, 認識演算子, 行為演算子およびコンストラクタを繰り返し用いることで定義される.

認識演算子, 時相演算子, 行為演算子とコンストラクタを伴う論理式は以下のように解釈される.

- $AX\varphi$  すべての次の未来の状態で  $\varphi$  が成り立つ.
- $AF\varphi$  すべての分岐した未来のどこかで  $\varphi$  が成り立つ.
- $AG\varphi$  すべての分岐した未来ですべて  $\varphi$  が成り立つ.
- $A(\varphi U \psi)$  すべての分岐で  $\psi$  になるまで  $\varphi$  が成り立つ.
- $B_i\varphi$  エージェント  $i$  は  $\varphi$  を信じている.
- $\langle \alpha_{ij} \rangle \varphi$  行為  $\alpha$  を  $i$  から  $j$  へ実行後で, 少なくとも一つの状態で  $\varphi$  が成り立つ.
- $\varphi?; \alpha_{ij}$   $\varphi$  が成り立ったならば  $\alpha_{ij}$  が実行される.
- $\alpha_{ij} | \beta_{ij}$   $\alpha_{ij}$  か  $\beta_{ij}$  のいずれかが実行される.
- $\alpha_{ij}^*$   $\alpha_{ij}$  が繰り返し実行される.

また, コンストラクタ '?' は行為  $\alpha_{ij}$  を含まない論理式  $\varphi$  のみ使用することが可能である. 時相演算子を含む論理式の略記を以下に示す.

$$\begin{aligned} \varphi \wedge \psi &\equiv \neg(\neg\varphi \vee \neg\psi), & \varphi \supset \psi &\equiv \neg\varphi \vee \psi, \\ EX\varphi &\equiv \neg AX\neg\varphi, & EF\varphi &\equiv E(trueU\varphi), \\ EG\varphi &\equiv \neg AF\neg\varphi, & AF\varphi &\equiv A(trueU\varphi), \\ AG\varphi &\equiv \neg EF\neg\varphi, & \langle \alpha_{ij} \rangle \varphi &\equiv \neg[\alpha_{ij}]\neg\varphi \end{aligned}$$

[クリプキモデル]  $B_{CTL}^*$  のクリプキモデル  $M$  は以下から構成される。

$M = \langle W, T_w, R_w, B_i, V \rangle$ ,  $W$  は可能世界の集合.  $w$  を  $w \in W$  とすると,  $T_w$  は各可能世界の状態の集合,  $R_w$  は各可能世界の状態間の二項関係を表す.  $v \in V$  は原子命題  $p \in P$  への真偽値割り当て, さらに,  $B_i$  は信念到達可能関係の集合<sup>\*1</sup>. ただし添字  $i$  はエージェントを示す. これに加え,  $B_i$  は公理型 KD45 を充たす.

[クリプキ意味論]  $B_{CTL}^*$  のクリプキ意味論は付値  $\models^*$  を用いて以下のように定義される. そこで,  $(M, w, t) \models^* \varphi$  はモデル  $M$  の可能世界  $w$  の状態  $t$  にて  $\varphi$  が成り立つことを表す. また, 記号  $v(w, t, p) \in V$ ,  $j \in Agent$ ,  $Path(t)$ ,  $path[n]$  を以下で用いる.

$$\begin{aligned} (M, w, t) \models^* p & \iff v(w, t, p) \in V(p \text{ は原子命題}) \\ (M, w, t) \models^* \neg\varphi & \iff (M, w, t) \not\models^* \varphi \\ (M, w, t) \models^* \varphi \vee \psi & \iff (M, w, t) \models^* \varphi \text{ または } (M, w, t) \models^* \psi \\ (M, w, t) \models^* B_j\varphi & \iff \forall w'' \in \{w' \mid (w, t, w') \in B_j\}, (M, w'', t) \models^* \varphi \\ (M, w, t) \models^* AX\varphi & \iff \forall path \in Path(t), (M, w, path[1]) \models^* \varphi \\ (M, w, t) \models^* E(\varphi U\psi) & \iff \exists path \in Path(t), \exists n \geq 0, (M, w, path[n]) \models^* \psi \text{ かつ } n > m \geq 0 \text{ における } \forall m \text{ で } \\ & (M, w, path[m]) \models^* \varphi \\ (M, w, t) \models^* A(\varphi U\psi) & \iff \forall path \in Path(t), \exists n \geq 0, (M, w, path[n]) \models^* \psi \text{ かつ } n > m \geq 0 \text{ における } \forall m \text{ で } \\ & (M, w, path[m]) \models^* \varphi \\ (M, w, t) \models^* \langle \alpha_{ij} \rangle \varphi & \iff \exists path \in Path(t), (M^{\alpha_{ij}}, w, path[1]) \models^* \varphi \end{aligned}$$

ここで  $\alpha_{ij}$  の実行によって更新されたモデルを  $M^{\alpha_{ij}}$  とする.

## 5. $B_{CTL}^*$ に基づく通信行為の形式化

本節では, [Hagiwara 06] の *inform* を 4. 節の意味論に従い定義していく. まず (1) のように定義できれば理想であり, 以下を考えた. ここでは *inform* を *inf* とする.

$$(M, w, t) \models^* \langle inf_{ij} \rangle \varphi \iff \exists path \in Path(t), (M^{inf_{ij}}, w, path[1]) \models^* \varphi \quad (1)$$

しかし (1) のままでは  $inf_{ij}$  の前提条件も示されなければ, 通信結果も任意になってしまう. よって  $inf_{ij}$  の前提条件と通信結果を  $FP$ ,  $RE$  とし, コンストラクタ ' $?$ ', ' $'$ ' を用い (1) の行為  $inf_{ij}$  から以下のように構成する.

$$(M, w, t) \models^* FP?; \langle inf_{ij} \rangle RE$$

ここで

$$\begin{aligned} FP & \equiv B_i p \wedge \neg B_i (B_j p \vee \neg B_j p) \\ RE & \equiv B_j p \end{aligned}$$

\*1  $B_i \supseteq W \times T_w \times W$ , 例:  $(w', t, w'') \in B_i$

は前提条件と通信結果である<sup>\*2</sup>. すなわち  $(M, w, t) \not\models^* FP$  であればそもそも通信行為は実行不可能である. また, 4. 節の行為演算子  $\langle \alpha_{ij} \rangle$  の性質に従い,  $(M, w, t) \models^* FP$  かつ  $(M, w, t) \models^* \langle inf_{ij} \rangle RE$  のとき, あるモデル  $M^{inf_{ij}}$  が存在して,

$$\exists path \in Path(t), (M^{inf_{ij}}, w, path[1]) \models^* RE.$$

とする. をこの定式化に見るとおり, ここでは本論理体系を実問題に適用する際, 自由に  $FP$  と  $RE$  の内容を差し替えることができる仕様になっている.

## 6. *inf* によるモデルの更新手順

本節では,  $M$  から  $M^{inf_{ij}}$  への更新手順を述べる. ここで,  $i, j \in Agent$ , 通信される原子命題は  $p \in P$ , 更新以前から成り立っていた原子命題  $q \in P$ , 原子命題への真偽値割り当てを  $v(w, t, p) \in V$ , 状態間の関係を  $\prec$ , 更新前のモデルを  $M = \langle W, T_w, R_w, B_i, V \rangle$ , 更新後のモデルを  $M^{inf_{ij}} = \langle W, T_w^{inf_{ij}}, R_w^{inf_{ij}}, B_i^{inf_{ij}}, V^{inf_{ij}} \rangle$  とする.

- (1)  $T_w^{inf_{ij}} = T_w \cup \{t', t''\}$   
更新以前からの各可能世界  $w \in W$  の状態集合  $T_w$  と  $inf_{ij}$  の実行によって追加される新しい状態  $t', t''$  を追加する.
- (2)  $R_w^{inf_{ij}} = R_w \cup \{t \prec t', t \prec t''\}$   
更新以前の各可能世界  $w \in W$  の状態の時間関係の集合  $R_w$  と (1) で追加した新しい状態  $t', t''$  と通信時の状態  $t$  との時間関係  $t \prec t', t \prec t''$  を追加する.
- (3)  $B_i^{inf_{ij}} = B_i \cup \{(w, t', w') \mid (w, t, w') \in B_i\} \cup \{(w, t'', w') \mid (w, t, w') \in B_i\}$   
なお  $B_i^{inf_{ij}}$  に関しては, すべての  $i$  について更新を行う. 更新以前の各可能世界  $w, w' \in W$  から到達可能な可能世界  $w' \in W$  間の信念到達可能関係の集合  $B_i$  と新しく追加した状態からの信念到達可能関係  $(w, t', w'), (w, t'', w')$  を付加する.
- (4)  $V^{inf_{ij}} = \{v(w, t', q) \mid v(w, t, q) \in V, q \in P\} \cup \{v(w, t'', q) \mid v(w, t, q) \in V, q \in P\} \cup \{v(w, t', p) \mid p \in P\}$

更新以前の原子命題への真偽値割り当て  $V$ , 通信時の状態  $t$  で成り立っていた原子命題  $q$  を新しい状態  $t', t''$  へコピーし, さらに通信行為  $inf_{ij}$  によって追加された原子命題への真偽値割り当て  $v(w, t', p)$  を付加する.

[例 1] 可能世界  $w_0$  の状態  $t_0$  で  $inf_{ij}$  を実行した場合に, 上記の更新手順に従い図 2 のようにモデルが更新される.

$inf_{ij}$  実行後は, すべての可能世界へ新しい 2 つの状態を追加するとした (図 2). 本来, エージェント間で通信が行われた場合に成功したならば成功した状態だけを追加し, そうでないならば失敗した状態だけを追加する.

別の更新方法として, 本来は送信元のエージェントの信念到達可能関係の存在する可能世界にだけ 2 通りの新しい状態を追加し, 受信側のエージェントは過去の状態と同じ新しい状態を 1

\*2 [Hagiwara 06] では通信結果を ' $B_i B_j p$  および  $B_j p \wedge B_j B_i p$ ' としていたが, 本稿では通信可能性の形式化を第一としたため, よりシンプルな [FIPA 01] の *inform* の通信結果に従った.

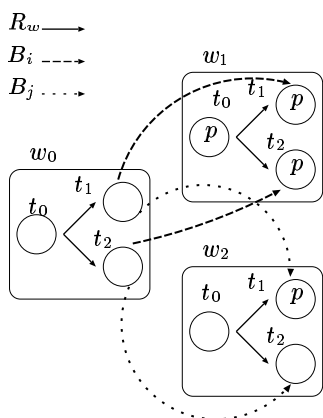


図 2: 例 1 における更新後のモデル

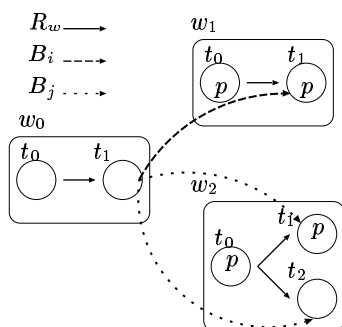


図 3: 問題が生じるモデルの更新方法

つ追加する方法がある (図 3) . つまり, *inform* の実行により時間の分岐が起こり, 次の未来を表す状態のうち  $B_j p$  が成り立つ状態と  $B_i p$  が成り立つ状態を加える方法である . しかし, そのようなモデルの更新方法を用いてしまうと, 意味論 (4 節) で定めた信念到達可能関係の性質である  $B_i \subset W \times T_w \times W$  を満たさなくなってしまう . なぜならば, この信念到達可能関係の性質は異なった可能世界の同じ状態  $t_n$  間で信念到達可能関係が存在することを示しているからである . 具体的には, 図 3 で信念到達可能関係  $B_j(w_0, t_1, w_1, t_2)$  のように異なった可能世界の異なった状態間で  $B_i$  が存在してしまう ( $B_j \subset W \times T_w \times T_w \times W$ ) . これを認めてしまうと, 現在の状態から過去の状態へ信念到達可能関係  $B_i$  が存在し, さらに  $B_i$  には現在か過去の信念のいずれかを区別することができない .

したがって, 図 2 のように通信が成功した状態と失敗した状態の異なった 2 つの状態をすべての可能世界へ追加することとする .

## 7. おわりに

本稿では [Hagiwara 06] の  $B_{CTL}$  へ [Gerbrandy 98] によって提案された *DEL* を組み合わせた動的時相認識論理  $B_{CTL}^*$  を用いエージェント間の通信可能性を形式化できることを示した . しかしながら, 本論文では通信可能性を導入したエージェントコミュニケーションは考察の対象となっておらず, 通信後のエージェントが通信が成功した状態または失敗した状態へ遷移したかを確認することができない . 将来的には, エージェントが実行可能な行為を追加し, 各エージェントへコミットメントを与えられる論理体系へ拡張し, SMTP サーバや POP サーバの役割を担うエージェントが各中継地点に点在するエー

ントネットワークを構築しなければならない . そして, 個々のエージェントが自律的に計画立案可能とするエージェントモデルの研究も必要となる . また, 本論文では [Hagiwara 06] のモデルを採用したため, 通信を実行する以前に未来を推論することが実質不可能となっている . *CTL* の表現能力を活かし, 計画立案の表現するには初期モデルで未来の分岐木を用意しておく必要もあるが, 初期の段階でエージェントが取りうる通信行為とこれによって変化する状態をすべて準備するのは困難である . そこで, 限られた状態変化しか生じない特定の実問題への適用することでこういった問題は解決されると思うが, これは将来の課題としよう .

## 参考文献

- [Baltag 99] Baltag, A., Moss, L. S., Solecki, S. : The Logic of Public Announcements, Common Knowledge, and Private Suspicions. Technical Report TR534, Department of Computer Science(CSCI), Indiana University, 1999.
- [van Benthem 05] van Benthem, J., van Eijck, J. and Kooi, B. : Common knowledge in update logics. In *Proc. the 10th conference on Theoretical aspects of rationality and knowledge(TARK10)*, 2005, pp. 253 – 261.
- [van Eijck 03] van Eijck, 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 Huget, M. P. (Ed.), *Communication in Multiagent Systems Agent Communication Languages and Conversation Policies*, Springer-Verlag, 2003.
- [FIPA 01] Foundation for Intelligent Physical Agents(FIPA), Communicative act library specification, <http://www.fipa.org>, 2000.
- [Gerbrandy 98] Gerbrandy J. : Dynamic Epistemic Logic, In: Lawrence S. Moss, Jonathan Ginzburg, and Maarten de Rijke, editors, *Logic, Language and Computation*, CSLI Publications, Stanford, vol.2, 1999, pp 67–84.
- [Hagiwara 06] Hagiwara, S., Kobayashi, M. and Tojo, S. : Belief Updating by Communication Channel, In *Proc. the 7th International Workshop on Computational Logic in Multi-Agent Systems(CLIMA)*, 2006, pp.177–190.
- [Meyer 98] Meyer, J. -J. Ch., Wieringa, R., Dignum, F.: The Role of Deontic Logic in the Specification of Information Systems, *Logics for Databases and Information Systems*, 1998, pp. 71-115
- [Rao 98] Rao, A. S. and Georgeff, P. M. : Decision procedures for BDI logics, *Journal of Logic and Computation*, vol. 8(3), 1998, pp.293 – 343.