

論争推論による不完全情報下における意思決定

織田 充

(株)富士通研究所 情報社会科学研究所

あらまし：各々のエージェントが与えられた問題を解決する不完全な知識を用いなければならぬマルチエージェントシステムにおいて、エージェントが導いた結論が互いに矛盾し合う場合がある。本研究ではより信頼できる結論を決定するために論争に基づく推論が提案される。この推論は互いに矛盾する結論の信頼性の比較を論争の枠組みの中で行う。

Decision making using argumentation-based reasoning
under incomplete knowledge

Mitsuru Oda

Institute for Social Information Science, Fujitsu Laboratories Ltd

Abstract : In a multi-agent system where each agent has to use incomplete knowledge to solve the given problem, there is a case that agent infer conclusions which contradict each other. Thus In this paper, an argumentation-based reasoning is proposed to decides which one is more reliable than others. This reasoning compares the reliability of such conclusions in the framework of argumemntation.

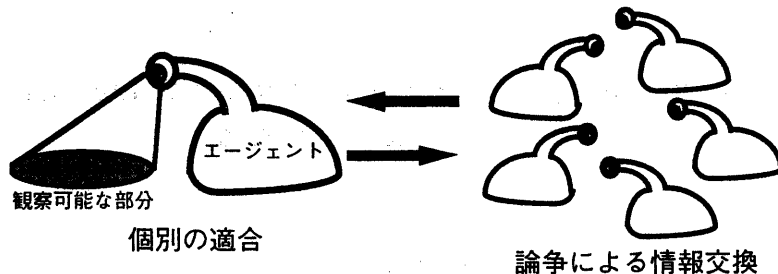
1. はじめに

マルチエージェントシステムを考えた場合、個々のエージェントは与えられた目標を達成するために、それが置かれた状況において、自身の有する知識を用いて問題解決を行うことが必要である。

エージェントをプロダクションシステムと捉え、エージェントの持つ知識をルールの集合とする。エージェントが置かれる状況が固定され、またエージェントがその状況全体を把握可能であるならば、各エージェントは（どのようにして得るかは問題としても）状況に対して適当な知識を発見することで問題解決を行うことができる。しかしエージェントを取り巻く状況が動的に変化すれば、以前の状況で成立したルールが新たな状況では成立しなかったり、またその逆の現象が生じる可能性がある。したがってエージェントは動的に変化する状況に適合するルールの選択が必要となる。

またエージェントを取り巻く状況が全く新たな状況へ変化した場合には、新しいルールを発見しなければ問題解決が行えない場合も考えられる。個々のエージェント自身が知識に含まれるルールの情状との適合性のチェック、新しい知識の学習、状況のサーチを行い、状況の動的変化に追従することは大切である。

しかしエージェントの能力が有限ならば、エージェントにとって自身が置かれている状況全体を観察することが必ずしもできない。このような場合、エージェントは自身が持っている知識に含まれるルールをその状況における推論に適用して良いかの判定ができず、エージェントの知識には不確実性が生じる。また直面する状況に適合する新しい知識を発見できない場合、エージェントの知識には不完全性が生じる。マルチエージェントシステムでは、個々のエージェント自体の能力だけでは状況変化に追従できない場合、他のエージェントとの協調により対処することが考えられる。



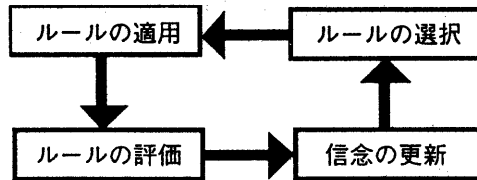
個々のエージェントは観察能力は同一であったとしても、過去（あるいは現時点）において異なる状況に遭遇することで互いに異なる知識を獲得している可能性がある。したがってエージェントが状況変化に追従できない場合の対処方法として、我々人間がわからないことを他人に聞くように、他のエージェントの有する知識や能力を利用することで有限な能力を補うことが考えられる。しかし各エージェントは常に全ての状況に対応する汎用な知識を持つとは限らない。むしろ個々のエージェントが過去遭遇した状況に対して適合する知識を持つと考えられる。この場合、単純に他のエージェント群の知識を自身の知識に加えることは、その総和に対応する知識から矛盾する結論が導かれる可能性がある。

我々は矛盾する仮説間の信頼性の比較を行なう手段として、個人あるいは集団として論争を行なうことが多い。このような場面において、我々人間はこれらの結論を互いに矛盾する仮説と見做し、それらのいずれが（注目する状況に対して）信頼性が高いかを判定する。法廷における弁論に見られるように、論争を用いた対立する命題の比較、選択は社会的に認知された方法であると言える。このような論争の持つ基本的な構造は反証の提示の繰り返しである。

2章において、本研究で扱うエージェントの定義およびエージェントの状況の動的変化への対応を示す。また3章で論争の定義、論争の評価、論争によるエージェントの信念の変化について述べる。

2. エージェント

まずエージェントの個別な問題解決に注目する。エージェントは動的に変化する状況に合わせて問題解決に用いるルールを、その知識から選択する必要がある。ここではエージェントが過去どのくらいの頻度で個々のルールを使用したか、またそのルールがどの程度状況に適合したかをルールの信頼度として量的に表現し、信頼度が最も強いルールを選択するという基準を用い新たな状況におけるルール選択を行うことを考える。しかし状況は動的に変化するため、選択されるルールもまたその状況に対する適用度に合わせ動的に変化する必要がある。



定義1：エージェント

エージェントを

i ：エージェントの識別子、

F ：エージェントが置かれた状況において成立する事実を表現した命題の集合、

K ：エージェントが持つ知識（ルール集合）、

\vdash ：推論機構、

G ：エージェントに与えられた目標を表す命題、

v ：知識 K に含まれる各ルールに対してエージェントが持つ信頼度を与える関数（信念関数）

からなる組 $\langle i, F, K, \vdash, G, v \rangle$ として表現する。ただし以下では各エージェントは同一の推論機構を持つものとする。

エージェントが持つルール r に対してある時点に（信念関数 v により）与えられる信頼度は、そのルール r がその時点における状況において成立するかについての信念の度合いである。エージェントは各時点において問題解決を行なう際、エージェントは自身の知識に含まれるルールのうちその時点における状況に適合する条件部を持つルールを次々に適用させ推論を行う。同時に適用可能なルールが複数存在する場合、それらのうち最も信頼度の高いルールを用いるものとする。また最も高い信頼度を持つルールが複数存在する場合には乱数を用いて選択する。

各ルールの信頼度は、それをを用いたエージェントにおけるそのルールの過去におけるルールの利用頻度、および時間分布より計算される値である。したがってエージェントが過去に遭遇した状況でのルール適用を、現時点における状況でのルールの信頼度いかに反映させるかが問題になる。

ルールに対する信頼度は区間 $[0, 1]$ のある値を取るものとする。現在の適合度と信頼度および適用に関して競合するルールの信頼度を用いて次にルールが適用される時点での信頼度を与える関数 v を次式で与える。ただし $v^*(r)$ は適用される時点におけるルール r の適合度、 $v_{now}(r)$ は適用される時点におけるルール r の信頼度、また $v^*(r)$ はルール r と適用に関して競合する規則群に対する信頼度である。また $v_{next}(r)$ はルール r が次の時点におけるルール r の信頼度である。また α, β, γ は現時点の適合度と信頼度および競合するルール群に対する重みを表す係数である。関数 $f[x]$ は $x > 0$ ならば x 、 $x \leq 0$ ならば 0 を返す関数である。

$$v_{next}(r) = f[\alpha v^*(r) + \beta v_{now}(r) - \gamma v^*(r)] \quad (1)$$

重み α, β, γ の比は、現時点での適合度、自身の信頼度、競合ルール群の信頼度がどのように次の適

用時点での信頼度により強く影響するかを表している。 $\alpha = \beta$ ならば現時点での適合度と信頼度は同等と判断され、 $\alpha > \beta$ ならば現時点での適合度がより強く反映させ、 $\alpha < \beta$ ならばその逆である。また適合度 $v(r)$ および競合度の値は次式に従って計算する。ただし A_1, A_2, \dots, A_n はルール r の条件部に現れる命題、 $p(A_i)$ は A_i の時点 t における適合度とする。

$$v(r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p(A_i) \quad (2)$$

問題解決における推論過程に A_i が時点 t において観察可能な事実であるならば $p(A_i) = 1$ 、定理として現れたならばその定理の適合度の値、その他の場合には 0 を取るものとする。また $A, A \rightarrow B \vdash B$ なる推論が行われた場合、 B の適合度は前提 A の適合度と一致させる。また競合ルール群 r'_1, r'_2, \dots, r'_m 全体に対する信頼度は以下の式で与える。

$$v''(r) = \begin{cases} 0 & \text{if } m = 0 \\ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{\text{now}}(r'_j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

例 1：信頼度の計算

エージェント a が知識

{ $r_1: A \wedge B \rightarrow F, r_2: C \rightarrow D, r_3: D \wedge E \rightarrow F$ }

から構成された知識を持ち、時点 t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 ($t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$) での状況において成立する事実が { A, B }, { B, C }, { C }, { C, E } とする。エージェント a が t_0, t_1, t_2, t_3 それぞれの時点において命題 F に関する問題解決を行うものとする。初期値として時点 t で各ルールは共に信頼度 1 を与える。

α, β, γ の値として共に $1/2$ とした場合の時点 t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 におけるルール r_1, r_2, r_3 の信頼度の変化は以下の図で示すようになる。時点 t では F をヘッドに持つルール r_1, r_3 間で信頼度の差が生じないため共に選択し、それぞれについて推論を行う。計算結果として、 r_1 と r_3 では r_1 の信頼度が高くなる。このため時点 t_1 では F に関する推論には r_1 が用いられる。 t_2 の時点まではルール r_1 の信頼度が高いが、徐々に r_1 の適合度が減少し、 t_4 での信頼度が r_1 と r_3 で逆転する。このため時点 t_4 ではルール r_3 が採用される。

$\alpha = \beta = \gamma = 1/2$	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
$v_{\text{now}}(r_1)$	1	1/2	1/2	1/4	1/16
$v_{\text{now}}(r_2)$	1	1/2	3/4	7/8	15/16
$v_{\text{now}}(r_3)$	1	0	0	1/8	7/16

3. 論争

個々のエージェントの立場における論争の目的は、個々のエージェントが個別に得た状況に関する情報である知識を互いに利用することである。個々のエージェントにとって論争は

- 1) エージェントの知識に含まれるルールの信頼度の更新（信念変化）、
- 2) エージェントの知識への新しいルールの追加

に用いられる。これに対して

- 3) 個々のエージェントが持つ知識を総合して問題解決を行う

というマルチエージェントシステム全体としての目的がある。これはエージェント全体としての意思決定に対応している。

3. 1 論争の形式化

定義2：補命題

任意の命題Aに対する補命題 $\neg A$ とは以下の条件を満たす命題である。

- (1) Aが $\neg B$ なる形をした命題であるならば, $\neg A=B$,
- (2) その他の場合, $\neg A=\neg A$.

定義3：証明

”命題Aの証明”とはAを結論とする証明である。命題Aの証明を”命題Aの本証”とも言う。

以下の論議では簡略化のため証明を演繹証明に制限する。

定義4：主張命題

”証明Pの主張命題”とは証明Pの結論となる命題である。逆に”主張命題Aの証明”とは, Aを結論とする証明である。

定義5：根拠

”証明Pの根拠”とは証明Pの前提となる命題の集合である。ある論争者が根拠に用いれる命題には,

- (A) 自身の知識に含まれる命題,
- (B) 事実に含まれる命題,
- (C) 他の論争者の証明に含まれる命題

がある。(A),(B),(C)それぞれのタイプを持つ命題を以下では, 自己信念, 事実, 他者信念と呼ぶ。他者信念を用いることが可能とすることで, 論争に参加したエージェントは他のエージェントの知識が利用可能となる。

定義6：反証

”証明P'が証明Pの反証である”とは, P'の結論A'の補命題 $\neg A'$ がPに出現する場合である。証明P'が論争証明Pの反証であることを二項関係attackにより

$P' \text{ attack } P$

で表す。attackを反証関係と呼ぶ[1]。また $P' \text{ attack } P$ が成立するとき, Pに現われるP'の結論A'の補命題 $\neg A'$ を反証P'のPにおける”攻撃対象”と呼ぶ。

定義7：支持命題

”命題Aが論争者dの支持命題である”あるいは”論争者dが命題Aを支持する”とは, 論争者dが命題Aを主張命題とする証明を発言した場合である。

定義8：論争

論争とは証明の集合である。

定義9：争点

争点とは互いに補命題となる命題の対である。論争Argに含まれる証明P, P'について $P' \text{ attack } P$, $P \text{ attack } P'$ が共に成立するとき, P, P'の主張命題A, A'からできる対 $\langle A, A' \rangle$ を”論争Argにおける争点”と呼ぶ。

定義10：初期争点

初期争点とは各論争に対してひとつ指定される争点である。論争Argの初期争点が $\langle A, \neg A \rangle$ であるとき, 論争Argは少なくともA, $\neg A$ の一方を主張命題とする証明を含む必要がある。

定義11：論争者

論争に参加するエージェントを”論争者”と呼ぶ。

定義12：論争フレーム

論争者の集合D, 初期争点<A, 'A>からなる組<D, <A, 'A>>を論争フレームと呼ぶ。

定義 1 3 : 支持命題

”命題Aが論争者dの支持命題である”あるいは”論争者dが命題Aを支持する”とは、論争者dが命題Aを主張命題とする証明を発言した場合である。

例 2 : 論争

2 エージェント d_1, d_2 間での論争の例を示す。いま論争フレームとして

$\langle \{d_1, d_2\}, \{ \text{Broken-Cage}(b) \}, \langle \text{Escape}(a), \neg \text{Escape}(a) \rangle \rangle$

が与えられたとする。また論争者であるエージェント d_1, d_2 の持つ知識 K_1, K_2 を以下のように与える。

$K_1: \{ r_1: \text{Bird}(a) \rightarrow \text{Fly}(a), r_2: \text{Dodo}(a) \rightarrow \text{Bird}(a),$

$r_3: \text{Fly}(a) \rightarrow \text{Escape}(a), r_4: \text{In-Cage}(a,b) \wedge \text{Broken-Cage}(b) \rightarrow \text{Escape}(a) \},$

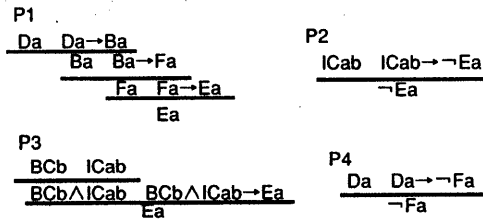
$K_2: \{ r_5: \text{Dodo}(a) \rightarrow \neg \text{Fly}(a), r_6: \text{In-Cage}(a,b) \rightarrow \neg \text{Escape}(a), r_7: \text{Strong-Wing}(a) \rightarrow \text{Fly}(a) \}.$

ここで論争の開始時点において各ルール r_1, r_2, \dots, r_7 に対して各エージェントが与える信頼度を 1 とする。また d_1, d_2 が観察可能であった事実 F_1, F_2 を以下のように与える。

$F_1: \{ \text{Dodo}(a), \text{Strong-Wings}(a) \},$

$F_2: \{ \text{In-Cage}(a,b) \}.$

このとき以下の証明 P_1, P_2, P_3, P_4 (命題 $\text{Dodo}(a), \text{Bird}(a), \text{Fly}(a), \text{Escape}(a), \text{In-Cage}(a,b), \text{Broken-Cage}(b)$ をそれぞれ $Da, Ba, Fa, Ea, \text{ICab}, \text{BCb}$ と略記してある) からなる集合は論争となっている。個々の証明は説明すると次のようになる。 P_1, P_3 が d_1 により P_2, P_4 が d_2 により P_1, P_2, P_3, P_4 の順で発言される。 P_1 は d_1 の立場表明、 P_2 は d_2 の立場表明、 P_3 は d_1 による P_2 への攻撃と同時に P_1 への補強であり、 P_4 は d_2 による P_1 への攻撃になっている。



この論争において、 P_3 は d_2 が P_2 に用いた命題 $\text{In-Cage}(a,b)$ を他者信念として根拠に用いている。つまりエージェント d_1 はエージェント d_2 の持つ情報 (事実) を利用して推論を行っている。これは先に述べた論争を行う目的のひとつである。この例では現れていないが、他のエージェントの持つ知識つまりルールを利用することも可能である。

3. 2 論争の評価 (マルチエージェントシステムとしての問題解決)

論争に基づく推論は defensible な推論であり論争で与えられる評価値は真理値を表す値ではなくむしろ信頼度を表す値である。主張命題の評価値は次のような性質を持つ。

- 1) 主張命題Aの確信度は、主張命題Aに関する証明が多く提出されるほど増加する。
- 2) 主張命題Aの確信度は、主張命題Aに関する証明に対する反証が多く提出されるほど減少する。

まず準備のために部分論争を定義する。

定義 1 4 : 証明に関する部分論争

論争 Arg の証明 P に関する部分論争 Arg' とは、次のように定義される証明の集合である。ただし attack^* は Arg 上で定義された反証関係 attack の推移的閉包である。

- 1) 証明Pが論争Argに含まれないならば, Arg'は空集合,
- 2) 証明Pが論争Argに含まれるならば, $Arg' = \{P \mid P \text{ attack}^* P, P \in Arg\} \cup \{P\}$,
- 3) 証明Pを部分証明とする証明P'が論争Argに含まれるならば,

$$Arg' = \{P' \mid P' \text{ attack}^* P, P' \in Arg\} \cup \{P\}$$

定義15：主張命題に関する部分論争

論争Argの主張命題Aに関する部分論争Arg'とは, 論争Argの主張命題Aに関する証明Pに関する部分論争である.

論争Argにおける主張命題Aの評価値を与える関数 F_{Arg} を示す. ただし式中のcase1, case2, case3は以下の場合を表す.

- case1) 論争Argの主張命題Aに関する部分論争 $Arg_i (1 \leq i \leq n)$ およびAの補命題 $\neg A$ に関する部分論争 $Arg'_j (1 \leq j \leq m)$ が存在する場合,
- case2) 論争Argが主張命題Aに関する証明をひとつだけ含み, かつその証明に対する間接的反証も含む場合,
- case3) 論争Argが主張命題Aのに関する証明としてPのみを含み, かつPに対する反証がArgには含まれない場合.

ただしcase2において $A_i (1 \leq i \leq n)$ は証明Pで主張命題Aを直接導くのに用いた命題である. また $SubArg_i (1 \leq i \leq n)$ は $A_i (1 \leq i \leq n)$ を結論とするPの部分証明に関する論争Argの部分論争である. 式中の関数 F_{proof} は証明に対する評価値を与える関数である.

$$F_{Arg}(A, Arg) = \begin{cases} \frac{1}{n+m} \left(\sum_{i=1}^n F_{Arg}(A, Arg_i) + \sum_{j=1}^m (1 - F_{Arg}(\neg A, Arg'_j)) \right) & \dots \text{case 1} \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{Arg}(A_i, SubArg_i) & \dots \text{case 2} \\ F_{proof}(A, P) & \dots \text{case 3} \end{cases} \quad (4)$$

証明に対する評価値を与える関数 F_{proof} は以下の式で計算される. ただし式中の関数 v は証明Pを主張したエージェントiが命題に対して持つ信頼度を与える関数である. また $SubP_i (1 \leq i \leq n)$ は命題Aを導くのに直接用いた命題 $A_i (1 \leq i \leq n)$ を結論とするPの部分証明である.

$$F_{proof}(A, P) = \begin{cases} v(A) & \text{if } A \text{ is an axiom of } P \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{proof}(A_i, SubP_i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

例3：論争の評価

例2で示した論争に関する評価を行う. 証明 P_1, P_2, P_3, P_4 がこの順で発言される時点をそれぞれ $t_1, t_2, t_3, t_4 (t_1 < t_2 < t_3 < t_4)$ で表す. このとき各時点における争点となる主張命題 $Escape(a), \neg Escape(a)$ に割り付けられる値の変化を次表に示す.

表からわかることは論争が終結する t_4 の時点における評価値は $Escape(a)$ が $\neg Escape(a)$ より優っているということである. つまりマルチエージェントシステム全体の評価は $Escape(a)$ の方が高い.

	t_1	t_2	t_3	t_4
Arg	$\{P_1\}$	$\{P_1, P_2\}$	$\{P_1, P_2, P_3\}$	$\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$
$F_{Arg}(Escape(a), Arg)$	1	1/2	2/3	7/12
$F_{Arg}(\neg Escape(a), Arg)$	—	1/2	1/3	5/12

3. 3 論争によるエージェントの信念変化

論争の結果求められた主張命題の信頼度を用い、エージェントのルールに対する信頼度を変化させることを考える。論争の結果求められた主張命題の信頼度は特定の状況において計算されたものではない。しかし論争により求められた命題の信頼度は、各エージェントの置かれた状況においても成立すると仮定することで、(1)式の第一項の計算に用いることができる。例2で用いたエージェント d_1 の知識に含まれるルール $r_3: Fly(a) \rightarrow Escape(a)$, $r_4: In-Cage(a,b) \wedge Broken-Cage(b) \rightarrow Escape(a)$ それぞれの信頼度が、例2で示した論争が進行するに従ってどのように変化するかを表したのが下の表である。表からわかることは、論争におけるルールの使用また反証の出現に合わせルールの信頼度も沿った変化をしていることである。

$\alpha = \beta = \gamma = 1/2$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
$v_{now}(r_3)$	1	1/2	3/4	1/2	3/8
$v_{now}(r_4)$	1	0	1/4	1/4	3/8

4. 結論

マルチエージェントシステムにおいて個々のエージェントが動的に変化する状況に置かれ、かつ個々のエージェントの能力が有限なためにそれぞれの時点における状況全体の把握および状況に対する完全な知識を有しない場合における

- 1) ルールの状況への適合度を表す信頼度を用いたルール選択による状況の動的変化への対応方法,
- 2) 他のエージェントの有する知識の利用による自身の能力の補完方法,
- 3) エージェント全体としての意思決定による問題解決

について考察した。

以上の考察における論争は、未知な部分を残す可能性のある状況における問題解決のためにエージェントが互いに情報交換する手段として用いられた。この点、本研究で扱った論争は論争と言うよりむしろ議論と呼ばれるものである。一般に我々人間が行う裁判などでの論争は利害の対立を原因として生じるものであり、論争は対立する当事者間の調整機能として行われる場合が多い。同様にマルチエージェントシステムにおいても、エージェント間で資源競合などを原因とし発生した利害対立を解決するための手段として論争を用いることも考えられる。エージェント間に利害対立がある場合の論争では、証明の構成を行うのに自身の過去の経験に基づく信頼度優先という基準だけではなく、論争結果が自身により多くの効用をもたらすという基準を用いたより複雑な論争を構成する必要がある。

参考文献

- [1] Fox, J, Krause, P.: Argumentation as a General Framework for Uncertain Reasoning. Proc. Ninth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence.
- [2] Polya, G.: 発見的推論 - そのパターン -, 丸善 (1959).
- [3] Rescher, Nicholas.: 対話の論理, 紀伊国屋書店.
- [4] Toulmin, S.: The uses of argument. Cambridge, Cambridge University Press (1956).