

論争に基づく交渉による協調的問題解決

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独立に解決するマルチエージェントシステムにおいて，エージェントのプランが互いに競合し合う場合がある．本研究ではプランの成功確率を用いた競合解消のための交渉が提案される．

Cooperative Problem Solving by the Argumentation-based Negotiation

Mitsuru Oda

Institute for Social Information Science, Fujitsu Laboratories Ltd

Abstract : In a multi-agent system where each agent solves the given problem independently, there is a case that the agent's plan conflict with other agent's plan. Thus In this paper, the negotiation which uses the probability of succeeding a plan is proposed to solve a conflict of plans.

1. はじめに

本研究では独自に問題解決行動を行う能力のある自律性の高いエージェント群が互いに異なる（可能性のある）問題を共有資源を用いて非同期に解決する状況において、エージェントのプラン間で資源競合を生じた場合の協調的な競合解消方法を提案する。本研究での方法では、共有資源の損失を避けるという合意基準を共有するエージェント群が、交渉を通じて互いのプラン間の競合解消を行う。合意基準はプラン実行の成功確率のより高いプランの資源利用が優先されるという形で、競合解消に反映される。

競合解消を行う上で考慮すべき点が多いが、本研究では競合解消における交渉において注目する点として”競合の連鎖”と”競合解消による新たな競合の発生”を挙げる。競合の連鎖とは、エージェント群には異なる資源に関する競合関係が存在し、それらが共通のプランを介して繋がりが合っていることである。このことは特定の資源競合を解消するのに、他の資源に関する競合も考慮する必要があることを意味する。

また競合解消による新たな競合の発生とは、ある競合の解消に伴い生成された新たなプランが他のプランと新たな競合を発生させることを言う。これらは競合解消が特定の資源に注目した局所的なエージェント間でのプラン調整に収まらず、エージェント全体のプラン調整に拡がる可能性があることを示している。プランニングが個々のエージェントにより独自に行われる場合には特に問題である。

以上の事を考慮し、以下において本研究で提案する競合解消のための交渉方法を述べる。

2. 交渉の合意基準

個々のエージェントは自身の問題解決を行うことが目標である。したがってエージェントの問題解決行動のための行動基準は次のように設定される。

行動基準：自身の問題解決に対して最大効用をもたらす行動を行う。

問題が異なるエージェント間では効用関数も異なり、個々のエージェントがプラン実行により獲得する効用の比較では競合を解消できない。したがってこれらエージェントのプラン間に生じた資源競合を解消するには、各エージェントの効用関数とは独立な判定基準が必要である。

エージェント群が競合解消のためにある判定基準を採用するには、その判定基準がエージェント間での合意基準を満たしていることが必要である。本研究が前提しているように、互いに異なる（可能性のある）問題解決を行うエージェント群では、エージェントが互いに問題を共有していないためプラン実行による目標達成への貢献度の比較によりプラン間の競合解決を行うことができない。ここでのエージェント群が共有しているのは資源である。したがって合意基準は共有資源に関する基準であり、判定基準はその基準を反映したものになる。本研究では次のようなエージェント間での合意基準を与える。

合意基準：共有資源の損失を避ける。

あるプランが失敗することは、そのプランが（失敗する以前に）消費した資源は無駄に利用されたことになる。このように考えれば、共有資源を用いたプラン実行においては、なるべく実現可能性の高いプランが共有資源を使用すべきである。これが合意基準の意味することである。

本研究ではプランの実現可能性を表す評価値として、プラン実行の成功確率を導入する。プラン実行の成功確率は、互いに資源競合を通じて関連し合っているエージェントのプラン実行されたらと仮定したときに、自身のプランが実行が成功する確率を表す。競合プラン間でそれぞれのプラン実行の成功確率の比較を行い、もっとも確率の高いプランの共有資源の利用を優先する。このことによりプラン間の資源競合を解消する。プラン実行の成功確率は、プランに含まれるオペレータの成功確率、およびそのプランに対する競合プランの成功確率に用いて計算される。

2. 論争

競合解消を行うには、いかなるプランが競合しているのか、言い換えればプラン間の競合関係がどのようなになっているのかを把握する必要がある。しかし互いに独立に問題解決行動を行うエージェントが他のエージェントのプラン全体を常に把握していることは困難である。

このプラン間の競合関係に関する情報を集めるのに、エージェント間で論争を行わせる。一般に論争では、特定の主張間の対立に始まり、その主張の反証、またその反証というように考慮される主張数が随時拡大する同様にエージェントのプラン間での競合解消においても、まず競合関係が生じていると判明したプランをエージェント全体に対して提示し、そのプランに対して競合するプランを持つエージェントに自身のプランを提示させる。さらにこれら提示されたプランに対して競合するプランを…というように随時提示させ、提示されるプランが無くなった時点までに提示されたプランの集合に関して競合解消を行う。このような方法を取るのには、極力情報を共有しないことと、また他のエージェントが先に提示したプランを見てから、自分の提示するプランを変更することが可能なためである。

3. プラン実行の成功確率

共有資源の競合を介して関連しているプラン群が判明したとする。

定義：問題

問題とは初期状態 s_{ini} と目標状態 s_{goal} の対 $\langle s_{ini}, s_{goal} \rangle$ である。またエージェントの”問題解決行動”とは、環境が初期状態を含むならば、環境に対して作用（オペレータを実行する）することで、環境を目標状態を含むように遷移させることである。

定義：目標

エージェントの目標とは、自身に与えられた問題に対する問題解決行動を取ることである。

ここでは各エージェントの目標得られる効用を最大にすることである。効用を最大にする問題解決行動の選択、実行を”目標達成行動”と呼ぶ。

定義：プラン

プランとはエージェントの識別子idとオペレータ列Sの組 $\langle id, S \rangle$ である。

以下では異なるエージェントのプランはオペレータ列としては同一であったとしても区別可能とし、特に問題がない限りエージェントの識別子を省略し、オペレータ列のみでプランを表すことにする。またオペレータ o_1, o_2, \dots, o_n の列を $[o_1, o_2, \dots, o_n]$ で表す。またエージェントは自身がプランニングしたプランを実行するに必要な全てのオペレータを実行する能力があるものとする。

プラン $p_k (= [o_1, o_2, \dots, o_k], 1 \leq k \leq n, p_n = p)$ を p の”部分プラン”と呼ぶ。いまプラン p をオペレータ列 $[o_1, o_2, \dots, o_n]$ とする。”プラン p を実行する”とは、実行時点における環境に対してオペレータ o_1 を適用し、その結果生じる状態に対して o_2 を適用するというように、プランに含まれるオペレータを順次 o_n まで適用することである。また”プラン実行が成功する”とは、プランに含まれる全てのオペレータの適用が成功することである。プラン実行が成功しないことを、プラン実行の失敗と呼ぶ。”プラン p は問題 $\langle s_{ini}, s_{goal} \rangle$ を解決するプランである”とは、 s_{ini} を含む任意の環境についてプラン p の実行が成功したならば、成功した時点における環境が最終状態 s_{goal} を含む場合である。

状態 s_0 を含む環境でプラン $p (= [o_1, o_2, \dots, o_n])$ のみが実行され、かつ実行が成功した仮定したとき、オペレータ o_1, o_2, \dots, o_n を s_0 に対して o_1 を、その結果生じる状態 s_1 に対して o_2 を…というように順次適用したとする。その結果生じると予測される状態の列 $\{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ を”状態 s_0 でのプラン p の期待状態列”と呼ぶ。

定義：競合関係

状態 s, s' が競合するとは、 s が環境に含まれる ($s \subseteq E$) 事態と s' が環境に含まれる ($s' \subseteq E$) 事態の成立が互いに排他的 ($\neg \exists E.(s \subseteq E \wedge s' \subseteq E)$) である場合である。オペレータ o, o' が競合するとは、 o, o' が実行された結果生じる (と予測される) 状態 s, s' が競合する場合である。またプラン p, p' が競合するとは、 p, p' が互いに競合するオペレータ $o (\in p), o' (\in p')$ を含む場合とする。

いま区別が付く限り、状態、オペレータ、プランに関する競合関係を同一な2項関係Conflictで表す。またConflictの推移的閉包をConflict*で表す。

定義：プラン集合

いま“プラン集合”とは、同一のエージェントのプランを高々一つ含むプランの集合とする。互いに競合するプランを含むプラン集合を“競合プラン集合”，また要素となる任意のプラン p, p' 間で競合しないプラン集合を“非競合プラン集合”と呼ぶ。特に非競合プラン集合 PS' が、プラン集合 PS の部分集合かつ包含関係で極大となる場合、 PS' を PS における“極大非競合プラン集合”と呼ぶ。

プラン集合 PS に含まれる全てのプランが実行される場合にプラン $p (p \in PS, p = [o_1, o_2, \dots, o_n])$ が成功する確率を“プラン集合 PS におけるプラン p の成功確率”と呼ぶ。競合プラン集合 PS に含まれる全てのプランが実行される時、プラン $p (\in PS)$ の実行が成功するには、 p に含まれる全てのオペレータの実行が成功し、かつ PS に含まれる p に対する全ての競合プランの実行がそれに含まれる (p に関する) 競合オペレータを実行する時点またはそれ以前に失敗すれば良い。プラン実行の成功確率はこの条件を反映した条件付き確率となる。

プランの成功確率を求めるにあたり、前提として与えられるプラン集合 PS に含まれるプランについて以下の仮定を行う。

- 仮定1) 任意のプラン p について、それ自身に含まれるオペレータ o, o' 間で競合を起こさない。(プランの無矛盾性)
- 仮定2) 競合関係にない任意のオペレータ o, o' の実行は互いに他方へのオペレータの実行および結果生じる状態に対して影響を及ぼさない。
- 仮定3) 全てのプランの初期状態は同一とする。
- 仮定4) PS に含まれるプランを頂点、競合関係Conflictを辺とするグラフはループを持たない。

オペレータ o の実行の成功 (失敗) を表す命題を $o^+ (o^-)$ で、また状態 s が環境に含めれる (含まれない) 事態を表す命題を $s^+ (s^-)$ と記述する。またプラン p が成功 (失敗) することを表す命題を $p^+ (p^-)$ と記述する。状態 s でオペレータ o の実行が成功する条件つき確率 $P(o^+ | s^+)$ を“状態 s でのオペレータ o の成功確率”と呼ぶ。また状態 s を含む環境に対してプラン p が実行されたとき p が成功する条件つき確率 $P(p^+ | s^+)$ を“状態 s でのプラン p の成功確率”と呼ぶ。

定義：プランの成功確率

プラン集合 PS に含まれる全てのプランが実行される場合にプラン $p (p \in PS, p = [o_1, o_2, \dots, o_n])$ が成功確率 $P(p^+ | s_0^+)$ は以下のように定義する。ただし定義式中で、状態 s_0 はプラン実行開始時点の状態 (初期状態) を表す。状態 s_0 でのプラン p の期待状態列を $[s_0, s_1, \dots, s_n]$ とする。また PS' は、 PS に含まれかつ p と競合するプラン p' の部分プランのうちその最後のオペレータが初めて p のオペレータと競合する部分プランを全て含みかつそれ以外のプランを含まないプラン集合である。また $P(s_k^+ | s_{k-1}^+, \dots, s_1^+, s_0^+)$ は状態 s_0, s_1, \dots, s_{k-1} が順次成立した後に状態 s_k が成立する条件付き確率、 $P(s_0^+)$ は環境において状態 s_0 が成立する事前確率である。

$$P(p^+ | s_0^+) = P(s_0^+) \cdot P(s_1^+ | s_0^+) \cdot P(s_2^+ | s_1^+, s_0^+) \cdot \dots \cdot P(s_n^+ | s_{n-1}^+, \dots, s_1^+, s_0^+) \\ P(s_k^+ | s_{k-1}^+, \dots, s_1^+, s_0^+) = \\ P(o_k^+ | s_{k-1}^+)$$

- … $\alpha_k (1 \leq k \leq n)$ に対する競合オペレータを含むプランが存在しない場合
 $P(\alpha_k^+ | s_{k-1}^+) \cdot \prod_{p' \in PS} P(p' | s_0^+)$
- … $\alpha_k (1 \leq k \leq n)$ に対する競合オペレータを含むプランが存在する場合

プランpと競合するプランが存在しないと仮定して計算されたpの成功確率を”プランpが単独で成功する確率”と呼ぶ。

定義よりオペレータの成功確率が一定ならば、プランの成功確率はプランが長い程（自身の単独での成功確率が下がるため）、競合プラン数が多い程、また競合プランに現われる競合オペレータの出現位置が早い程（競合プランの競合オペレータまで実行するための実行の成功確率が上がるため）低くなる傾向がある。

例：プランの成功確率

いまプラン $p_1 (= [o_1, o_2, o_3, o_4, o_5])$, $p_2 (= [o'_1, o'_2, o'_3, o'_4])$, $p_3 (= [o''_1, o''_2, o''_3, o''_4])$ 間で、オペレータ o_1 と o'_3 , o'_2 と o''_4 が競合しているとする。このときプラン p_1, p_2, p_3 の成功確率は以下ようになる。ただし簡単にするために各オペレータの成功確率を1/2、また各プランの初期状態が共通な状態 (s_{ini}) とし、 s_{ini} が環境で成立する事前確率 $p(s_{ini}^+)$ を1とする。

$$\begin{aligned}
 P(p_1^+ | s_{init}^+) &= p_1 \text{ 単独での成功確率} \cdot (1 - p_2 \text{ の部分プラン } [o'_1, o'_2, o'_3] \text{ の成功確率}) \\
 &= p_1 \text{ の部分プラン } [o'_1, o'_2, o'_3] \text{ の成功確率 } P([o'_1, o'_2, o'_3]^+ | s_{ini}^+) \\
 &= \text{部分プラン } [o'_1, o'_2, o'_3] \text{ 単独での成功確率} \cdot (1 - p_3 \text{ 単独での成功確率}) \\
 &= (1/2)^3 \cdot (1 - (1/2)^4)
 \end{aligned}$$

したがって $P(p_1^+ | s_{ini}^+) = (1/2)^5 \cdot (1 - ((1/2)^3 \cdot (1 - (1/2)^4))) \doteq 0.028$ となる。同様にして $P(p_2^+ | s_{ini}^+) \doteq 0.029$, $P(p_3^+ | s_{ini}^+) \doteq 0.047$ となる。プランの成功確率は p_1, p_2, p_3 の順で高い。

4. プランの成功確率を用いた競合解消

PSを交渉対象となるプラン集合（交渉集合）とする。PSには交渉に参加するエージェントのプランが高々1つ含まれる。またSPは交渉結果資源配分が決定したプラン集合（交渉結果集合）である。PS_{ini}は交渉開始時点での交渉集合であり、各エージェントが自身にとって最大効用を持つプランからなる競合解消が必要なプラン集合とする。

いま有限なプラン集合PS_{ini}が与えられたとする。このとき以下の交渉手順によって非競合プラン集合を構成することで競合解消を行う。

交渉手順

(STEP 1：初期値設定) PS=PS_{ini}, SP=φとする。

(STEP 2：交渉の終了判定)

もしPS=φならば、SPを交渉結果集合とし交渉を終了する。そうでなければSTEP 3へ進む。

(STEP 3：優先プランの選択)

PSに含まれるプランで成功確率が最大のプラン集合をPS_{max}とする。PS_{max}が非競合プラン集合ならば、SPUPS_{max}を改めてSPとする。PS_{max}が競合プラン集合である場合、PS_{max}の部分集合となる極大非競合プラン集合PS'_{max}をランダムに一つ選択し、SPUPS'_{max}を改めてSPとする。

(STEP 4：最大成功確率を持つプランに対する競合プランの除去)

PSに含まれるプランでPS_{max}に含まれるプランと競合するプランがあれば、それらを全てPSから取り除く。

(STEP 5：除去されたプランの代替プラン提示)

PS_{max}に含まれるプランと競合するプランを持つ全てのエージェントは、SPに含まれる任意のプラン

と競合しないという条件下で各エージェント最大効用を持つ代替プランを生成する。各エージェントは、自身の代替プランが生成が可能ならば、その代替プランをPSへ加える。
(STEP 6) STEP 2へ戻る。

以上の交渉手順により得られるSPは以下の性質を持つ。

定理：SPはパレート最適性を満たす妥結案である。

証明)

交渉手順から同一段階におけるSPとPSは互いに競合するプランを持たない。次の段階での交渉結果集合を作るためにSPに新たに付加されるプランは現段階のPSに含まれるプランであるから、次の段階のSPと現段階のSPもまた互いに競合するプランを持たない。よって最終的に得られるSPは非競合プラン集合である。また交渉終了の際には $PS = \emptyset$ となるから、 PS_{min} に含まれるプランを持つ任意のエージェントはSPに含まれるプランを持つか、もしくは交渉過程で代替プランが出せなかったかのいずれかの状態にある。したがって最終段階における交渉結果集合SPは基準点となるプラン集合 PS_{min} に含まれる競合を解消した妥結案となるプラン集合である。

いまプラン p' をSPに含まれるプラン p より効用が大きい（同一エージェントの）プランとする。SPの p を p' で置き換えたプラン集合が非競合集合であると仮定する。 p' が存在することは、 p は PS_{min} に含まれず交渉過程で代替プランとして登場する。しかしこれはSTEP 5で規定された、その段階でのSPに含まれる任意のプランと競合しないという条件下での最大効用を持つプランを代替プランとして用いることに矛盾する。よってSP'は競合プラン集合である。またSPに含まれるプランを持たないエージェントのプラン p'' を新たにSPに加えた結果生じるプラン集合をSP''とすれば、同様にSTEP 5での規定からその段階での、SP''は競合プラン集合となる。

よってSPはプラン集合 PS_{min} を基準点とする競合解消におけるパレート最適な妥結案である。□

5. まとめ

本研究では、独自に問題解決行動を行う能力のある自律性の高いエージェント群が互いに異なる（可能性のある）問題を共有資源を用いて非同期に解決する状況において、プラン実行中にエージェント間で資源競合を起こした場合の競合解消方法として、プラン実行の成功確率を用いたエージェント間での交渉方法を提案した。本研究で提案した競合解消のための交渉は、競合解消に伴う新たな競合発生を含めた解消方法であり、交渉終了後のプラン間では明らかに競合の連鎖が切れている特徴を持つ。

一般に競合解消に限らずエージェント間の問題解決行動間の調整を行うには多大な時間資源の消費が必要となる可能性がある。その結果として目標達成の機会損失の可能性を増加させる。個々のエージェントの目的は、あくまでも自身に与えられた目標の達成であるから、完全な調整を目指すのではなく、なにかしら限定合理性を満たす範囲での調整が必要である。

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] Sycara, K. P. : Argumentation: Planning Other Agents' Plans, IJCAI-89, pp.517-523 (1989).
- [5] Toulmin, S.: The uses of argument. Cambridge, Cambridge University Press (1956).
- [6] 桑原 和宏, 石田 亨, 分散人工知能 (2) : 交渉と均衡化, 人工知能学会誌 Vol.8 No.1, Jan. 1993.
- [7] 佐伯 胖, 「きめ方」の論理, 東京大学出版会, 1980.
- [8] 榎木 哲夫, 意思決定論に基づく異種情報源の融合と協調, 計測と制御 Vol.32 No.3, Mar. 1993.