

マルチエージェント環境における交渉のモデル

Modeling Negotiation in Multiagent Environments

大沢 英一 (Ei-Ichi Osawa)

ソニーコンピュータサイエンス研究所
Sony Computer Science Laboratory Inc.

Keywords negotiation, multiagent planning, cooperation,
conflict resolution

1 はじめに

複数のエージェントが独立の目標を持つ環境 (以下, マルチエージェント環境と略す) では, エージェントの目標間に競合や協調などの利害関係が生じ得る. そのような状況に置かれたエージェント達は, 相互の利益のために, 必要な情報を交換し, 相互の要求を局所的に評価し, 最終的には相互の利害を考慮した合意を形成することが好ましい. このようなプロセス全体は交渉と呼ばれる. 合意は, 目標の変更, 行為の整合, そして共同などを含み, 結果として大局的な協調動作となる.

本解説では, マルチエージェント環境における交渉のモデルについて概説する. まず, ゲーム理論における基本的な交渉観に基づいた合理的エージェントの交渉モデル (プロトコル) について説明する. 続いて, より一般的枠組から提案された交渉プロトコルについて説明する. 最後に, マルチエージェントプランニングの分野において, より特殊な状況などを考慮して提案されたいくつかの交渉モデルについて概説する.

2 ゲーム理論に基づく交渉のモデル

2.1 合理的エージェント

エージェントとは, その持つ基本意思決定原理/機構に基づき自己の信念や興味 (願望, 意図) に応じて行動する主体であることとする. よって, 意思決定原理/機構として採用するシステムによって, そのエージェントの意思決定のメカニズムは特徴付けられる. 本稿では, 主に合理的なエージェントを対象とする. この場合, 意思決定原理としては効用最大化原理 (経済的合理性) や論理的整合 (論理的合理性) などが考えられる. 本章では, 主に前者の立場に基づいた交渉モデルの説明を行なう. ちなみに, 後者の立場としては, 例えば Shoham によるエージェント指向プログラミング [15] や Bratman の研究 [1] などを参照されたい.

エージェント同士が相互作用する場合, 各エージェントに合理性を仮定すれば, 相手のモデルを比較的容易に構築することが可能となり (相手の意思決定や挙動の推定などが容易になる), 必

要以上の通信などを行わずとも効率の良い整合や共同が行なえる可能性がある。また、合理性は、交渉において何を合意として受け入れることができるかの判断基準を提供する。このような理由により、合理的なエージェントの研究は盛んとなった。

2.2 ゲーム理論における合意形成の枠組

複数のエージェントが、それぞれ独立な目標を持っていると仮定する。それらのエージェントが各自の目標を同時に達成しようと試みる場合、それらの目標の内容によっては、いくつかの目標の一部が同時には成り立たないような場合がありうる。このような場合、大局的に協調的な動作を行なうために、エージェントの間で交渉を行なうことが重要となる。

交渉の結果として得られる合意は、全てのエージェントによって受け入れられなければならない。合意の候補（一般には複数ある）を妥結案と呼ぶことにする。もしある妥結案が、交渉に参加した全てのエージェントに対して最大の効用を与えるならば、それが合意として受け入れられるであろう。しかし、一般には、必ずしもそのような妥結案が得られるとは限らない。よって、複数の妥結案があったときに、どれを合意とするかは自明ではない。

交渉については、さまざまな交渉観が考えられるが、ここではゲーム理論において採用されている次のような基本的な交渉観 [20] を考える。以下の交渉観は、多くの人が共通に持つものであると考えられる。

まず、交渉が行なわれる場合、それを成功に導くのは、交渉が成立した場合に得られる効用 u_s と、交渉しなかった場合、あるいは、交渉が不成立に終わった場合に得られると予想される効用 u_f とを比較して、 u_s が u_f よりも大きいという保証があることである。

さて、交渉が成立して合意（妥結点）が得られるためには、その妥結点は次の様な性質を満たすべきであると考えられている。

個合理性: 妥結点における各エージェントの効用は、交渉が不成立の場合に得られる効用未満であってはならない。

共同合理性 (パレート最適): 交渉は、双方のエージェントの効用がよりよくなる妥結案がある限り継続される。つまり、合意が得られた場合、双方のエージェントの効用をさらに改善する妥結案が存在しない。

この二つの性質を満たす妥結案の集合を交渉集合とよぶ。

このような、ゲーム理論に基づく交渉観は、人工知能研究におけるエージェント間の交渉プロトコルの研究に多くの示唆を影響を与えている。以下では、それらの研究うちの代表的な研究事例について概説する。

2.3 統合的交渉プロトコル

交渉における合意の形成について、以下では Zlotkin と Rosenschein による統合的交渉プロトコル [16] について概説する。この研究は、二人の合理的エージェントのそれぞれ異なる目標に

対して、それらの目標の間に協調の可能性や競合状態がある場合に合意を形成する一つのプロトコルを提案している。

この研究は、エージェントによるプランニングを対象としているので、まず、プランニングに関する基本的な事柄を定義する。

プランニングとは、問題空間 (状態集合) において、初期状態から目標を含む状態へ至る行為 (動作) 系列の探索である。

Definition 1 (目標)

- エージェント $i \in \{A, B\}$ の目標 g_i は充足したい述語の集合
- G_i は g_i の全ての述語を充足する世界状態の集合

Definition 2 (プラン)

- オペレーション o_i の合成. 世界を状態 $s \in ST$ (ST はすべての可能な状態の集合) から状態 $f \in ST$ へと変化させる 1 エージェントプランを $[o_i]_{(i=1, \dots, n)}$ とする.
ただし, $f = o_n(o_{n-1}(\dots o_1(s) \dots))$.
- ジョイントプラン J は各エージェントのプランの対 (P_A, P_B) とスケジュール (和集合上の半順序).

次に、プランのコストを定義する。

Definition 3 (コスト)

- コスト関数 $cost : OP \rightarrow \mathcal{N}$ が存在する
- プラン $P = [o_1, o_2, \dots, o_n]$ のコスト $Cost(P) = \sum_{k=1}^n cost(o_k)$

- ジョイントプラン $J = (P_A, P_B)$ に対して,
 $Cost_i(J) = Cost(P_i)$

ある目標に対する複数のプランが考えられる場合、最小コストプランを以下で定義する。

Definition 4 (最小コストプラン)

- $s \rightarrow f$ (s, f は状態) は状態 s から f へと変化させる最小コスト 1 人エージェントプラン
- $s \rightarrow F$ (F は状態集合) は状態 s から F 中の一つの状態へ変化させる最小コスト 1 人エージェントプラン
 $Cost(s \rightarrow F) = \min_{f \in F: s \rightarrow f \text{ is defined}} Cost(s \rightarrow f)$

次に、交渉の対象となる妥結案 (共同プランの候補) を定義する。

Definition 5 (妥結案)

- 妥結案 δ : 状態 s を状態 $G_A \cap G_B$ にする共同プラン J .
妥結案 δ のエージェント i に対する効用は $Utility_i(\delta) = Cost(s \rightarrow G_i) - Cost_i(\delta)$
- 個合理性: $\forall i \text{ } Utility_i(\delta) \geq 0$
- 共同合理性 (パレート最適): 妥結案 δ に対して、あるエージェントにとっては良く、他のエージェントにとって悪くない他の妥結案が存在しない
- 交渉集合 NS : 個合理的かつ共同合理的な妥結案の集合

よって、エージェント間の交渉では、両方のエージェントの目標を達成する妥結案 (共同プランの候補) を見つけることとなる。上では、妥結案の好ましさを計るために効用が導入されている。先に述べたように、交渉集合とは二人のエージェント間で協調可能な妥結案の集合である。

次に、交渉集合が存在する場合の条件を探る。まず、次の二つの条件を導入する。

Definition 6 (和条件と最小条件)

- **和条件** : $\sum_{i \in \{A,B\}} \text{Cost}(s \rightarrow G_i) \geq \sum_{i \in \{A,B\}} \text{Cost}_i(J)$
- **最小条件** : $\min_{i \in \{A,B\}} \text{Cost}(s \rightarrow G_i) \geq \min_{i \in \{A,B\}} \text{Cost}_i(J)$

この条件を用いて、次の定理を得る。

定理 [協調 1]

交渉集合 $NS \neq \emptyset$ のとき、またそのときに限り共同プラン $J(s \rightarrow G_A \cap G_B)$ が存在し、 J は和条件と最小条件を満たす。

よって、交渉集合が存在するときは、どちらのエージェントにとっても、妥結案の中のいずれかの共同プランを選択することが有益となる。共同プランを実行した場合のコストが、各々が独立に目標を達成する場合のそれに較べて、不利になることがない。

交渉集合が存在しない場合、つまり和条件と最小条件のいずれか、もしくは両方が成り立たない場合にはどうなるのであろうか。このような場合に両者のゴールを達成するためには、い

ずれか (もしくは両方) のエージェントが、単独で自分の目標を達成する場合よりも多くのコストを払わなければならない。このような場合の交渉を可能にするために、目標の価値という概念を導入する。

Definition 7 (価値) W_i はエージェント i が目標 g_i を達成するのに払える最大予想コスト。

目標の価値をもとに、目標の効用を定義しな

Definition 8 (効用の再定義)

$$\text{Utility}_i(\delta) = W_i - \text{Cost}_i(\delta)$$

この新たに定義された効用を用いても、先に導入した定理は成立する。

定理 [協調 2]

Definition 10,11 の $\text{Cost}(s \rightarrow G_i)$ を W_i に変えても Theorem 1 が成立する。

以上をもって、エージェントの目標間の関係は以下のように分類することができる。

- **競合** : 交渉集合が空。
- **妥協** : 交渉集合がある (他のエージェントの存在が歓迎されない)。交渉集合中のいずれかのディールを選ぶほうが、初期状態のまま放置するよりも良い。
- **協調** : 交渉集合があり、その中に両エージェントが歓迎する妥結案が存在する (他のエージェントの存在が歓迎される)。

協調と妥協の状況に関しては、全ての i に対して $W_i \leq Cost(s \rightarrow G_i)$ and $NS \neq \emptyset$ であれば、それは協調状況であり、さもなければ、それは妥協状況である。

以上の事柄をもとに、二人のエージェントは交渉を行なう。交渉は、二人のエージェントがそれぞれ計算した妥結案のうち、自分にとっての効用の高い妥結案から順に提示し合い、もし相手の提示した妥結案が自分の提示した妥結案と較べて悪くない(つまり、自分の効用が低くない)ならば、その妥結案が合意となり交渉が成立する。

なお、競合状況に関しては、交渉集合が空となる。この場合は混合共同プランにより妥結案を拡張する。混合共同プランとは、共同プランのどの部分をどのエージェントが実行するかを確率的に決定するものである。さらに、最終的にどちらのエージェントの目標を達成するかも確率的に決定するように拡張する。このように、確率的にどちらか一方の目標を達成することにより、妥結案を拡張することで、交渉集合が空の場合においても、合意を形成することができる。

この混合共同プランを用いて、協調/妥協/競合状況における交渉を可能としたものが統合的交渉プロトコルである。

Zlotkin と Rosenschein は、このようなアプローチをさらに発展させて、タスクの性質の分類による領域理論 [17] を展開している。また、これに関連して、ゲーム理論の協力ゲームにおける**提携**の概念をもとにした交渉プロトコルなども提案されている [18, 8]

2.4 交渉プロトコルに求められる性質

以上、合理的エージェントに基づき、それらの間の交渉と合意形成のメカニズムについて概説した。

複数の合理的エージェントが対等な関係にあり、独立の目標を持ち、かつ、独立の価値感に基づいて意思決定し行動するような場合、交渉プロトコルにはどのような性質が望まれるのであろうか。

これに関して、次のような指針が提案されている [13]。

有用性: 交渉の結果得られた合意は有用なものでなければならない(例えば、パレート最適の基準を満たすこと)。

安定性: どのエージェントも合意した内容から他の戦略へ変更する動機を持ち得ない。

単純性: 交渉に必要な通信コストは低く、計算の複雑さも比較的低い。

分散性: ボトルネックなどを回避するために、意思決定のための中心的なエージェントを必要としない。

対象性: 交渉において、どのエージェントも特別な役割を負わない。

この章で紹介した交渉プロトコルは、上記の性質を満たすようなプロトコルの追求が主な目的となっている。

しかしながら工学的な応用などを考えた場合、上記のような性質を満たすプロトコルが、必ずしも常に効率が良いというわけではない。例え

ば、この章で紹介した交渉プロトコルは、交渉に参加するエージェントが、ほぼ同様な知識や計算や通信能力を備えていることを仮定している。そのような前提条件を成立させるには、一般には、大量の通信を要すことになる。よって、ゴールの内容や各エージェントの置かれた状況によっては、その状況の特殊性をうまく利用して、例えば、何らかの中心的なエージェントの存在を許容した方が、より効率よく目標が達成できる場合もあると考えられる。

次章以降では、上記のいくつかの条件を緩和することにより、より一般的な状況に適用可能な交渉プロトコルや、また、より特殊な状況を考慮して提案された、いくつかの交渉プロトコルについて説明する。

3 交渉プロトコル

この章では、より一般的な枠組から考案された交渉プロトコルについて説明する。以下で紹介する二つのプロトコルは、前節で紹介したプロトコルと比較すると、交渉に関わる様々なメッセージの分類とその役割の規定に主眼が置かれている。

3.1 契約ネットプロトコル

契約ネットプロトコル (以下、契約ネットと略す)[4] は、人間社会における契約入札の仕組みをもとに、複雑なタスクを独立した個々のタスクに分割して、それらを複数のエージェントに割り当てるためのプロトコルである。契約ネットでは、分割されたタスクは独立に解かれるもの

として契約が結ばれる。

契約ネットは、そのプロトコルに従って通信する複数のエージェント、および、問題に対応するタスクとその部分タスクの集まりによって構成される。契約ネットは次のような手順で実行される。

まず、タスクを持つエージェント (マネージャと呼ぶ) は、必要であればそのタスクを部分タスクに分解し、各部分タスクに対してタスク提示メッセージを放送する。提示されたタスクを実行可能なエージェントは、そのタスクに対して入札メッセージをマネージャに送信する。マネージャは、送られてきた複数の入札メッセージを評価し、それらの中から最も適切と思われる入札を一つ選択して、それを送ってきたエージェントに落札メッセージを送る。この落札メッセージを得たエージェントが契約者である。マネージャは、各部分タスクの実行結果のレポートを集め、最終的には各部分タスクに対する解の統合を行なう。このようにして、契約ネットでは階層的なタスク割り当て構造がトップダウンに形成される。

契約ネットの一つの特徴は相互選択性にある。つまり、契約を行なう際に、マネージャと契約者が入札と落札に関して独立の価値規準を持つことが可能である。このように、契約ネットはタスクの割り当てに関して複数のエージェント間で交渉を可能にするプロトコルとなっている。

3.2 マルチステージネゴシエーション

マルチステージネゴシエーション [2, 21] は、タスク/資源割り当て問題に関して、複数エージェント間でのタスク/資源割り当てに対する大域的な制約がある場合、つまり部分タスク間に制約がある場合に、競合を解消して制約充足を行なうためのプロトコルである。

前節で述べたように、契約ネットは各部分タスクが独立であることを仮定しているため、部分タスク間に制約 (相互作用) がある場合が扱えない。マルチステージネゴシエーションでは、部分タスク間に大域的制約が存在する問題を、交渉を複数回繰り返すことにより解決しようとする。さらに、契約ネットでは、タスクの提示、入札、落札という一回のプロセスでタスク割り当てを行なっているのに対して、マルチステージネゴシエーションでは、局所的な資源割り当ての影響に関して交換した情報をもとに、必要に応じて資源割り当てをやり直す。このように、大域的制約が充足されるまで、何度も交渉が繰り返される。

4 マルチエージェントプランニング

マルチエージェントプランニングでは、マルチエージェント環境における単一、もしくは複数エージェントの目標に関するプランニング問題を取り扱う。各エージェントは、自己の目標を達成する過程で他のエージェントと競合を起したり、その競合を解消しようとしたり、また、単独では達成できない目標を共同により達成し

ようとする。このような状況では、他のエージェントの行動の結果として現れる環境の動的性質や、他のエージェントとの相互作用を考慮する必要がある。よって、静的な環境における単一エージェントの存在を前提して開発されてきた従来のプランニング技法 (例えば STRIPS[6]) や行為とプランの理論だけでは、扱える目標が極端に制限されてしまう。本章では、複数エージェント間の相互作用を扱うために開発されてきたマルチエージェントプランニングのいくつかの技法を通して交渉モデルについて説明する。

4.1 マルチエージェントプランスキーマ

マルチエージェントプランニングは、マルチエージェントプランをどのエージェントが生成するのか (つまり、プランニングに関するエージェントの制御関係) によって2つのクラスに分けることができる。第一のクラスは**集中型プランニング**で、この方式では代表的な一人のエージェントが他のエージェントのためのプランを集中的に生成する。第二のクラスは**分散型プランニング**で、この方式では複数のエージェントが共同してプランを生成する。集中型プランニングの場合に較べて、分散型プランニングが対象としている環境では権限が分散していて、かつ、エージェントの自律性が高い場合が多い。

次に、マルチエージェントプランは、目標の性質により2つのクラスに分けることができる。第一のクラスは**競合解消**であり、その場合は、既に各エージェントが自己のプランを持っているという仮定のもとに、それらのプランを実行す

る上での競合解消や整合を行なうことを目的とする。第二のクラスは**共同** (共有目標の達成) であり、これは例えば、単一エージェントでは達成できないような目標を複数のエージェントが共同して達成しようとすることを目的とする。

以上で述べた2つの側面は、多くのマルチエージェントプランニング方式の主要な性質を反映しているが、これらの側面により全てのスキーマが完全に分類されるわけではない。以下では、いくつかのプランニング方式とエージェント間での交渉のプロトコルを、それらがとるアプローチの主要な性質により分類して考察し、さらに前述の2つの側面から特徴付ける。

4.1.1 プランの同期

複数のエージェントが独立に生成したプランを同時に実行しようとする、異なるエージェントのプランの一部や、もしくは、全体が競合する場合がある。Corkillによる分散NOAHでは、連言的目標を分解し各部分目標を独立のエージェントに割り当て、それぞれの部分目標をさらに複数の部分目標に階層的に分解する過程で同期情報を抽出し、それに基づいてエージェント間競合を回避する方法を提案している[3]。分散NOAHは、階層的分散プランニングと同期の問題を扱った最も初期の研究の一つである。

Georgeffは、複数のプランに含まれた競合する行為の同期をとることにより、競合解消を行なう方法を提案している[7]。この方法では、先ず各エージェントは独立にプランを生成し、次にそれらのプランを大局的スケジューラに伝達す

ることにより各エージェントの意図(この場合、個々に生成したプラン)を伝え、その後に、大局的スケジューラがそれらの情報をもとに競合を解消する方法を提案している。具体的な競合解消の方法は、先ず、各エージェントのプランにおいて競合する行為と競合の形態を解析し、次に、競合する部分に適当な同期行為を挿入することにより競合が解消される。

Georgeffの提案した方法は基本的に集中型プランニングに属する。またこの方法は、独立した目標の競合解消的側面を強く見せているが、複数エージェントの共同のための行為の同期としてこの方法を利用することも可能である。つまり、Georgeffの提案は、複数プランの臨界領域に関する制約の解消による整合の手法であると考えてよい。

4.1.2 交渉プロトコル

競合の可能性のあるエージェント間においては、プランの実行前に交渉を行なうことにより、互いにより良いプランを探索し、元のプランを修正することで、より良い結果を得る(つまり、競合による最悪の結果を回避する)ことが可能な場合がある[14]。交渉に基づくプランニングは、基本的に分散型プランニングであると考えてよい。第2章で紹介した統合的交渉プロトコルは、マルチエージェントプランニングにおける典型的な分散型プランニングである。

また、前節で述べたマルチステージネゴシエーションは、タスク/資源割り当て問題に関して、複数エージェント間での資源割り当てに対する

大域的な制約がある場合、つまり部分タスク間に制約がある場合に、競合を解消して制約充足を行なうための分散型プランニング方式である。

4.1.3 共同プランニング

マルチエージェント環境においては、単一エージェントでは本質的に達成不可能な目標 (例えば技能の不足などにより) を複数のエージェントの共同により達成したり、また、ある問題を単一のエージェントで解決するよりも、複数のエージェントにより効率良く解決する (分散協調問題解決) ということが有用である。以下では、そのような側面に重点をおいたいくつかの主要な研究事例について述べる。

Partial Global Plan

Durfee と Lesser は、センサ情報から移動体の航路を解析する DVMT[9] という分散システムを通して、PGP (Partial Global Plan) と呼ばれる疎結合分散協調問題解決のモデルを考案した [5]。PGP は分散型プランニングであるが、まず、各エージェントは自己のプランを生成し、その概略 (PGP では局所プランと呼ぶ) を他のエージェントに伝える。次に、各エージェントは受信した他のエージェントの局所プランから、大域的なプランを推定する。各エージェントは、自己の局所プランと大局プランの不整合さの度合から、局所プランを修正するかどうかを判定する。PGP では、不整合さの度合に対するしきい値を適当に選ぶことにより¹、動特性が変動する

¹このしきい値があまり低いと、各エージェントが局所プランの修正に敏感となってしまう、それにかかるコスト

ような環境においても、各航路追跡エージェントが十分な追跡性能を保持することが可能であることを主張している。

階層的共同組織

Martial は、単一エージェントでは不可能な目標を達成するための共同プラン生成方法を提案している [10]。この方法では、各エージェントの実行可能なプランを事前に解析して、その関連性から、複雑な目標を達成するための階層的プランを複数のエージェントの明示的な協調を仮定して、事前に (つまり実際にその目標の充足が要求される前に) 構成しておく。この方法は分散型プランニングに分類される。

機会主導型共同プランニング

マルチエージェント環境が開放性を有する場合は、前で述べた Martial の方法の様に事前に共同関係を解析して階層プランを構成しておくことには本質的な限界がある。Osawa は、部分的²で相互に不整合な信念を有する可能性のある複数エージェントが、機会に応じて共同の可能性を推定し、整合的に共同プランを生成する機会主導型共同プランニング方式を提案している [12]。これは分散型プランニングに分類される。機会主導型共同プランニングでは、Davis らにより提案された契約ネット [4] を拡張³してマルチエージェントプランニングに適用している。よっ

増から全体のパフォーマンスが低下することになる。

²どのエージェントも環境に関する完全な知識や、その環境内で達成できる (達成を依頼される) 目標に対する完全なプランを持っていないこと。

³共同プラン間の制約が扱われている。

て、局所プランと共同プランが相互作用することになるが、マルチエージェント環境では、環境の動的特性によりそれを整合的に行なうことは一般に困難である。機会主導型共同プランニングでは、この環境の動的諸性質に起因する目標分割の困難さや共同プランの不完全さを解消する方法を提案している。また、Osawa は、共同プラン生成の定式化と、共同における各エージェントの合理的行為選択 (作業の分担など) に関して、効用に基づいた合理的共同のモデル化を行なった [11, 19]。このモデルでは、第 2 章で述べた合理的エージェントの考え方が採用されている。

4.2 まとめ

マルチエージェント環境における交渉のモデルについて概説した。ゲーム理論における基本的な交渉観に基づいた合理的エージェントによる交渉のプロトコルから始まり、交渉におけるメッセージの役割などを規定した、より一般的交渉プロトコル、そして、エージェントの特殊な状況を考慮した様々な交渉のモデルについて、マルチエージェントプランニングを通して説明した。

なお、本稿では取り扱わなかったが、マルチエージェント環境で、実際にエージェント間の交渉を可能にするためには、交渉のモデルやプロトコル以外にも、エージェント間通信に用いられる具体的な言語の設計やエージェント間で共有される知識の設計の問題などが挙げられる。これらについては、人工知能学会誌 1994 年度 1

月号 (Vol.9, No.1) に掲載されている「知識の共有と再利用」の特集などを参照されたい。また、本稿で述べたようなエージェントの局所的な観点からみた交渉プロトコルだけではなく、より多数のエージェントの協調動作の大局的挙動 (均衡化) などについて手際良くまとめられた文献としては、桑原と石田による解説 [22] などを参照されたい。

参考文献

- [1] Michael E. Bratman. *Intention, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987.
- [2] Susan E. Conry, Robert A. Meyer, and Victor R. Lesser. Multistage Negotiation in Distributed Planning. In Alan H. Bond and Les Gasser, editors, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, pp. 367–384. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1988.
- [3] Daniel D. Corkill. Hierarchical Planning in a Distributed Environment. In *IJCAI-79*, pp. 168–175, 1979.
- [4] Randall Davis and Reid G. Smith. Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving. *Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp. 63–109, 1983.
- [5] Edmund H. Durfee and Victor R. Lesser. Using Partial Global Plans to Coordinate

- Distributed Problem Solvers. In *IJCAI-87*, pp. 875–883, 1987.
- [6] R. E. Fikes and Nils J. Nilsson. STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving. *Artificial Intelligence*, Vol. 2, No. 3, pp. 189–205, 1971.
- [7] Michael P. Georgeff. Communication and Interaction in Multi-Agent Planning. In *AAAI-83*, pp. 125–129, 1983.
- [8] Steven Ketchpel. Forming Coalitions in the Face of Uncertain Rewards. In *AAAI-94*, pp. 414–419, 1994.
- [9] V. R. Lesser and D. D. Corkill. The Distributed Vehicle Monitoring Testbed: A Tool for Investigating Distributed Problem Solving Networks. *AI Magazine*, Vol. 4, No. 3, pp. 15–33, Fall 1983.
- [10] Frank von Martial. Coordination of Plans in Multiagent Worlds by Taking Advantage of the Favor Relation. In *Proceedings of the Tenth International Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, 1990.
- [11] Ei-Ichi Osawa. A Scheme for Agent Collaboration in Open Multiagent Environments. In *IJCAI-93*, pp. 352–358, 1993.
- [12] Ei-Ichi Osawa and Mario Tokoro. Collaborative Plan Construction for Multiagent Mutual Planning. In Eric Werner and Yves Demazeau, editors, *Decentralized A.I. 3*, pp. 169–185. Elsevier/North Holland, 1992.
- [13] Jeffrey S. Rosenschein. Consenting Agents: Negotiation Mechanisms for Multi-Agent Systems. In *IJCAI-93*, pp. 792–779, 1993.
- [14] Jeffrey S. Rosenschein and Michael R. Genesereth. Deals Among Rational Agents. In *IJCAI-85*, pp. 91–99, 1985.
- [15] Yoav Shoham. AGENT0: A simple agent language and its interpreter. In *AAAI-91*, pp. 704–709, 1991.
- [16] Gilad Zlotkin and Jeffrey S. Rosenschein. Conflict Resolution in Non-Cooperative Domain. In *AAAI-90*, pp. 100–105, 1990.
- [17] Gilad Zlotkin and Jeffrey S. Rosenschein. A Domain Theory for Task Oriented Negotiation. In *IJCAI-93*, pp. 416–422, 1993.
- [18] Gilad Zlotkin and Jeffrey S. Rosenschein. Coalition, Cryptography, and Stability: Mechanisms for Coalition Formation in Task Oriented Domains. In *AAAI-94*, pp. 432–437, 1994.
- [19] 大沢英一. 合理的エージェントによる共同プランスキーマ. コンピュータソフトウェア, Vol. 12, No. 1, pp. 52–63, January 1995.
- [20] 鈴木光男. ゲーム理論入門. 共立出版, 1981.

- [21] 桑原和宏, Victor R. Lesser. マルチステージ
ネゴシエーションにおけるゴール間競合の
検出. 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 10,
1991.
- [22] 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,
pp. 17-25, 1993.