

## 協調的なスケジューリングのための交換条件の提示による説得手法

伊藤 孝行<sup>†</sup>      新谷 虎松<sup>†</sup>

Persuasion based on exchanging for cooperative scheduling

Takayuki ITO<sup>†</sup> and Toramatsu SHINTANI<sup>†</sup>

あらまし ネットワーク上を自律的かつ協調的に行動し人間の活動を支援するソフトウェアとして、エージェントが注目を集めている。エージェントの行動の一つとして合意形成がある。個々に異なるスケジュールを持つエージェントが合意形成し一つのスケジュールを協調的に生成することを協調スケジューリングと呼ぶ。スケジュールとはイベントの並びである。本論文では、協調スケジューリングをゲーム理論の協力ゲームにおける交渉問題として定式化し、エージェント間で交渉問題を解決するための手法として説得による手法を提案する。筆者らは、実社会での人間同士の交渉の一つとして説得に注目している。本論文では、互いに最も好ましい案を受け入れてもらうという交換条件の提示によって説得を実現している。協調スケジューリングの例の一つとして、エージェントによる議事のスケジューリングを示し、説得の有用性を示す。

キーワード マルチエージェントシステム, 説得, 合意形成, ゲーム理論, 交渉

### 1. はじめに

インターネットの普及に伴い、エージェント [2] [7] と呼ばれるネットワーク上で自律的かつ協調的に振舞うことにより人間の活動を支援を行うソフトウェアが注目を集めている。複数のエージェントの自律的かつ協調的な行動によって問題を解決するようなシステムをマルチエージェントシステムと呼ぶ。マルチエージェントシステムにおいて、エージェントは個々に問題を持ち、かつ個々に問題を解決しながら、システム全体としての問題もうまく解決しなければならない。システム全体としての問題を解決するためには合意を形成する必要がある。合意形成 [10] [11] [17] はマルチエージェントシステムにおける重要な問題の一つである。

本論文では、個々にスケジュールを持ったエージェントが、集団として一つのスケジュールを生成するために合意形成を行う状況を想定する。エージェントが協調的にスケジュールを生成することを協調スケジューリングと呼ぶ。スケジュールとはイベントの並びのことを言う。例えば、会議の議事のスケジューリングでは議事がイベントとなる。エージェントはスケジュール

について個々に異なる好みを持つ。スケジュールに関する好みとは、あるイベントをどこにスケジューリングするかという好みである。全体としてのスケジュールは、個々のスケジュールを反映しなければならない。本論文では、協調スケジューリングを定式化し、協調スケジューリングにおいて、個々の好みをなるべく保ちながら全体としてのスケジューリングを生成する手法として、説得による方法を提案する。

人間社会での説得 [8] には様々な手法が考えられる。筆者らは人間社会の様々な説得の手法からモデル化可能な手法を選びだし、エージェント間の合意形成に導入している。まずエージェント間の説得の基本的な枠組を示す。エージェント間の説得において、説得する側のエージェントを説得者と呼び、説得される側のエージェントを妥協者と呼ぶ。説得者および妥協者の基本的な動作は以下の通りである。要請：説得者は、妥協者に合意案を送信する。妥協：合意案を受信した妥協者はその合意案に対して妥協を試みる。返答：妥協の結果、提案された合意案に合意可能となったら、妥協者は説得者に合意することを返信する。合意不可能であれば、合意を拒否することを返信する。

文献 [3] [4] [6] では説得において、妥協者が妥協する場合に自らの信念の変更を行うことによって、経済的合理性や論理的整合性を満たすことを試みる。具体

<sup>†</sup>名古屋工業大学知能情報システム学科, 名古屋市  
Department of Intelligence and Computer Science, Nagoya  
Institute of Technology, Gokiso, Showa-ku, Nagoya, 466-  
8555 Japan.

的には文献 [3] では、ゲーム理論 [16] の提携ゲームを用い、特性関数を調整することによって信念の変更を実現している。また、文献 [4] [6] では、AHP (Analytic Hierarchy Process) [14] を用いてエージェント間の説得を提案している。AHP とは、ユーザのある問題とそのイベントに対する主観的な評価から、イベントの重要度を重み付けした意思決定木を構築することによって解析的に求める手法である。文献 [4] [6] ではユーザの好みを AHP による意思決定木とし、意思決定木をエージェントの信念と考える。そして意思決定木における重み付けをエージェントが自ら経験則に従い、調節することによって信念の変更を行い妥協を実現している。

以上のようにこれまで提案してきた説得はエージェントの信念の変更を行うことによって妥協を実現している。本論文では、これまでの実現方法とは異なり、互いに最も好ましい案を受け入れてもらうという交換条件の提示によって説得を実現する。

協調スケジューリングは、ゲーム理論 [16] の  $n$  人協力ゲームとしてみることが出来る。協力ゲームでは、非協力ゲームにおける囚人のジレンマの様な閉塞的な状況を脱するために各プレイヤーが話し合いなどを行い、状況自体を変化させる。ゲーム理論ではプレイヤーは人間であるから、プレイヤーは「話し合い」などの協力のための交渉過程を遂行する能力を当然持ち合わせている。協調スケジューリングをゲーム理論の枠組で捉えた場合、プレイヤーはソフトウェアであるエージェントであるから、交渉過程を遂行する能力を考えなければならない。本論文ではエージェントが交渉過程を遂行するために、交換条件の提示による説得を提案する。

本論文では、2 章で協調スケジューリングの定式化を行う。3 章で協調スケジューリングにおける交渉の手法として交換条件の提示による説得を論じる。4 章では、説得が協調スケジューリングの一例である議事スケジューリングにおいて有効であることを示す。5 章では本説得についてゲーム理論的な観点から考察を行う。本研究の関連研究を 6 章で示し、7 章で本論文をまとめる。

## 2. 協調的なスケジューリングの定式化

本節では協調スケジューリングを形式的に定義する。エージェントの集合を  $N = \{1, \dots, i, \dots, n\}$  で表す。イベントの集合を  $E = \{e_1, \dots, e_j, \dots, e_m\}$  で表す。  
[定義 1] (スケジュール) エージェント  $i$  の持つス

ケジュールは、スロット  $y_k$  のベクトル  $[y_k]_i (k = 1, 2, \dots, m)$  とする。スロットとはイベントを配置するための時間帯を意味する。

[定義 2] (イベントの重要度) エージェント  $i$  のイベント  $e_j$  に対する正の価値を重要度と呼び、 $Weight_i(e_j)$  とする。 $Weight_i(e_j)$  が大きくなるほどイベント  $e_j$  の価値が大きくなる。

[定義 3] (スロットのコスト) エージェント  $i$  のスロット  $y_k$  に対する負の価値をコストと呼び  $Cost_i(y_k)$  とする。 $Cost_i(y_k)$  が大きくなるほど、スロット  $y_k$  の価値は小さくなる。

スロットのコストは、そのスロットにイベントが配置された場合の都合の悪さを示す。例えば、議事をイベントとしスロットを時間帯とする議事スケジューリングでは、スロットのコストとは、時間帯に存在する議事以外の個人的なイベントの重要度と考えられる。

定義 2 と定義 3 より重要度もコストも価値であるので比較可能かつ加減算などの計算も可能である。

[定義 4] (イベントの配置に対する価値) あるエージェント  $i$  がイベント  $e_j$  をスロット  $y_k$  に配置することを  $\langle e_j, y_k \rangle$  と表す。配置  $\langle e_j, y_k \rangle$  の価値は、イベントの重要度  $Weight_i(e_j)$  とスロットのコスト  $Cost_i(y_k)$  が与えられた時、 $w_i(\langle e_j, y_k \rangle) = f(Weight_i(e_j), Cost_i(y_k))$  で求められる。異なるエージェント間同士の価値の比較は不可能とする。すなわち、 $w_i(\langle e_j, y_k \rangle)$  と  $w_{i'}(\langle e_{j'}, y_{k'} \rangle)$  について  $i \neq i'$  のときこれらは比較不可能である。

定義 4 における関数  $f$  は応用分野によって様々な定義の方法があると考えられる。本論文の実験では、重要度の高いイベントをコストの低いスロットへ配置することが価値が高いと考え、 $w_i(\langle e_j, y_k \rangle) = |Weight_i(e_j)| - |Cost_i(y_k)|$  とする。

[定義 5] (スケジュールに対する効用) エージェント  $i$  の、スケジュール  $[y_k]_i$  に対する効用を、 $u_i([y_k]_i) = \sum_{1 \leq k \leq m} \{w_i(\langle EVENT_i(y_k), y_k \rangle)\}^2$  とする。 $EVENT_i(y_k)$  は、エージェント  $i$  のスケジュール  $[y_k]_i (k = 1, 2, \dots, m)$  において、 $y_k$  に配置されているイベントを示す。

定義 5 のスケジュールに対する効用の式において、 $u_i([y_k]_i) = \sum_{1 \leq k \leq m} \{w_i(\langle EVENT_i(y_k), y_k \rangle)\}^2$  のように、価値の 2 乗を足し合わせた理由は、より価値の高い配置から成るスケジュールがより高い効用を持つようにするためである。

定義 4 で示した通り、価値はエージェント間で比較

不可能であるから、効用についてもエージェント間での比較は不可能である。価値のエージェント間での比較を不可能とした理由は、価値は各エージェントの固有で主観的な評価であって、他エージェントの主観的な評価値と客観的に比較することはできないからである。

協調スケジューリングの流れを以下に示す。初期の時点において、エージェント  $i$  は各々にスケジューリングを行っており、スケジュール  $[y_k]_i (k = 1, 2, \dots, m)$  を持っている。このスケジュールは、 $u_i([y_k]_i)$  を最大化するものである。この時点でエージェント間でスケジュールが同じである保証はない。そして、交渉を行い、交渉が終了した時点において、すべてのエージェントのスケジュールが同じになっていればスケジューリングは成功とする。エージェント  $i$  とエージェント  $i'$  のスケジュールが同じであるとは、すべての  $k$  において  $EVENT_i(y_k)$  の示すイベントと  $EVENT_{i'}(y_k)$  の示すイベントが同じイベントであることを言う。

協調スケジューリングは  $\langle N, S, c \rangle$  という3要素のタプルで表される交渉問題となる。 $N$  はエージェントの集合で  $N = \{1, \dots, i, \dots, n\}$  である。 $S$  は実現可能集合であり、エージェントが共同戦略を取った時に実現すると期待される利得ベクトル  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) = (u_1([y_k]_1), u_2([y_k]_2), \dots, u_n([y_k]_n))$  の集合である。 $n$  人のエージェントが協力し合意のうえでの戦略を共同戦略と呼ぶ。つまり共同戦略とは話し合いを経て協力して取る戦略である。協調スケジューリングにおいて、戦略とは、ある1つのスケジュールを提示することである。すべてのエージェントの合意が得られる  $S$  に属するただ1つの点を受結点と呼び  $s \in S$  で表す。協調スケジューリングにおける受結点は、すべてのエージェントの戦略すなわちスケジュールが同じになる点である。 $c$  は基準点であり、交渉が不成立の場合に得られると予想される利得ベクトルである。交渉が不成立の場合とは話し合いがうまくいかずに共同戦略がとれなかった場合である。協調スケジューリングにおいて交渉が不成立の場合とは、エージェント間のスケジュールは同じものでない場合で、 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n) = (0, 0, \dots, 0)$  である。すなわち、協調スケジューリングにおいてエージェント間でスケジュールがすべて一致しなかった場合、利得ベクトルは  $x = (0, 0, \dots, 0)$  となる。

### 3. 交換条件の提示による説得

本章では、実現可能集合に含まれる利得行列を受結

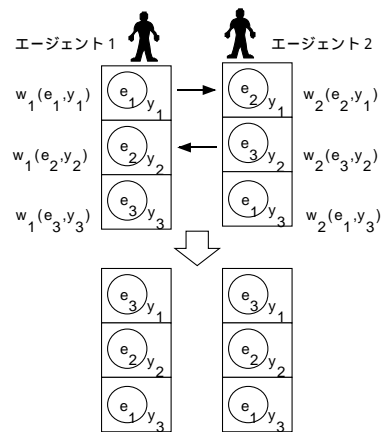


図1 説得の例

点として得るためのエージェント間の説得に基づく交渉過程を示す。本論文で提案する説得の基本的なアイデアは「互いに最も好ましい交換条件を提示し、互いに交換条件を受理できるなら成功とする」というアイデアである。説得では2エージェントによる交渉が基本となるので本節では  $N = \{1, 2\}$  とする。イベントとスロットの数は簡単のために3とする。

図1に簡単な例を示す。図1の上の図では、エージェント1とエージェント2が説得に基づく交渉を行うとする。エージェントは各々に自分の効用を最大化するスケジュールを持っている。例えば、エージェント1は、スロット  $y_1$  にイベント  $e_1$ 、スロット  $y_2$  にイベント  $e_2$ 、およびスロット  $y_3$  にイベント  $e_3$  を配置している。エージェント1とエージェント2のスケジュールが一致しないために、エージェント1もエージェント2も利得を得ることができない。そこで、説得を行う。

イベントとスロットの組を配置と呼ぶ。説得では相手のスケジュールと異なる配置の中の一つを相手に交換条件として提示する。交換条件となる配置を選択する方法として、本論文では、とりえず経済的な合理性に従い、自分が最も価値の高い配置を相手に提示することとする。

図1では、エージェント1は  $e_1$  を  $y_1$  に配置する価値  $w_1(\langle e_1, y_1 \rangle)$  が最大であり、エージェント2は  $e_3$  を  $y_2$  に配置する価値  $w_2(\langle e_3, y_2 \rangle)$  が最大であるとする。そこでエージェント1は、 $e_1$  を  $y_1$  に配置することを交換条件として提示し、エージェント2は、 $e_3$  を  $y_2$  に配置することを交換条件として提示する。交換条件を互いに提示することが説得における要請であ

る。すなわち、本論文で提案する説得ではエージェント 1 の立場から見れば、エージェント 1 が説得者かつエージェント 2 が妥協者となる。エージェント 2 の立場から見ればエージェント 2 が説得者かつエージェント 1 が妥協者となる。エージェントは同じイベントを提示したり、同じスロットを提示したりすることはしない。また、提示すべきイベントがない場合は、説得は行われず交渉は失敗とする。

次に説得における妥協に移る。提案を受けたエージェントは提案に対して妥協が可能かどうかを確かめる。妥協が可能かどうかを判定する方法は応用領域に合わせて定めるべきである。以下に本論文で提案する方法を示す。

[妥協判定方法] エージェント 1 の提案した配置を  $\langle e_j, y_k \rangle$  とし、エージェント 2 の提案した配置を  $\langle e_{j'}, y_{k'} \rangle$  とする。もし、 $Cost_1(y_{k'}) \leq Weight_1(e_j)$  かつ  $Cost_2(y_k) \leq Weight_2(e_{j'})$  ならば、妥協が成功したとする。すなわち、自分が提案したイベントが受理されるならば、相手のイベントも受理する。ただし、相手のイベントを配置するスロットに対する自分のコストが、自分の提案したイベントの重要度よりも低くなければならない。

例えば、議事スケジューリングでは以下のような意味になる。互いに、相手の議事を配置する時間帯に存在する自分の個人的なイベントの重要度が、自分の提案したイベントの重要度よりも低い時に妥協が行われる。

図 1 では、エージェント 1 にとって  $Cost_1(y_2) \leq Weight_1(e_1)$  が成立し、かつ、エージェント 2 にとって  $Cost_2(y_1) \leq Weight_2(e_3)$  が成立した時、説得が成功する。提案を受理したとき、元にあったイベントは提案されたイベントのあったスロットへ入れ換える。例えば、図 1 下で示すように、エージェント 1 は、スロット  $y_2$  にイベント  $e_3$  を受理した。そこでイベント  $e_3$  が元にあったスロット  $y_3$  にスロット  $y_2$  にあったイベント  $e_2$  を配置する。

以上の説得の特長は以下の点である。(1) エージェント相互の個々のイベントの配置に対する価値の比較を直接行わない。ユーザの支援を目的とした領域では、エージェント相互の好みを比較するということは、ユーザ間の好みを比較することになる。ユーザ間の好みを数の大小関係によって比較することは、一般的に好ましくない。(2) エージェントは互いに相手の効用に関する知識を必要としない。上で示した [妥協判定

方法] において、各エージェントは自分の重要度とコストだけを比較している。つまり、スケジューリングにおいて相手の効用に関する情報を得られない場合でも説得による交渉は行うことができる。

## 4. 具体例

### 4.1 議事スケジューリングの具体例

本節では、協調スケジューリングの具体例として議事スケジューリングを挙げ、議事スケジューリングにおける説得の具体例を示す。議事スケジューリングとは、区切られた時間(時間帯)にどのようにこれらの講演つまり議事を並べるかを決定することである。時間帯がスロットで、議事がイベントである協調スケジューリングである。議事を並べる場合にユーザの好みが反映される。すべての議事が区切られた時間に配置された時、議事スケジューリングが成功したと言う。

議事のスケジューリングに説得に基づく合意形成を導入した理由は以下の通りである。実際の人間が行う議事スケジューリングはそれほど主張がぶつかるものではなく、むしろ和やかに淡々と進む場合が多い。しかし、それはあくまで人間が行う場合である。本研究では、人間の代理としてエージェントが交渉を行う。エージェントが人間の代理として議事をスケジューリングすることによって、議論の負担を軽減でき、人間が直接交渉に立ち会うことなしに議事スケジューリングを進めることが可能となる。本論文ではソフトウェアとして実装されるエージェントが議事スケジューリングを行うための手法として説得を提案する。

議事スケジューリングにおける説得を用いたエージェント間の合意形成の流れを、最も簡単なエージェントが 2 人の場合の例を用いて示す(図 2)。図 2 において、議事を丸、時間帯を四角で表す。例えば、図 2(A) においてエージェント  $a_1$  は議事 B を時間帯 1、議事 C を時間帯 2、議事 A を時間帯 3、および議事 D を時間帯 4 にスケジューリングしているとする。議事  $m$  を時間帯  $t$  に配置するという案を  $\langle$  議事  $m$ , 時間帯  $t$   $\rangle$  と表す。つまり、エージェント  $a_1$  は、 $\langle$  議事 B, 時間帯 1  $\rangle$ 、 $\langle$  議事 C, 時間帯 2  $\rangle$ 、 $\langle$  議事 A, 時間帯 3  $\rangle$ 、および  $\langle$  議事 D, 時間帯 4  $\rangle$  という案を持っている。合意条件は 2 人とし、2 人の案が合致すれば合意とする。

図 2(A) でエージェント  $a_1$  が議事 D を時間帯 4 にスケジューリングすること、つまり  $\langle$  議事 D, 時間帯 4  $\rangle$  を提案したとする。 $\langle$  議事 D, 時間帯 4  $\rangle$  を受

け取ったエージェント  $a_2$  も議事 D を時間帯 4 にスケジューリングしているので、 $\langle$  議事 D, 時間帯 4  $\rangle$  を受理する。図 2(B) において、議事 D を時間帯 4 にスケジューリングすることが合意となる。

そして、図 2(B) でエージェント  $a_2$  が議事 A を時間帯 1 にスケジューリングすること、つまり  $\langle$  議事 A, 時間帯 1  $\rangle$  を提案したとする。エージェント  $a_1$  は時間帯 1 に議事 B をスケジューリングしているので、エージェント  $a_2$  の提案を拒否する。エージェント  $a_2$  が拒否したことによって、図 2(C) で、エージェント  $a_2$  は  $\langle$  議事 A, 時間帯 1  $\rangle$ 、つまり議事 A を時間帯 1 にスケジューリングするという案を保留とする。以上のようにすべてのエージェントが提案可能な議事と時間帯を提案するまで図 2(A) から図 2(C) を繰り返す。そして  $\langle$  議事 D, 時間帯 4  $\rangle$  以外の案が保留となり図 2(D) の状況になったとする。

図 2(D) となった時点でエージェントは説得を始める。交換条件として、エージェント  $a_2$  が  $\langle$  議事 A, 時間帯 1  $\rangle$  をエージェント  $a_1$  に提示し、エージェント  $a_1$  は  $\langle$  議事 C, 時間帯 2  $\rangle$  をエージェント  $a_2$  に提示するとする。この説得が成功したとすると、議事 A は時間帯 1 にスケジューリングされ、議事 C は時間帯 2 にスケジューリングされる。結果として、エージェント  $a_1$  もエージェント  $a_2$  も時間帯 3 にスケジューリングすべき議事は議事 B のみとなるので、図 2(E) に示すように議事がスケジューリングされ、合意となる。

エージェントが  $n$  人の場合は、(A) において  $a_1$  が他のすべてのエージェントに提案を行う。その提案がある合意人数以上のエージェントに受理されたら、その提案は受理されたものとする。合意人数以上でなければ (C) のように保留する。(D) においては  $a_2$  は、保留を持ったすべてのエージェントに説得を試みる。説得を行った結果、ある配置について同じ配置を持つエージェントが合意人数以上存在すれば、その配置については合意が得られたものとする。

#### 4.2 実験と評価

説得による合意形成の効果を確認するために実験を行った。実験におけるエージェント数と議事の数を実験的なものとするためには、実際の議事スケジューリングについて考察する必要がある。規模の小さな議事スケジューリングとして研究会について考え、規模の大きな議事スケジューリングとして国際会議について考える。

まず規模の小さな議事スケジューリングとして、一

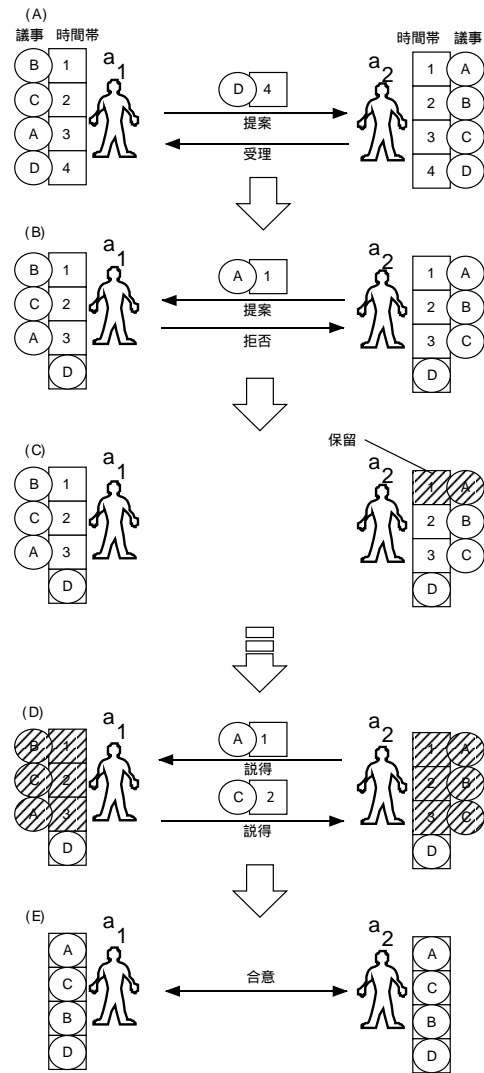


図 2 合意形成の例

般的な研究会では、直接議事スケジューリングに関与する人数は 5 人程度であり、議事の数 は 10 ~ 20 である。これは、具体的な研究会 [5] などの議事スケジューリングに実際に関与している一人から確認された。

国際会議などではプログラムコミッティのメンバーは 20 人程度であり、議事の数 は 200 程度になる。例えば、比較的規模の大きい国際会議 IJCAI-97 [4] では、プログラムコミッティのメンバーは 27 人、議事の数 は 216 (受理された論文数) である。20 人以上のメンバーが 200 以上の議事をすべてスケジュー

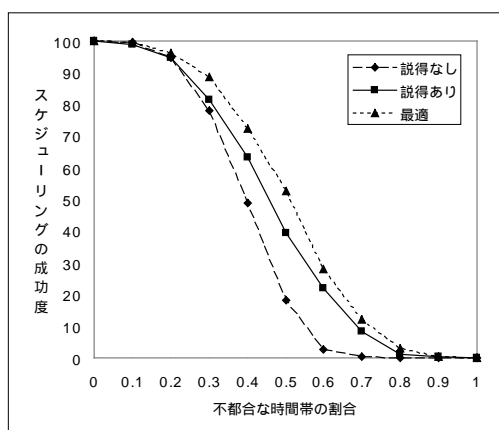


図3 実験結果

リングするのは非現実的である。そこで、議事はセッションごとに分類され、各セッションごとに議事のスケジューリングが行われると考えるのが妥当である。メンバーについても5人程度ずつが各専門分野に近い分野についての議事をスケジューリングすると考えるのが妥当である。すなわち、国際会議のように規模の大きな議事スケジューリングにおいても、直接あるひとつの議事スケジューリングに関わる人数は5人程度であり、議事の数も10程度であるとする。

以上の理由から、議事を10、エージェント数を5として、実験を行った。実験では、議事のスケジューリングの成功または失敗を確かめた(図3)。

実験の設定としては、「説得なし」では、4.2節で述べた(A),(B),および(C)で1ターンとした。「説得あり」では、4.2節で述べた(A),(B),(C),(D),および(E)で1ターンとした。「説得なし」と「説得あり」それぞれについて(C)および(E)で集計が行われるものとした。すべてのエージェント*i*について、あるイベント $e_j$ とあるスロット $y_k$ の配置 $\langle e_j, y_k \rangle$ に対する価値 $w_i(\langle e_j, y_k \rangle)$ は、 $w_i(\langle e_j, y_k \rangle) = |Weight_i(e_j)| - |Cost_i(y_k)|$ とした。合意条件は過半数とした。すなわち全エージェントのうちの半数以上が同じ配置を示せばその配置については合意が得られたこととした。(A)の提案や(D)の説得において、提案または説得が可能な案 $\langle e_j, y_k \rangle$ をすべて提案または説得するまで、各ターンを繰り返す、これを1試行とした。そしてこの試行を100回行った。各図において縦軸のスケジューリングの成功率とは、試行100回中何回スケジューリングが成功

したかを示している。横軸は、各エージェントの不都合な時間帯の割合を示している。エージェント*i*の不都合な時間帯とは、 $Cost_i(y_k) > 0$ なるスロット $y_k$ である。本実験は説得の効果を示すことが目的であるため、不都合な時間帯のコストおよび議事の重要度はランダムに与えた。不都合な時間帯に対しては1~9のコストをランダムに与えた。現実的な状況を想定したとき、これからスケジューリングする議事に対する重要度の方が、個人的なイベントよりも高くなる傾向があると考えられる。そこで、議事的重要度に関しては最小値を5とし、5~9の重要度をランダムに与えた。

説得を用いた合意形成によって成功した議事スケジューリングの数を示す「説得あり」の場合では、説得を用いない合意形成によって成功した議事スケジューリングの数を示す「説得なし」の場合と比較して良好な結果が得られていることが図3より分かる。説得を用いることによって、不都合な時間帯の割合が4~6のときには、20%程度改善できている。

説得が必ず成功する最適な場合を図3に示すことによって、説得による合意形成の一般的な性質を示す。最適な場合とは説得が必ず成功する場合である。説得が必ず成功するには、(D)の説得において説得者の妥協の条件 $Cost_i(y_{k'}) \leq Weight_i(e_j)$ と妥協者の妥協の条件 $Cost_i(y_k) \leq Weight_i(e_{j'})$ が常に成り立てば良い。つまり、議事に対する重要度が常に時間帯に対するコスト以上であれば良い。そこで、すべてのエージェントの持つ議事的重要度を9とし、時間帯にコストが存在する時、そのコストを1~9とした。図3に示したとおり、最適な場合は説得なしの場合よりも30%程度改善できている。さらに最適な場合は説得ありの場合よりも5~10%程度改善できている。すなわち、議事に対する重要度が時間帯に対するコストよりも大きければ大きい程、議事のスケジューリングは成功しやすいことが分かる。これはユーザにとって大事だと思われる議事が集まった会議ほど説得による効果が得られやすいことを示す。以上の実験から、議事スケジューリングにおいて、本論文で提案した交換条件の提示に基づく説得を用いた合意形成は、説得を用いない合意形成よりも議事スケジューリングの成功率を改善できることが分かった。

## 5. 考 察

本論文で提案した説得の方法についての考察を以下に示す。妥結点*s*が満たすべき公準[16]として、個人

合理性, パレート最適がある.

個人合理性: 利得ベクトル  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  が次の条件を満たす時,  $x$  は個人合理的であるという. すなわち,  $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  を基準点とすると,  $x_1 \geq c_1, x_2 \geq c_2, \dots, x_n \geq c_n$ .

パレート最適 (共同合理性):  $x$  が実現可能集合  $S$  に含まれる要素の一つであり,  $x$  の 1 つの成分を減少させることなしに, 他の成分を増加させることができないようなベクトルであるとき,  $x$  はパレート最適という.

まず説得による方法で, 説得が成功した場合に得られる妥結点は個人合理性を満たす. 説得が成功したとき得られる妥結点  $s$  では各エージェント  $i$  の利得は必ず 0 以上である. ここで利得ベクトルは  $x = (x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0)$  である. 交渉の基準点は  $c = (c_1 = 0, c_2 = 0, \dots, c_n = 0)$  であるから,  $x_1 \geq c_1, x_2 \geq c_2, \dots, x_n \geq c_n$  を満たすので個人合理性を満たす.

説得による合意形成によって得られる妥結点  $s$  は, 実現可能集合  $S$  の中の一つの要素であるが, 必ずしもパレート最適とは限らない. 実際の議事のスケジューリングにおいては, 必ずしもパレート最適なスケジュールを得ようとしているわけではない. また, 一般にパレート最適解を見付けるためには非常に大きなオーダーの解空間を探索しなければならない. そこで, 本論文ではヒューリスティックな方法を導入することによって, すべての解空間の探索は行わず, 無理にパレート最適なスケジュールを得ることを避けた. 本論文で提案した説得の手法では, エージェントはとりあえず最も価値の高い配置を交換条件として提示することによって最低限得られる効用の中で最も高いと期待できる効用を保持する. これは, 相手がどのような交換条件を提示しても自分が最低限得られる効用を保持して交換条件を提示する, という経済的な合理性に基づいた手法である.

4.1 節で説明した説得を用いた合意形成手法について以下に述べる. 本合意形成手法の (A)(B)(C) は, 契約ネットプロトコル[15]における「公示」「入札」, および「落札」に相当する. 本合意形成手法では, (A)(B)(C) で合意が得られない場合, (D)(E) において説得を行うことによってより多くの合意を得ることを試みる. 4.2 節の実験で示した通り, 説得を用いない場合 ((A)(B)(C) のみ) と比較して説得を用いた場合 ((A)(B)(C)(D)(E) ) の方がより多くの合意

が得られる.

## 6. 関連研究

エージェント間の交渉をゲーム理論を用いて説明した代表的な研究として, 文献[13]がある. 文献[13]では様々な交渉の領域における交渉方式について議論されている. 文献[13]では, 統合交渉プロトコルを提案しており, 競合状態になる場合において確率的なコイン投げの手法を用いて競合の解消を行う手法が挙げられている. 本論文では, 競合的な状況で交換条件を提案することによって合意を得るという手法を提案した.

ゲーム理論を用いたエージェントに関する研究の一つとして文献[9]は, 有限繰り返し囚人のジレンマゲームを例として, 行動選択による利得値の変化を繰り返しゲームに採り入れた. エージェントは, 現時点での損得と将来の時点での損得を重み付け評価し行動を選択する. 協調行動を生成できる単純な行動選択方法を提案している. つまり, 協調行動は利得値の変化と行動選択方法によって生成される. 本論文では, 協調行動を各エージェントが持つスケジュールを同じにすることとして捉え, 各エージェントが持つスケジュールを同じスケジュールにするための手法としての説得を提案した.

文献[12]では, マルチエージェントに基づくプランニングに関して, 合理主義エージェント間の共同プランを統合的に生成する共同プランスキームを提案している. 共同プランを生成する際, エージェントは効用最良均等原理に基づき効用を均等にするように行動する. 本論文で提案した説得では, 各々のエージェントは自分が最低限得られる効用を保持しながら行動する.

交渉において相手の効用についての知識がない場合について考察したが, あるエージェントが他のエージェントの好みを学習する方法も研究されている. Buiら[1]の研究では, エージェントは初期状態において他のエージェントの好みの知識を持たないが, 統計的手法を用いて他のエージェントの好みを学習していく. 本論文で提案した手法に学習によって相手の効用を予想するような仕組みを導入することもでき, 今後の課題とする.

逐次的な意思決定プロセスにおける交渉プロセスを定式化し, その上で学習メカニズムを提案している研究もある[18]. 2 エージェント間の交渉において, 提案と提案に対する受理または拒否が繰り返される. 文献[18]と異なる本論文の主張点は, 2 エージェントが

交換条件を出し合い，相互の受理が得られた時点で説得が成功する点である．

## 7. おわりに

本論文では，エージェント間の協調的なスケジューリングをゲーム理論の協力ゲームにおける交渉問題として定式化した．そして協調的なスケジューリングを解決するための手法として説得による手法を提案した．本論文で提案した説得では，エージェントは自分にとってとりえず最も価値の高い交換条件を提示することによって最低限得られる効用の中で最も高いと期待できる効用を保持する．説得の有用性を示すために，協調スケジューリングの例として議事のスケジューリングを挙げた．さらに実験を行うことにより，議事スケジューリングにおいて交換条件の提示に基づく説得を用いた合意形成によって，説得を用いない場合よりも議事スケジューリングの成功率を改善できることを示した．

謝辞 貴重なコメントを頂いた査読者の方々に感謝いたします．

## 文 献

- [1] Bui, H. H., Kieronska, D. and Venkatesh, S., "Learning other agents' preferences in multiagent negotiation," Proc. of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence(AAAI-96), pp. 115-119, 1996.
- [2] 石田亨, "エージェントを考える," 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 663-667, 1995.
- [3] Ito, T. and Shintani, T., "Implementing an agent negotiation protocol based on persuasion," Proc. of the Second International Conf. on Multiagent Systems (ICMAS-96), AAAI Press, p.443, 1996.
- [4] Ito, T. and Shintani, T., "Persuasion among Agents : An Approach to Implementing a Group Decision Support System Based on Multi-Agent Negotiation," Proc. of the Fifteenth International Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-97), Morgan Kaufmann, pp. 592-597, 1997.
- [5] 伊藤孝行, 新谷虎松, "マルチエージェントにおける説得に基づく会議スケジューリングについて," 第28回人工知能基礎論研究会資料 (SIG-FAI-9603), pp. 80-85, 1997.
- [6] 伊藤孝行, 新谷虎松, "グループ代替案選択支援システムにおけるエージェント間の説得機構について," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 10, pp. 2780-2789, 1997.
- [7] 金淵培, "エージェント技術の現状と実用化," 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 850-860, 1997.
- [8] 草野耕一, "日本人が知らない説得の技法," 講談社, 1997.
- [9] 松原繁夫, 横尾真, "繰り返しゲームにおいて協調行動を生成する先読み型行動選択方法," 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 881-890, 1997.

- [10] 村上国男, "マルチエージェントシステムとその応用," 電子情報通信学会誌, 電子情報通信学会, Vol. 78, No. 6, pp. 570-577, 1995.
- [11] 村上国男, "機械エージェント間の合意形成システム," 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 6, pp. 697-700, 1993.
- [12] 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, 1994.
- [13] Rosenschein, J. and Zlotkin, G., "Rules of Encounter," The MIT Press, 1994.
- [14] Saaty, T., "The analytic hierarchy process," McGraw Hill, 1980.
- [15] R. G. Smith, "The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver," In IEEE Transaction on Computers, No. 12 in C-29, pp. 1104-1113, 1980.
- [16] 鈴木光男, "新ゲーム理論," 勁草書房, 1994.
- [17] 柳沢洋, 村上国男, "マルチエージェントシステムの合意形成方式," 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 6, pp. 1387-1395, 1995.
- [18] Zeng, D. and Sycara, K., "Benefits of Learning in Negotiation," Proc. of Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-97), pp.36-41, 1997.

(平成年月日受付, 月日再受付)

## 伊藤 孝行 ( 学生員 )

平成7年名古屋工業大学工学部知能情報システム学科卒業．平成9年同大学大学院工学研究科電気情報工学専攻博士前期課程修了．現在, 同大学院工学研究科電気情報工学専攻博士後期課程2年在学中．マルチエージェントシステム, グループ意思決定支援システムに興味を持つ．AAAI, 情報処理学会, 人工知能学会各学生会員．

## 新谷 虎松 ( 正員 )

昭57東京理科大学大学院修士課程修了．同年富士通(株)国際情報社会科学研究所入所．知識情報処理, 論理プログラミングなどの研究に従事．現在, 名古屋工業大学知能情報システム学科助教授．工学博士．分散人工知能, 意思決定支援システム, ヒューマンインタフェースの研究に従事．AAAI, 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会, 人工知能学会各会員．