

マルチエージェントシステムの合意形成方式

柳 澤 洋[†] 村 上 国 男[†]

マルチエージェントシステムを、集団における人間の知的生産活動を支援するグループウェアなどのインフラストラクチャとして捉え、エージェント相互の合意形成方式について検討する。まず、人間の組織活動を支援するエージェントとその行動をモデル化する。次に、この基本機能の一つとしてマルチエージェント環境下における合意形成メカニズムの二つの方式、投票方式と交渉方式を提案する。最後に、集団活動の代表例として企業における社内会議日程の設定を支援するシステムを構築し、提案した合意形成方式の有効性を評価する。

Some Mutual Agreement Mechanisms for Multi-agent Systems

YOU YANAGISAWA[†] and KUNIO MURAKAMI[†]

This paper describes some mutual agreement mechanisms for multi-agent systems which are considered as infrastructure of cooperative systems such as groupware. At first, agents, which support group works, and their behavior are formulated. Next, two mutual agreement mechanisms, which are a voting mechanism and a negotiating mechanism, are proposed for multi-agent system. Finally, described are some evaluation results based on an experimental system in the case of deciding the date of meeting.

1. はじめに

最近、人間の組織活動をコンピュータによって支援するシステムとしてグループウェアが注目を集め、その構築のための基本技術の研究・開発が精力的に推進されている。すでに、いくつかの成果が報告され、システムの提案もなされている^{1),2)}。

一方、分散人工知能の分野では、集団における人間の知的行動やインタラクションによる協調作業をマルチエージェントシステムとしてモデル化し、問題解決能力を持つ知的エージェント間の相互干渉やエージェント自身の振舞いの研究を進めている³⁾⁻⁶⁾。

通常、組織活動における人間の知的行動は、メンバー間の協調を前提として進められる。協調過程では、各メンバーは、当該時点までに知り得た情報をもとに相手の価値判断基準や今後の行動計画を推論し、この推論結果をもとに協調の枠組の中で自己の取る最適な行動を決定する。人間の組織的な知的生産活動をコンピュータで支援する場合、人間同士の協調動作をどのようにモデル化し、コンピュータ上にどのようなメカニズムとして実現するかは重要な研究課題である。しかし、

現時点では、応用分野における事例研究の蓄積や解析も不十分であり、共通メカニズムとしての合意形成方式の確立までには至っていない^{7),8)}。この観点から、グループウェアと分散人工知能の研究交流は、今後の研究展開にとって極めて重要である。

本論文では、グループウェアを構築するシステムの枠組を、人間とエキスパートシステムで構成されるエージェントが協調作業を行うマルチエージェントシステムとして捉える。そして、グループメンバー間の協調動作をエキスパートシステムによる機械系通信によって支援するメカニズムについて検討する。まず、人間の組織活動を支援するエージェントをモデル化し、次に、このエージェントの基本機能の一つとしてマルチエージェント環境下における合意形成メカニズムの二つの方式、投票方式と交渉方式を提案する。最後に、企業における社内会議日程の設定を支援するシステムを例にとり、システム構築を通じて本論文で提案した合意形成方式の有効性を評価する。

2. 組織活動支援のマルチエージェントシステムモデル

2.1 マルチエージェントシステム

本論文におけるマルチエージェントシステムは、($m+1$) 個のエージェントの集合 $A = \{A^0, A^1, \dots, A^m\}$ か

[†] 神奈川大学大学院理学研究科
Graduate School of Science, Kanagawa University

ら成り、問題の原案を設定する一つの問題提起エージェント A^0 と、提起された問題に対して交渉や情報交換によって解を求める問題解決エージェント $A^1 \sim A^m$ とによって構成される。本論文では、エージェントの応用分野として、人間の集団作業としてのグループウェアを支えるエージェントを考える。各エージェントは、知的生産活動を行う人間とこれを支援するエキスパートシステムから成り、エキスパートシステム間で相互に交渉や情報交換を行うことができる。ただし、他のエージェントの持つ資源や行動パターンについて情報を持っておらず、協調の必要が生じた局面で相互の情報交換や交渉を行わなければならない。

エージェントには、合意を形成するために使用することのできるオペレータの集合が対応している。すなわち、問題解決エージェントは、指定された合意形成方式ごとに許容されるオペレータ集合の中から状況に応じてオペレータを選択し、相手エージェントとの交渉およびそれに必要な付帯処理を行いながら合意できる解を模索する。

2.2 エージェント間の協調行動と合意形成

エージェントの協調行動は、協調目的の観点から二つに大別することができる⁷⁾。

第一は、各エージェントが、各々独立な自分自身の目的を達成するために、システム内の共通資源を確保する際に必要となる協調行動である。この協調行動における合意形成は、自己の利害を第一に考えつつ他のエージェントと折り合いをつけながら、複数の資源から各エージェントにとって最も適当であると思われる資源を選択するプロセスである。

第二は、各エージェントが目的を共有する他のエージェントと共に、組織全体の制御プランを生成する際に必要となる協調行動である。この協調行動における合意形成とは、共通の目的を達成するために、与えられた制約条件下で各エージェントがとるべき行動計画を設計し実行するプロセスである。

本論文では、特に前者の協調行動に関し、エージェントを構成するエキスパートシステム間の機械系通信によって合意形成を支援するメカニズムを検討する。

グループウェアなどの個別の応用システムを構築するインフラストラクチャとしてマルチエージェントシステムを考え、マルチエージェントにおける合意形成の位置付けを図1のように捉える。合意形成の層では、エージェント相互で協調行動のための交渉を行う。下層のエージェント間通信の層は、交渉などの合意形成のプロトコルを管理し、実際に通信回線を経由して、エキスパートシステム間通信を行う部分である⁸⁾。

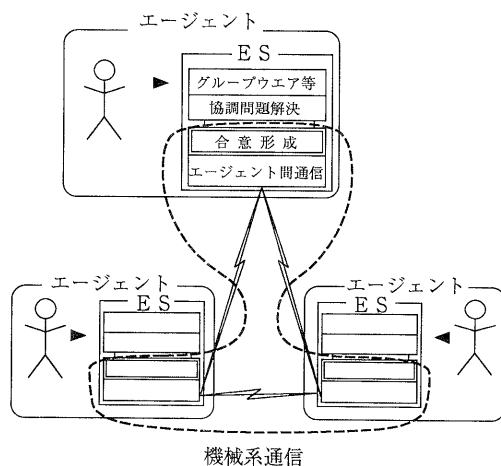


図1 マルチエージェントシステムにおける合意形成
Fig.1 Mutual agreement mechanisms for a multi-agent systems.

2.3 組織のモデルと責任権限のモデル

交渉等の協調動作のメカニズムを検討する場合、他エージェントとの相互関係およびエージェントが問題解決に持つ責任権限のモデル化は重要である。人間の集団には、上下関係のような組織内関係が存在するとし、この関係をエージェント相互の階層的なレベルとしてモデル化する。各レベル間には、組織内関係を表す組織固有の距離が設定されているものとし、このレベル間の距離をエージェント間の相対関係を表現する指標と考える。

また、問題解決エージェントには、問題に対応して各エージェントの責任権限が設定される。各エージェントの責任権限の差は、問題提起時に外部パラメータとして設定するか、もしくは、これを組織のレベルに対応して設定する。これによって、各エージェントは、問題解決に際し責任権限を反映した行動を取ることができる。

2.4 エージェントの行動モデル

エキスパートシステムによる合意形成を検討対象としているので、以下では、特に断らない限り、エージェントとは人間を除くエキスパートシステムを表すものとする。

問題提起エージェントが合意を形成すべき課題として、問題 $Problem \langle T, PW, B \rangle$ をすべての問題解決エージェントに提示する。ここで、

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$$

$$PW = \{pw^1, pw^2, \dots, pw^m\}$$

であり、 T は (解となりうる) 候補の集合、 pw^i はエージェントに与える責任権限、 B は合意形成を行う手

表 1 エージェント A^i の候補集合
Table 1 Proposed set of agent A^i .

| 候補 | 重要度 |
|----------|----------|
| t_1^i | w_1^i |
| \vdots | \vdots |
| t_n^i | w_n^i |

段（交渉や投票）である。

問題解決エージェント A^i を、三つ組 $\langle T^i, R^i, O^i \rangle$ で表現する。ここで、

$$T^i = \{t_1^i, t_2^i, \dots, t_n^i\}, \quad T^i \subseteq T$$

$$R^i = \{r_1^i, r_2^i, \dots, r_j^i\}, \quad i \neq j$$

$$O^i = \{o_1^i, o_2^i, \dots, o_k^i\}$$

であり、 T^i は各エージェントの候補集合、 R^i は A^i と他の問題解決エージェントとの二者間関係の集合、 O^i は A^i が使用可能なオペレータの集合である。

問題解決エージェント A^i は、候補集合 T^i の h 番目の候補 t_h^i に対し、自己の価値体系に基づく重みを付与することができる（表 1）。すなわち、各エージェントの合意形成プロセスにおける判断は、候補に対するこの重要度（価値）の設定に依存する。この価値体系に基づく判断には、組織のすべてのエージェントが等しい側面と、個々のエージェントで異なる側面とが存在する。エージェント間の価値体系が等しいということは、各エージェントが同一の候補に対して付ける重要度が等しいことを意味し、価値体系が異なるということは、各エージェントが同一の候補に対して付ける重要度が異なるということの意味する。

また、エージェント i から見たエージェント j の相対関係（ i から見た j の上下関係の程度）を、

$$r_j^i = f(p(\text{position}^i), p(\text{position}^j), a_j^i)$$

で表す。関数 f は、各エージェントのレベルを組織固有の大きさにマッピングする関数であり、 position^i とは、組織情報によって定義されるエージェント i のポジションである。また、 a_j^i は、エージェント i と j に固有の個別関係を表す。一般に $r_j^i \neq r_i^j$ である。

今、問題解決エージェント間の合意形成によって、候補 t_x が解として設定されたとする。このとき、エージェント A^i が被る損失コスト c_x^i を候補 t_x の重要度 w_x^i の関数で定義する。

$$c_x^i = g(w_x^i)$$

さらに、候補 t_x が解として設定された場合に組織全体が被る損失コスト C_x を、エージェントが組織に占める重要度 $p(\text{position}^i)$ と、各エージェントの損失コスト c_x^i の関数の和、

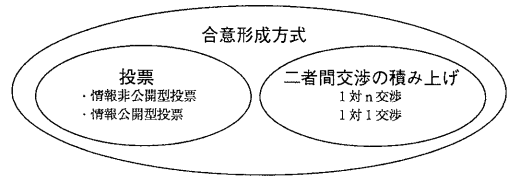


図 2 合意形成方式

Fig. 2 Two mutual agreement mechanisms.

$$C_x = \sum_{i=1}^m h(c_x^i, p(\text{position}^i))$$

で定義する。

以上のモデルを用いると、マルチエージェントにおける合意形成は、問題解決エージェント間の交渉や情報交換を通じて、各エージェントが各々の損失コスト c_x^i を考慮しつつ、できる限り組織全体の損失コスト C_x の小さい候補 t_x を求めること、と定義することができる。

3. 合意形成方式

二つの合意形成方式を提案する（図 2）。第一は、エージェントが独立に自分に都合の良い候補を宣言し合う「投票による合意形成」方式である。第二は、二者間交渉をもとにこの交渉結果の積み重ねで全体の合意を形成する「交渉による合意形成」方式である。

3.1 合意形成問題とマルチエージェントシステム

組織内の会議日程調整問題を例として取り上げ、合意形成問題とマルチエージェントシステムの関係について述べる。

独自の予定に従って行動するメンバのスケジュール調整を、エキスパートシステム間の情報交換と交渉によって行うマルチエージェントシステムを考える。

日程調整は、会議設定を提起する主査エージェント A^0 が会議開催可能な複数の日 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ （候補日）をメンバエージェント $A^1 \sim A^m$ に提示し、メンバエージェントが何度かの相互交信によって会議開催日を設定する合意形成プロセスと考えることができる。

日程調整における合意形成でも、エージェントの組織内の関係およびエージェント間の個人的関係が重要になる。上司と部下とで合意形成を行う場合、部下は上司の意見を無視することは困難であろうし、上下関係がない場合でもメンバ間の個人的関係が合意形成に与える影響は無視できない。

3.2 候補の提示単位

合意形成は、エージェント A^i が自分の解候補集合 T^i の各要素を合意候補として提案し、他エージェントとの妥協点を見出すという作業である。解候補を自

己の価値体系にしたがってどのようにグループ化し、自己に都合の良い提案をどのような形で提示するかは、合意形成の方式を検討する上で極めて重要である。そこで、合意形成方式を検討するに当たって、まず、提示候補の単位について考察する。ここでは、二つの提示候補単位（単一提示および等重要度セット提示）を設定する。

(1) 単一提示

問題提起エージェントが提示した候補集合の各要素に対し、問題解決エージェント A^i がその判断によって重要度を付与しこれを昇べきの順に並べ替えた系列を A^i の重要度順系列 q^i として定義する。

$$q^i = \langle q_1^i, q_2^i, \dots, q_k^i \rangle$$

ここで、 $q_j^i = (t_j^i, w_j^i)$, $t_j^i \in T$ であり、 $j \leq k$ とすれば、 $w_j^i \leq w_k^i$ である。

この時、エージェント A^i の候補集合は、 q_j^i の集合として $T^i = \{q_1^i, q_2^i, \dots, q_k^i\}$ と表現できる。

単一提示方式は、重要度順系列に従って毎回1候補を提示する方式である。

(2) 等重要度セット提示

各 q_j^i について、重要度が等しい候補をまとめて T^i の部分集合とし、これらの部分集合を重要度の昇べきの順に並べて得られる系列をエージェント A^i の等重要度セット系列と定義する。

$$Q^i = \langle Q_1^i, Q_2^i, \dots, Q_l^i \rangle$$

ここで、 $j \leq k$ であれば、 $q_j^i \in Q_j^i$, $q_k^i \in Q_k^i$ である任意の候補の組 q_j^i, q_k^i に対し、 $w_j^i \leq w_k^i$ が成り立つ。

等重要度セット提示方式は、等重要度セット系列に従って毎回1セットの候補を提示する方式である。

3.3 投票による合意形成方式

投票による合意形成の基本は、多数決による決定である。この方式では、投票権を持つ問題解決エージェントが、問題提起エージェントによって提示された候補集合に関して最も望ましい候補へ投票する。その結果、最も得票数の多い候補（集合）を解とし、そこで合意形成が完了したとする。

投票を行う場合、投票の途中結果をエージェントが参照できるか否かは、エージェントの投票候補の決定を左右する重要な点である。途中結果を参照しないで単純に投票を行う方式を非公開型投票方式と呼び、途中結果を参照し状況を考慮に入れて投票可能な方式を公開型投票方式と呼ぶ。

3.3.1 非公開型投票方式

問題提起エージェントが、 $\text{Problem} \langle T, PW, \text{非公開投票方式} \rangle$ を提示することによって起動される。

ここで、非公開型投票方式の指定は、候補の提示単

位の指定を入力パラメータとして持つ。

エージェントは、投票案作成オペレータを使用して投票案を作成しすべての票を一度に投票する。エージェントは、これで投票終了状態へと移行し、合意形成完了通知があるまで待機する。全エージェントが投票終了状態へ移行した後、投票結果について多数決論理を用い解を決定する。

この方式は、各々エージェントが自分の持つ情報のみ、すなわち、自分の都合のみを考えて投票を行う方式であり、組織全体の損失コスト C_x について最小の解を得ることは困難かもしれない。しかし、各エージェント相互の直接インタラクションを主体とする協調作業に大きなコストがかかる場合や、問題解決までの時間的な制約が厳しい（解決に与えられる時間が短い）場合には有効であると考えられる。

3.3.2 公開型投票方式

問題解決エージェントが、 $\text{Problem} \langle T, PW, \text{公開投票方式} \rangle$ を提示することによって起動される。

ここで、公開型投票方式の指定は、投票順序の提示と候補の提示単位の指定を入力パラメータとして持つ。

投票順に従い各エージェントは、状況評価オペレータによって現状を評価し、戦略策定オペレータを用いて評価結果をもとに投票戦略を設定する。次に、得られた投票戦略に従い投票案作成オペレータを用いて投票案を作成し投票を行う。すべての問題解決エージェントが全持ち票を投票したとき（投票の意志のある問題解決エージェントがなくなった場合を含め）、合意形成完了状態となる。

この方式では、各エージェントが現状を評価し戦略を設定するためオーバーヘッドが多くなるが、非公開投票方式に比べより多くのエージェントが納得できる合意形成を行うことが期待できる。また、組織全体の損失コスト C_x についてできるだけ最小の解を得るということに関しても、非公開投票方式と比べ良い結果をもたらすと予想される。

3.3.3 責任権限と投票戦略

投票方式では、エージェントの責任権限の反映、すなわち、各エージェント間の問題に対する責任権限の差をどのように表現するかが重要である。簡単には、各エージェントの持ち票数に責任権限の差を反映させる傾斜票方式が考えられるが、問題領域の特性に合わせた方式設定が必要である。傾斜票方式の例としては、各エージェント間の責任権限の差を組織におけるレベルの差と考え、それに応じて各エージェントの持ち票数に反映させることなどが考えられる。

また、情報公開型投票方式では、各エージェントが持ち票をどのように投票するか（投票戦術）が合意形成の結果を大きく左右すると考えられる。

3.4 交渉による合意形成方式

交渉形式による合意形成の基本単位は、2エージェントの交渉、すなわち、2エージェント間の直接インタラクションによる合意形成である。多数エージェント間の交渉による合意形成は、2エージェント交渉を基にそれを積み上げて行う。この積み上げ方法によって多くの決定方式を設定することができる。

3.4.1 2エージェント間の合意形成^{9),10)}

2エージェント間の交渉による合意形成は、次の各ステップの繰り返しで解を決定することである。まず、一方がその時点で最も都合の良い候補を相手に提案する。提案を受理したエージェントは、相手提案に対する評価結果や相手との二者間関係等を考慮しながら合意するか否かを決定する。合意できない場合は、理由を述べ新たな提案をする。

(1) 交渉行動に関する制約

問題解決エージェントが自由な行動を取ることが許されている場合には、交渉が収束することは保証できない。逆に、各エージェントの交渉行動に厳しい制約を課してしまうと、交渉それ自身が意味を持たないものになってしまう。ここでの合意形成方式は、必ず解を得ることを前提としており、交渉の決裂は許されない。そこで、合意形成のための交渉行動を、組織規律と呼ぶ最小限の行動制約を設定し、各エージェントが交渉時にこの組織規律を満たす行動をとることで交渉の決裂を回避する。

規律1：相手のアクションに対して沈黙してはならず、必ず何らかのアクションをとる。

規律2：相手の提案に反対の場合には、反対の理由を述べ対案を提案する。

規律3：対案は、新たな候補か、または、過去に相手が提案した候補から選定する。

(2) 相手提案の評価

相手提案の諾否の決定には、相手提案の評価が必要である。本システムのモデルでは、各エージェントは他エージェントの価値判断体系、すなわち、候補の重要度の設定尺度についての情報を持っていない。このため、提案を受理したエージェントは、相手の価値体系を推測しつつこの結果を評価し、自身の候補の重要度と比較しなくてはならない。

ここでは、相手提案を、自分の価値基準関数 θ で近似評価を行うこととする。エージェント j が提案した候補 t_j^i に対し、エージェント i から推定した候補 t_i^j の

重要度を $w_h^{(i)}$ とする。ここで、 $i=j$ ならば $w_h^{(i)}=w_h^i$ である。

$$w_h^{(i)} = \theta(t_i^j)$$

(3) 相互関係の評価

交渉過程では、相手エージェントとの組織内関係が大きな意味を持ち、交渉の帰結に重大な影響を与える。そこで、エージェント間の相互関係モデルを、前述の、

$$r_j^i = p(\text{position}^i) - p(\text{position}^j) + \alpha_j^i$$

を用いて交渉メカニズムに反映させる。

(4) 総合判断

エージェントは、異なる複数の視点からの評価に基づいて多角的な評価を行い、最終的に相手案に賛成するか反対するかを決定する。

本論文では、総合判断にもっとも影響を与える要因を、重要度順系列の一要素 q_h^i 、または、等重要度セット系列の一要素 Q_h^i の状態に対する重要度 w_h^i と、相手提案の評価結果 $w_h^{(i)}$ 、そして、交渉エージェント間の相対関係 r_j^i であるとし、これら以外をその他の判断要素 γ としてまとめ、この4変数による関数を考える。関数の評価結果がある値を満たした場合に、合意の意志表示を行う。

$$\text{総合評価値} = f(w_h^i, w_h^{(i)}, r_j^i, \gamma)$$

3.4.2 2エージェント間の交渉の手順

問題解決エージェントが $\text{Problem} \langle T, PW, \text{交渉方式} \rangle$ を提示することによって交渉が起動される。

ここで、交渉方式の指定は、交渉のスタートエージェントを入力パラメータとして持つ。

交渉をスタートさせるエージェントは、まず、提案作成状態となり、提案を作成しそれを送信する。もう一方のエージェントは、最初は、相手提案待ちの状態となる。相手提案を受けると提案内容を自分の判断基準で評価し、二者間の関係を考慮した上で受け入れるかどうか検討する。受け入れると判断した場合は、相手にその旨を伝え合意完了となる。逆に、相手提案に反対する場合は、必要に応じて戦略を再設定すると共に、新たな提案を作成し、反対理由を含めて相手へ送信する。エージェントの処理の流れを図3に示す。各状態間の遷移は、エージェントが利用可能なオペレータを用いることで実現される。

2エージェント交渉では、各々エージェントが損失コスト c_x^i を考慮しつつ提案を行い、相手エージェントはこれを評価して、必要なら逆提案を行うというステップを繰り返すことによって、組織全体としての損失コスト C_x をできる限り低く抑えることを狙っている。候補が極端に多い場合などは、提案や評価にコストがかかることもあり、時間制限のある場合などは、

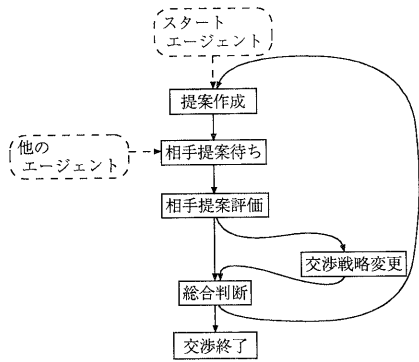


図3 交渉方式におけるエージェントの処理の流れ
Fig.3 Processing flow of agents.

詳しい評価を行うことができないために C_x が大きくなる可能性もある。

3.4.3 多数エージェント間の合意形成

2 エージェントのみのモデルでは、2 エージェント交渉の結果がそのまま最終的な解となるが、多数エージェント間にまたがる合意形成の場合、最終決定までに様々な方式が考えられる。

多数エージェント間の合意形成のための2 エージェント間交渉積み上げ方式として、問題提起エージェントが複数の問題解決エージェントとそれぞれ交渉しその結果を勘案して決定する方式と、問題解決エージェント間で2 エージェント交渉を行い、この結果を持ち寄り決定する方式を提案する。

(1) 1対n 交渉方式

この方式は、例えば、問題提起エージェントが組織内の主要な問題解決エージェントと交渉を行う1対n 個別交渉であり、投票方式における複数の候補に同じ数の票が集まった場合などにも応用できる。

複数エージェントと交渉しなければならないエージェントは、交渉順序に関する戦略も持ち、もっとも責任権限の重いエージェントからなどの順に交渉を行う。交渉結果を加味しつつ次のエージェントと交渉することも可能である。

(2) 1対1 交渉方式

この方式は、問題解決エージェント相互の2 エージェント間交渉を積み重ね、最終的に解を設定する方式である。

(a) トーナメント交渉：問題提起エージェントが交渉の組合せを指示し、組合せに従って問題解決エージェントが2 エージェント間交渉を行う。2 エージェント間交渉の方式で合意を形成し、どちらかを代表としてトーナメント形式で次のエージェントと交渉する。トーナメント交渉では、組合せ方法とトーナメン

表2 役職および重要度
Table 2 Positions and their weight.

| position | p(position) |
|----------|-------------|
| 課長 | 10 |
| 課長補佐 | 8 |
| 係長 | 5 |
| 主任 | 3 |

表3 イベント
Table 3 Example of events.

| | 外出 | 接客 | 会合 | その他 |
|-------|----|------|-----|--------|
| 組織行事 | 出張 | 顧客対応 | 会議 | その他の業務 |
| 私人的行事 | 旅行 | 来客 | 地区会 | 家族サービス |

トの途中結果の情報を次の交渉相手の場へ反映させる方法とが、解設定の重要な要因と予想される。

(b) 総当たり交渉：問題解決エージェント総当たりで2 エージェント交渉を行う。その結果を集計し解を設定する。

4. 例題による評価

3.1 節で述べた日程調整問題の例を用い、システムの構築を通して合意形成方式の有効性を評価する。

4.1 日程調整のモデル化

本例では、メンバは、他のメンバのスケジュールに関する情報を予め持ち合わせないとする。現実には、同一会議への出席や、出張によって、相互のスケジュールについて部分的に情報を持つことがあるが、ここでは、メンバ同士の協調作業、すなわち、交渉や情報交換によってのみ他のメンバのスケジュール情報を獲得することが可能であるとする。

4.1.1 組織およびメンバの責任権限のモデル

調整を行うメンバは、表2に示す役職と重要度で規定される組織に属すると考える。

メンバ i とメンバ j の二者間関係 r_j^i は、役職間の距離の差とメンバ i のメンバ j に対する個人的な関係を示す距離 a_j^i の和として定義する。

$$r_j^i = p(\text{position}^i) - p(\text{position}^j) + a_j^i$$

また、会議に対するメンバの責任権限の大きさを、役職によって規定される上下関係に対応して設定することとする。 position^i のメンバ i の責任権限の大きさ pw^i を関数 p の値とする。

$$pw^i = p(\text{position}^i)$$

4.1.2 価値体系のモデル

本例で用いたイベントは表3のとおりである。表3の行はイベントの公共性の程度を表し、列はイベント

表 4 メンバ i の行動予定表
Table 4 Schedule of member i .

| | 候補日 | イベント | 重要度 |
|----------|----------|----------|----------|
| s_i^1 | t_i^1 | e_i^1 | w_i^1 |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| s_m^i | t_m^i | e_m^i | w_m^i |

のカテゴリを表す。各メンバの合意形成プロセスにおける判断は、このイベントに対する重要性 w_h^i の認識、すなわち、イベントの集合に対する価値体系に依存すると考える。

企業の組織内では、その組織に関係するイベント(公的なイベント) に対してはすべてのメンバが同じような価値体系を持ち、私事(私的なイベント) に対しては各メンバが異なる価値体系を持つとする。

価値体系の差は、イベントのメンバ特有の重み付けによって表現される。

主査から指定された会議設定の候補日の集合に対するメンバ i のスケジュールを、候補日 t_h^i 、その日に予定されているイベント e_h^i 、その(イベントの) 重要度 w_h^i の三つ組で定義される行動予定 s_h^i の集合として表現する(表 4)。

4.1.3 エージェントの行動目標

本例では、エージェントの損失コスト c_x^i と、組織全体の損失コスト C_x を以下のように定義する。

$$c_x^i = w_x^i$$

$$C_x = \sum_{i=1}^m (c_x^i \times p(\text{position}^i))$$

日程調整における合意形成は、行動予定 s_h^i を基本情報とした交渉と情報交換を通じて、各々の c_x^i を考慮しつつ、できる限り C_x を最小とする候補日 t_x を求めることとなる。

4.2 システム構成

本システムは、主査エージェント、事務局エージェント、メンバエージェントから成り立っている(図 4)。事務局は、主査の事務的な手助けを行う機関で調整には一切関与できないとする。

4.3 評価

4.3.1 評価尺度の設定

損失コスト関数は、一般に応用分野ごとに定義される。本例では、最終決定結果の解の質についての評価を検証することとし、次の二つの尺度を設定した。解の最適性の程度を示す相対的乖離度 (D_r)、および、試行の中で最適日を得る割合 (F) である。ここで、最適な日とは、4.2.3 項で導入した組織全体の損失コスト C_x が最小となる候補日 t_x である。

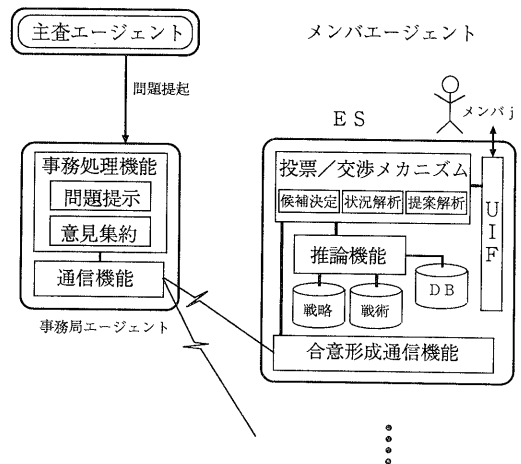


図 4 システム構成

Fig. 4 Configuration of experimental system.

表 5 提案単位の合意形成(投票方式)への影響
Table 5 Effects of proposal unit (vote).

| | 提示単位 | D_r | F |
|----------------|------|-------|-------|
| 提案対象 10/候補日 10 | 単一 | 0.254 | 35.1% |
| | セット | 0.254 | 35.1% |
| 提案対象 5/候補日 10 | 単一 | 0.279 | 32.9% |
| | セット | 0.166 | 43.2% |

いま、組織全体の損失コスト C_x を比較し、その昇順に対応する候補日を並べた以下のような系列 G を考え、これを(候補日) 適合度系列と呼ぶ。

$$G = \langle g_1, g_2, \dots, g_m \rangle$$

ここで、 $g_h \in T$ かつ $m' \leq m$ である。ただし、同損失コストは同添字を付すものとする。

次に、調整の結果得た日を g_x としたとき、 D_r を次式で定義し、評価には、その試行平均 $\overline{D_r}$ を用いる。

$$D_r = (x-1)/(m'-1), \quad m' \geq 2$$

4.3.2 投票方式の評価

以下では、10メンバ間での日程調整問題を50ケースを一つの単位(以後例題と呼ぶ)として作成し、1例題50ケースごとに $\overline{D_r}$ と F を求め比較を行った。

(1) 提案単位の合意形成への影響

表 5 は、提案対象数の異なる2組の例題を作成し、同一 position のメンバ間で合意形成を行った結果の一例である。ここで、提案対象数は、等重要度セット系列におけるセット数に等しい。

単一提示の場合、各メンバが都合の良い日を複数持っていたとしても1日しか宣言できないために票が分散してしまう。一方、等重要度セット提示では、それらのす

表 6 責任権限の合意形成 (投票方式) への影響
Table 6 Effects of agent's responsibility (vote).

| | \bar{D}_r | F |
|--------|-------------|-------|
| 均等投票 | 0.13 | 50.7% |
| 比例分割投票 | 0.10 | 53.2% |

表 7 情報公開の影響
Table 7 Effects of opening of information.

| | \bar{D}_r | F |
|-----------|-------------|-------|
| 情報非公開 | 0.17 | 43.2% |
| 公開 (戦術なし) | 0.17 | 43.2% |
| 公開 (戦術あり) | 0.12 | 45.1% |

べての日を一度に提案できるため複数メンバが妥当と考える日を設定しやすい。

この例でも明らかなように、等重要度セット提示は、単一提示よりも我々の感性に合った妥当なものといえる。よって、以下では、等重要度セット提示を基礎として各種の評価を行うこととする。

(2) 責任権限の効果

表 6 は、異なる position に属するメンバ間で、各メンバの position を持ち票数に反映させず試行 (均等投票) した場合と、各メンバの position を考慮し投票可能数に差をつけ試行 (比例分割投票) した場合の結果の一例である。

この結果から、position を持ち票数に反映させる方式が損失コストの少ない候補日を設定することに有効であることがわかる。position の持ち票数への反映は、グループメンバの構成によって定まるが、票の分割法などは各エージェントの戦術に属する事項である。

(3) 情報公開の効果

表 7 は、同一 position のメンバ間で、情報非公開型方式と情報公開型方式を試行した結果である。全メンバとも同じ投票戦術、すなわち、「自分の投票しようと考えている候補に対し、各候補のその時点までの得票数に比例して票を分割する」という戦術を使用した。

この結果から、公開投票方式では、途中結果を考慮した各エージェントの投票戦術が解の値を左右することがわかる。

4.3.3 二者間交渉方式の評価

以下では、2メンバ間の日程調整問題について 50 ケースを 1 例題とし、 \bar{D}_r と F を求めて比較を行った。

また、 $w_k^{(i)}$ は、 e_k^i と同種イベントに対して付与した重要度と同じとし、相対関係における個人的なつき合い α と総合判断のその他の判断要素 γ は無視した。最終的な総合判断では、

表 8 提案単位の合意形成 (二者間交渉) への影響
Table 8 Effects of proposal unit (negotiation).

| | 提示単位 | \bar{D}_r | F |
|----------------|------|-------------|-------|
| 提案対象 10/候補日 10 | 単一 | 0.016 | 90.0% |
| | セット | 0.016 | 90.0% |
| 提案対象 5/候補日 10 | 単一 | 0.008 | 96.0% |
| | セット | 0.004 | 98.0% |

表 9 責任権限の合意形成 (二者間交渉) への影響
Table 9 Effects of responsibility (negotiation).

| | \bar{D}_r | F |
|----------------|-------------|-------|
| position を考慮せず | 0.094 | 59.6% |
| position を考慮 | 0.069 | 70.7% |

$$\text{総合判断値} = w_k^i - w_k^{(i)} - \sigma r_j^i < 0$$

であれば合意するとした。ここで σ は、イベントに対して与えた重要度のなかの最低の重要度の値である。

本例では、およそ 3~4 回の交渉 (候補の提示) によって解が決定した。

(1) 提案単位の合意形成への影響

表 8 は、提案対象数の異なる 2 例題を作成し、同一 position のメンバ間で合意形成を行った結果の一例である。両者とも同一の交渉戦略を用いている。

提案単位をセットで行うことで、より最適な合意形成結果が得られる。候補日 10 に対し提案対象数が 10 ある場合、単一提示と等重要度セット提示同等の結果が得られる。

この例でも明らかなように、投票方式と同様に二者間交渉方式でも等重要度セット提示は、単一提示よりも妥当なものといえる。

(2) メンバの責任権限反映の影響

表 9 は、各メンバの position を総合判断で考慮した場合とそうでない場合を比較した結果の一例である。

結果として position を総合判断に反映させることで、より妥当な合意形成結果が得られた。

5. おわりに

マルチエージェントシステムを、集団における人間の知的生産活動をコンピュータで支援するグループウェアなどのインフラストラクチャとしてとらえ、エージェント相互の合意形成方式について検討した。

また、マルチエージェント環境下の合意形成メカニズムとして、投票方式と交渉方式を提案した。

さらに、集団活動の代表例として企業における社内会議日程の設定を支援するシステムを構築し、提案した合意形成メカニズムの有効性を評価した。

今後は、各エージェントの投票戦術や交渉戦略が最終結論に与える影響を定量的に評価すると共に、多人数間の二者間交渉の積み上げによる合意形成について実験的な評価を行っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 松下 温 (編著) : グループウェア入門, オーム社 (1991).
- 2) 石井 裕 : CSCW とグループウェア—協創メディアとしてのコンピューター, オーム社 (1994).
- 3) 石田 亨, 桑原和宏 : 分散人工知能(1) 協調問題解決, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 6, pp. 945-954 (1992).
- 4) 石田 亨, 桑原和宏 : 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).
- 5) Zlotkin, G. and Rosenschein, J. S. : A Domain Theory for Task Oriented Negotiation, *IJCAI '93*, pp. 416-422 (1993).
- 6) Lander, S. E. and Lesser, V. R. : Understanding the Role of Negotiation in Distributed Search among Heterogeneous Agents, *IJCAI '93*, pp. 438-444 (1993).
- 7) 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).
- 8) 村上国男 : コミュニケーション・ネットワークと人工知能, 電子情報通信学会研究会報告, AI93-40, pp. 31-38 (1993).
- 9) 柳澤 洋, 村上国男 : マルチエージェントによる

会議日程調整支援システム, 第7回人工知能学会全国大会, pp. 361-364 (1993).

- 10) 柳澤 洋, 村上国男 : 会議日程調整におけるエージェント間の合意形成方式, マルチメディア通信と分散処理研究会, pp. 31-36 (1993).
(平成6年8月30日受付)
(平成7年1月12日採録)



柳澤 洋 (学生会員)

1993年神奈川県立大学理学部情報科学科卒業。現在、同大学院理学研究科情報科学専攻修士課程在学中。分散人工知能に興味を持つ。人工知能学会会員。



村上 国男 (正会員)

1964年茨城大学工学部電気工学科卒業。工学博士。同年、日本電信電話公社電気通信研究所入所。以来、PL/1処理系、DIPS-1オペレーティングシステム、機能分散型計算機アーキテクチャ、分散型大規模データベースシステム、知識処理システムなどの研究開発に従事。この間、1982年から3年間、(財)ICOT 第一研究室長として出向。1990年4月、神奈川県立大学理学部情報科学科教授。電子情報通信学会、人工知能学会、日本ソフトウェア科学会、IEEE、ACM、AAAI各会員。