

自律型知識処理システムのネゴシエーションによる問題解決

Problem Solving by Negotiation among Autonomous Knowledge-Processing Systems

鈴木 英之進*¹ 堀 浩一*² 大須賀 節雄*² Pierre Morizet-Mahoudeaux*^{2,*3}
 Einoshin Suzuki Koichi Horii Setsuo Ohsuga

- * 1 東京工業大学工学部情報工学科
Dept. of Computer Science, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152, Japan.
- * 2 東京大学先端科学技術研究センター
Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo 153, Japan.
- * 3 コンピエーニュ工科大学
The University of Technology of Compiègne, 60206 Compiègne, France.

1992年11月6日 受理

Keywords: distributed artificial intelligence, negotiation, agent model, autonomous agents, knowledge-processing system.

Summary

Distributed expert systems have several advantages compared with ordinary expert systems. Research on such systems belongs to the field of cooperative problem solving, which is a sub-field of distributed artificial intelligence. Cooperative problem solving can be divided into three stages: (1) problem decomposition, (2) subproblem solution, and (3) answer synthesis. Several studies have addressed to the general domain-independent model of the first and second points. However, for the second and third points, most studies have addressed only specific cases of distributed expert systems and have insisted on the generality of their method. Few of these works have presented general domain-independent architectures and their implementation. In order to cope with this problem, we present CoKBS: an architecture for managing several autonomous knowledge-processing systems (called agents hereafter). CoKBS has been implemented with the metaphor of negotiation among human experts. In CoKBS, the solution to the problem at work is obtained after negotiation between the involved agents. The agent which is in charge of the problem at work selects two agents and the solution is obtained after a negotiation procedure has been carried out between the two agents. During the negotiation procedure each agent may update dynamically his beliefs, his perspective, his own model, as well as his model of the other agent. The behavior of the agent during the negotiation is determined by his set of meta rules and domain-independent meta rules are supplied by the system. The architecture has been tested on a simple application with an experimental system.

1. ま え が き

協調問題解決は、分散人工知能[Bond 88, Deen 91, Gasser 89]の一分野である[石田 92]。従来の人工知能のアプローチと比べた場合の協調問題解決の利点としては、開発と管理の容易さ、信頼性、計算時間の短縮などがあげられ、研究の進展が望まれている。また、協調問題解決の技術を用いた、分散型エキスパートシ

テムは、工学的応用の見地から有望であると考えられる。協調問題解決は、一般的に次の3段階に分割することが可能である[Smith 81]。①問題分割、②部分問題の解決、③部分解の合成。既存の協調問題解決に関する問題を考えると、①+②の分野では、契約ネット[Davis 83]と、その一般化であるマルチステージネゴシエーション[Conry 91]、あるいはPGP (Partial Global Planning) [Durfee 88]のように、領域に依存しない一般的な枠組みとその計算機システムを提供す

る研究が存在する。しかし、②+③の分野では、特定の分野において事例を示すことにとどまるもの（例えば、[Adler 89, Lander 91]）や、事例を示して方法論の一般性を主張することにとどまる場合（例えば、事例に基づく推論[Riesbeck 89]と複数の属性値からなる効用理論に基づく一般的なネゴシエーションモデル[Sycara 88, Sycara 89]）が多く、領域に依存しない一般的な分散型エキスパートシステムの枠組みと、計算機システムを提供するような研究は少ない。

したがって本稿では、②+③の部分問題の解決と部分分解の合成の段階を重視した、協調問題解決の領域に依存しない一般的な枠組み：CoKBS (Cooperating Knowledge-based Systems)を提案する。CoKBSは、分散型エキスパートシステムの原型となるものである。CoKBSは、複数の専門家の議論による問題解決を想定し、これを模擬することにより構築された。したがって、CoKBSの構成要素(以降、エージェントと呼ぶ)は、1人の人間に相当する程度にエージェントの粒度が大きい自律型知識処理システムであり、各エージェントはネゴシエーションによって視点を同調させ、問題解決を行う。また、エージェントのネゴシエーション中の振舞いを決定する戦略と、エージェントどうしの関係性を表現するエージェントモデルが考察されている。CoKBSには、2種類のエージェント—ユーザエージェントとエキスパートエージェント—が存在する。ユーザエージェントは、CoKBSのユーザの知的なヒューマンインタフェースである。1人のエキスパートエージェントは1人の専門家によって構築され、その専門家を表す。ユーザが入力したタスクは、ユーザエージェントによってエキスパートエージェントに発注され、2人のエキスパートエージェントのネゴシエーションによって解決される。

以降、2章では、エージェントの構成について述べる。3章では、CoKBSの問題解決モデルを説明する。4章では、実験システムを紹介する。最後に結論と課題を論じる。

2. エージェントの構成

現実世界での人間どうしの議論を想定することにより、エージェントに必要な資質が仮定された。それらの資質は、自律性（エージェントの粒度が大であること）と通信能力、そして信念体系、視点、自分・相手モデルの動的な管理である。本章では、以上のことを考慮に入れて、CoKBSのエージェントの構成について述べる。

2・1 KAUS

エージェントの基礎システムとして、KAUS (Knowledge Acquisition and Utilization System) [Ohsuga 89, Ohsuga 90]が用いられた。KAUSは、オブジェクトのデータ構造が表現できるように一階述語論理を拡張した論理型言語である。オブジェクトのデータ構造は構造定義文で記述される。KAUSでは、基本的には同一形式である複数のメタルレベルが使用できる。すなわち、オブジェクトを項とするオブジェクトルールはオブジェクトレベルの推論によって取り扱われ、オブジェクトルールを項とするメタルルールはメタルレベルの推論によって取り扱われる。また、オブジェクトルールの集合は「ワールド」と呼ばれ、ワールドもメタルルールの項になり得る。

2・2 エージェントの概要

エージェントの概要を図1に示す。エージェントは、KAUSのプログラムとIMBOXから構成される。IMBOXについては2・5節で説明する。エージェントの認識は「対象物をどのように表すか」と定義され、KAUS言話の構造定義文として表される。同様に、信念 ϕ は「エージェントの持つ知識」と定義され、オブジェクトルールとして表される。エージェントの認識と信念は完全に問題依存であり、問題に応じてインプリメントされる。

エージェントの視点Cは「推論に使用する信念の集

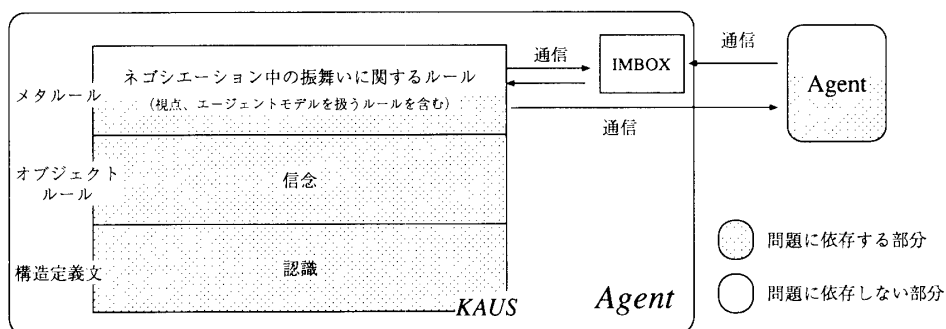


図1 エージェントの構成

合」と定義され、KAUS 言語のワールドとして表される。視点 C は、問題に応じて定義される基本的な副視点である素視点 PC_i の和集合として表される。

$$C \equiv PC_1 \cup PC_2 \cup \dots \cup PC_m$$

$$PC_i \equiv \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$$

各素視点 PC_i は、ユーザが指定した重要度 P_i を持つ。重要度が大きいほど、素視点は重要である。重要度の計算方法はメタルールとして登録される。視点とエージェントモデル (2.4 節にて説明) は、エージェントのネゴシエーション中の振舞いに関連する。エージェントのメタルールはネゴシエーション中の振舞いを決定するルールであり、視点やエージェントモデルを扱うルールを含む。これらのメタルールには問題に依存するルールと、依存しないルールが存在する。

エージェントは、他のエージェントからのメッセージとユーザからの入力を受けて、自己のメタルールに基づいて推論を行う。その際、オブジェクトルールとして表された信念、構造定義文として表された認識を用いて推論を行うこともあり得る。得られた結果はメタルールに従い、適切なエージェントにメッセージとして送信される。以上の意味において、エージェントは自律的知識処理機構を備えている。

2.3 動的な信念体系と視点の扱い

動的な視点はメタレベルの推論で実現した。すなわち、メタレベルの推論でオブジェクトレベルの推論の際に用いるワールド C (視点) を決定するのである。

$$C = MF(inputs)$$

ただし、 $inputs$ は入力、 $MF(X)$ はメタルールによる関数である。 $MF(X)$ は問題に応じてインプリメントされる。

動的な信念体系は KAUS の薬物設計への応用システムである DD-CHAUS [Suzuki 93] にならって、オブジェクトレベルとメタレベルの推論で実現した。例えば、信念の追加・削除はメタレベルからの操作で行われる。また、視点のもとにおける推論は、メタレベルで決定したワールド C におけるオブジェクトレベルの推論で行われる。

$$Ans = OF_c(inputs)$$

ただし、 Ans は解、 $OF_c(X)$ は C に属するオブジェクトルールによる関数である。 $OF_c(X)$ は問題依存であり、問題に応じてインプリメントされる。解 Ans は、解の重要度 PA_{Ans} を持つ。通常、解の重要度 PA_{Ans} の計算方法はメタルールで与えられている。メタルールが与えられていない場合は、解の重要度は解 Ans が真である素視点の重要度の和として計算される。

$$PA_{Ans} = \sum_i P_i$$

ただし、 $Ans = OF_{PC_i}(inputs)$ かつ $PC_i \subset C$ 複数の解 Ans_x が存在する場合、最も高い重要度を持つ解 Ans_h が選ばれる。

$$Ans_h = OF_c(inputs)$$

ただし、 $\forall Ans_x (PA_{Ans_h} \geq PA_{Ans_x})$

2.4 エージェントモデル

各エージェントは、自分および他エージェントのエージェントモデルを持つ。エージェントモデルを導入することにより、対象とするエージェントに応じて適切に振る舞うことが可能となり、問題解決の効率化や解の質の保証が行えると考えられる。本研究では、エージェントモデルを、能力度 (能力がある順に、+1, 0, -1) と協力度 (協調性がある順に、+1, 0, -1) からなる定義する。以降、 $agent_x$ が $agent_y$ に対して持つエージェントモデル、能力度、協力度をそれぞれ

エージェントモデル: $AM_{agent_x}(agent_y)$

能力度: $B_{agent_x}(ability, agent_y)$

協力度: $B_{agent_x}(cooperation, agent_y)$

と表す。エージェントモデルは動的であり、その更新方法はメタ知識として記述される。具体的な更新方法は 3.2 節で述べる。

2.5 エージェント間の通信

エージェント間の通信は、[Morizet - Mahoudeaux 92] で論じた方法を改良して用いる。通信機構を図 2 に示す。エージェントは、KAUS と IMBOX (Intelligent Mail BOX) から構成される。メッセージの発送は KAUS から行われ、メッセージの受信は IMBOX を通して行われる。IMBOX は、通常のメッセ

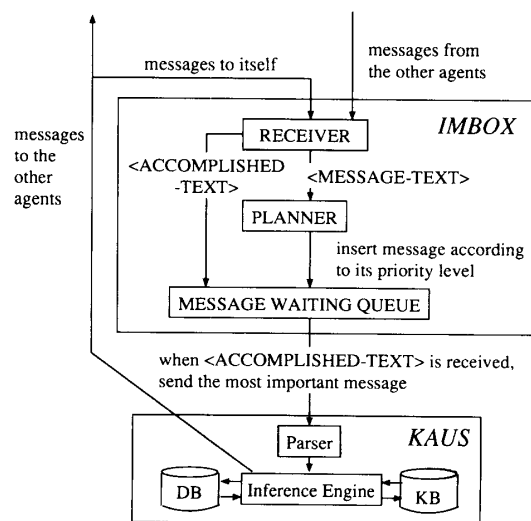


図 2 通信機構

```

<MESSAGE>:=<ADDRESSEE>*<ORIGINATOR><TEXT>
<ADDRESSEE>:=<MACHINE-ADDRESS>[SOCKET-ADDRESS]
<MACHINE-ADDRESS>:=Name_Station_1|Name_Station_2|...|Name_Station_n
<ORIGINATOR>:=<KBS-TYPE><MACHINE-ADDRESS>
[SOCKET-ADDRESS][PROCESS-ID]
<KBS-TYPE>= KAUS | SUPER
<TEXT>:=<ACCOMPLISHED-TEXT>|<MESSAGE-TEXT>
<MESSAGE-TEXT>:=<MSG-TYPE><MSG-KIND>[COMD][MSG-SIZE]
<MSG-TYPE>:=NORMAL | EMERGENCY | SLOW
<MSG-KIND>:=<SUBSCRIPTION-MSGKIND>|<ORDER-MSGKIND>
|<DISCUSSION-MSGKIND>| USER
<SUBSCRIPTION-MSGKIND>:= SUBSCRIBE | ORDER | ACCEPT | REJECT
<ORDER-MSGKIND>:= IMPOSSIBLE-REPORT
<DISCUSSION-MSGKIND>:= PROPOSE | AGREE | REFUTE | REFUTE-REASON
| SUPPORT-REASON | FINISH | REPORT
| QUARREL-REPORT | QUESTION | ANSWER
<ACCOMPLISHED-TEXT>:= ACCOMPLISHED

```

図3 高次プロトコル

ージである<MESSAGE-TEXT>を受信すると、そのメッセージの重要度を計算し、メッセージ待ち行列に挿入する。重要度は送り手の情報（名前、マシン名、メッセージのタイプ）と、メッセージの到着時刻から計算される。到着時刻はオペレーティングシステムにおける飢餓状態[Peterson 85]に相当する状態を防ぐエージング、という方法を利用するために必要である。KAUSは、一つのメッセージを処理すると、自分のIMBOXに<ACCOMPLISHED-TEXT>を送信する。IMBOXは<ACCOMPLISHED-TEXT>を受信した場合、メッセージ待ち行列中で最も重要度の高いメッセージを、担当するKAUSに渡す。通信機構はsocketシステムコールを用いてインプリメントされた。

また、Smithが定義した高次プロトコル[Smith 80]に相当する本機構のプロトコルを、図3に示す。ただし、非終端記号は“<”で囲まれており、終端記号は区切り文字なしで書かれている。また、議論に重要でない非終端記号は，“[]”で囲まれており、エージェントのローカル言語で埋められるスロットは，“{ }”で囲まれている。なくてもよいスロットの前には*が付いている。メッセージは送り先のエージェントADDRESSEE、送り主ORIGINATOR、メッセージの内容TEXTから構成される。ADDRESSEEはマシン名MACHINE-ADDRESSと、マシン上のエージェント名SOCKET-ADDRESSからなる。ORIGINATORは、MACHINE-ADDRESS、SOCKET-ADDRESS、知識処理システムのタイプKBS-TYPE、プロセス番号のPROCESS-IDから構成される。MESSAGE-TEXTは、メッセージの重要さMSG-TYPE、メッセージの種類MSG-KIND、KAUSによって直接処理されるメッセージのテキスト部COMD、テキスト部のバイト数MSG-SIZEから構成される。MSG-TYPEはEMERGENCY、NORMAL、SLOWの3種類あ

* 1 受注エージェントが2人であるのは、二者間の議論が基本的であり、しばしば観察されるからである。n人の受注エージェントを仮定するほうが一般的だが、各ステージの同期など、機構は複雑になる。

り、この順番にメッセージの重要性が高い。MSG-KINDはメッセージが問題解決モデル(3章)のどの段階に相当するかを示す。ただし、USERはユーザーエージェントにメッセージを送信するときに使用する。他のMSG-KINDが、どの段階で使用されるかは次章で示す。MSG-SIZEはIMBOXから知識処理システムCOMDを渡す際に、すべてを渡したかを確認するために必要である。

同期通信は、容易にデッドロックとライブロックを引き起こす[Peterson 85]。したがって、非同期通信のみが使用できる。プログラムレベルにおける通信の指定は、組込み述語を用いて行う。以下に、send述語(一対一通信)と、broadcast述語(一対すべて通信)のシンタックスを記す。ORIGINATORなどプログラム中に指定しないスロットは自動的に満たされる。

```

($send MSG-TYPE MSG-KIND COMD
MACHINE-ADDRESS SOCKET-ADDRESS)
($broadcast MSG-TYPE MSG-KIND COMD)

```

現在、14台のワークステーション（5台のSun3、5台のSun4、4台のSony News）が互いに通信できる。通信可能である計算機の数容易に拡張できる。

3. 問題解決モデル

3.1 全体の流れ

CoKBSの問題解決モデルを、図4に示す。エージェント間の点線はメッセージを表す。点線の近くにある文字列は、図3の高次プロトコルで定義されたメッセージの種類MSG-KINDである。ユーザがユーザーエージェントにタスクを入力すると、ユーザーエージェントはエキスパートエージェントにタスクを発注する(図では①)。発注に応じるエキスパートエージェントはユーザーエージェントに報告する(図では②)。ユーザーエージェントは、エージェントについての知識と報告の内容を利用して、タスクを発注する2人のエージェント*1を決定し、そのむね通知する。選考にもれたエージェントにも、そのむね通知する。ここまでのプロセスを入札フェーズと呼ぶ。選ばれたエージェントは、契約ネット[Davis 83]に見られるように、他のエキスパートエージェントに部分タスクを発注することもあり得る(図では③)。これを注文フェーズと呼ぶ。選ばれた2人のエージェントは議論(ネゴシエーション)を行い(図では④)、その結果をユーザーエージェントに報告する。これを議論フェーズと定義する。議論が物別れに終わったときの報告は、「物別れ報告」と呼ばれる。ユーザは出力結果を見て、再度タスクを入力し直すこ

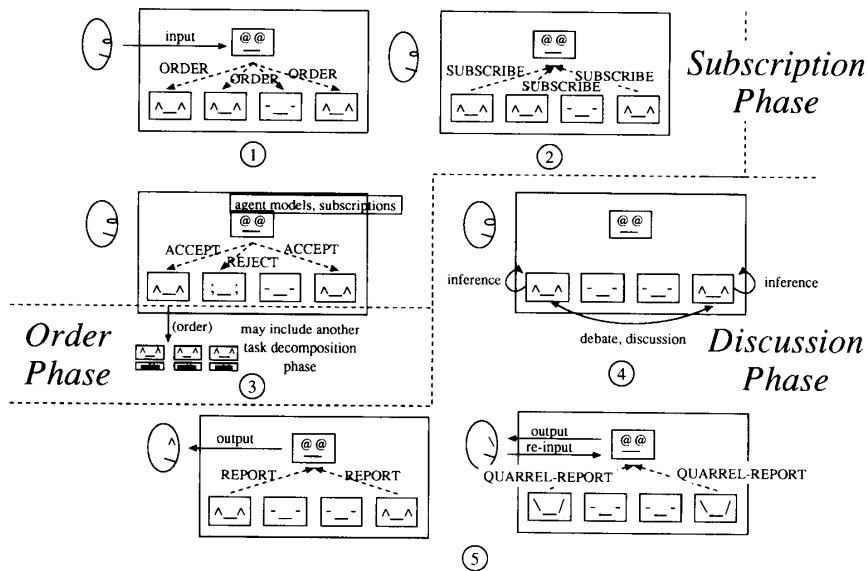


図4 問題解決モデル

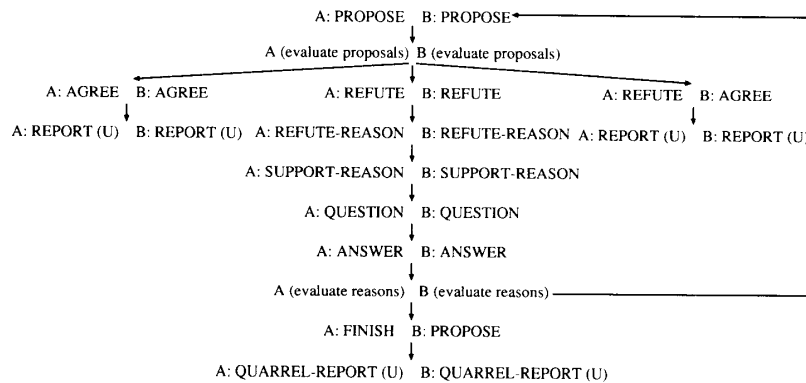


図5 議論フェーズ

ともあり得る(図では⑤)。

議論フェーズの概略を図5に示す。ただし、図中のA, Bは議論を行う2人のエキスパートエージェントを表し、図は、

A : *MSG-KIND* B : *MSG-KIND*
 (メッセージを送信する場合)
 A (inference) B (inference)
 (推論を行う場合)

の形式で記されている。メッセージの送信先は、通常は相手のエキスパートエージェントである。ただし、*MSG-KIND*の後に(U)がある場合は、タスクを発注したユーザーエージェントである。なお、自明な場合(例えば、A : AGREE B : REFUTE)は省略した。このプロセスではまず、各エージェントが自分の視点のもとで推論したタスクの解を提案しあう。そして、相手の提案を評価して賛成か反対かを表明する。片方でも賛成を表明すれば、賛成する提案を発注エージェントに報告して議論フェーズは終了する。2人とも相手の提案に反対の場合は、反対する理由と自分の提案が正当である理由を交換しあう。理由としては、視点を構

成する素視点を選ばれた。これは膨大な数の信念を交換するのは、非現実的であると考えられたからである。エージェントは反対理由、支持理由を知らなければ、相手に質問して素視点の重要度と解を得る。そして、(視点を変更して)再度提案をしあうか、物別れするかを決定する。

3・2 問題に依存しないネゴシエーション中の振舞いに関する戦略

2・2節で述べたように、エージェントのメタルールには問題に依存するルールと依存しないルールが存在する。例えば、入札フェーズ時にある特定の素視点を提案してきたエージェントを議論者として選択する、という戦略は問題依存であり、問題に応じてインプリメントされるメタルールである。そのようなメタルールをインプリメントする際の指標となることを目的として、CoKBSでは、ネゴシエーション中の振舞いを決定する問題に依存しない戦略をいくつか実装している。

入札フェーズでは、発注者であるユーザーエージェントが議論しあう2人のエキスパートエージェントを決

表1 入札フェーズ時に考慮されるパラメータ

表2中の表現	パラメータ
発注者への評判	$B_{Agent_x}(ability, Eagent_x) + B_{Agent_x}(cooperation, Eagent_x)$
自信	$B_{Agent_x}(ability, Eagent_x)$
他人への評判	$B_{Agent_y}(ability, Eagent_x) + B_{Agent_y}(cooperation, Eagent_x)$

表2 ユーザエージェントの入札フェーズ時の戦略

戦略名	戦略
SU11	発注者への評判が最も高い二人を選ぶ
SU12	自信が最もある二人を選ぶ
SU13	発注者への評判と自信の算術和が最も高い二人を選ぶ
SU14	発注者への評判と自信と他人への評判の算術和が最も高い二人を選ぶ

表3 エキスパートエージェントが入札時に報告する情報

戦略名	報告する情報
SU11	なし
SU12	$B_{Agent_x}(ability, Eagent_x)$
SU13	$B_{Agent_x}(ability, Eagent_x)$
SU14	$(\forall y) . AM_{Agent_x}(Eagent_y)$

表4 入札を決定する際のエキスパートエージェントの戦略

戦略名	戦略
SE11	もし自信が-1であれば、入札しない
SE12	常に入札する

定する。決定の際に考慮されるパラメータを表1に、決定方法として実装した戦略を表2に、エキスパートエージェントの報告内容を表3に示す。ユーザエージェントは表2の戦略のうちの一つを使用できる。ただし、 $Uagent$ はユーザエージェント、 $Eagent_x$ はエキスパートエージェントを表す。また、エキスパートエージェントが入札フェーズ時に利用できる戦略を表4に示す。なお、自信とは表1のそれを指す。エキスパートエージェントは、表4の戦略のうちの一つを使用できる。

注文フェーズでは、タスクを発注するエキスパートエージェントは入札フェーズにおけるユーザエージェントに相当し、タスクを受注するエキスパートエージェントは入札フェーズにおけるエキスパートエージェントに相当する。したがって、上記の入札フェーズの戦略が流用できる。

議論フェーズで、エキスパートエージェントは相手の提案を評価して賛成するか反対するかを決定する。実装した戦略を表5に示す。エキスパートエージェントは、表5の戦略のいくつかを同時に使用できる。ただし、SE23とSE24は併用することができない。また、このフェーズでエキスパートエージェントは、相手の理由を評価して自分の視点を変化するか、あるいは物別れをするかを決定する。表6は、実装した戦略である。エキスパートエージェントは、表6の戦略のいくつかを同時に使用できる。ただし、SE31、SE32、SE

表5 エキスパートエージェントの提案評価時の戦略

戦略名	戦略
SE21	相手の能力度が上であれば賛成する
SE22	提案回数があるしきい値を超えると、賛成する
SE23	相手と自分の提案がある程度一致すれば賛成する
SE24	相手と自分の提案が一致しなければ賛成しない

表6 エキスパートエージェントの理由評価時の戦略

戦略名	戦略
SE31	相手の能力度が上であれば相手と同じ視点を採用する
SE32	相手の視点を一部取り入れる
SE33	自分の視点を一部捨てる
SE34	自分の視点を決して変えない
SE35	提案回数があるしきい値を超えると、視点を変更する
SE36	提案回数があるしきい値を超えると、物別れする
SE37	相手の協力度が-1であれば、議論を打ち切る

表7 エキスパートエージェントのエージェントモデル更新戦略

戦略名	戦略
SE41	相手が質問に答えると、相手の能力度をインクリメントする
SE42	相手が前回と同じ提案を行えば、相手の協力度をデクリメントする
SE43	自分が妥協を行えば、相手の協力度をデクリメントする
SE44	物別れしたエージェントの解にユーザが満足すれば、自分の能力度をデクリメントし、相手のそれをインクリメントする
SE45	SE44の逆

表8 ユーザエージェントのエージェントモデル更新戦略

戦略名	戦略
SU41	ユーザが解に満足すれば、能力度をインクリメントする
SU42	ユーザが解に不満足であれば、能力度をデクリメントする
SU43	一方的に物別れをすれば、協力度をデクリメントする。ただし、ユーザが解に満足している場合を除く
SU44	一方的に物別れをされれば、協力度をインクリメントする。ただし、ユーザが解に不満足である場合を除く

33、SE35の各戦略はSE34と併用することはできない。エキスパートエージェントは、ネゴシエーションの相手のエキスパートエージェントのエージェントモデルを更新する。実装した戦略を表7に示す。

また、エキスパートエージェントからの報告とユーザの満足度から、ユーザエージェントはエキスパートエージェントのモデルを更新する。実装した戦略を、表8に示す。

4. 実験システム

4.1 実験システム概要

CoKBSの有効性を確認するために、ユーザの要求に対して最適の車を選択する実験システムを構築した。この問題は単純であるが、本稿の目的は一般的な協調問題解決の枠組みと計算機システムの提供にあるので、例として選ばれた。実験システムは14台のワークステーション(5台のSun3、5台のSun4、4台のSony News)を使用することができる。1台のワーク

ステーション上には、複数のエージェントが存在することが可能である。エージェントは車をオブジェクトとして表している。なお、人間どうしの実際の会話を観察した結果、反対理由、支持理由は提案した車のうちの1台について行われる。しかし、このことは本質的な問題ではなく、メタルールの変更により容易に他の方法に変えることができる。また、本システムでは注文フェーズは実現されていない。

4・2 エージェントの会話例

本節では、エージェント間の会話例を載せる。会話例の条件のうち重要なものを、表9～表13に示す。ただし、表12のEAはエキスパートエージェントを、UAはユーザエージェントをそれぞれ意味する。

図6に会話例1を示す。図中では一つの通信は、通信番号) 発信音：(受信音)MSG-KIND“COMD”という形式で記されている。ただし、四角で囲まれた通信については、発信するエージェント名と受信するエージェント名は四角の上部に記されている。MSG-KINDとCOMDについては、図3とその説明を参照されたい。なお、通信番号が同じである通信は前後関係が特定できないものである。これは、通信が非同期であるからである。車名は[]で囲まれており、素視点は{ }で囲まれている。また、メッセージCOMDはわかりやすいように日本語に直してある。以下、この会話例を簡単に解説する。ユーザエージェントの入札戦略がSU13であるために、各エキスパートエージェントは自分の自信を報告し(1)、発注者tamaへの評判と自信の算術和が最も高いebiと、hyouが議論を行うエージェントとして選ばれている(2)。ebiとhyouは独自の視点・信念・認識のもとで解を推論し、提案を行っている(3)。両者の提案は異なり、提案評価時の戦略はSE24であるので、両者は反対を表明する(4)。ebiは相手の提案した車の1台について、反対理由(その車が

表9 参加エージェント

エージェントの種類	エージェント名
ユーザエージェント	tama
エキスパートエージェント	ebi, hyou, kame, kaus1, kaus2, puma, tora, matu, naeba, manza, ootori, nme, zaoh

表10 エキスパートエージェントの自信

自信 ($B_{Eagent}(ability, Eagent)$)	エージェント名 (Eagent)
自信あり (+1)	ebi, hyou
自信なし (-1)	kaus1, manza, naeba, zaoh

表11 ユーザエージェントの信頼

信頼 ($B_{tama}(ability, Eagent)$)	エージェント名 (Eagent)
信頼あり (+1)	ebi, hyou, puma

推論できて、重要度が負である素視点すべて) を述べている(5)。hyouはそのような素視点を持たなかった(6)。反対理由は空白となっている(6)。支持理由は自分の提案した車の1台についてであり、その車が推論できて、重要度が正である素視点すべてである(7)。両者は相手の反対理由と支持理由の素視点を知らなかった(8)。そして、相手の質問に答えている(9)。両者は理由評価時の戦略としてSE32を採用している(9)。相手の素視点の一つを取り入れて自分の視点を変化する。すなわち、2・3節のCが変化(10)。今後は未知の素視点が多くなる(11)。hyouはSE43戦略を採用している(10)でebiの素視点を取り入れた際にebiの協力度をデクリメントしており、

$$B_{hyou}(cooperation, ebi) = -1$$

となっていた。したがって、SE37戦略より、議論を打ち切り(12)、物別れの報告を行っている(13)。ebiはhyouが議論打ち切りの原因であることも併せて報告している(14)。

図7に会話の続きを示す。ユーザは物別れの報告を受けて、結果に不満足であることをユーザエージェントに伝えた(15)。したがって、SU43戦略より、tamaのhyouへの信頼はデクリメントされ

$$B_{tama}(cooperation, hyou) = 0$$

となった。したがって、今回はpumaとhyouの条件(発注者tamaへの評判と自信の算術和)が同じとなり、ebiとpumaが選ばれた(16)。(17)では4回提案が行われている。両者はSE32戦略によって相手の素視点の一つずつ取り入れていき、最終的に両者の提案は一致する。SE24戦略より、両者は賛成を表明し(18)、tamaに報告を行っている(19)。

表12 エージェントの戦略

戦略の種類	戦略
UAの入札の戦略	SU13
EAの入札の決定戦略	SE11
EAの提案の評価戦略	SE24
hyou以外のEAの理由の評価戦略	SE32 (相手の素視点の一つを取り入れる)
hyouの理由の評価戦略	SE32 (相手の素視点の一つを取り入れる)、SE37
hyou以外のEAのエージェントモデル更新戦略	SE41
hyouのエージェントモデル更新戦略	SE41, SE43
UAのエージェントモデル更新戦略	SU41, SU42, SU43

表13 エキスパートエージェントの視点を構成する素視点

エージェント名	素視点名
ebi	{low_price}, {small_room}, {fear_accident}
puma	{rather_expensive}, {cheap}, {common_car}, {not_expensive}, {not_speedy}
hyou	{nice}, {speedy}, {expensive}

入札フェーズ

- 1) tama: (全員) ORDER "良い車を選ぶ議論をします。入札戦略はSU13です"
- 2) ume, puma, kame, ootori, kaus2, matu, tora: (tama) SUBSCRIBE "自信は0です" (1)
- 2) hyou, ebi: (tama) SUBSCRIBE "自信は1です" (1)
- 3) tama: (ume, puma, kame, ootori, kaus2, matu, tora) REJECT (2)
- 4) tama: (hyou) ACCEPT "ebiと議論しなさい" (2)
- 4) tama: (ebi) ACCEPT "hyouと議論しなさい" (2)

議論フェーズ

ebi: (hyou)

hyou: (ebi)

- 5) PROPOSE "[civic today mira fx familia]" (3)
- 6) REFUTE (4)
- 7) REFUTE-REASON "[prelude] は{ small_room fear_accident }だ" (5)
- 8) SUPPORT-REASON "[civic] は{ low_price }だ" (7)
- 9) QUESTION "{ nice speedy expensive }" (8)
- 10) ANSWER "素視点 {low_price} のもとで解になるのは、[civic today mira charade city fx familia]です。重要度は4です" (9)
- 10) ANSWER "素視点 {fear_accident} のもとで解になるのは、[detsol beet skyline rx7 prelude cuptino z mr2]です。重要度は-4です" (9)
- 10) ANSWER "素視点 {small_room} のもとで解になるのは、[city cuptino beet skyline rx7 prelude z mr2 detsol charade]です。重要度は-2です" (9)
- 11) PROPOSE "[civic pajero today mira fx familia]" (10)
- 12) REFUTE
- 13) REFUTE-REASON "[rx7] は、{ fear_accident small_room }だ"
- 14) SUPPORT-REASON "[civic] は、{ low_price }だ"
- 15) QUESTION "{}" (11)
- 16) ANSWER "{}" (11)
- 17) PROPOSE "[pajero today mira fx familia civic]"

- 5) PROPOSE "[z skyline rx7 prelude]" (3)
- 6) REFUTE (4)
- 7) REFUTE-REASON "{}" (6)
- 8) SUPPORT-REASON "[prelude] は、{ expensive speedy nice }だ" (7)
- 9) QUESTION "{ low_price fear_accident small_room }" (8)
- 10) ANSWER "素視点 {nice} のもとで解になるのは、[z skyline rx7 prelude]です。重要度は5です" (9)
- 10) ANSWER "素視点 {speedy} のもとで解になるのは、[z skyline rx7 prelude]です。重要度は3です" (9)
- 10) ANSWER "素視点 {expensive} のもとで解になるのは、[z pajero skyline rx7 prelude]です。重要度は5です" (9)
- 11) PROPOSE "[skyline z prelude rx7]" (10)
- 12) REFUTE
- 13) REFUTE-REASON "{}"
- 14) SUPPORT-REASON "[rx7] は、{ nice speedy expensive }だ"
- 15) QUESTION "{}" (11)
- 16) ANSWER "{}" (11)
- 17) FINISH (12)

18) ebi: (tama) QUARREL-REPORT "[civic familia fx mira today pajero]がいいです。hyouが議論を中断しました" (14)

18) hyou: (tama) QUARREL-REPORT "[skyline z prelude rx7]" (13)

図6 会話例1

ユーザ: (tama)

ユーザによる再度入力

- 19) USER "結果には不満足です" (15)
- 20) USER "良い車を選ぶ議論をしなさい"

入札フェーズ

- 21) tama: (全員) ORDER "良い車を選ぶ議論をします。入札戦略はSU13です。"
- 22) ume, puma, kame, ootori, kaus2, matu, tora: (tama) SUBSCRIBE "自信は0です"
- 22) hyou, ebi: (tama) SUBSCRIBE "自信は1です"
- 23) tama: (ume, hyou, kame, ootori, kaus2, matu, tora) REJECT (16)
- 24) tama: (puma) ACCEPT "ebiと議論しなさい" (16)
- 24) tama: (ebi) ACCEPT "pumaと議論しなさい" (16)

議論フェーズ

ebi: (puma)

puma: (ebi)

- 25) PROPOSE "[civic pajero today mira fx familia]"
- 26) REFUTE
- 27) REFUTE-REASON "[mr2] は、{ fear_accident small_room }だ"
- 28) SUPPORT-REASON "[familia] は、{ low_price }だ"
- 29) QUESTION "{ rather_expensive not_expensive common_car }"
- 30) ANSWER "素視点 {low_price} のもとで解になるのは、[civic today mira charade city fx familia]です。重要度は4です"
- 30) ANSWER "素視点 {small_room} のもとで解になるのは、[city cuptino beet skyline rx7 prelude z mr2 detsol charade]です。重要度は-2です"
- 30) ANSWER "素視点 {fear_accident} のもとで解になるのは、[detsol beet skyline rx7 prelude cuptino z mr2]です。重要度は-4です"
- (中略) (17)
- 55) PROPOSE "[z pajero prelude rx7 skyline]"
- 56) AGREE (18)

- 25) PROPOSE "[detsol cefilo estima beet cuptino mr2]"
- 26) REFUTE
- 27) REFUTE-REASON "[familia] は、{ common_car not_expensive }だ"
- 28) SUPPORT-REASON "[mr2] は、{ rather_expensive }だ"
- 29) QUESTION "{ low_price small_room fear_accident }"
- 30) ANSWER "素視点 {rather_expensive} のもとで解になるのは、[detsol cefilo estima beet cuptino mr2]です。重要度は5です"
- 30) ANSWER "素視点 {not_expensive} のもとで解になるのは、[milia fx civic carina integra sx180 levin]です。重要度は3です"
- 30) ANSWER "素視点 {common_car} のもとで解になるのは、[legacy familia fx civic carina integra sx180 levin]です。重要度は5です"
- (中略) (17)
- 55) PROPOSE "[pajero z prelude rx7 skyline]"
- 56) AGREE (18)

57) ebi: (tama) REPORT "[skyline rx7 prelude pajero z]" (19)

57) puma: (tama) REPORT "[skyline rx7 prelude z pajero]" (19)

図7 会話例2

4・3 会話例の分析

前節と異なるさまざまな条件下で実験システムを動作させることにより、3・2節で説明した戦略が正確に動作することが確認された。しかし、CoKBSを一般的に評価することは困難である。なぜなら、エージェントの行動がメタルールの集合で決定され、エージェントの能力がオブジェクトルールの集合で決定されるために、考慮すべき条件が無数に存在するからである。ただし、複数の会話例を分析した結果、「良い」エージェントの振舞いは、現実世界における「良い」議論者の振舞いと同一であることが予想されている。すなわち、協力的に振る舞い、適切な長さの時間の議論を行うエージェントである。また、エージェントモデルを適切に利用することにより、「粗悪な」エージェントを排除できることも確認された。図7の会話例で、hyouが選ばれなかったのはその一例である。すなわち、hyouのように理由の評価戦略としてSE 32とSE 37、エージェントモデルの更新戦略としてSE 43の三つの戦略を同時に保有するエージェントは、視点を構成する素視点が異なれば必ず物別れし、建設的なネゴシエーションを行わないと考えられる。このようなエージェントはユーザエージェントのエージェントモデルを利用したSU 43戦略によって議論に参加できる機会を減らされる。現実の実用システムにおいては会話例のhyouのようにあらゆる問題に対して粗悪であるエージェントは存在しないものの、大規模な分散型エキスパートシステムにおいてはさまざまな振舞いをするエージェントが存在する可能性がある。したがって、解決すべき問題の文脈によっては「粗悪」となり得るエージェントも存在すると考えられる。現実世界からのメタファにより本論文のような手法を使用することは、一つの対応策であると筆者らは考える。

5. む す び

本稿では、複数の自律型知識処理システムがネゴシ

エーションによって視点を同調させ、問題解決を行う枠組みCoKBSを提案した。協調問題解決の分野で部分問題の解決と部分解の合成の段階を扱う研究では、領域に依存しない一般的な分散型エキスパートシステムの枠組みと計算機システムを提供するようなものは少ない。CoKBSはこの問題に対処するものである。

CoKBSの特徴としては、複数の専門家の議論による問題解決を想定し、これを模擬することにより構築されたことがあげられる。したがって、CoKBSでは、①ネゴシエーション中のエージェントの振舞いを決定する戦略、②エージェントモデル、の2点が議論・インプリメントされている。エージェントがネゴシエーション中に、システム、タスク、対象とするエージェントに応じて振舞いを変更することにより、問題解決の効率化や解の保証が行えると考えられる。CoKBSの上記の2点の特徴はそのためのものである。

CoKBSの課題としては、まず、エージェントモデルの表現力があげられる。例えば、以下のような表現を許すことにより、エージェントモデルの表現力が向上する。

$B_{agent_x}(cooperation, agent_y, agent_z)$

(他のエージェント間の協力度)

$B_{agent_x}(ability, domain, agent_y)$

(特定分野における能力度)

$B_{agent_x}B_{agent_y}(cooperation, agent_x)$

(自分の相手に対する協力度についての相手の考え)

しかし、エージェントモデルの伝搬などの問題があり、現在考察中である。また、本研究の議論フェーズでは、エージェントは解と素視点と重要度を交換することにとどまっておらず、専門家どうしの迅速な議論を模擬している。CoKBSをより有効なものとするためには、信念や認識のレベルに関する情報を交換することが考えられる。このことは、問題分割の機能を付加することとともに、より現実の議論に近いネゴシエーションモデルを構築するために必要であると考えられる。なお、3人以上のエージェント間の議論モデルについては、別稿で検討したい。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Adler 89] Adler, M. R., Davis, A. B., Weihmayer, R. and Worrest, R. W.: Conflict Resolution Strategies for Non-hierarchical Distributed Agents, Gasser, L. and Huhns, M. N. (eds.), *Distributed Artificial Intelligence Vol. 2*, chap. 7, pp. 139-161, Morgan Kaufmann (1989).
- [Bond 88] Bond, A. H. and Gasser, L. (eds.): *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann (1988).
- [Conry 91] Conry, S. E., Kuwabara, K. and Lesser, V. R.: Multistage Negotiation for Distributed Constraint Satisfaction, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-21, No. 6, pp. 1462-1477 (1991).
- [Davis 83] Davis, R. and Smith, R. G.: Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving, *Artif. Intell.*

- Vol. 20, No. 1, pp. 63-109 (1983).
- [Deen 91] Deen, S. M. (ed.): *CKBS'90: Proc. Int. Working Conf. on Cooperating Knowledge Based Systems*, Springer-Verlag (1991).
- [Durfee 88] Durfee, E. H.: *Coordination of Distributed Problem Solvers*, Kluwer Academic Pub. (1988).
- [Gasser 89] Gasser, L. and Huhns, M. N. (eds.): *Distributed Artificial Intelligence Vol. 2*, Morgan Kaufmann (1989).
- [石田 92] 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).
- [Lander 91] Lander, S., Lesser, V. R. and Connell, M. E.: Conflict Resolution Strategies for Cooperating Expert Agents, Deen, S. M. (ed.), *CKBS'90: Proc. Int. Working Conf. on Cooperating Knowledge Based Systems*, pp. 183-200, Springer-Verlag (1991).
- [Morizet - Mahoudeaux 92] Morizet - Mahoudeaux, P., Suzuki, E., Ohsuga, S., Hori, K., Kumara, S. and Ham, I.: Integrated Design and Diagnostics Modeling in Manufacturing: a prospective study and first results, *Proc. Avignon'92*, Vol. 2, pp. 235-246 (1992).
- [Ohsuga 89] Ohsuga, S.: Toward intelligent CAD systems, *Computer Aided Design*, Vol. 21, No. 5, pp. 315-337 (1989).
- [Ohsuga 90] Ohsuga, S.: Framework of knowledge-based systems-multiple meta-level architecture for representing problems and problem-solving processes, *Knowledge-Based SYSTEMS*, Vol. 3, No. 4, pp. 204-214 (1990).
- [Peterson 85] Peterson, J. L. and Silberschatz, A.: *Operating System Concepts*, 2nd ed., Addison-Wesley Pub., (1985).
- 宇津宮孝一, 福田 晃 訳: オペレーティングシステム概念, 原書第2版(上下), 培風館(1987).
- [Riesbeck 89] Riesbeck, C. K. and Schank, R. C.: *Inside Case-Based Reasoning*, Lawrence Erlbaum Associates Pub. (1989).
- [Smith 80] Smith, R. G.: The Contract Net Protocol: High Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-29, No. 12, pp. 1104-1113 (1980).
- [Smith 81] Smith, R. G. and Davis, R.: Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-11, No. 1, pp. 61-70 (1981).
- [Suzuki 93] Suzuki, E., Akutsu, T. and Ohsuga, S.: Knowledge-based system for computer-aided drug design, *Knowledge-Based SYSTEMS*, Vol. 6, No. 2, pp. 114-126 (1993).
- [Sycara 88] Sycara, K. P.: Resolving Goal Conflict via Negotiation, *Proc. AAAI-88*, Vol. 1, pp. 245-250 (1988).
- [Sycara 89] Sycara, K. P.: Argumentation: Planning Other Agents' Plans, *Proc. IJCAI-89*, pp. 517-523 (1989).
- (担当編集委員: 山田誠二, 査読者: 桑原和宏)

 著者紹介

鈴木 英之進(正会員)



1988年東京大学工学部航空学科卒業。1993年同大学院博士課程修了。博士(工学)。同年、東京工業大学工学部情報工学科助手、現在に至る。人工知能、分散人工知能の研究に従事。特に協調問題解決、協調均衡化、知的CAD、事例ベース推論などに興味を持つ。情報処理学会、AAAI各会員。

堀 浩一(正会員)



1979年東京大学工学部電子工学科卒業。1984年同大学院博士課程修了。工学博士。同年、国文学研究資料館助手。同助教授を経て、1988年東京大学先端科学技術研究センター助教授。1992年同工学系研究科助教授、現在に至る。人工知能、特に、発想支援システムの研究に従事。情報処理学会、日本認知科学会、日本ソフトウェア科学会各会員。

大須賀 節雄(名誉会員)



1957年東京大学工学部卒業。同年、富士精密工業(株)入社。1961年東京大学航空研究所助手、1966年工学博士。1967年東京大学宇宙航空研究所助教授、1981年東京大学工学部教授、1987年東京大学先端科学技術研究センター教授、現在に至る。研究分野は、人工知能、データベース、新コンピュータシステム、知的CAD、マンマシンコミュニケーションほか。情報処理学会、電子情報通信学会、航空宇宙学会、日本ソフトウェア科学会、AAAI各会員。

Pierre Morizet-Mahoudeaux
(Member)

Pierre Morizet-Mahoudeaux received the engineer degree from the CESTI Paris, in 1976, and the These de Docteur Ingenieur degree, and the These de Doctorat d'Etat es Sciences, from the University of Technology of Compiègne, in 1981 and 1987 respectively. He is now as a Professor in the Computer Science Engineering Department of the University of Technology of Compiègne. He was Invited Associate Professor in RCAST, the University of Tokyo, in 1988 and in 1990. He is currently Researcher at the Maison Franco-Japonaise of Tokyo and Invited Research Fellow at the RCAST. His research interests concern diagnostics of physical systems in AI. He is member of IEEE societies.