

間欠性カオス写像を用いたファジイ意思決定に基づく交渉エージェント

松 村 幸 輝[†]

交渉支援を目的として、交渉当事者に代わって交渉に当たるエージェントを意思決定原理に基づいて構築し、エージェントによる交渉シミュレーションで得られる解決案を実際の交渉に役立てる方法について検討した。まず、知的原理として、(1) 効用理論から導いた交渉規則に基づき、効用を表すメンバシップ関数を用いてファジイ推論によって効用値を計算し、(2) 変形ベルヌーイ系の1次元写像で発生する間欠性カオス写像を用いてこのメンバシップ関数を修正することによって譲歩するという交渉モデルを提案した。そして、これを協調的な意思決定を必要とする具体的な交渉事例に適用することによって有用性を検討した。その結果、エージェントは各交渉者の意思を反映した行動をとり、交渉者双方が互いに満足するような合理的な合意点をシミュレーションにより導き出し、交渉支援に有益な解決案を提案しうるものと期待できた。

Negotiation Support Agent Based on Fuzzy Decision Making with Intermittency Chaos

KOKI MATSUMURA[†]

This paper describes the construction of the agents, which undertake the negotiation in place of the negotiators, based on the decision making principle and the intellectual information processing technology, for the purpose of the negotiation support. And, the method of using the solution idea obtained by the negotiation simulation was examined. First of all, as an intellectual principle, the negotiation model based on the following two mechanisms was proposed here. (1) The utility values are calculated from the membership functions, which express the utilities, by the fuzzy reasoning based on the negotiation ruleled from the utility theory. (2) Agents concede by correcting these membership functions with the intermittency chaos generated by one-dimensional maps of the deformation Bernoulli system. Furthermore, this method was examined in practice by applied to a concrete negotiation case where cooperated decision making is needed. As a result, the agents derive a reasonable agreement point, where either party of negotiators is fairly satisfied, as intentions of both sides are reflected. It is expected that the solution idea proposed by agents is to support the negotiation.

1. はじめに

調和を目指した交渉は、交渉者双方が満足する合意を得るための協調問題解決の行為であるので、交渉者である複数の意思決定者によるグループ意思決定の一例としてとらえることができる^{1),2)}。そのため、交渉支援は交渉者の意思決定を支援することを目的とする。

このような交渉では、スムーズに話し合いを進めることができ、しかも交渉者双方が納得のいく、より合理的な譲歩過程や合意点を見い出すことが重要な事項となる。このため、交渉過程における交渉者双方の情

報の伝達や情報の有効活用に計算機システムを用いることは、より有益な交渉の実現を可能にするものと考えられる。たとえば、計算機を利用した事例ベース推論³⁾は、経験的手法による多くの事例に基づいた正確な情報分析と実時間処理の実現が可能となり、交渉過程にもたらす利得は大きいものと考えられる。また、個人の意見や考えを明確にそして客観的に表現することも可能であるので、抽象概念による表現を阻止するとともに、交渉において争点となっている当事者の価値感の相違に基づく感情的要素をおさえる⁴⁾という効果があり、正確な判断が可能になるものと思われる。このように、計算機システムを交渉支援に用いることにより、交渉の当事者は、交渉過程の本質でもある情報や時間をうまく活用できるとともに、交渉能力を向

[†] 甲南大学理学部

Faculty of Science, Konan University

上させることが可能となる。

このような交渉者の情報活動の支援を有効に行うためには、計算機システムの処理能力を上げて、交渉者の行為を代行できる能力を備えたヒューマンインタフェースを構築することが考えられる^{5),6)}。具体的な方法としては、システムを擬人化し、エージェントの機能を持たせることが有効な手段と考えられる。

そのためのインタフェースの構成として、1つは、交渉者のやりとりを認識して、現在の譲歩の状況や交渉者の効用の変化などを実時間で計算したり、これらの結果を図表などを用いて定量的に分かりやすく交渉者双方に伝達できるようにすることが考えられる。これによって、交渉者自身が行うべき様々な作業が代行され、交渉当事者は問題となっている本質に集中できるようになる²⁾。そしてさらには、情報の入出力過程において、音声や表情などの複数のモダリティによるインタラクティブなインタフェースを実装することによって、より快適な交渉環境を実現することも考えられる。

他方、システムの知的レベルを上げて、インタフェースに自律性を持たせることが考えられる。そして、交渉者の目的と権限に基づいて、交渉当事者に代わって交渉に当たる代理人、あるいは仲介者としての働きを代行させるのである。言い換えれば、交渉過程において最も重要な行為である意思決定をエージェントに行わせるのである^{7),8)}。このためには、交渉当事者の習性や意思あるいは効用などを表現しうる交渉者モデルを、意思決定原理に基づいてできるだけ忠実に記述する必要がある。そして、これらを学習あるいは認識させた複数の交渉者モデルをエージェントとしてシステム内部に構築することによって、交渉者と同様の意思を持って交渉に当たらせるのである。これによって、エージェントは交渉者の意思を反映した行動をとり、交渉者双方が互いに満足するような合理的な妥結案をシミュレーションにより導き出し、交渉支援に有益な解決案を提案しうるものと期待できる。

このような概念に基づいて筆者らは、交渉者モデルや譲歩過程の表現方法²⁾、および知的情報処理技術を用いて合意点を探索するシミュレーション方法^{9)~14)}について種々検討してきた。

この一連の研究結果から、遺伝的アルゴリズムによる解探索過程でカオスのゆらぎを利用することが、解探索の各ステップで個体の変異を予測するのに有効で、カオスの遍在性が交渉過程での人間の行動をモデル化するのに適すると考えられた¹²⁾。これは、個体の生成過程に、生物種の増減現象の予測等に用いられてい

るロジステック写像を利用した類似パターン想起の方法¹⁵⁾を適用するもので、連想記憶での記憶探索において生じた分岐構造が記憶パターンの類似度に基づいたクラスタ構造に重なるという結果¹⁶⁾に基づくものである。これによって、初期入力であるキーパターンに対してカオス性の強弱に応じて類似度の異なるパターンが動的に想起されるのである。

一方、ファジイ意思決定に基づいたシミュレーション手法は、(1)多段決定問題において、意思決定の対象の複数の属性に対して各交渉者の固執の度合いを考慮し、相手の交渉者の動きに応じて譲歩するという、人間の柔軟な行動を模倣した合意点探索過程を容易に表現することが可能であること、(2)多くのルールの中から、組合せ爆発を避けて最適なルールを求めることができるということから、交渉支援に簡便に利用しうる有効な手段であることが分かった^{13),14)}。ただこの方法は、譲歩の程度を決定する場合に人間のとるあいまいな行為が非線形的であるにもかかわらず、これを十分に表現できないという問題があった。

この点を改善するため、ファジイ意思決定原理に基づく新しい手法として、人間のとるあいまいな行動を記述するのにカオス性が適切であるという前述の結果¹²⁾を考慮して、カオスのゆらぎを利用した無制約大域的最適化手法¹⁷⁾によって譲歩の程度を決定するという行動をモデル化したエージェントの構築を提案する。そして、譲歩過程の制御に、今回は、変形ベルヌーイ系の1次元写像で発生する間欠性カオス写像¹⁸⁾を用いることを試みる。これにより、カオス写像が持つ遍在性と間欠性を利用して、パラメータ値によって各属性に対する交渉者の固執の度合いを表現し、エージェントの譲歩過程を制御することが可能になると考えられる。また、各属性に対する意識をメンバシップ関数で表し、これを用いたファジイ推論によって効用値を算出するという新しい方法を検討する。

具体的な交渉問題の事例として、協調して自動車を購入する場合に合意を得るための交渉を取り上げ、この場合の交渉支援のためのエージェントの構築方法および合意点の探索方法を述べるとともに、この方法の有有用性について検討する。

2. エージェントの交渉モデル

現実世界での人間同士の交渉を模倣して、意思決定に必要な資質と譲歩に必要な柔軟な制御機能をエージェントに持たせ、自律的に交渉を進めるようなシステムの構築を目指した。その構成を以下に述べる。

2.1 エージェントの意思決定モデル

エージェントの意思決定原理として効用理論を用いる²⁾。そして、評価項目である属性が複数であるので、多次元効用理論の概念より個々の属性に対する効用値を合成して総合的な効用値を算出する。これによって、意思決定の対象の選好順序を定量的に表現する。

ここで、効用は、一般に望ましさを程度を表すので、たとえば、以下の具体的交渉事例である自動車に対しては、評価項目（属性）としての「車内の広さ」については「広ければ広いほど」高く、また「価格」については「安ければ安いほど」高くなるというように、評価項目の値（属性値）に対して効用値が単調増加あるいは単調減少するものとする。

このことから、意思決定の対象に対する効用値は次のように与えられる。2組のエージェント $i (i = 1, 2)$ があるとし、各属性値 $y_j (j = 1, \dots, p)$ に対する各エージェントの効用値を算出する効用関数を $u_{ij}(y_j)$ で表すものとする。これにより、意思決定の対象に対する総合的な効用値は、多次元効用理論に基づき $u_{ij}(y_j)$ の総和をとった総合評価の効用関数 u_i とし次式で表される^{2),10)}。

$$u_i = \sum_{j=1}^p u_{ij}(y_j) \quad (1)$$

この総合評価の効用関数 u_i の値が最大となる対象が各エージェントの意思決定の結果となる。なお、以下の本文および表中では簡単のため、 $u_{ij}(y_j)$ は u_{ij} と記している。

次に、交渉における譲歩という行為が交渉者の効用値の変化に基づいて行われるものであることを考慮すれば^{1),2)}、エージェントの譲歩過程は、各属性に対する各エージェントの効用関数 $u_{ij}(y_j)$ を修正することで表現できる。これについては、前報¹⁰⁾で詳しく議論しているところであるが、その主旨は次のとおりである。すなわち、調和を目指した交渉過程では、交渉者は互いに相手を理解しようと努め、意思決定の対象についてその良さをお互いに教え合ったり、調べたりすることによって、新しい知見を得ようとする。その結果として、意思決定の対象に対する交渉者の評価すなわち効用が変化すると考えられるのである。

このことから、このモデルにおいては、以下に記するような、両エージェントの効用を表すメンバシップ関数間の隔たりが小さくなるようにメンバシップ関数を互いに近づけるように移動させることによって譲歩を表現する。ここで、メンバシップ関数の移動量（以下、譲歩の幅という）は、両エージェントにおける交

渉開始時のメンバシップ関数間の隔たりを規格化して1としたときのそれに対する比で表し、譲歩の度合い $\alpha_{ij} (0 \leq \alpha_{ij} \leq 1)$ とする。したがって、この交渉モデルは、譲歩の度合い α_{ij} を用いて両エージェントのメンバシップ関数を互いに接近させる量を決定し、 α_{ij} すなわち譲歩の幅を拡大していくことによって譲歩し、最終的に両エージェントの効用値が一致し、効用値が最大となる対象を妥結案とするものである。なお、この具体的な手続きについては、事例によるシミュレーションの部分（3.1節）で記述する。

また、合意点に達した状態を譲歩の度合い α_{ij} で表せば、

$$\alpha_{1j} = (1 - \alpha_{2j}) \quad (2)$$

となる。式(2)の $(1 - \alpha_{2j})$ は α_{2j} とは逆に、各属性に対する固執の度合いを意味するものと考えられる。したがって、式(2)の関係は、各属性に対する一方の譲歩の度合いと他方の固執の度合いが均衡するときに両エージェントが合意点を見出し、交渉が成立することを示すものである。

2.2 ファジイ推論による効用値の算出

属性に対するこだわり（固執度）や評価等の考え方は交渉者ごとに異なる。このことを考慮すれば、各属性に対して交渉者ごとに異なる考え方を表したメンバシップ関数を作成し、これを用いてファジイ推論によって効用値を計算する方法が有効であると考えられる。この方法の利点は、効用値を直接設定することが困難な場合でも、総合評価で表される意思決定の対象にとらわれることなく属性そのものに対する個人的評価あるいは統計量からの客観的評価をメンバシップ関数で容易に表現することができ、しかもファジイ推論によって簡便に効用値を算出できることである。

たとえば、前件部を表すメンバシップ関数として、図1に示すような交渉者ごとに異なった関数を用意する。この図は、価格を例にとって「高い」「普通」「安い」と感じる感覚的な度合いをメンバシップ関数で表したものである。一般に価格については、「安ければ安いほど良い」と考えられるが、その度合いは個人によって相違する。同図はこの点に着目したものである。したがって、この例に示すように、交渉者2の方が「安くなくてはならない」というこだわりが強く価格に対する固執の度合いが大きいのが、交渉者1は価格に対する固執の度合いは比較的lowく、「少々高くてもかまわない」と考えていることが表現できるのである。そして、この考えの違いがコンフリクトを生じさせているのである。そこで、これを解消して合意点を得るために、それぞれメンバシップ関数を修正することに

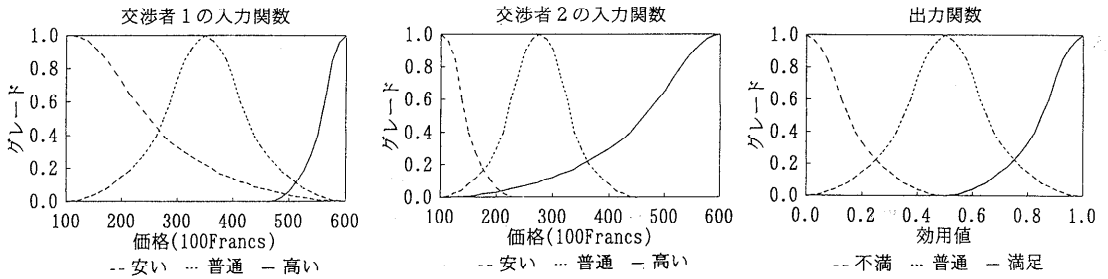


図1 メンバシップ関数の概念図

Fig. 1 Conceptual diagram of membership function.

よって譲歩するのである。

一方、ルールは、前節にも述べたように、基本的に「燃費(ただしここでは燃費は、100 km 走行するのに必要な燃料の量 (ℓ) としている)」については「良ければ良いほど」望ましさの度合いは高く、また同様に「車内の広さ」については「広ければ広いほど」、「価格」については「安ければ安いほど」、「最高速度」については「速ければ速いほど」それぞれ望ましさの度合いは高いものとする。これを if (前件部) then (後件部) 型のファジイ制御規則で表すと、以下のようになる。

if y_1 is L then z is H
 if y_1 is M then z is M
 if y_1 is H then z is L
 if y_2 is L then z is L
 if y_2 is M then z is M
 if y_2 is H then z is H
 if y_3 is L then z is H
 if y_3 is M then z is M
 if y_3 is H then z is L
 if y_4 is L then z is L
 if y_4 is M then z is M
 if y_4 is H then z is H

ただし、 y_j は各属性 j の状態変数 (入力変数) である。ここでは具体的に車の性能を表す評価項目を例にとって、 y_1, y_2, y_3, y_4 はそれぞれ、燃費 ($\ell/100$ km)、車内の広さ (m^2)、価格 (100 Francs)、最高速度 (km/h)、を表すものとしている。また、 z は、たとえば価格を例にとれば、「高い」「普通」「安い」と感じる感覚的な度合いを表す出力変数、L は小さい、M は中位、H は大きい、を表す言語変数 (ファジイラベル) である。

なお、推論結果である効用値は、推論法としてファジイ制御で最も広く使われている、min-max 重心法 (マムダニの推論法)¹⁹⁾ を用いて算出する。

2.3 間欠性カオス写像を用いた譲歩過程の制御

前述した α_{ij} の最適値の組合せを、カオス写像を用いて求める方法について述べる。

以前報告した方法では、譲歩量は、各属性に対する重み (後述する式 (5) に基づいて算出する) から基準となる譲歩の度合いを求め、この値と乱数の積によって算出していた¹³⁾。この方法は、簡便で、しかも交渉者の意思をある程度表したものとして有用であるが、このような確率的手法では譲歩量として得られる値が最適である保証はない。したがって、局所的にとられることなく、大域的な最適値を得る方法が必要とされる。そこで、この非線形大域的な最適解を求める方法として間欠性カオス写像を用いた。この手法は、決定論的力学系が生み出す確率的な現象である間欠性カオスを局所解から逃れるゆらぎとして利用できるとともに、遍在する解の領域を制限するのに有効となるものである¹⁷⁾。

この手法の主な特徴としては、(1) 変形ベルヌーイ系のパラメータを変更することにより、ランダム性の強い探索から、間欠的に局所的な最適解に収束する探索まで容易に実現できる、(2) 間欠性カオス写像を用いた探索は、間欠的に局所的な最適解に収束し、精度の高い解が得られる、また (3) この離散力学系はシンプルで、アルゴリズムが単純である等があげられる¹⁷⁾。

このような間欠性カオス写像を発生する 1 次元写像力学系である変形ベルヌーイ系¹⁸⁾ は、次の式 (4) で与えられる。

$$\xi_{k+1} = g(\xi_k) = \begin{cases} \xi_k + 2^{B-1}(1-2\varepsilon)\xi_k^{B+\varepsilon} & (0 \leq \xi_k \leq 0.5) \\ \xi_k - 2^{B-1}(1-2\varepsilon)(1-\xi_k)^{B-\varepsilon} & (0.5 < \xi_k \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 ε は正の微小パラメータで、B は 1 以上のもう 1 つのパラメータである。この写像は B = 1 の

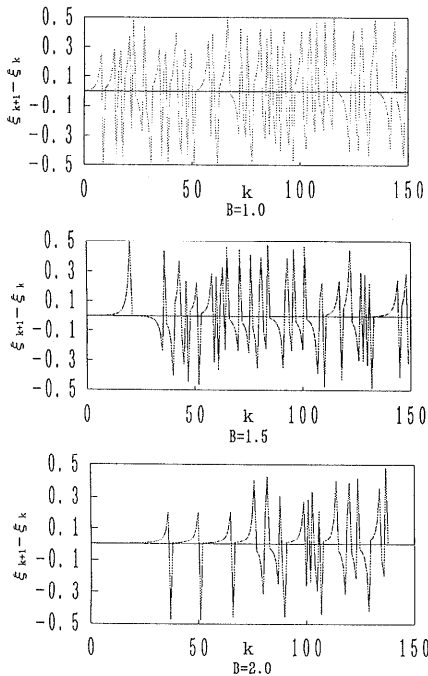


図2 間欠性カオス画像の変化量の時間発展

Fig. 2 Time history of variation in the intermittency chaos map.

ときはベルヌーイ系と呼ばれ、 ξ_k の変動はランダム性が強く、 B が増加するに従って変動が間欠的になる。パラメータ B の増加により探索点が $\xi_k = 0$ と 1 の付近に長時間局在するようになり、大きく乱れた状態の発生が間欠的になる。そして、 B が増加すると $\xi_k = 0$ と 1 の付近の $g(\xi_k)$ の傾きが 1 に近づき、このため、この付近では探索点の変化量 $\xi_{k+1} - \xi_k$ が微小となり、この付近に長時間局在することにより間欠的な変動が発生する。また、 B の値が同一のときは、 ε の値が小さいほど、探索点の変化量が減少するため、 $\xi_k = 0$ と 1 の付近に探索点が局在する時間は長くなる。

図 2 に、パラメータ B を (a) $B=1.0$, (b) $B=1.5$, (c) $B=2.0$, としたときに得られた探索点の変化量 $\xi_{k+1} - \xi_k$ の時間発展の例を示す。この観測量のとりうる値の範囲は -0.5 から 0.5 であり、 B の増大に従って、0 付近の状態の持続時間が長くなり、大きな変動は間欠的になる。このようにランダム性の強い探索から、間欠的に局所的最適解に収束する探索まで実現できる。このことから、本手法ではこの点に着目して、譲歩過程において固執の度合いに依存してメンバシップ関数を修正するのにこの間欠性カオス画像を用いた。

実際には、エージェントによる譲歩過程は、互いに歩み寄るように図 1 で示されるようなメンバシップ

関数をシフトすることによって行われる。この場合、上述の変形ベルヌーイ系のパラメータは、(1) 固執の度合いが強く譲れない属性に対しては、間欠的に局所的な値に収束するような制御パラメータ値を割り当て、また、(2) あまり固執しない属性に対しては、譲歩の割合にランダム性を持たせるような制御パラメータ値を割り当てるようにする。この制御パラメータは B で表現し、固執の度合いが大きいときには、間欠的な変動が発生しやすい 2 に近い値を、またあまり固執しない場合には 1 に近い値を振り当てるようにする。そして、譲歩回数 k に対して得られる $\xi_{k+1} - \xi_k$ の値を譲歩量に対応した値とする。

具体的には、まず、属性 j に対する各交渉者 i の重み w_{ij} ($0 \leq w_{ij} \leq 1$) を式 (5) によって求める。ただし、意思決定の対象の個数を h とし、対象 n に対する属性 j の初期効用値を $u_{ij}(n)$ 、各対象に対する総合的な初期効用値を $u_i(n)$ とする。

$$w_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^h u_{ij}(n)}{\sum_{n=1}^h u_i(n)} \quad (5)$$

ここで、(1) 前件部のメンバシップ関数の横軸の値が大きくなるに従って効用値が大きくなる属性（たとえば、「車内の広さ」や「最高速度」）では、大きい重み w_{ij} を有する交渉者の方がその属性に対して固執する度合いが大きくなるが、(2) 前件部のメンバシップ関数の横軸の値が小さくなるほど効用値が大きくなる属性（たとえば、「燃費」や「価格」）では、小さい重み w_{ij} を有する交渉者の方がその属性に対して固執する度合いは大きくなると考えられる。そして、固執する度合いが大きい交渉者はその属性については譲歩したくないと考えるので、大幅な譲歩は避けた部分的な提案しか行わない。その反面、固執する度合いが小さい交渉者はその属性については固執しなければならないという気持ちがあり譲歩してもいいと考えているので、ランダムに大域的な提案を行うものと考えられる。これらのことを考慮して、制御パラメータを次のように与える。

(1) 前件部のメンバシップ関数の横軸の値が大きくなるほど効用値が大きくなる場合には、固執する度合いは重み w_{ij} そのものと考えられるので、この値 ($0 \leq w_{ij} \leq 1$) をそのまま制御パラメータに反映するように、 B_{ij} (ただし B_{ij} は交渉者 i の属性 j に対するパラメータ B の値) のとりうる範囲 ($1 \leq B_{ij} \leq 2$) にシフトすることによって対応付けする。

$$B_{ij} = w_{ij} + 1 \quad (6)$$

(2) 前件部のメンバシップ関数の横軸の値が小さく

表1 属性と初期効用値
Table 1 Attributes and initial utilities.

車の種類	属性				各属性に対するN1の効用値				各属性に対するN2の効用値				各交渉者の総合的な効用値		各交渉者の選好順序	
	y1 C120	y2 space	y3 price	y4 speed	u11	u12	u13	u14	u21	u22	u23	u24	u1	u2	N1	N2
Opel Record	10.48	7.96	467	176	0.520	0.626	0.571	0.798	0.400	0.780	0.472	0.687	2.515	2.339	2	2
Peugeot 505	10.01	7.88	495	173	0.537	0.588	0.549	0.764	0.436	0.766	0.459	0.577	2.438	2.238	3	3
Peugeot 104	8.42	5.11	352	161	0.697	0.146	0.748	0.578	0.490	0.146	0.497	0.500	2.169	1.633	9	10
Citroen Dyana	6.75	5.81	248	117	0.852	0.354	0.852	0.146	0.852	0.502	0.852	0.146	2.204	2.352	7	1
Citroen Visa	7.30	5.65	321	142	0.813	0.294	0.785	0.502	0.500	0.501	0.500	0.453	2.394	1.954	5	7
VW Golf	9.81	6.15	392	148	0.546	0.442	0.683	0.511	0.448	0.509	0.493	0.480	2.182	1.930	8	8
Mercedes 230	10.40	8.47	757	180	0.523	0.852	0.146	0.836	0.407	0.852	0.146	0.812	2.357	2.217	6	4
Citroen CX	11.05	8.06	647	178	0.508	0.692	0.502	0.818	0.333	0.797	0.278	0.760	2.520	2.168	1	5
Volvo 244	12.95	8.38	550	145	0.146	0.827	0.522	0.505	0.146	0.841	0.417	0.469	2.000	1.873	10	9
BMW 520	12.26	7.81	686	182	0.500	0.566	0.500	0.852	0.224	0.753	0.238	0.852	2.418	2.067	4	6

なるほど効用値が大きくなる場合には、固執する度合いは重み w_{ij} が小さいほど大きいので、固執する度合いは $(1 - w_{ij})$ と表され、パラメータ B_{ij} は、(1)の場合と同様、とりうる範囲に対応させて次式のように記述される。

$$B_{ij} = 2 - w_{ij} \quad (7)$$

このようにして得られた各属性に対する各交渉者のパラメータ B_{ij} に基づき、各属性に対するそれぞれの変化量 $\xi_{k+1} - \xi_k$ の時間発展を求める。そして、これより得た変化量の絶対値 $|\xi_{k+1} - \xi_k|$ から譲歩の割合を算出する。なお、 k は交渉回数（譲歩ステップ数）に対応するものである。また、絶対値をとるのは、先に提案した譲歩よりも後退したものとにならないようにするためである⁹⁾。さらに、このようにして得られた値そのままでは1回の譲歩の値としては大きな値となるので、これを適当な数で除算することによって、ある一定値（以下、最大譲歩幅という）以下の小さな数に変換する。これは、交渉回数が多いほど丁寧な交渉が可能で、交渉者双方で納得のいく妥結点が得られるという前報の結果に基づくものである¹³⁾。

2.4 交渉シミュレーションの手順

エージェントによる交渉シミュレーションの手順をまとめると、以下のようになる。

(1) 初期効用値の計算と間欠性カオス写像の生成

- 各交渉者の考えに基づいてメンバシップ関数を作成する。
- ファジイ推論（min-max 重心法）によって初期効用値を求める。
- 各エージェントの各属性に対する重みから制御パラメータ B_{ij} を算出し、この値に基づいて図2に示すような譲歩の制御のためのカオス写像をエージェントごとおよび属性ごとに作成する。

(2) メンバシップ関数の修正

- 間欠性カオス写像を用いて属性ごとの $|\xi_{k+1} - \xi_k|$ (0~0.5) を算出する。

- 両エージェントのメンバシップ関数間の隔たりが小さくなるように互いに近づくことによってメンバシップ関数を修正する。なお、1回の譲歩でメンバシップ関数が互いに接近する量すなわち譲歩の度合い α_{ij} で表される譲歩幅は、上で得られた値 $|\xi_{k+1} - \xi_k|$ をある所定の数 H (5~30) で除算して与えるものとした。すなわち、
譲歩幅 = $|\xi_{k+1} - \xi_k|/H$

(3) 効用値の再計算

- 修正されたメンバシップ関数から効用値を再計算する。

(4) 合意点に達したかどうかの判定

- 総合的な効用値の差が0.1%以下になったとき、合意点に達したものと判定し、シミュレーションを終了する。
- 合意点に達していなければ、(2)~(4)の処理を繰り返す。

3. 交渉シミュレーションの実行

具体的な事例についてエージェントによる交渉シミュレーションを実行し、その結果を検討する。

3.1 事例

事例として、表1に示すような10種類の自動車の中から1台の自動車を協調して選択する場合のエージェントの交渉を考える^{1),2)}。車の性能を表す評価項目としては、前述したように、(1) y1: 燃費 ($l/100$ km), (2) y2: 車内の広さ (m^2), (3) y3: 価格 (100 Francs), (4) y4: 最高速度 (km/h), の4つの属性を設定している。

これらの属性値に基づき作成した各属性に対する各エージェントの交渉開始時のメンバシップ関数の例を図3に示す。ここでは、実際の計算での簡単化のため、メンバシップ関数は入力変数に対して直線的に変化する関数とし、三角波の形状で表した。このように、それぞれの関数の位置によって各属性に対する交渉者の

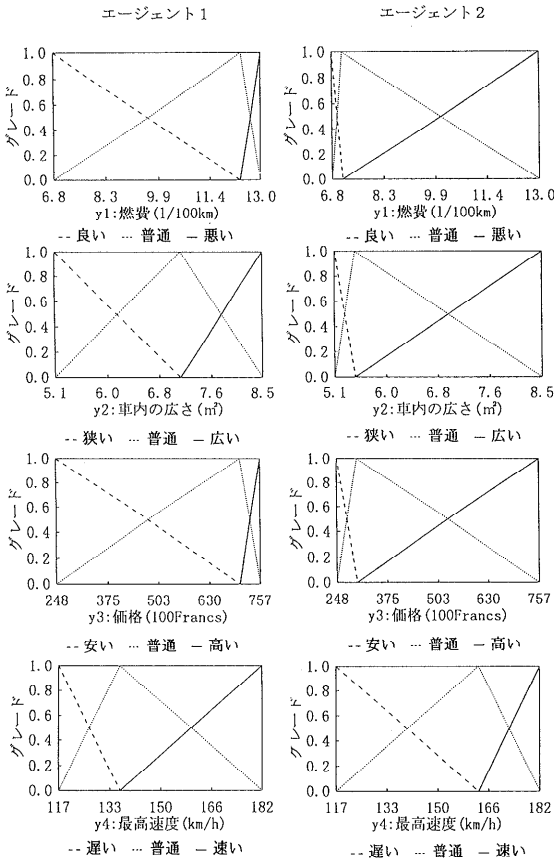


図3 交渉者の意思に基づいて作成したメンバシップ関数一覧
 Fig. 3 List of membership functions based on each negotiator's intention.

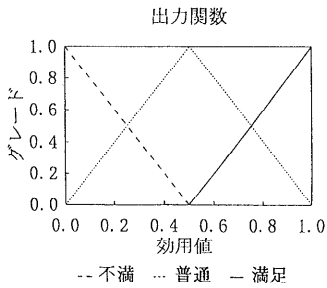
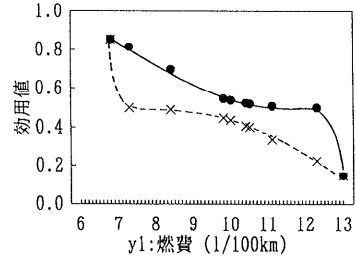


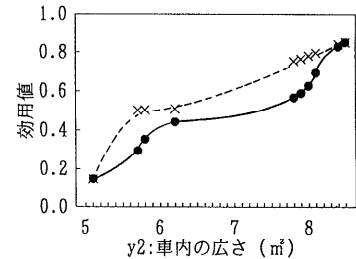
図4 後件部を表すメンバシップ関数
 Fig. 4 Membership function of the consequent part.

意思を表示することができる。また、後件部を表すメンバシップ関数は全属性について同一のものとし、この例を図4に示す。

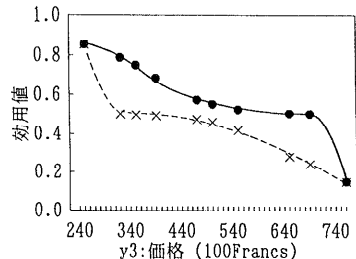
ここで、メンバシップ関数の修正は、具体的には、両エージェントのメンバシップ関数間の隔たりが小さくなるようにメンバシップ関数を互いに近づけるように移動させることによって行うものとした。特に今回



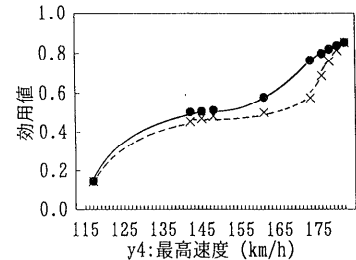
●N1 × N2



●N1 × N2



●N1 × N2



●N1 × N2

図5 各属性値に対する効用値の変化
 Fig. 5 Changes of utilities against each attribute.

あげた事例では、メンバシップ関数は直線で構成されているので、移動の結果、直線部分の傾きや切片等の修正を行うこととなる。また、今回、メンバシップ関数の修正のための手続きを簡単にするため、図3および4のように、これらのメンバシップ関数を補関係にあるものとした。これは、「普通」と感じるメンバシップ関数の頂点の位置を横軸方向に移動させるだけで、これと連動してメンバシップ関数全体が修正されるの

<p>エージェント 1</p> <p>(1) 交渉 1</p> <p>1):私は広さを重視します。</p> <p>2):現在の選好順序は次のとおりです。</p> <p>順位</p> <p>1.Citroen CX</p> <p>2.Opel Record</p> <p>3.Peugeot 505</p> <p>したがって、Citroen CX を提案します。</p> <p>3):あなたの提案する Citroen Dyana は拒否します。</p> <p>4):広さに対して譲歩してください。</p> <p>5):燃費に対して譲歩しました。</p> <p>(2) 交渉 2</p> <p>1):私は広さを重視します。</p> <p>2):現在の選好順序は次のとおりです。</p> <p>順位</p> <p>1.Opel Record</p> <p>2.Citroen CX</p> <p>3.Peugeot 505</p> <p>したがって、Opel Recordを提案します。</p> <p>3):あなたの提案する Citroen Dyana は拒否します。</p> <p>4):広さに対して譲歩してください。</p> <p>5):燃費に対して譲歩しました。</p> <p>⋮</p> <p>(25) 交渉25</p> <p>1):私は広さを重視します。</p> <p>2):現在の選好順序は次のとおりです。</p> <p>順位</p> <p>1.Opel Record</p> <p>2.Citroen CX</p> <p>3.Peugeot 505</p> <p>したがって、Opel Recordを提案します。</p> <p>3):あなたの提案するOpel Recordと一致します。</p>	<p>エージェント 2</p> <p>(1) 交渉 1</p> <p>1):私は燃費を重視します。</p> <p>2):現在の選好順序は次のとおりです。</p> <p>順位</p> <p>1.Citroen Dyana</p> <p>2.Opel Record</p> <p>3.Peugeot 505</p> <p>したがって、Citroen Dyana を提案します。</p> <p>3):あなたの提案する Citroen CX は拒否します。</p> <p>4):燃費に対して譲歩してください。</p> <p>5):広さに対して譲歩しました。</p> <p>(2) 交渉 2</p> <p>1):私は燃費を重視します。</p> <p>2):現在の選好順序は次のとおりです。</p> <p>順位</p> <p>1.Citroen Dyana</p> <p>2.Opel Record</p> <p>3.Mercedes 230</p> <p>したがって、Citroen Dyana を提案します。</p> <p>3):あなたの提案するOpel Recordは拒否します。</p> <p>4):燃費に対して譲歩してください。</p> <p>5):広さに対して譲歩しました。</p> <p>⋮</p> <p>(25) 交渉25</p> <p>1):私は燃費を重視します。</p> <p>2):現在の選好順序は次のとおりです。</p> <p>順位</p> <p>1.Opel Record</p> <p>2.Citroen Dyana</p> <p>3.Mercedes 230</p> <p>したがって、Opel Recordを提案します。</p> <p>3):あなたの提案するOpel Recordと一致します。</p>
---	---

図 6 エージェント同士が行う会話例

Fig. 6 Example of conversation between the agents.

で、上述した譲歩過程を表現するメンバシップ関数の修正が容易になるためである。

次に、図 3 および図 4 のメンバシップ関数を用いて、式 (4) のルールによって各属性ごとの初期効用値を計算した。この結果を図 5 に示す。図中の実線および破線はそれぞれ、エージェント 1 (N1) およびエージェント 2 (N2) の効用値の各属性値に対する変化を示す。なお、●および×の各点は、表 1 の各車種の各属性値を入力して得られた効用値で、個々の車種に対応している。同図において、 y_1 : 燃費と y_3 : 価格に関する効用値は属性値に対して単調減少し、 y_2 : 車内の広さと y_4 : 最高速度に関する効用値は単調増加することが観察される。この計算結果による変化は、2.1 節で述べた効用値の変化と定性的に一致しており、このモデル化が正常に行われていることを示唆するものと考えられる。また同図より、こだわりを持つ属性に対し

では両者とも、より厳しい評価をしていることが分かる。これは、こだわりが強い場合には、効用値の高い領域での効用値の減少率が大きく、効用値が下がる方向に属性値がわずかでも変化すると、急激に効用値が減少するためであると考えられる。そしてその結果として、効用値の変化曲線全体が、効用値が高くなる属性値側にシフトしているように観察されるのである。

このようにして得られた交渉開始時での効用値、選好順序等を、表 1 にあわせて示す。同表に見られるように、この事例において、交渉開始時では、エージェント 1 (N1) の選好順序が 1 位となる車種は 8 行目の車 Citroen CX (効用値 u_1 は 2.520) であるが、エージェント 2 (N2) の選好順序が 1 位となる車種は 4 行目の Citroen Dyana (効用値 u_2 は 2.352) である。したがってこの時点においてすぐに合意は得られない状況である。

表 2 探索過程と妥結案
Table 2 Search process and agreement.

	譲歩過程	初期値	100回目	200回目	300回目	400回目	500回目	600回	700回
Opel Record	N1	2.515	2.442	2.434	2.426	2.422	2.420	2.419	2.419
	N2	2.339	2.402	2.412	2.417	2.418	2.419	2.419	2.419
Peugeot 505	N1	2.438	2.346	2.344	2.337	2.332	2.330	2.330	2.329
	N2	2.238	2.301	2.322	2.327	2.328	2.329	2.329	2.329
Peugeot 104	N1	2.169	1.838	1.726	1.698	1.690	1.689	1.687	1.687
	N2	1.633	1.648	1.674	1.682	1.686	1.687	1.687	1.687
Citroen Dyana	N1	2.204	2.231	2.259	2.267	2.269	2.270	2.270	2.270
	N2	2.352	2.317	2.283	2.274	2.271	2.270	2.270	2.270
Citroen Visa	N1	2.394	2.294	2.195	2.136	2.109	2.100	2.098	2.096
	N2	1.954	1.977	2.039	2.078	2.089	2.094	2.095	2.096
VW Golf	N1	2.182	2.006	1.978	1.967	1.963	1.962	1.962	1.962
	N2	1.930	1.956	1.958	1.960	1.960	1.962	1.962	1.962
Mercedes 230	N1	2.357	2.321	2.296	2.287	2.282	2.281	2.280	2.280
	N2	2.217	2.256	2.270	2.278	2.279	2.280	2.280	2.280
Citroen CX	N1	2.520	2.408	2.326	2.296	2.284	2.280	2.280	2.280
	N2	2.168	2.228	2.259	2.272	2.276	2.278	2.279	2.280
Volvo 244	N1	2.000	1.969	1.951	1.943	1.940	1.938	1.938	1.938
	N2	1.873	1.912	1.931	1.935	1.937	1.938	1.938	1.938
BMW 520	N1	2.418	2.020	1.997	1.994	1.992	1.991	1.992	1.992
	N2	2.067	2.026	2.001	1.993	1.992	1.991	1.992	1.992

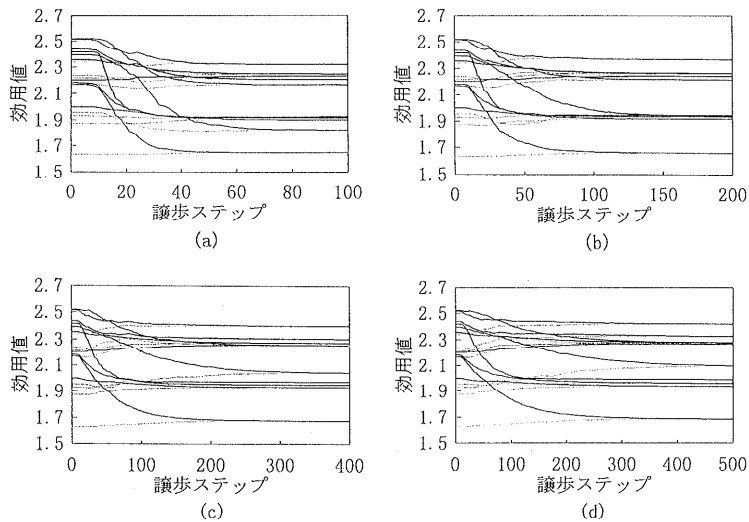


図 7 譲歩過程での各エージェントの効用値の変化
Fig. 7 Change of utilities of each agent in concession process.

3.2 手続き

まず、効用値を計算した結果、効用値が最大となる対象がエージェント間で一致した場合は、交渉が成立したものと見なし、互いに相手の提案と一致したことを表示する。効用が最大となる対象が一致しない場合は、先述した譲歩の操作によって合意点を探索する。譲歩を行うたびに、各エージェントは効用値を計算し直し、その結果から選好順序の一覧を表示するとともに、選好順序が1位の車種を新たに提案する。そして、両エージェントの提案が一致するまでのこの操作を繰り返す。

このような交渉で合意点に達するまでの譲歩の過程、

各エージェントの効用値および選好順序の変化等を記録する。

3.3 結果と考察

交渉過程でエージェント同士が行う会話例を図6に示す。図のように、各エージェントの提案する車種や選好順序、あるいは自分が重視している属性や相手の譲歩を促す提案など、交渉過程でのメッセージのやりとりの様子が表示される。

このような交渉過程での各エージェントの効用値の変化を表2に示す。これにより、譲歩過程での各エージェントの効用や選好順序の変化の様子が定量的に分かる。そして最終的に、各エージェントの最大効用の

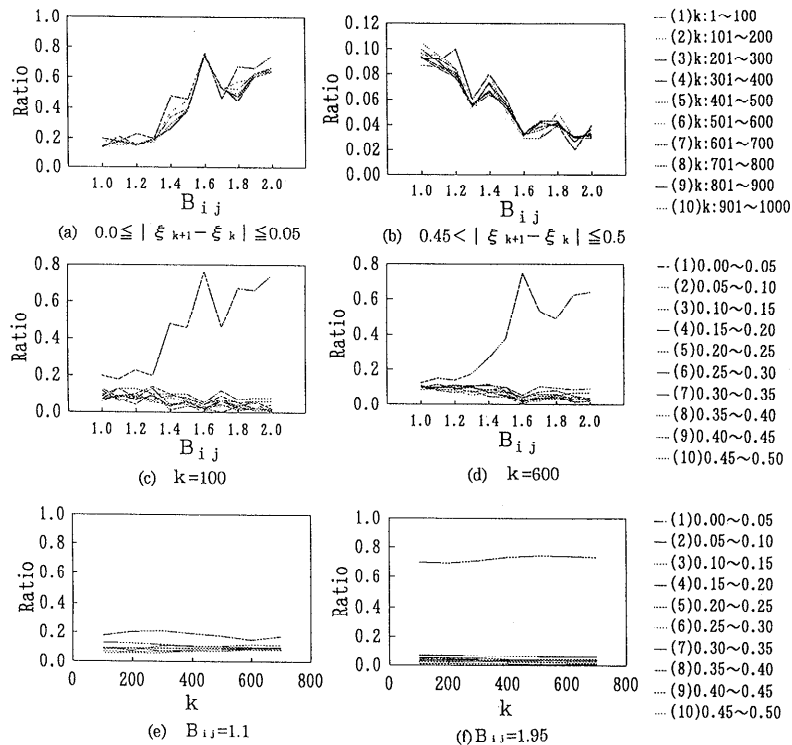


図8 $|\xi_{k+1} - \xi_k|$ の割合
Fig. 8 Ratio of $|\xi_{k+1} - \xi_k|$.

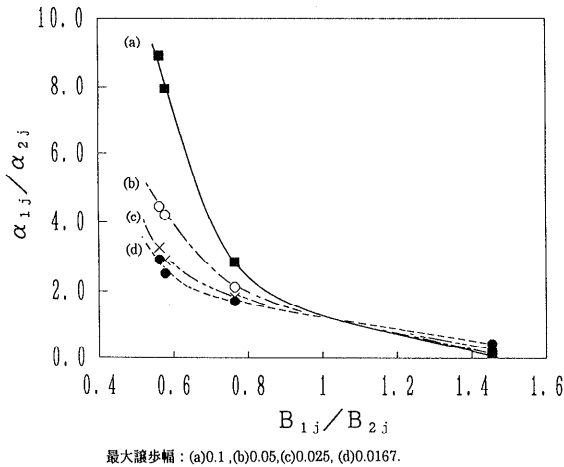
車種が一致して、Opel Record が妥結案として示されている。この妥結案は、交渉開始時における両エージェントの選好順序がともに高く2位であったことから、ある程度納得できるものと考えられる。

同表に基づいて、譲歩過程での各エージェントの各車種に対する効用値の変化を図7に示す。同図(a), (b), (c), (d)はそれぞれ、1回あたりの最大譲歩幅をそれぞれ、(a) 0.1, (b) 0.05, (c) 0.025, および(d) 0.0167 (除算の数Hとしてはそれぞれ、(a) 5, (b) 10, (c) 20, (d) 30が対応している)としたものである。いずれにおいても、譲歩が進むにつれて同一車種に対する両エージェントの効用値が徐々に近づいていき、最終的に一致する様子が見られる。なお、各曲線が示す車種は、最終的な選好順序に従って示した表2の車種に対応している。

さらにこれらを詳細に観察すると、効用値が変化せずに横這いになる部分と急に变化する部分があって効用値の変化が階段状になっていること、そしてこのような階段状に変化する割合は最大譲歩幅が小さいものほど少なくなって全体的になめらかに変化していることなどが分かる。この効用値が横這いになってあまり変化しない部分は間欠性カオス領域で制御されている部分であり、交渉過程で固執している状態をうまく表

現しているものと考えられる。また、最大譲歩幅が小さいほど、間欠性カオス領域で制御される部分とランダム要素によって制御される部分が均等になって偏りのない譲歩が可能となるものと思われる。

これに関連して、この写像の間欠性を詳細に調べた。この結果の一部を図8に示す。同図は、各属性に対する重みから算出した B_{ij} を用いて作成した間欠性カオス写像(図2参照)から得られた $|\xi_{k+1} - \xi_k|$ の値を、同図(c), (d), (e), (f)の枠外に記述するように、等分に10段階に分け、それぞれの範囲に属する測定値の数の全測定数に対する割合 Ratio を算出したものである。同図(a)および(b)はそれぞれ、 $0.0 \leq |\xi_{k+1} - \xi_k| \leq 0.05$, および $0.45 < |\xi_{k+1} - \xi_k| \leq 0.5$ の範囲に測定値が属する場合の割合 Ratio について、 B_{ij} による変化を示したものである。なお、図の枠外に記述する条件は、計算に用いた k の範囲を示す。図(c)および(d)は、計算回数 k をそれぞれ1~100および1~600としたときの Ratio の B_{ij} による変化を示す。図の枠外に記述する条件は、 $|\xi_{k+1} - \xi_k|$ の範囲を示す。また、図(e)および(f)は、それぞれ $B_{ij} = 1.1$ および $B_{ij} = 1.95$ の場合についての計算回数 k による Ratio の変化を求めた結果である。この場合のパラメータは図(c), (d)と同じである。これらの図より分かること



最大譲歩幅: (a)0.1, (b)0.05, (c)0.025, (d)0.0167.

図9 α_{1j}/α_{2j} と B_{1j}/B_{2j} の関係

Fig. 9 Relationship between α_{1j}/α_{2j} and B_{1j}/B_{2j} .

は、 $|\xi_{k+1} - \xi_k|$ が 0 近傍の値となる割合は B_{ij} が大きいほど大きくなる一方で、0 近傍以外の値となる割合は B_{ij} が大きいほど減少することである。そして、この傾向は計算回数にはあまり依存しない。このようなことから、この写像の間欠性は、 B_{ij} によって定量的な制御を可能にするものと考えられる。

このことを考慮し、制御パラメータ B_{ij} が交渉過程にもたらす効果を、最終的に両エージェントが合意に達するまでに譲歩した割合から調べた。この結果を、最終的な譲歩の度合いの比 α_{1j}/α_{2j} と制御パラメータの比 B_{1j}/B_{2j} の関係で表し、図 9 に示す。同図からは、 B_{1j}/B_{2j} が増大するにつれて、 α_{1j}/α_{2j} が減少することが観察される。ここで、 B_{1j}/B_{2j} はエージェント間の重みに関する比であるので、この値が大きいほど、エージェント 1 の方がエージェント 2 よりも属性 j に対して固執する度合いが大きいことを意味する。また、 α_{1j}/α_{2j} は最終的な譲歩の度合いの比（すなわち最終的な譲歩幅の比）であるので、この値が大きいほど、エージェント 1 の方が大きく譲歩したことを示す。このことから、図 9 の結果は、固執する度合いが大きいほど最終的な譲歩幅が小さくなることを示していることが分かる。そして、間欠性カオス写像のパラメータ B_{ij} が固執の度合いに基づく意思を明確に表現し、譲歩幅をうまく制御しうるものであることを示唆する。

また、図 9 に示すように、1 回の最大譲歩幅を大きくして全譲歩回数を少なくしたもののほど、 α_{1j}/α_{2j} は B_{1j}/B_{2j} の変化に敏感に反応することが分かる。これについては、1 回の最大譲歩幅が大きい場合は、相手が間欠部分で制限されて譲歩しないときでも一方的に

譲歩する確率が高くなるためであると考えられる。逆に、1 回の最大譲歩幅が小さい場合は相手が間欠部分にあって譲歩しないときには一方的に譲歩することは少なくなる。このことは、時間をかけて十分議論しながらの交渉過程では、互いを理解しながら譲歩するので極端な結果になりにくいという結果^{10),13),14)}と定性的に一致する。

以上のことから、間欠性カオス写像を用いた場合、制御パラメータ値や最大譲歩幅を適切にとることによって、意思を考慮した譲歩過程の最適制御が可能になるものと考えられる。また、今回提案したメンバシップ関数を用いた効用値の算出方法は、意思決定者の意識や考えを容易に、しかも明確に表現することができるので、実用的なシステムの構築に有効と思われる。これらのことから、エージェント間の交渉によって得られた妥協案は交渉支援に有益な解決案として提案しうるものと考えられる。

4. おわりに

本論文では、交渉当事者に代わって交渉に当たるエージェントを意思決定原理に基づいて構築する新しい方法を検討した。そして、交渉者の目的と権限を委譲したエージェント同士の交渉シミュレーションによって得られる解決案を実際の交渉支援に役立てる方法について提案した。まず、知的原理として、(1) 効用理論から導いた交渉規則に基づき、効用を表すメンバシップ関数からファジイ推論によって効用値を計算し、(2) 変形ベルヌーイ系の 1 次元写像で発生する間欠性カオス写像に基づきこのメンバシップ関数を修正することによって譲歩するという交渉モデルを提案した。そして、実際にこれを協調的な意思決定を必要とする交渉事例に適用した結果、エージェントは各交渉者の意思を反映した行動をとり、交渉者双方が互いに満足するような合意点を導き出しうることから、交渉支援に有益な解決案を提案するものであると期待できた。

なお、評価項目に対するエージェントの立場は多様であり、そのためエージェント同士の利害関係も複雑である。したがって、このような環境から生じてくる社会感情的な事柄を取り扱うことは最も難しい問題の 1 つになるものと考えられる。この観点において、本方法は、情報を共有したり、他者の利害関係を公平に取り扱う等の相互作用を規則づけることが可能であることから、社会感情的な要素を含んだ問題を解決する方法としても有用であると期待できる。また、精度の高いシミュレーションを実現することを目的として、さらに多くのルールと現実的なメンバシップ関数の組

合せに基づき、より信頼性の高い結果を得る方法を検討することが必要であると考えられる。さらに、ネットワーク上で有効な交渉エージェントを構築することによって、インターネット上の個人同士の交渉²⁰⁾、あるいはこれに開設されている店舗や会社等との電子商取引での交渉にも利用可能であると考えられる。そして、交渉者が3者以上になった場合も興味深い問題として残されている。これらについては今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Jarke, M., Jelassi, M.T. and Shakun, M.F.: MEDIATOR: Towards a negotiation support system, *European Journal of Operational Research*, No.31, pp.314-333 (1987).
- 2) 松村幸輝: グループ意思決定における交渉シミュレーションシステム, 電気学会論文誌, Vol.114-C, No.6, pp.681-688 (1994).
- 3) Sycara, K.P.: Negotiation planning: An AI approach, *European Journal of Operational Research*, No.46, pp.216-234 (1990).
- 4) Faure, G.O., Dong, V.L. and Shakun, M.F.: Social-emotional aspects of negotiation, *European Journal of Operational Research*, No.46, pp.177-180 (1990).
- 5) 西田豊明: ネットワーク社会とエージェント 擬人化されたシステム, 情報処理, Vol.38, No.1, pp.10-15 (1997).
- 6) 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).
- 7) 大沢英一: マルチエージェント環境における交渉のモデル, 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, pp.690-696 (1995).
- 8) 鈴木英之進, 堀 浩一, 大須賀節夫, Morizet-Mahoudeaux, P.: 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, 人工知能学会誌, Vol.9, No.1, pp.109-118 (1994).
- 9) 松村幸輝: 遺伝的アルゴリズムに基づく交渉シミュレーションシステム, 電気学会論文誌, Vol.116-C, No.5, pp.524-533 (1996).
- 10) 松村幸輝: 遺伝的アルゴリズムによる線形加法和評価関数を持つ2者間交渉の分析, 経営情報学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.1-17 (1996).
- 11) 松村幸輝: ニューラルネットワークの探索手法に基づく交渉シミュレーションシステム, 経営情報学会論文誌, Vol.5, No.1, pp.51-70 (1996).
- 12) 松村幸輝: カオスの探索手法に基づいた遺伝的アルゴリズムによる交渉シミュレーションシステム, 電気学会論文誌, Vol.117-C, No.4, pp.346-356 (1997).
- 13) 松村幸輝: ファジイ意思決定に基づく交渉シミュレーションシステム, 日本ファジイ学会誌, Vol.8, No.5, pp.801-811 (1996).
- 14) 松村幸輝: 遺伝的アルゴリズムによるチューニング手法を用いたファジイ意思決定に基づく交渉シミュレーションシステム, 日本ファジイ学会誌, Vol.9, No.2, pp.223-230 (1997).
- 15) 佐藤友彦, 牛田博英, 山口 享, 井村 敦, 高木友博: ファジイ連想記憶システムにおけるカオスの記憶探索, 日本ファジイ学会誌, Vol.6, No.4, pp.765-774 (1994).
- 16) 谷 淳: カオスの最急降下法を適応したニューラルネットワークにおける学習および記憶想起の動特性について, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-A, No.8, pp.1208-1215 (1991).
- 17) 藤田得光, 渡辺隆男, 安田恵一郎, 横山隆一: 間欠性カオス写像を用いた大域的最適化手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J78-A, No.11, pp.1485-1493 (1995).
- 18) 相沢洋二: カオスと $1/f$ ゆらぎ—両者を結ぶ普遍則, 数理科学, No.349, pp.8-16 (1992).
- 19) 日本ファジイ学会(編): 講座ファジイ5, ファジイ制御, 日刊工業新聞社 (1993).
- 20) 松村幸輝: インターネット環境を利用した交渉シミュレーションシステム, シミュレーション&ゲーミング学会誌, Vol.6, No.1, pp.35-48 (1997).

(平成9年6月30日受付)

(平成10年3月6日採録)

松村 幸輝 (正会員)



1978年大阪市立大学大学院博士課程修了。茨城大学工学部助教授を経て、1998年より甲南大学理学部教授。人間の思考や意思決定を支援する知能情報科学の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、電気学会、日本ファジイ学会、経営情報学会等会員。