

ルールベース・マルチエージェントシステムにおける 集団のモデル化

松並 勝 碓崎 賢一
九州工業大学 情報工学部

実世界では、個体は集まって集団を形成し、個体と集団の間には相互作用がある。本論文では、その相互作用をシミュレーションできる個体と集団のモデルを提案する。提案モデルでは個体の知識記述を分野毎に分類した知識源を単位として行い、個体-集団間の相互作用をこの知識源の交換によって実現している。また、集団の性質の習得等により、同一個体内に同じ分野の知識源が複数組み込まれた場合には、それらの推論結果の食い違いが起こる。提案方式では、知識源強度という概念を導入し、その比に従って競合解消を行う。これにより、個体の環境適応能力のシミュレーションを可能にしている。

A Group Model for Rule-Based Multi-Agent Systems

Masaru MATSUNAMI and Ken'ichi KAKIZAKI

Faculty of Computer Science and Systems Engineering
Kyushu Institute of Technology

This paper proposes a simulation model for interactions between agents and groups. In our model, the knowledge of an agent consists of some knowledge sources, and each group has knowledge sources that express the characteristics. The interactions between agents and groups are realized by making an exchange of these knowledge sources. The knowledge sources are classified into some categories by the subject. When knowledge conflict occurred on a category in an agent, conflict resolution is performed for selecting an effective knowledge source. The selection is executed with the intensity of each knowledge source. The shift in selected knowledge source simulates environmental adaptation ability of agents.

1 はじめに

実世界では人間に限らず動物までもが、何らかの形で集団を形成している。集団はそれを形成している個体群によって特徴づけられ、逆に個体の特徴は集団によって影響を受ける。例えば人間は、家族、会社、国家など大小さまざまな集団を形成しているが、日本人という集団は個々の日本人の特徴を表現しており、また日本に生まれた子供は日本人としての影響を強く受けて育つ。我々は、このような個体と集団の相互作用に着目し、計算機上でこの相互作用をシミュレーションできる個体と集団のモデルを提案する。

提案方式では、個体の振舞いを、対応する問題毎に分類した知識源を組み合わせるにより定義する。性質の影響等の個体と集団の相互作用は、この知識源を単位として個体と集団の間で交換することにより実現している。個体に同じ分野の知識源が複数含まれる場合、その知識源間で推論結果の競合が発生するが、知識源強度の概念を導入することにより、この競合解消を実現している。この競合解消法では、集団と個体の関係で知識源強度を変化させることにより、個体の環境適応能力のシミュレーションを可能にしている。また、この競合解消法では、知識源の競合を検出するために、同じ分野の知識源かどうかを判定する手段が必要になるが、クラス階層を用いた知識源の記述法により、これを自動的に行うことができるようにしている。

これまでに分散協調問題解決のための集団モデルの研究 [西尾 93][丸一 90] は行われているが、本研究は実世界の個体と集団の相互作用に着目した集団のシミュレーションを目的としている。従って、集団の形成、成長、消滅といった、従来の研究にはないシミュレーションも可能となっている。

2 個体と集団の相互作用

本論文では、個体と集団の相互作用として次の4つに着目し、そのシミュレーション方式を提案する。

1. 集団の性質は、それを形成する個体の振舞いによって特徴づけられる。
2. 集団に入った個体は、その集団の環境に合った振舞いをするようになる。
3. 集団の雰囲気は、それを形成する個体の様子によって特徴づけられる。
4. 個体は集団の雰囲気を認識し、それに従った行動をできる。

以下、1について2.1節、2について2.2節、3と4について2.3節で説明する。

2.1 個体が集団の性質に与える影響

我々が野犬の群れに遭遇したとき、野犬は我々を吠え立てる。個々の野犬は、人間が近づいたら吠えるという振舞いをするが、野犬の群れは、そのような性質の野犬で構成されるため、我々にとって、その群れがそのような性質を持っているように見える。我々はこの現象を、野犬の群れという集団が、個々の野犬の振舞いによって特徴付けられた性質を持っていると捉える。図1に示すように、集団内の個体の振舞いのうち大勢を占めるものが集団の性質として反映される。個体の振舞いが多様性を持っているが、個体の振舞いの主要なものが集団の性質として示されると考えられる。

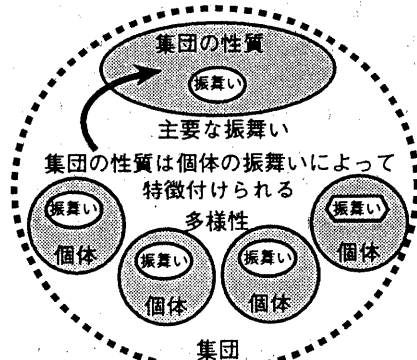


図1: 集団の性質

2.2 集団が個体の振舞いに与える影響

集団に入った個体はその集団の環境に合った振舞いをするようになる。個体のこの性質は環境適応能力といわれている。我々はこの現象を、個体が集団の性質を学習していく結果、その個体が集団の環境に合った振舞いをするようになるものと捉える。

また、我々が物事を習得する場合には、ある程度まで学習を続けないと物事を理解できない。理解に至る前に学習を止めると、あっさりと全てを忘れてしまうが、一度理解すると、そう簡単には忘れず再び習得する場合は回復が速い。このように、振舞いの習得は集団の構成員としての学習時間を要因として持つと我々は捉える。ここで、学習とは知識を習得しようとし、徐々にその知識を利用しだす過程を示し、また、習得とはその知識を理解し、簡単に忘れない状態になることを示すものとする。

2.3 個体の様子、集団の雰囲気

我々は、その人の様子を見ただけで、怒っているのか、喜んでいるのか判断することができる。また、

我々は暗い様子の人達が集まった集団を見ると、暗い雰囲気や漂っていると感じる。さらに、我々は暗い雰囲気が漂った集団にいて、ふざけた発言を控えたりする。

このように、個体は様子を変化させることにより、集団の雰囲気を変化させ、また、集団の雰囲気によって個体は行動や様子を変化させることができると、我々は捉える。

3 個体と集団のモデル

3.1 個体のモデル

3.1.1 個体と知識源

本論文における個体のモデルは、プロダクションシステム [小林 85] を用いた黑板モデルとなっている。個体のモデルを図 2 に示す。個体の知識は個体の振舞いを定義するもので、対応する問題毎に分類された複数の知識源の組み合わせによって構成される。状態は個体内部の状況を表すととも個体内の知識源間の通信にも用いられる。これらの要素が有機的に結びつくことによって、個体が自律的に動き始める。図 2 に示す様子、特性パラメタ、知識源強度については後述する。

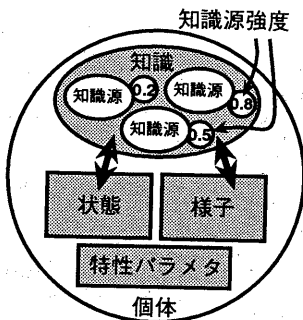


図 2: 個体モデル

知識源のモデルを図 3 に示す。知識源は個体の状況に応じて個体がどのように行動すべきかを決定し、個体の自律的行動を実現する。この知識源の機能は $IF \sim THEN \sim$ 形式のプロダクションルール集合で記述される。プロダクションルールは、その知識源を所有している個体の状態と、知識源自身が持つ局所状態によって、個体が次に行うべき行動を定義する。

知識源は対応する問題毎に分類されて記述される。動物を例にすれば、動物の知識は手足を動かす知識源、食料を探す知識源、外敵を避ける知識源などから構成され、それぞれの知識源は分類されて定義されている。また、同じ分類には複数の異なる知識源

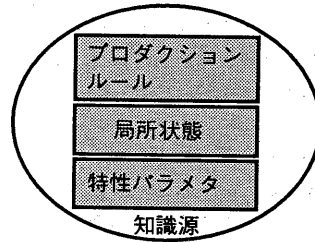


図 3: 知識源モデル

が定義されている。日本人を例にすれば、住む地域(集団)が異なると、同じ日本語であっても、九州の人は九州弁を喋り、関西の人は関西弁を喋るように、それぞれの人が持っている日本語を喋るという同じ分類の知識源は、その内容が少し異なるため、日本語を同じ分類に別々に定義されている。また、図 3 に示した特性パラメタについては後述する。

3.1.2 知識源のクラス階層

本提案モデルでは、知識源はクラスとして定義され、個体は知識源クラスのインスタンスを知識源として持つ。従って、同一の知識源が複数の個体で利用され、個体間で共通性が現れる一方で、個体は複数の知識源を持つことができ、個体毎の知識源の組み合わせは非常に多くなるため、個体の多様性が実現されている。

図 4 に示すように、知識源の分類により知識源のクラスには階層構造が作られる。知識源のサブクラス化は、スーパークラスからプロダクションルール、および局所状態を継承し、それぞれに関して追加、変更、削除して新しい知識源クラスを定義することで行う。複数のサブクラスが作成された知識源は、知識源の分類を表していると考えられる。この方式では、新しく知識源が定義される場合、該当する分類の知識源クラスのサブクラスとして定義されるので、知識源作成者が特に意識することなく知識源の分類が行われる。また、該当する知識源クラス

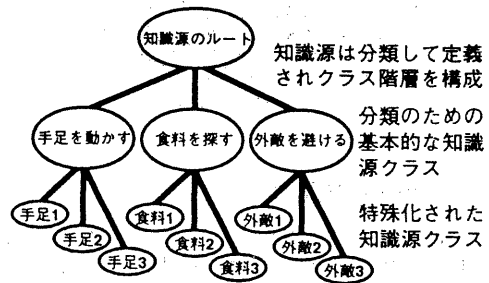


図 4: 知識源のクラス階層

がない場合は、新しく知識源のルートクラスのサブクラスとして知識源クラスを作成し、そのサブクラスとして知識源クラスを定義することになるが、この場合も知識源の分類が自然に行われる。

3.2 集団のモデル

本提案モデルでは、複数の個体間で対話が行われている時、それらの個体群は集団を形成していると捉える。対話を行う個体は図5に示すように、集団内の黒板を用いた個体間の多対多通信により情報交換を行うものとする。

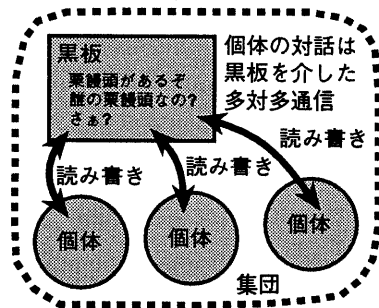


図 5: 集団のモデル

また、図6に示すように、集団は個体を持つ知識源のうち集団内で優勢なものをいくつか取り上げ、集団の性質を示す知識源として持つ。

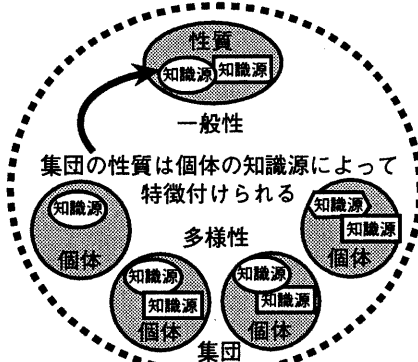


図 6: 集団と知識源

3.3 様子と雰囲気

個体モデルは図7に示すように、その内部状態を外部に表現するものとして様子を持ち、集団モデルは個体の様子によって特徴付けられた雰囲気を持つ。様子は基本的に個体の内部状態を外部に表現するも

のであるが、個体の内部状態とは無関係に表情を指定することができる。これにより、表情を偽っている個体を定義することが可能である。

また、個体モデルは図8に示すように、集団モデルの雰囲気を知ることができ、雰囲気をよって行動を変化させることができる。

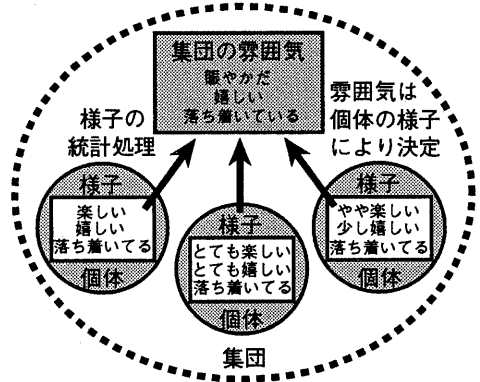


図 7: 様子と雰囲気

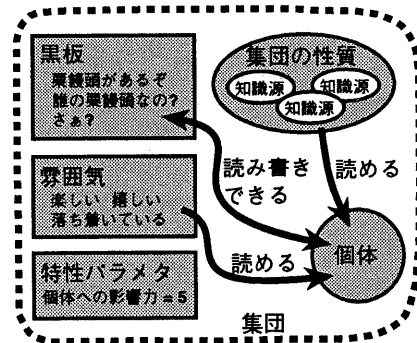


図 8: 集団と個体

4 相互作用の実現

特性パラメータは表1に示すような、個体と集団の相互作用における、個体、知識源、集団の特性を指定する値である。

個体の特性パラメータは集団との相互作用の影響、学習能力、記憶力に関する特性を定義し、知識源の特性パラメータは知識源毎の学習、忘却に関する特性を指定する。また、集団特性は形成する個体群の個体特性から算出され、集団の特性を表す。

表 1: 特性パラメタ

所有者	パラメタ名	意味
個体	個体特性 1	集団に対するその個体の影響力
	個体特性 2	集団からその個体が受ける影響の受け易さ
	個体特性 3	その個体が知識源を習得するのに必要な知識源強度
	個体特性 4	その個体が知識源を忘却するときの忘却容易度
知識源	知識源特性 1	個体にとってのその知識源の習得され易さ
	知識源特性 2	個体にとってのその知識源の忘却され易さ
集団	集団特性 1	個体に対するその集団の影響力
	集団特性 2	その集団内の個体間で行われる対話の量

集団特性 1 は、個体に対する集団の影響力を表す特性パラメタである。集団の影響力は、そもそも集団という実体が実世界に存在しないことを考えると、個体が他の個体に与える影響力の総和であると捉えることができる。従って、集団特性 1 はその集団内の個体の個体特性 1 の平均で算出できる。この算出法は、集団への影響力の強い個体ばかりで形成されている集団内の個体は、集団から強い影響を受けるといった現象を扱えるようにする。

集団特性 2 は集団内の個体間の対話の頻度を表し、集団の形成、消滅に関係する値である。集団特性 2 の詳細については 4.4 節で述べる。

4.1 集団の性質

本提案モデルでは図 6 に示したように、集団はその個体を持つ知識源のクラスのうち集団内で優勢な、いくつかの知識源のクラスを集団の性質を示す知識源としている。提案モデルではこれを実現するために、各知識源クラス毎の優勢度を計算し、優勢度の大きい知識源クラスからいくつかを、集団の性質を示す知識源とする。各知識源クラスの優勢度を計算するために、個体の特性パラメタの個体特性 1 を利用して、各知識源クラスの優勢度 s_i は、それぞれのクラス C_i に対して次のように計算される。

$$s_i = \sum_{j=1}^n p_j \quad (1)$$

$$p_j = \begin{cases} \text{個体特性 1} & (\text{個体 } j \text{ が } I_i \text{ を持つ}) \\ 0 & (\text{個体 } j \text{ が } I_i \text{ を持たない}) \end{cases} \quad (2)$$

$$n : \text{その集団内の個体数} \quad (3)$$

$$I_i : \text{知識源クラス } C_i \text{ のインスタンス} \quad (4)$$

この優勢度の算出法は、単純にインスタンス数だけで判定するのではなく、個体の集団への影響力をも考慮した集団の知識源の算出法となっている。これにより、5.1 節のシミュレーション 1 で示すような現象のシミュレーションを可能にしている。

4.2 個体の環境適応能力

個体内に同じ分類の知識源が複数含まれる場合、それらの知識源間では個体の振舞いを決定する推論結果に食い違いが起こる。本方式では、同じ分類の知識源の推論結果を各時点で 1 つに限定するために、知識源間の競合解消を行う。例えば九州弁と関西弁の両方を喋ることができる人がいる。その人が関西から九州に帰って来てしばらくの間は関西弁を主に喋っているが、次第に関西弁が少なくなり、九州弁を多く喋るようになる。

この例を個体が関西という集団から出て、九州という集団に入ったと考えると、この例が示す現象は、個体を持つ同じ分類の知識源のうち、集団の性質に合ったものが優先的に利用されることによって環境適応が行われていると捉えることができる。このように、同じ分類の知識源が同じ個体に複数ある場合は、それらの知識源のうち、その個体の所属する集団の性質に合った知識源の決定が個体に多く反映されるような競合解消法が必要である。

本提案モデルでは、以下のような仮定を基に、図 2 に示したように、個体内の知識源にその個体内における知識源強度をそれぞれ持たせ、その値の比により確率的に知識源を選択する競合解消方式を提案する。そして、その知識源強度を、集団と個体の関係で時間的に変化させることにより、個体の環境適応能力のシミュレーションを実現する。

1. 個体は自然に集団の知識を学習する。
2. 個体は集団の知識をある程度学習すると、それを習得する。
3. 個体が集団から離れると、一度習得した知識は少しずつ利用されなくなる。
4. 個体が集団から離れると、習得されるまで学習されなかった知識はすぐに忘れられる。
5. 個体が集団から離れ、再びその集団に戻ると、一度習得している知識は再習得されるのが速い。

なお、個体内の異なる分類の知識源間では、その対象が異なるため競合は起こらないと仮定している。

4.2.1 知識源強度

ある個体内に同じ分類に属する知識源が n 個あったとき、それぞれの知識源の知識源強度を K_i ($i = 1, 2, \dots, n$) とする。このとき、それぞれの知識源は確率 $P_i = \frac{K_i}{\sum_{j=1}^n K_j}$ で選択される。この知識源の確率的な選択は推論の1サイクル毎に行われ、十分長い時間で見ると、各知識源の決定が知識源強度の比に従って、個体の振舞いに反映されていることになる。

4.2.2 環境適応能力の実現

個体は集団に入ると、その集団の性質を示す知識源を参照するようになる。個体内にはその知識源について知識源強度が用意され、0に初期化される。この段階はその集団の知識源を学習し始める段階である。その後、図9に示すように、知識源強度は時間と個体の知識源吸収度(後述)の積に依存して増加する。この段階が個体が集団の知識源を学習する過程である。この知識源強度の曲線が知識源習得強度(後述)まで達した時、個体は参照していた集団の知識源を取り込み、以後その知識源を利用するようになる。この時点で個体はその知識源を習得したことになり、集団から離れ学習しなくなっても、簡単にその知識源を忘れてしまわない。

個体が集団の性質を示す知識源を習得した後、その集団から出ると、図10に示すように、その集団の知識源の知識源強度は時間と個体の知識源忘却度(後述)の積に依存して減少する。これは個体が一度習得した知識源の学習を止め、それを利用しなくなっていく過程である。

逆に、個体が集団から出るとき、知識源強度が個体の知識源習得強度に至らなかった場合、図11に示すように、その知識源の参照は終わり、個体はその知識源を簡単に忘れてしまう。

個体が集団の知識源を習得した後、集団から出て、再びその集団に入ると、図12に示すように、知識源強度が減少したところから増加を再開する。この過程は個体が一度習得した知識源を、利用しなくなっても思い出すが速く、すぐに多く利用しだすという特性を示している。

ここで、3つの因子、知識源習得強度、知識源吸収度、知識源忘却度のそれぞれを α , β , γ とすると、それぞれは以下のようにして計算される。

$$\alpha = \text{個体特性 } 3 \quad (5)$$

$$\beta = \text{個体特性 } 2 \times \text{集団特性 } 1 \times \text{知識源特性 } 1 \quad (6)$$

$$\gamma = \text{個体特性 } 4 \times \text{知識源特性 } 2 \quad (7)$$

ここで、(6)式の β の算出に3つの特性パラメタが関与しているが、これは個体が知識源を吸収するの

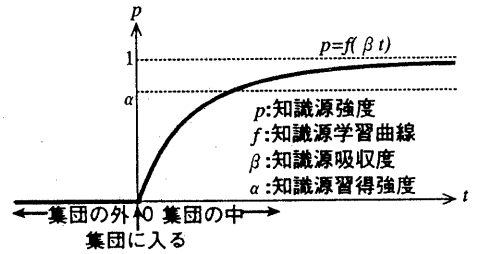


図9: 集団の知識源を学習する過程

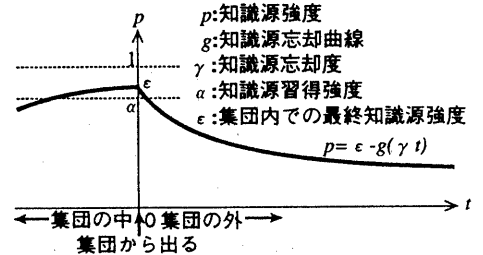


図10: 集団の知識源を忘れる過程

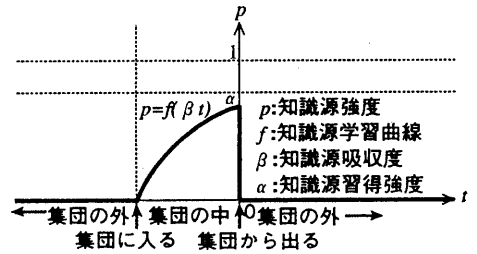


図11: 短期間学習した知識源の忘却過程

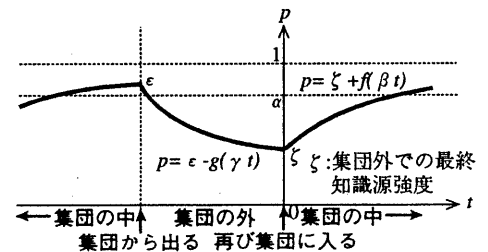


図12: 一度習得した知識源の再習得過程

に、個体の能力、集団の圧力、知識源の習得し易さの3つの要因が関係していると考えたからである。また(7)式の γ の算出にも2つの特性パラメタが関与しているが、同様に個体の能力、知識源の忘却さ

れ易さが関係していると考えたからである。

4.3 集団の雰囲気

本提案モデルでは、個体の様子は、個体の明るさ、個体の落ち着き、個体の怒り度など、様々な種類の要素から成り、それぞれの要素は、その程度を表す値を指定することにより、個体の様子を決定する。例えば、落ち着きという要素に負の値を指定すると落ち着きがない様子を表し、正の値を指定すると落ち着いた様子を表す。また、絶対値が大きければ、その程度が甚だしいことを表す。個体はその内部状態を外部に表現するために、その様子を変化させる。この機能は知識源によって記述され、知識源が様子を変更することにより実現している。

図7に示したように、集団の雰囲気は集団を形成する総ての個体の様子を集計して集団の雰囲気を計算する。集団の雰囲気も個体の様子と同様に、様々な要素から成り、それぞれの要素は、その程度を表す値を指定することにより、集団の雰囲気を決定する。それぞれの要素の具体的な計算方法は、システムにより与えられている。例えば、集団内の総ての個体について、落ち着き等の様子の要素の平均をとって、これを集団の落ち着き等の雰囲気の要素とする計算方法が、システムに準備されているということである。このような手法により、集団の雰囲気をシミュレーションできる。

本提案モデルでは、個体は集団の雰囲気を知り、行動を変化させることができる。これを実現するために、個体の持つ知識源は、その個体が所属する集団の雰囲気を参照できるようにしている。従って、知識源の記述により、集団の雰囲気に応じた振舞いを個体に行わせることができる。逆に知識源で集団の雰囲気に応じた振舞いが記述されていなければ、集団の雰囲気に鈍感な個体を定義することになる。つまり、知識源の記述によって、個体の雰囲気に関する反応を柔軟に定義できる。このようにして、集団の雰囲気に対する個体の様々な反応をシミュレーションできる。

4.4 集団の形成、成長、消滅

本提案モデルでは、集団の形成、成長、消滅はシミュレーション中の現象として発生する。我々は、個体は何らかの情報交換のために集まって集団を形成すると仮定し、集団はある2つの個体間で初めて対話が行われる時に、その2つの個体だけを含む集団として生成されるようにモデル化している。このとき、表1に示した集団特性2はシステムが定めるある正の値に設定され、集団内で個体が対話を行うと、集団特性2は対話(発言)を行った個体の個体特性1だけ増加し、行われないと時間の経過に従ってシステムが定める一定の速度で減少する。集団特性2が

0になると、その集団内での対話は疎である、つまり殆ど対話が行われていないとシステムは判断し、その集団を消滅させる。以上の集団特性2の時間変化を図13に示す。

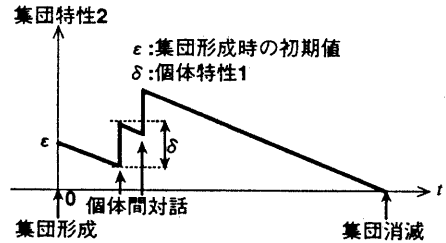


図13: 集団の形成、消滅

また、この集団に他の個体も入ることができ、逆に集団内の個体はその集団から出ることもできる。集団内に外部から多くの個体が入ってくれば、集団は成長することになる。また逆に、集団内から個体が出ていけば、集団は小さくなる。さらに個体が出ていき集団内の個体数が1になるまで減ったとき、その集団は消滅するとする。そもそも、個体数が1の集団は集団と言えないからである。

このような処理手続きによって、動的な集団の形成、成長、消滅をシミュレーションできる。

5 シミュレーション

ここでは各特性パラメタによって、様々なシミュレーションが可能であることを、例を通して示す。

5.1 シミュレーション1 — 村の会合

ある村で集会が行われた。このとき、子供、大人、長老が発言した。村人達は子供の意見にはあまり耳を傾けなかったが、大人の意見には耳を傾けた。子供と大人が盛んに発言している中で、長老が一言発言した。すると、村人全員が静まり返り、長老の一言に納得した。

これは各個体で集団に対する影響力に差がある例である。この例は、個体特性1を子供は小さく、大人は中程、長老は大きく設定することによりシミュレーションできる。

5.2 シミュレーション2 — 子犬の野性化

飼い犬は飼い主のもとで尻尾を振りながら暮らしていた。あるとき飼い犬は飼い主のもとから離れ、野犬の群れに仲間入りした。

ケース 1: 飼い犬が影響を受け易い場合

飼い犬は人間が近づくと尻尾を振る習性を持っているが、周りの犬が人間を吠えながら追いかけていくのを見て、だんだんそれに影響されていく。そして飼い犬も周りの犬と同様に人間を吠えながら追いかけるようになる。

ケース 2: 飼い犬が鈍感な場合

人間が近づくと、周りの犬たちは吠えながら追いかけていくのに対し、飼い犬は飼い犬歴が長いので、人間に対して尻尾を振る習性が抜けない。野犬の群れの中では異質な存在になるが、飼い犬は実は鈍いので気づかない。

ケース 3: 飼い犬が群れへの影響力を持つ場合

人間が近づくと、周りの犬たちは吠えながら追いかけていくのに対し、飼い犬は飼い犬歴が長いので、人間に対して尻尾を振る習性が抜けない。しかし、飼い犬はその群れの中で実は人望が厚く、他の犬たちから慕われていた。そのうち、周りの犬たちは飼い犬の真似をするようになる。野犬の群れは、その特性が大きく変わって愛らしい集団になる。

以上の3つのケースは次のようにしてシミュレーションできる。ケース1は、飼い犬の個体特性2を大きくし、ケース2は逆に小さくする。またケース3は、個体特性2を小さめ、個体特性1を大きめにする。

6 考察

従来の集団モデルの研究 [西尾 93][丸一 90] は、分散協調問題を解決するために、場および集団という概念を導入している。しかし、本研究では同じ集団という概念に着目してはいるが、目的が異なる。本研究の目的は実世界で見られるような個体とそれらが作る集団の相互作用を計算機上でシミュレーションすることである。従って、従来の研究における集団は分散協調問題の前提条件として準備されるものであるのに対し、本研究の集団はその形成、消滅がシミュレーションの1現象として扱われている。

本研究に非常に近い研究として、参考文献 [生天 93] が挙げられる。本研究の集団の概念に相当する概念は、この研究では複合エージェントとして定義されている。この複合エージェントは再帰的に定義されていて、複合エージェントの集合はまた1つの複合エージェントであるとされている。本研究とこの研究の大きな違いは、本研究が集団と個体の相互作用について着目したのに対し、この研究は再帰型組織構造のエージェント社会形成、つまり自己組織化に注目を置いている点である。本研究における集団の動的形成、消滅のシミュレーションは、この自己組織化の一部を含むものと考えられるが、この研究では集団と個体の相互作用については言及されていない。

本提案モデルでは多数の知識源について、同時に推論を行わなければならない。このため、一般的なプロダクションシステムを用いた場合、各知識源毎にプロダクションシステムを準備しなければならない。非常に規模の大きなシミュレーションシステムが必要になる。しかしながら、現在では一度に多数の知識源の推論を行う高速な推論方式 [碓崎 95] が提案されており、本論文で提案した個体と集団のモデルのシミュレーションは現実的に利用可能となっている。

7 おわりに

本論文では、個体と集団の相互作用に着目し、個体の振舞いと様子が集団の性質と雰囲気に影響を与え、また集団の性質と雰囲気が個体の振舞いに影響を及ぼす現象をシミュレーションできる、個体と集団のモデルを提案し、個体と集団の相互作用のシミュレーションに有効であることを示した。

今後の課題として、実際に計算機上でこのモデルを実現し、シミュレーションを行う必要がある。

謝辞 本研究を行うにあたり、貴重な御助言、御討論を頂いた碓崎研究室の諸氏に感謝致します。

参考文献

- [丸一 90] 丸一威雄, 市川正紀, 所真理雄: “自律的エージェントからなる組織の計算モデルと分散協調問題解決への応用”, 情報処理学会論文誌, Vol. 31, No. 12, pp. 1768-1779 (1990).
- [小林 85] 小林重信: “プロダクションシステム”, 情報処理, Vol. 26, No. 12, pp. 1487-1496 (1985).
- [生天 93] 生天目章, 塚本義明: “複合エージェントによるエージェント社会の構築”, マルチエージェントと協調計算 III, 第8巻, pp. 75-90, 近代科学社 (1993).
- [西尾 93] 西尾郁彦, 渡辺豊英, 杉江昇: “オブジェクトと場に基づいた協調的プログラム言語”, 情報処理学会論文誌, Vol. 34, No. 12, pp. 2499-2508 (1993).
- [碓崎 95] 碓崎賢一, 清水浩: “個体群の共通性に着目したルールベース・マルチエージェントシステムの高速推論方式”, 情報処理学会研究報告 94-AI-98, 情報処理学会 (1995).