

種を単位とした適応度評価による 利他的コミュニケーションの進化的獲得

北橋 昌樹 山口 智浩 谷内田 正彦

大阪大学大学院基礎工学研究科

〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, 06-850-6361

E-mail : {kitahasi,tomo}@yachi-lab.sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 本研究では、遺伝的アルゴリズム（以下、GA）を用い、個体間の相互作用である協調行動の進化実験を行う。従来、GAで協調行動を獲得するために、集団評価法が用いられてきたが、計算コストが大きく、進化速度が遅い。一方、計算コストが小さい個体評価法では、協調行動を獲得できない。そこで本論文では、同じ遺伝子を持つ個体群を種と定義し、同一種内で個体適応度を共有し、種間で競争を行う種評価法を提案する。協調行動を発生させる要因として、集団での捕食タスクにおいて、エサ発見信号の送受信能力の有無を遺伝子として4種の生物を定義し、4種での進化シミュレーションを行い、集団パフォーマンスを改善する。そして、評価手法の比較および進化過程での種の増減と集団パフォーマンスとの関係について議論を行う。

キーワード 人工生命, 進化, 協調行動, コミュニケーション, 種評価, 集団パフォーマンス

The Species Fitness Method for the Evolution of Cooperative Behavior in a Group Task

Masaki KITAHASHI Tomohiro YAMAGUCHI Masahiko YACHIDA

Graduate School of Engineering Science, OSAKA University

1-3 Machikane-yama, Toyonaka 560-8531 JAPAN, +81-6-850-6361

E-mail : {kitahasi,tomo}@yachi-lab.sys.es.osaka-u.ac.jp

Abstract To optimize the group performance, it is important both the concept of competition and sharing. Therefore, this paper presents *the species fitness method* that has both advantages between the group fitness method and the individual fitness method by sharing the individual performance of the agents belongs to the same species that has same chromosome.

We show the comparative experiments on the evolutionary simulation of a foraging task in a group among the group fitness, individual fitness, and the species fitness method. As the interaction among the agents, four kinds of species on the communication ability whether the agent can send or receive the signal for food are evolved.

key words *Artificial Life, Evolution, Cooperative Behavior, Communication, Species Fitness, Group Performance*

1 はじめに

エージェント集団における協調行動の発達は単にマルチエージェント分野での学習や進化の問題だけでなく、組織論、経営学といった社会科学の分野にわたる基本的な問題のひとつである。

そのような中で、集団パフォーマンスを最適化するという目標に対して、集団における協調行動はエージェント間の相互作用のうち集団パフォーマンスを改善するものと定義できる。しかしながら、従来研究では効率良く上述の協調行動を獲得するメカニズムが十分には解明されていない。そこで、本研究では、集団パフォーマンスを最適化させる協調行動を進化的に獲得する手法について述べる。

集団パフォーマンスを最適化するには、競争と共有の2つの概念が重要である。前者は、パフォーマンスを向上させる原動力であり、後者は評価に表れにくい利他的行動などの個体間の相互作用を保証する制約として機能する。しかしながら、従来手法[1]ではこの2つのバランスがあまり考慮されてこなかった。

集団パフォーマンスを最適化をGAによって行なうための評価手法には、大きく分けて集団評価法と個体評価法の2つがある。前者[1]は、集団パフォーマンスそのものを適応度とする手法である。この手法では、最適化を行ないたい集団パフォーマンスを直接評価し、集団パフォーマンスに寄与する個体間の相互作用を全て盛り込むことにより、集団パフォーマンスの最適化が容易に実現可能にするという利点がある。しかしながら、集団を構成する個体間で同一の適応度を共有してしまうため、個体間での競争が評価できずパフォーマンス改善の効率が悪く、進化スピードが遅い。そのため、通常は複数の集団同士での競争によりパフォーマンスを並列・山登り法的に改善していくが、このためのシミュレーションコストは後述する個体評価と比べて並列数倍となる。また、群れ全体の情報を1つの遺伝子として扱うので、個体評価と比べてGAでの探索空間が格段に広がることにもなる。従って、集団評価法は上記の理由で、最適化の効率が悪いと言える。

一方、後者は個体間での競争が直接評価されるため個体パフォーマンスは最適化される。しかしながら、個体間で他個体の個体パフォーマンスを共有しないため、他個体にとって有利となる相互作用も、その個体にとって有利とされない相互作用として無視されてしまい、集団パフォーマンスは通常、最適化されない。つまり各個体が利己的に自己のパフォーマンスを上げようとするため、協調行動を効率良く獲得することが出来ないのである。そのため協調行動にバイアスをかける個体間の相互作用を個体評価に加える手法が考えられるが、バイアスをかける相互作用が問題依存になることや、集団パフォーマンスを最適化できる保証がないという問題点があった。すなわち、自然選択における選択の単位は何か？個体か、集団か、種かという基本

的問題に帰着される。これらの問題を解決するため、本論文では、生物学での利他的行動を説明するハミルトンの仮説[2]にヒントを得て、同一種個体間で個体適応度を共有する種評価法を提案する。

種評価法の特徴は、単一集団において個体集合を種に分けることによって、種間での適応度(利益)の競争と共有の両者を実現したことである。これにより、効果的に集団パフォーマンスを最適化することが可能となる。しかも、従来の互惠主義的協調行動[3]では、利益を共有する相手の識別が問題であったが、本論文では、同種個体間での適応度の共有によりこの問題を解決した。

2 種評価法による競争と共有の実現

本章では、複数の個体から成る集団において、捕食タスクを例として集団パフォーマンスをGAを用いて進化的に改善するための枠組、特にパフォーマンスの評価手法について述べる。

2.1 集団評価法

集団評価法とは、集団パフォーマンスそのものをその集団の適応度として利用し、集団パフォーマンスを改善する手法であり、基本的な考え方は、ダーウィンの集団選択説[4]による個体の利他的行動の説明に基づいている。

この手法の特徴は、最適化する集団パフォーマンスそのものを適応度としている点である。そのため集団間での競争による集団パフォーマンスの改善を直接評価できる反面、どのようにすれば集団パフォーマンスを改善できるかといった詳細な評価は行なわない。つまり、集団を構成する全個体で1つの適応度を共有し、個体そのものの評価は行なわない。これにより利他行動を含め集団における個体間の相互作用は全て集団パフォーマンスに反映されているのだが、協調行動のみだす、あるいは逆に協調行動を誘導する個体間の相互作用に対して、直接評価を行なわないため、「寄らば大樹」となりがちで、パフォーマンス改善の効率が悪い。

2.2 個体評価法

個体評価法とは、各個体パフォーマンスそのものをその個体の適応度として利用し、各個体パフォーマンスを個体間の競争によって改善する手法である。

この手法を集団パフォーマンスの評価として利用する場合、集団パフォーマンスが全個体の個体パフォーマンスの和で表される場合でのみ利用可能である。例えば、本研究の捕食タスクの場合、各個体の捕食数の和が集団全体の捕食数と等しいことなどが上げられる。

しかしながら、個体評価法の問題点は、1章で述べたように、個体間で利益の共有を行なう制約が少ないため、原

理的に各個体が利己的にパフォーマンスを上げようとする
ことである。そのため、個体としては最善なパフォーマンス
を獲得する個体は得られても、単純にそれらの和をとる
だけでは、集団パフォーマンスの改善に必ずしも貢献しな
い。また、捕食タスクのように並列性が絡む集団パフォー
マンスを上げるには、各個体のタスク実行の並列性を促す
ような個体間の相互作用が協調行動として望ましい。し
かしながら、好ましい相互作用としてのアシスタンスや利
他行動と自己パフォーマンスの改善とのバランスは、状況
によって変化するため、それらを個体評価に加えるのは困
難である。

さらに個体間の競争は個体レベルでのパフォーマンスを
上昇させる反面、過度の競争により、かえって全体の集団
パフォーマンスを悪化させる恐れもある。したがって、集
団パフォーマンスの改善を促すためには、個体間で集団タ
スク達成に関する何らかの制約を共有することが重要であ
ると考えられる。

2.3 種評価法による協調行動の評価

以上の議論より、集団評価法による個体間での個体パフォー
マンスの共有、個体評価法による個体間での個体パフォー
マンスの競争には、それぞれ相反する特徴がある。そこで
種評価法では、個体間での個体パフォーマンスの共有と競
争の両立を目指す。

種評価法とは、1 集団中の個体集合を個体毎の遺伝子の
違いでサブグループに分け、それぞれのサブグループ間で
個体適応度を共有する手法である。

では、種評価法による集団パフォーマンスの効率的な改
善について述べる。集団を構成する個体が能力や行動パター
ンの違い、すなわち遺伝子の違いで複数のサブグループに
分類されるとき、同一の遺伝子を持つ個体グループを種と
呼ぶ。種内の各個体の個体適応度を共有することにより、同
種の個体間での利他行動は互恵主義的 [3] となり、利他行動
によって得た利益の分配が行なえる。従って、ある種で種
適応度を向上させる協調行動が発生し、それが他種の適応
度を上回った場合には、その種の個体数を集団内で増加さ
せることにより、集団パフォーマンスを直接評価すること
なく、集団パフォーマンスの改善と協調行動の拡大を同時
に行なうことが出来る。

つまり本手法の利点は、個体評価法と同程度のシミュレ
ーションコスト、計算コストでありながら、同種内での利他
的行動、つまり協調行動を評価することが可能であるため、
集団パフォーマンスを改善出来る点である。しかも、個体
評価法と同様に個体そのものを評価対象とするため、個体
を直接評価することができ、淘汰・増殖させることが可能
であり、個体パフォーマンスの改善も同時に行なうため、集
団評価法と比べて集団パフォーマンスに関する進化速度も
大きい。

2.4 種内で共有する適応度

種評価法では、種内で共有する適応度によって、集団で
の進化の挙動が異なることが予想される。同一の遺伝子
を持つ個体集合で種を定義した場合、条件が同一であれば同
種の個体の適応度は同一となるはずである。しかしながら、
本研究のように集団パフォーマンスに影響を与える個体間
の相互作用がある場合や、環境中にランダム性や非決定性
がある場合には、同種の個体であっても適応度は異なっ
てくる。したがって同一種内での適応度の共有は

- 互恵種内で利他行動した個体とそれによって適応度を
上げた受益個体間での適応度の再分配
- ランダム性や非決定性による適応度のバラツキの平均化
の 2 つの効果が考えられる。

次に、本研究で用いる集団での捕食タスクでは、各個体
のタスク実行の並列度が集団パフォーマンスに大きく影響
する。したがって、集団パフォーマンスを改善するには、各
個体パフォーマンスの平均を大きくし、かつ分散を小さく
することが基本である。したがって、種内で共有する適応
度としては、個体間での適応度の再分配を考慮すると個体
パフォーマンスの平均、あるいは種内での個体パフォー
マンスの均質化を重視すると分散の逆数が考えられ、さらに
その両者を同時に種の適応度とすることも可能である。

3 コミュニケーションを用いた集団タスクの進化シミュレーション

3.1 集団での捕食タスク

本論文では、集団タスクとして集団での捕食タスクを設
定し、それをシミュレーションを用いて実験する。但し、コ
ミュニケーションの進化を強調するため、捕食タスクは以
下のように単純化する。環境中には、多数の生物、多数の
エサ場、そして少数のエサがある。ここでの集団タスクと
は、生物集団が環境中の全てのエサを食べ尽くすことであり、
個体タスクとは、1 匹の生物ができるだけ多数のエサを
捕食することである。

シミュレーションの設定としては、エサ場の数が 500 個、
環境中の生物数が 500 匹で、初期設定として、エサのある
エサ場の数がランダムに 5 個あり、それぞれのエサ場には
100,200,300,400,500 個のエサがあるとする。また、生物の
初期配置として、それぞれのエサ場に 1 匹ずつの生物を配
置する。

次に生物の固定能力について説明する。各生物はいずれ
かのエサ場に位置し、1step 毎に捕食 or 移動を行なう。そ
れぞれのエサ場では任意の数の生物が存在でき、エサのあ
るエサ場にいる各生物はエサを 1 個/step の速さで捕食す
る。エサのないエサ場にいる生物は任意のエサ場に 1step
でランダムに移動する。

この問題設定のとき、最小 4step で集団タスクを達成することが出来る。これを理論的な最小値と呼ぶ。

3.2 生物間のコミュニケーション能力と種の定義

次に生物の遺伝的能力について説明する。前節で述べた集団タスク達成の効率化をはかるため、信号の送受信能力の有無を 2 ビットの遺伝子として設定して、以下の 4 種を生物の種として定義する。

- 孤立種：送受信能力なし (isolated species)
- 寄生種：受信のみ可 (parasitic species)
- 宿主種：送信のみ可 (hosted species)
- 互惠種：送受信能力あり (parasitic species)

このとき、1 ビットの情報は、その能力が「ある」か「ない」かの 2 値のみとする。送受信時の生物の行動は以下のように固定する。また、送信能力のある種は、捕食時に環境中の全てのエサ場へ信号を送信する。受信能力のある種は、非捕食時に信号を受信すると発信源へ 1step で移動する。捕食時は、その場で捕食を続ける。発信が決定的行動であるのに対し、環境中に複数の信号がある場合には、発信数に比例してランダムに 1 つの発信源を選択し、受信能力のある種は多くの発信捕食個体の群がるエサ場に確率的に移動する。つまり発信者は利他的であり、受信者は受益者である。

以上の設定により、送受信能力が共にある互惠種は、コミュニケーションによって集団タスク達成を容易にするので、同一種内では互惠的となる。受信能力のみの寄生種が一方的に利益を受け、利己的なのに対し、送信能力のみの宿主種は発信行動によって自己の未来の利益を間接的に減少、利他的である。

3.3 集団での種の増減の進化実験の目的

前述のシミュレーション設定において、集団の初期個体を全て送受信能力なしの孤立種として、GA を用いた進化シミュレーションを行う。各世代毎に各個体は一定の割合で他種へ突然変異し、その種が集団タスク達成に有利であると増加し、進化的に安定する。本論文での進化実験の目的は、集団タスクの進化において、次世代選択方法をいくつか変え、互惠種間での協調行動が進化的に安定になる条件、獲得手法を解明することである。

4 集団での捕食タスクの進化実験

4.1 実験 1: 集団評価法と個体評価手法との比較

4.1.1 実験方法

従来手法である集団評価法と個体評価法、それぞれの評価法を用いる GA によって、集団での捕食タスクについて

の集団パフォーマンス、つまり集団タスク達成時間を短く出来るか、どちらの手法がより良い結果を導き出せるかを検討する。よって、以下の 2 実験を行い、集団タスクパフォーマンスを比較する。

- 実験 1-1: 集団評価法 (20 集団 20 試行)
- 実験 1-2: 個体評価法 (1 集団 20 試行)

各実験は、各 20 試行での集団タスク達成時間、つまり環境中にある全エサを食べ尽くすまでの step 数の最大、平均、最小値を求めた。

本論文では、遺伝操作として、以下の手法を用いた [5],[6]。遺伝操作を行なう対象 (集団評価法では同一シミュレーションで同時に存在した個体集団の全ての情報をのせた遺伝子、個体評価法ではシミュレーションでの 1 生物の情報をのせた遺伝子) を GA 個体と呼び、同時に GA 操作を受ける GA 個体の集団を GA 集団と呼び、GA 集団中の GA 個体のその総数を N 個とし、各 GA 個体を i ($i = 1, 2, \dots, N$) と表現する。

まず、前述のシミュレーションを複数、もしくは 1 つ実行し、各 GA 個体 i の適応度 f_i を求める。

次に、選択・交叉を行なう。今回は GA 集団中の GA 個体を適応度の大きい順に並び変えた後、下位の一定の割合 (これを淘汰率と呼ぶ) の GA 個体を無条件に淘汰して消滅させる。そこで残った適応度の大きい n 個 ($n < N$) の GA 個体が次世代の親となる。この n 個の GA 個体に重複選択を許す適応度比例戦略を用いることにより子孫を残すこととする。このとき、ある GA 個体 i ($1 \leq i \leq n$) が各々の選択操作で選ばれる確率 p_i は、

$$p_i = f_i / \sum_{j=0}^n f_j$$

とする。エリート保存は行なわず、この確率に基づき重複選択し、選ばれた GA 個体について交叉確率に基づき 1 点交叉を行ない、さらに突然変異確率に基づきビット毎に突然変異の操作を行なう。各 GA 個体の遺伝子の各ビットは $\{0,1\}$ の 2 状態しかとらないので、突然変異の操作としては、0 から 1 へ、1 から 0 への 2 通りとする。この突然変異の操作を子孫の集団の遺伝子全てに対して行なう。

上記のすべての操作を行なって出来た子孫の集団を次世代の GA 集団とする。

以上の遺伝操作を本論文では拡張 GA と呼び、これを使用して、進化実験を行なった。

実験 1-1 の集団評価法では、同一シミュレーションで同時に存在した生物集団の全ての情報をのせた遺伝子を GA 個体として扱い、並列な 20 集団を GA 集団として集団評価法を実現し、GA による進化実験を行う。また、1 生物の遺伝子長が 2 ビット、集団の中に生物が 500 匹いることから、GA 個体の遺伝子長は (2 ビット) \times (500 匹) = 1000 ビットである。さらに、用いる集団の適応度 (以下、集団適応

度と呼ぶ)は、以下の通りである。

$$\text{集団適応度} = \begin{cases} 50 - \text{集団タスク達成時間} \\ \text{(if } 50 - \text{集団タスク達成時間} > 0) \\ 1 \\ \text{(if } 50 - \text{集団タスク達成時間} \leq 0) \end{cases}$$

遺伝操作として拡張 GA を用い、GA パラメータは、GA 個体数 20、遺伝子長 1000、交叉確率 0.2、ビット毎の突然変異確率 0.01、淘汰率 0.5 とした。また、交叉確率・突然変異確率・淘汰率は、実験 1-1 を用いてパラメータ調整を行ない、以降の実験 1-2, 2-1~2-3 でも同じ値を用いた。

実験 1-2 の個体評価法では、シミュレーションでの 1 生物の情報をのせた遺伝子を GA 個体として扱うので、1 生物の遺伝子長が 2 ビットだから、GA 個体の遺伝子長も 2 ビットとなり、1 つの集団の中に生物が 500 匹いることから、500 匹の生物を GA 集団として、個体評価法を実現し、GA による進化実験を行う。さらに、用いる生物の適応度 (以下、個体適応度と呼ぶ) は以下の通りである。

個体適応度 = 1 世代での、その生物の捕食数

遺伝操作として拡張 GA を用い、GA パラメータは、GA 個体数 500、遺伝子長 2、交叉確率 0、ビット毎の突然変異率 0.01、淘汰率 0.5 とした。

4.1.2 実験結果

図 1,2 にそれぞれ実験 1-1, 1-2 での世代毎の集団タスク達成時間の変化を示す。横軸は世代数、縦軸は集団タスク達成時間 (step) であり、20 試行の実験での集団タスク達成時間の最大、平均、最小値を求めた。但し、各値は 50 世代毎に平均値を表示する。

各実験における 20 試行での平均集団タスク達成時間を比較すると、実験 1-2 の個体評価法が 20~25step と最も悪く、あまり進化の様子が見られない。一方、実験 1-1 の集団評価法は 9step 程度に収束している。しかし、理論的な最小値の 4step とは、大きくかけ離れており、集団評価法、個体評価法では準最適解を得ることが出来なかった。

次に 20 試行での集団タスク達成時間の最大値と最小値を比較すると、個体評価法では差が非常に大きく、かつ、平均値の変動も非常に大きい。つまり、個体評価法では集団パフォーマンスが不安定に推移することがわかる。また、20 試行での最良の場合であっても、集団タスク達成時間は 10step 前後であり、集団評価法並みである。しかし、集団評価法では、最大値と最小値の差は個体評価法ほど大きくはなく、平均値の変動も小さい。

以上より、集団評価法の方が個体評価法よりも収束値の良さ、収束速度、収束値の安定度、収束値の最大値と最小値の差の全ての面で、良い結果を導くとと言える。

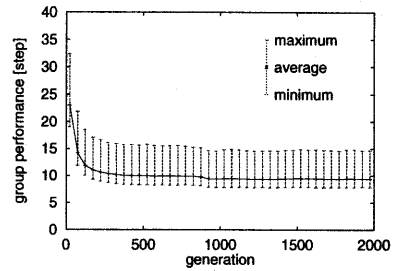


図 1: 実験 1-1: 集団評価法でのタスク達成時間の変化

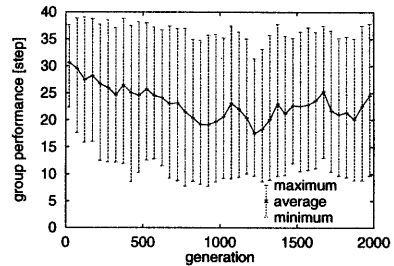


図 2: 実験 1-2: 個体評価法でのタスク達成時間の変化

4.2 実験 2: 種評価法での平均、分散適応度の比較

4.2.1 実験方法

提案手法である種評価法を用いる GA によって集団での捕食タスクについての集団パフォーマンス、つまり集団タスク達成時間を短く出来るかを検討する。このとき、種評価法に用いる適応度として以下の 3 種が考えられ、それぞれの適応度を用いて比較実験を行う。

- 実験 2-1: 種平均評価法 (種平均適応度)
- 実験 2-2: 種分散評価法 (種分散適応度)
- 実験 2-3: 種平均・分散評価法 (種平均・分散適応度)

実験 2-1, 2-2, 2-3 の種評価法では、個体適応度をサブグループ毎で共有する以外は 4.1.1 節の個体評価法と同様の GA (進化操作など全て) を行なう。

これらでは、ある同じ遺伝子をもつ生物群、つまりある GA 個体の集まりをある種 k と定義する。このとき、ある種 k の種平均適応度を以下のように定義する。

種平均適応度 = 種に属する GA 個体の個体適応度の平均

また、GA 集団中にある種の数 K とし、ある種 k に属する個体の個体適応度の分散を σ_k としたとき、その種 k の種分散適応度を以下のように定義する。

$$\text{種分散適応度} = \left(\sum_{j=0}^K \sigma_j^2 \right) / \sigma_k^2$$

さらに、ある種 k の種平均・分散適応度を以下のように定義する。

$$\text{種平均・分散適応度} = \text{種平均適応度} + \alpha \times \text{種分散適応度}$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} \alpha = a \times \frac{\text{全種の種平均適応度の和}}{\text{全種の種分散適応度の和}} & (\text{適応重み}) \\ \alpha = a & (\text{固定重み}) \end{cases}$$

適応度重みは全体のパフォーマンスが小さいときには、種分散適応度の重みを小さくし、全体のパフォーマンスが大きいときには、種分散適応度の重みを大きくする。また、全体の並列度が大きいとき、つまり種内での分散が小さいときには、種平均適応度の重みを大きくする。

遺伝操作として拡張 GA を用い、GA パラメータは、前述の個体評価法と同じ値を用いる。但し、予備実験によるパラメータ調整の結果、固定重みより適応重みの方がパフォーマンスが良く、 a の係数は $a = 1.5$ が最適となった。

4.2.2 実験結果

図 3,4,5 にそれぞれ実験 2-1,2-2,2-3 での世代毎の集団タスク達成時間の変化を示す。横軸は世代数、縦軸は集団タスク達成時間 (step) であり、20 試行の実験での集団タスク達成時間の最大、平均、最小値を求めた。但し、各値は 50 世代毎に平均値を表示する。

各実験における 20 試行での平均集団タスク達成時間を比較すると、実験 2-1 の種平均評価法が平均 35step と最も悪く、進化の様子が全く見られない。この理由については、5.2.2 節で考察を行なう。一方、実験 2-2 の種分散評価法と実験 2-3 の種平均・分散評価法が理論的な最小値の 4step に近い 6step 程度に収束している。また、進化によって得られた最小値は、理論的な最小値に近い準最適解である 5step を得ることが出来ている。

次に 20 試行での集団タスク達成時間の最大値と最小値を比較すると、種平均評価法では差が大きい。しかし、種分散評価法と種平均・分散評価法では、差が小さく、20 試行の全てにおいて良い値に収束していることがわかる。

以上のように、種評価法では、個体パフォーマンスの分散を用いた場合の方が、実験 1 の従来の評価法よりも良い結果となった。

5 考察

5.1 実験した各評価法での収束速度の比較

図 6 に実験 1,2 の 5 つの実験について、理論的な最小値に近い 5step を準最適解と置いた場合の、その step 数の整数倍の step 数で終了するようになった世代数を示し、これらの収束速度の比較、考察を行なう。横軸は準最適解 5step の何倍かを示し、縦軸はその step 数で終了した最初の世代数の 20 試行平均である。ただし、実験 2-1 の種平均

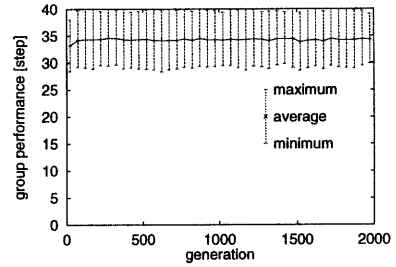


図 3: 実験 2-1: 種平均評価法でのタスク達成時間の変化

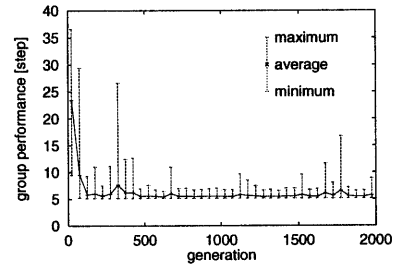


図 4: 実験 2-2: 種分散評価法でのタスク達成時間の変化

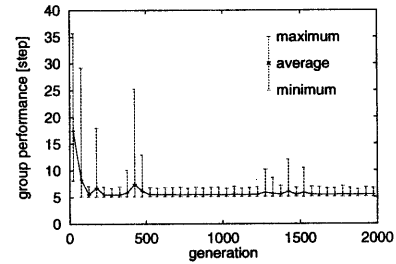


図 5: 実験 2-3: 種平均・分散評価法でのタスク達成時間の変化

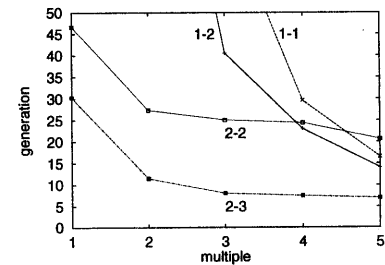


図 6: 収束速度の比較

評価法は、値が大き過ぎ、図 6 の範囲外なので表示されていない。

図 6 からわかるように、準最適解に最も早く到達するのは、実験 2-3 の種平均・分散評価法である。その理由については、次節で述べる。

5.2 種の増減と集団パフォーマンスとの関係

5.2.1 実験1での種と集団パフォーマンスとの関係

実験1での種と集団パフォーマンスとの関係について議論する。図7,8に実験1-1,1-2での世代毎の種の変化を示す。横軸は世代数、縦軸はそれぞれの集団中に占める種の割合である。但し、各値は50世代毎に平均値を表示する。

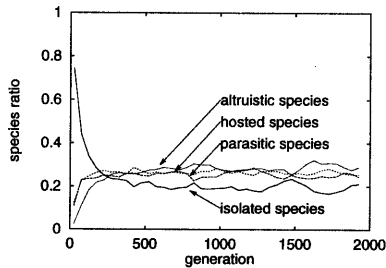


図7: 集団評価法(実験1-1)での種の変化

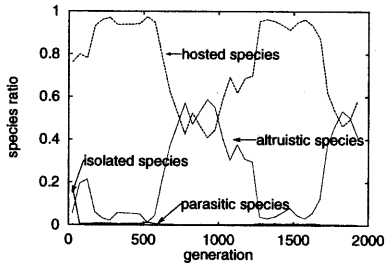


図8: 個体評価法(実験1-2)での種の変化

図7に集団評価法の実験(実験1-1)のある試行における20集団(500×20個体)での4種の個体数の割合の変化を示す。集団評価法では、種や個体に対して直接淘汰が作用しないため、4種の割合が各1/4に均質化されてしまうことがわかる。この原因として、集団評価法に用いる染色体の長さが個体評価法・種分散評価法の500倍で、探索空間が非常に広いため、同一の世代数の実験では十分な探索を行えなかったことが考えられる。

また、図8に個体評価法の実験(実験1-2)のある試行における1集団(500個体)での4種の個体数の割合の変化を示す。個体評価法では、個々の個体タスクパフォーマンスしか考慮に入れていないため、受信能力がある寄生種と互惠種が増えるが、この2種間では利他的でない寄生種が有利になり、数を増やす。しかし、あるところまで寄生種が数を増やすと、受信する信号がほとんどなくなるため寄生種の優位性が崩れ、数を減らしはじめる。同時に互惠種が数を増やしはじめるが、寄生種と互惠種の数がお互い同数となったところで、寄生種の優位性が発現し、寄生種が再度、数を増やしはじめる。このような増減を続け、振動するようになる。よって、各試行では集団パフォーマンスは振動

し、試行間で平均をとると、図2の様に集団パフォーマンスとしてはあまり改善が見られないようになる。

5.2.2 実験2での種と集団パフォーマンスの関係

種評価法の中でも、用いる適応度を変えることにより挙動が違うことを4.2.2節で示した。そこで実験2についても、種の分布と集団タスクパフォーマンスの関係を議論する。図9,10,11に実験2-1,2-2,2-3での世代毎の種の変化を示す。横軸は世代数、縦軸はそれぞれの集団中に占める種の割合である。但し、図9は5世代毎に平均値を表示する。

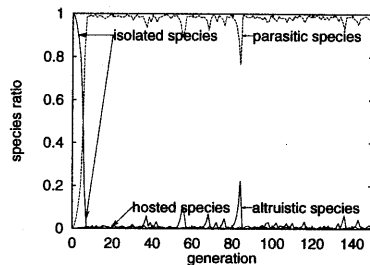


図9: 種平均評価法(実験2-1)での種の変化

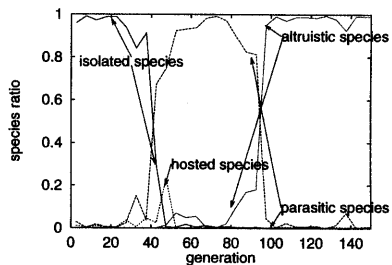


図10: 種分散評価法(実験2-2)での種の変化

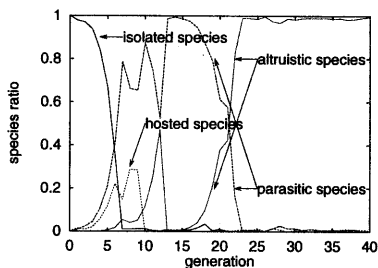


図11: 種平均・分散評価法(実験2-3)での種の変化

図10に種分散評価法の実験(実験2-2)のある試行での1集団(500個体)での4種の個体数の割合の変化を示す。0~40世代の初期世代では孤立種が減少する一方、寄生種、宿主種、互惠種の順で増加していく。50世代で受信能力を持たない孤立種と宿主種は淘汰され、受信能力を持つ寄生種と互惠種が0.5付近で競合状態となるが、一旦、互惠種

が0.5を越えて多数派となると、その後は大半が互惠種となって安定する。図4,10をあわせて見ると、互惠種が集団全体に広がり、安定すると集団パフォーマンスが最適値に近付くことがよくわかる。

ゲーム理論の分野では、囚人のジレンマのゲームを繰り返し多数行くと、協調者(互恵関係に相当する)と、裏切り者(寄生-宿主関係に相当する)のどちらか一方が大勢を占める世界になりやすく、さらに両者は数世代の間で簡単に移行する[7]ことが知られている。我々の場合、実験1-2の個体評価法でシミュレーションした世代全体に渡ってこの傾向が見られた。裏切り者に相当する寄生種と協力者である互惠種とを集団評価法では区別できず、また個体評価法では、囚人のジレンマゲームと同様の不安定な現象が発生するため、集団パフォーマンスが収束しない。これに対して種分散評価法では、図10に示したように、両者の不安定な期間が約60世代(40~100世代)と短く、しかも1度互惠種が多数派となるとそのまま長い世代に渡って安定するのが最大の特徴である。

さらに、図10から種分散評価法の特徴を考えると、寄生種と互惠種の攻めぎ合いの結果、互惠種が寄生種の数を上回ったときに、大部分が互惠種で安定するということだといえる。しかし、寄生種と互惠種の攻めぎ合いをはじめのまでに、しばらく世代を重ねる必要がある。また、図9から種平均評価法の特徴は、進化実験をはじめ、すぐに大部分が寄生種で安定することだといえる。さらに、図11から種平均評価法の特徴は、すぐに寄生種と互惠種の攻めぎ合いをはじめ、互惠種が寄生種の数を上回ったときに、大部分が互惠種で安定するということだといえる。

今回の実験の中で種平均・分散評価法を用いた実験2-3が最終収束値に最も早く到達する(図6)理由を、上記の特徴より説明する。種平均評価法と種分散評価法を組み合わせるとき、種平均評価法でのすぐに寄生種に偏る特徴により、種分散評価法で必要な初期収束部分である寄生種と互惠種が増減をはじめのまでの時間を短くする。これにより、種分散評価法部分で探索を行なっている寄生種と互惠種が増減する過程に早く進むことが出来る。以上の理由により、種平均・分散評価法を用いた実験2-3が最も早く最終収束値を得ることが出来たと考えられる。

これらの現象がおこる理由は以下の様に説明できる。種平均適応度のみでは、寄生種の一部の個体が良い結果を出して、種での平均値を上げている場合と、互惠種が利他的行動を発達させ、平均的に個体パフォーマンスを改善しているのを区別出来ない。しかも、互惠種の利他性は互惠種だけでなく、寄生種にまで利益、つまり個体パフォーマンスを上げるようにエサを分配してしまう。よって、寄生種にとって非常に有利な条件となり、寄生種が増え、結果として集団パフォーマンスを上げることは出来ないのである。また、種分散適応度のみでは、寄生種が抜け駆けをす

ることを否定的に評価出来るが、個体パフォーマンスがあまり上がらなくても、抜け駆けさえしていなければ良い評価を得ることが出来る。よって、個体パフォーマンスがなかなか上昇しないという足かせがあると考えられる。これらの理由により、種平均適応度と種分散適応度を別々に扱うことは不適當であることがいえる。

以上のような実証・理由により、集団タスクを進化的に最適化するための評価手法として、種平均・分散適応度を用いた種評価法が収束値の良さ、収束速度、収束値の安定度、バラツキなど全ての面で優れており、最も良い結果をもたらすと言える。

6 おわりに

本論文では、集団タスクの進化的獲得に対し、集団内で同種の個体間で適応度を共有する種評価法を提案した。種評価法を集団評価法、個体評価法と比較し、従来手法よりも小さな計算コストでパフォーマンスの良い協調行動が進化的に安定して得られることを示した。さらに、種評価法に用いる適応度として、種平均・分散適応度が最適であることを実験的に明らかにし、その理由について議論した。

今後の課題は、広がりを持つ空間での捕食タスクにおける協調行動の獲得に種評価法を用いることを予定している。

参考文献

- [1] Saunders,G.M. and Pollack,J.B, "The Evolution of Communication Schemes Over Continuous Channels," *Proc. 4th Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior (SAB-4)*, pp.580-589, 1996.
- [2] Hamilton,W.D. "The Genetical Evolution of Social Behavior I, II," *Journal of Theoretical Biology*, Vol.7, pp.1-52, 1964.
- [3] Sen,S., "A Foundational Principle for Promoting Cooperative Behavior among Self-Interested Agents," *Proc. Second Int. Conf. on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pp.322-329, 1996.
- [4] 東 正剛, "地球はアリの惑星," 平凡社, pp.22-29, 1995.
- [5] 北野 宏明 編. "遺伝的アルゴリズム" 産業図書, pp.3-7, 1993.
- [6] 安居院 猛 and 長尾 智晴, "ジェネティックアルゴリズム" 昭見堂, pp.18-21, 1993.
- [7] 松田 裕之 and 江副 日出夫 訳, Nowak,M.A., May,R.M. and Sigmund,K. 著, "囚人のジレンマ" と生物の進化, *The Arithmetics of Mutual Help*," 日経サイエンス, Vol.25, No.8, pp.50-57, 1995.