

行動ルールが変化する人工社会の進化的設計手法

Evolutionary Design of Rule Changing Artificial Society Using Genetic Algorithms

烏 云

Yun Wu

筑波大学システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

wu@kslab.cs.tsukuba.ac.jp, <http://www.kslab.cs.tsukuba.ac.jp/~wu/>

狩野 均

Hitoshi Kanoh

筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻

Department of Computer Science, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

kanoh@cs.tsukuba.ac.jp, <http://www.kslab.cs.tsukuba.ac.jp/~kanoh/>

Keywords: genetic algorithms, artificial society, agents, action rules, design

Summary

Socioeconomic phenomena, cultural progress and political organization have recently been studied by creating artificial societies consisting of simulated agents. In this paper we propose a new method to design action rules of agents in artificial society that can realize given requests using genetic algorithms (GAs).

In this paper we propose an efficient method for designing the action rules of agents that will constitute an artificial society that meets a specified demand by using a GAs. In the proposed method, each chromosome in the GA population represents a candidate set of action rules and the number of rule iterations. While a conventional method applies distinct rules in order of precedence, the present method applies a set of rules repeatedly for a certain period. The present method is aiming at both firm evolution of agent population and continuous action by that. Experimental results using the artificial society proved that the present method can generate artificial society which fills a demand in high probability.

1. はじめに

近年、エージェントシミュレーションを用いて人工社会を生成し、社会的、経済的、政治的な組織や現象を説明しようという試みが多くなされている [Gilbert 99].

Epstein らは Sugarscape モデルを提案し、環境に反応する単純なルールを持つエージェントの進化を通して、社会制度や文化がどのように伝播していくのかを分析した [Epstein 96]. Flentge らはミーム (memes) という概念を導入し、Sugarscape モデルを拡張して、人工社会における所有規範の創発と効果について研究を行った [Flentge 01]. 倉橋らは遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて、エージェントシミュレータ TRURL を構築し、コミュニティの共同分配規範が情報社会の中でどのように機能するかを分析した [Kurahashi 01]. 奥野らはコンピュータグラフィックス分野において、仮想都市を生成するセルオートマトンの状態遷移ルールを自動設計する手法を提案した [奥野 01].

これに対して、本研究では Sugarscape モデルをベースとして、行動ルールが時間的に変化する人工社会を検討した。本論文では、要求を満たす人工社会を実現するためのエージェントの行動ルールを GA を用いて効率的に設計する手法を提案する。本手法は、「行動ルール」と「ルールの適用回数」の組を染色体にしたものである。これにより、人工社会を進化的に設計する効率が向上することが見込まれる。

著者らは密度分類問題を対象として、問題を解く一次元 2 状態セルオートマトン (CA) の状態遷移ルールを進化的に獲得する手法を提案した [Kanoh 03]. その結果、1 つのルールを用いる場合よりも複数のルールを適用する場合 (すなわちルールが時間的に変化する) の方が正解率が向上することを実験により確認した。本研究はこの手法をエージェントシミュレーションに応用したものである。

以下では、まず、研究分野の概要について述べる。次に提案手法のコード化とアルゴリズムを説明する。最後に本手法を人工社会の生成に適用した実験結果を示し、

考察を行う。

2. 研究背景

2.1. セルオートマトンに基づく計算

CA が実行する計算とは次のようなものを意味する。計算への入力とは初期状態としてコード化し、出力はあるタイムステップ後の最終状態とする。入力から出力への変換の中間ステップが計算のステップである。ここで、複雑な計算に対して計算能力が高いルールを適用する必要がある。しかし、このようなルールを発見するのは容易なことではない。

これに対して、著者らはルールが時系列的に変化する CA、すなわち、ルール変化型 CA を提案した [烏 03]。提案する手法では、「ルール」と「ルールの適用回数」をプログラムのステップと考える。その具体的な動作過程は以下のようなものである。ここでは、 R_n は n 番目のルール、 M_n は R_n の適用回数を表す。 $S(t)$ を用いて時間 t における状態を表す。また、 $S(M)$ は CA の初期状態 $S(0)$ にルールを M 回適用した後の状態を表すものとする。

- Step 1: 計算への入力とは初期状態 $S(0)$ としてコード化する。
- Step 2: ルール R_1 を $S(0)$ に M_1 回適用する。ルール R_2 を $S(M_1)$ に M_2 回適用する。このようにルール R_n を $S(M_1 + \dots + M_{n-1})$ に M_n 回適用する。
- Step 3: 出力はあるタイムステップ後の状態をデコード化する。

2.2. Sugarscape モデル

本研究では Epstein らが提案した Sugarscape モデルを採用する [Epstein 96]。このモデルではエージェントは二次元格子を移動し、砂糖やスパイスといった食糧を摂取および交換などを行うものである。これは要求を満たす人工社会を設計する目的によく適している。

§1 環境

環境はエージェントが生き残るために必要な財、すなわち食糧の空間分布と定義される。ここでは食糧として砂糖とスパイスを配置する。それぞれの場所につき、食糧はその場所の最大容量に達するまで期間あたり一定の割合で回復する。エージェントはどちらかの財の蓄積がなくなったときに餓死する。最初は 400 エージェントをランダムに配置する。

§2 エージェント

人工社会に住む人々のことをエージェントと呼ぶ。エージェントはそれぞれの内部状態と行動ルールを持ち、環境内で行動する。

§3 内部状態

エージェントの内部状態は表 1 に示したように、現在位置、視力、代謝率、財産、性別、年齢などがある。

§4 行動ルール

エージェントには表 2 に示したような四つの行動ルールを与える。移動、収穫ルールは環境とエージェントの間で相互作用し、取引、交配ルールはエージェントとエージェントの間で相互作用する。ここで、移動、収穫、取引、交配のルールをそれぞれ 0, 1, 2, 3 と番号をつける。

表 1 エージェントの内部状態

現在位置	(x,y)という値のペアを持つ
視力	格子の直行 4 方向について視力の分だけ見渡すことができる
代謝率	期間ごとに燃焼する食糧の量
財産	エージェントが蓄積する食糧の量
性別	男 また 女
年齢	1 期間ごとに 1 歳増加する

表 2 エージェントの行動ルール

ルール名	ルール番号	意味
移動	0	視力の届く範囲で自分が長く生き伸びられるところに移動する
収穫	1	その場の食糧のすべてを財産として蓄える
取引	2	近隣と砂糖とスパイスを交換する
交配	3	交配条件を満たす場合、近隣と交配して子孫を残す

2.3. 関連研究

エージェントシミュレーションを用いて、ボトムアップのかつ自律的に人工社会を構築し、社会集団が持つ機能と組織構造や社会プロセスの解明に関する研究が盛んに行われている。

Epstein らの Sugarscape モデルでは、内部状態と行動ルールを持つエージェントを多数設定し、エージェントと単純な局所ルールを持つ環境、エージェントとエージェントの相互作用によって大域的な社会現象を創発する。エージェントの行動に伴って発生する現象を考察し、社会制度や経済、文化がどのように発達し、変化していくのかを分析した [Epstein 96]。これは、エージェントに簡単なルールを適用し、その積み重ねの結果として、現実社会での現象を導き出すという特徴がある。

Flentge らは Sugarscape モデルを拡張し、人工社会における所有規範の創発と効果について研究を行った [Flentge 01]。このモデルでは、社会規範をミームという概念とリンクした。ミームは遺伝子 (Gene) と類似し、自己複製することができる。遺伝子が個体を作る情報を伝達し、種を進化させるように、ミームは文化の伝達を媒介し文化を進化させる。Flentge らはミームという概念を導入し、本来の Sugarscape モデルにおける移動と文化伝播ルールを拡張した。これにより、社会全体の規範がどのように変化するか、また、ミームが規範の構築にどのような役割を果たしているのかを詳細に分析した。

倉橋らは遺伝的アルゴリズムを用いて人工社会 TRURL を構築し、コミュニティの共同分配規範が情報社会の中でどのように機能するかを分析した [Kurahashi 01][倉橋 01]。先天的属性は社会を表現する染色体上の遺伝子として記述されている。発言確率、知識移転率、コメント態度等によって人工社会に参加するエージェントの性格を表現している。これにより、意図的なパラメータの調整なしに人工社会モデルを進化的に実社会に近づけ、共同分配規範の性質を再現した。倉橋らが構築したエージェントシミュレータ TRURL では、社会指標を GA によって最適化する。すなわち、人工社会の多数のパラメータを進化的計算手法を用いて調整するという特徴がある。

奥野らは「地区」をセルオートマトン、市街地形成のプロセスを GA を用いて時系列的生成する方法を提案した [奥野 01]。セルに空地、建物、道路の状態を持たせ、セル間の相互作用の強さからセルの状態遷移ルールを決定する。ユーザの要求する都市が生成できるように、ユーザの要求に対する充足度を適応度関数とし、各都市における建物配置ルールの適用順序を GA の染色体とすることにより、都市の時系列的生成を可能とした。

Epstein, Flentge らは人工社会として Sugarscape モデルを提案しているが、行動ルールは人手により設計している。また、倉橋、奥野らはエージェントが持つ属性ならびに都市に建物を配置するためのルールの適用順を

染色体上の遺伝子とし表現し、GA で獲得する方法を提案している。これらの研究に対して、本論文では要求を満たす人工社会を実現するため、「行動ルール」と「ルールの適用回数」の組を GA の染色体にすることによって、効率的に設計しているところに特徴がある。

本手法により、社会的、経済的な現象を解明する手段を提供することができると思う。

3. 提案する手法

3.1. コード化

図 1 は従来手法のコード化を示す。例えば、奥野らはこの方法を用いている。すなわち、行動ルールをそのまま染色体にしたものである。

本研究では、従来手法のコード化方法に対して、図 2 のように改良したものである。 R_n は n 番目のルール組を表し、四つの行動ルールの組み合わせから一つを選んだものである。ここで、染色体は $4! = 24$ 個のルール組からなる。遺伝子は左から右に順に適用し、右端で終了する。なお、染色体はすべて固定長である。

また、 M_n は R_n の適用回数を表す。例えば、 R_1 を M_1 回適用し、次に R_2 を M_2 回適用する。

本手法は一定期間ごとに異なるルール組を適用することによって安定したエージェント集団の成長と持続的な行動を達成し、その結果効率よく人工社会を設計することを考えたものである。

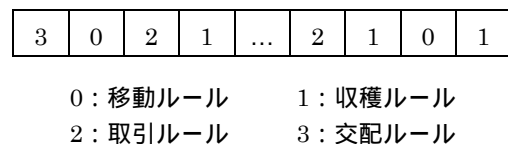


図 1 従来手法のコード化

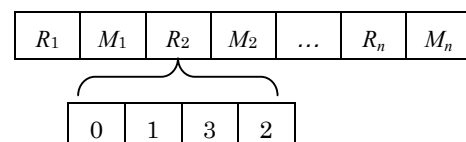


図 2 提案する手法のコード化
(0~3は図1と同じ)

3.2. 適応度

本研究では経済的に「豊かな社会」を効率的に生成するための行動ルールを獲得することを目的とする。ここでは、人口が一定数を超え、生まれたときよりも多くの財産を持ち、エージェントの財産の最小値がある値以上となる社会を「豊かな社会」と定義する。この基本方針に従って適応度関数 F は式 (1) で計算する。

$$F = f_1(W_{min}) + f_2(W) + f_3(P) \quad (1)$$

W_{min} : エージェントの最小財産

W : 一人当たりの財産の増加値

$$W = (W - W_{ini}) / P$$

W : エージェントの財産の現在値

W_{ini} : エージェントの初期財産

: 全エージェントに対する和

P : 生存人口

W_{min} , W は初期財産の平均値を上回ること、 P は初期エージェントの 1/4 を超えることを目標とする。例として、閾値がそれぞれ 100, 100, 350 である f_1 , f_2 , f_3 を図 3 に示す。その合計が 3 の場合満点になる。

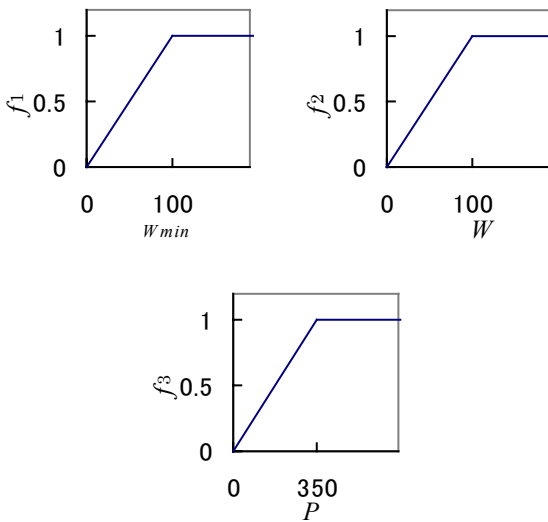


図 3 適応度関数

3.3. アルゴリズム

Step1: 初期集団として K 個の個体 (行動ルール) を生成する。

Step2: 世代ごとに、各エージェントの初期配置に行動ルールを適用し、人工社会を生成して適応度を計算する。

Step3: 集団中の個体を適応度でランクを付け、適応度が最も高い E 個のエリート個体を修正なしで次世代に残す。

Step4: 残りの $K - E$ 個の個体はエリートな E 個とルーレット戦略で選んだ個体から 1 つずつ選び、一点交叉を行う。

Step5: 交叉でできた子個体に 0.05 の確率で突然変異を行う。ここで、突然変異はルールの番号を現在の番号以外の番号に書き換える。

4. 実験

4.1. 実験方法

ここでは、エージェントの活動範囲を 50×50 セルとし、そこにエージェントをランダムに 400 個配置した (これを初期配置と称す)。エージェントの内部状態を表 3 に示す。GA の条件としては、集団サイズ $K = 50$, エリート個体数 $E = 10$, 世代数の上限は 100 とした。

表 3 エージェントの内部状態の設定

視力	1 ~ 10
代謝率	1 ~ 4
初期財産	20 ~ 60
性別	男, 女
年齢	0 歳から始まる
交配開始年齢	12 ~ 15
交配終了年齢	男 50 ~ 60, 女 40 ~ 50
寿命	60 ~ 100

4.2. 実験結果

§1 適応度の比較

ここでは、 W_{min} , W と P の異なる閾値に対して従来手法と本手法の比較実験を行った。ルールの適用回数を $1 \leq M_n \leq 10$ とする。

表 4 は乱数のシードを 30 回変え、50 世代まで進化させて、得られた最良適応度の平均値 (標準偏差) を示している。表 4 からわかるように、従来手法の適応度が 2.0 ~ 2.2 になっているのに対して本手法が 2.6 ~ 3 になっている。

表 4 従来手法と本手法の適応度 (Max = 3)

W_{min}	W	P	従来手法	本手法
50	50	120	2.2(10%)	3.0(0%)
50	50	150	2.2(8%)	3.0(0%)
70	70	200	2.0(2%)	3.0(6%)
100	100	350	2.0(0.5%)	2.6(26%)

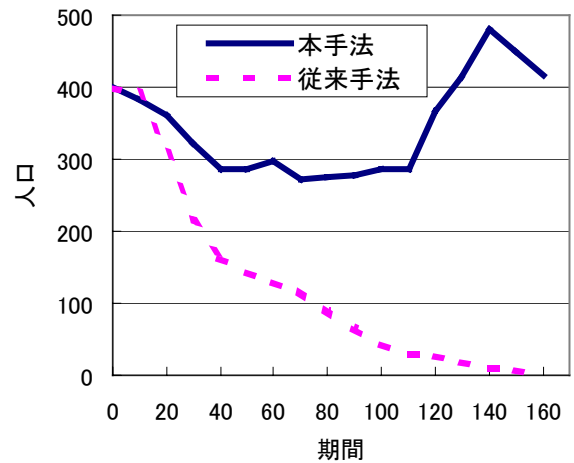


図 5 人口の時系列変化

§ 2 人工社会の時系列変化

W_{min} , W と P の閾値がそれぞれ 100, 100, 350 である場合の実験において、得られたエリート個体を 1 つ取り出して初期配置に適用し、三つの指標に対する比較実験を行った。

図 4 と図 5 はそれぞれ期間ごとの財産と人口の時系列変化である。図 4 と図 5 からわかるように、従来手法と本手法では、 W_{min} , W が徐々に増加している。しかし、 P に関しては、従来手法の人口が次第に減少しているのに対して、本手法は安定した人口の期間を経て再び増加している。本手法を用いて、豊かで、かつ健全に成長する人工社会を生成することができたといえる。

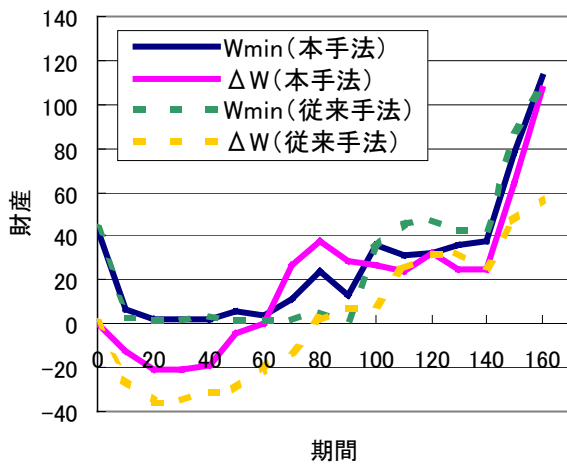


図 4 財産の時系列変化

§ 3 コード化方法の比較

行動ルールを複数まとめてモジュール化してコード化する方法は、他には 2 つ考えた。それぞれ以下のようなものである。

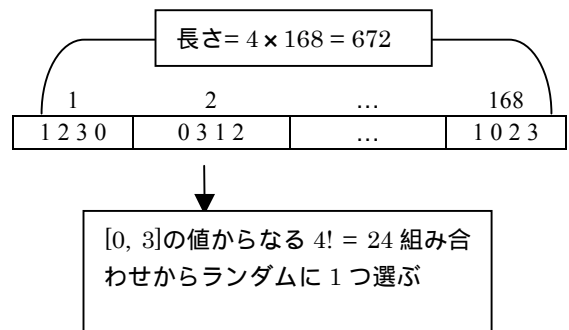


図 6 コード化 1

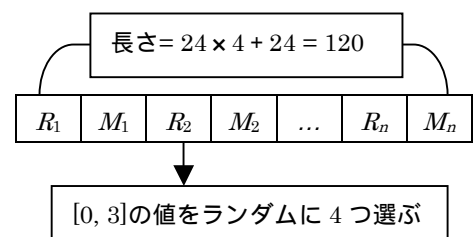


図 7 コード化 2

図6のコード化1は、1期間内では同じルールが連続しないようにしたものである。また、図7のコード化2は、1期間内では同じルールが連続する可能性はあるが、同じルール組をM期間繰り返し適用している。

表5は各コード化方法に対して、目標値が W_{min} 、 W と P の閾値がそれぞれ100、100、350である人工社会を生成し、最終世代における最良適応度の平均値を比較したものである。これは各実験を50世代まで行い、乱数のシードを10回変えて得られた結果である。

表5から本手法の適応度が一番高いことがわかる。すなわち、1期間内では同じルールが連続しないようにし、なおかつ、同じルール組を期間繰り返して適用することが有効であるといえる。

表5 コード化方法の比較

コード化方法	適応度 F
コード化1	2.0(0.6%)
コード化2	2.5(15%)
本手法	2.7(17%)

4.3. 考察

§1 本手法の進化状況

表4の W_{min} 、 W と P の閾値がそれぞれ100、100、350である場合の実験において、初期集団で適応度が中間値を取る個体(初期世代)と最終世代(50世代)におけるエリート個体を比較した結果を表6、7に示す。表中の値は30回の実験の平均値である。

表6は各評価指標の進化を表している。表6からわかるように W_{min} と W に関して、従来手法と本手法では最終世代で目標値を上回っている。しかし、 P に対して従来手法が目標の人口数の2%にしか達していない。これに対して、本手法は69%に達している。

表7は各個体に含まれるルールの適用比率を表している。この表から本手法は従来手法に比べて、移動ルールと収穫ルールが増え、取引ルールと交配ルールが減少していることがわかる。これにより、要求を満たす人工社会を実現するには移動ルールと収穫ルールが協調し、ともに重要な役割を演じていると考えられる。

§2 各財産領域における人口の割合

4.2節§2と同様な実験を行い、各財産領域における人口のヒストグラムを作成した(図8)。図8から見てわかるように、72%のエージェントが領域 $150 \leq W < 200$

に属している。これより、本手法を用いて生成した人工社会は貧富の差が少なく、健全な社会であるといえる。

表6 人工社会の評価指標の進化

手法	世代	移動	収穫	取引	交配
本手法	初期	25%	25%	25%	25%
	最終	29%	38%	13%	19%
従来手法	初期	25%	25%	25%	25%
	最終	25%	29%	23%	23%

表7 ルールの適用比率の変化

手法	世代	W_{min}	W	P
本手法	初期	33	24	191
	最終	100	105	243
従来手法	初期	75	33	6
	最終	153	115	6
目標値		100	100	350

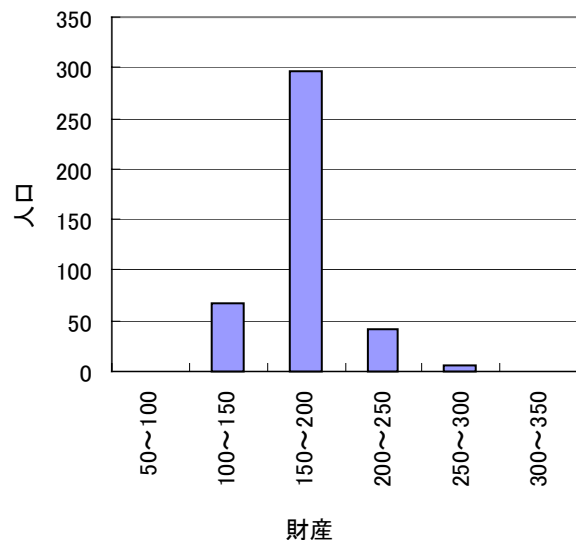


図8 人口の割合の変化

§3 食糧の再生期間によるルールの適用比率

W_{min} , W , P の閾値がそれぞれ 50, 50, 120 である場合の実験において、食糧の再生期間を変えたときのルールの適用比率と最終世代における最良適応度を表 8 に示す。また、ルールの適用比率と各指標の変化を図 9, 10 に示す。

図 9 から見てわかるように食糧の再生期間が長くなるにつれ、移動ルールが増加し、収穫ルールが減少していることがわかる。図 10 から食料の再生期間の増加につれ W_{min} , W は大きな変化はないが P は減少していることがわかる。図 9 と図 10 のような結果になった原因は、食糧の再生期間が延びたため収穫できる食糧が少なくなり、エージェントが生き延びために食糧が豊富なところへ積極的に移動する必要があると考えられる。また、期間 1 と比べ期間 2, 3 の交配ルールの適用比率が高い。これは要求された人口数を満たすためエージェント間により多く交配を行っていると考えられる。

表 8 再生期間によるルールの適用比率と最良適応度

期間	移動	収穫	取引	交配	適応度
1	26%	41%	15%	18%	3.0 (50 世代)
2	27%	40%	11%	21%	3.0 (50 世代)
3	35%	36%	10%	19%	3.0 (61 世代)

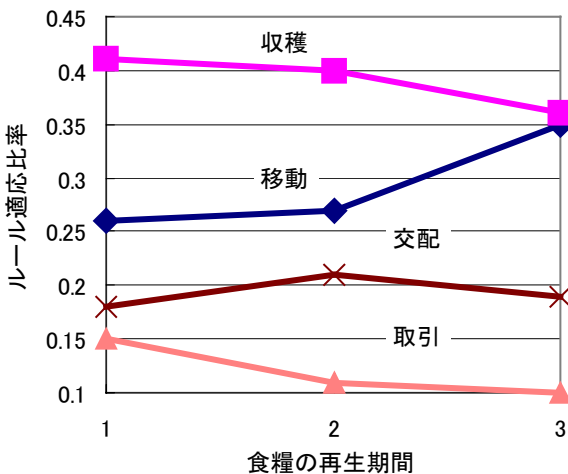


図 9 ルールの適用比率の変化

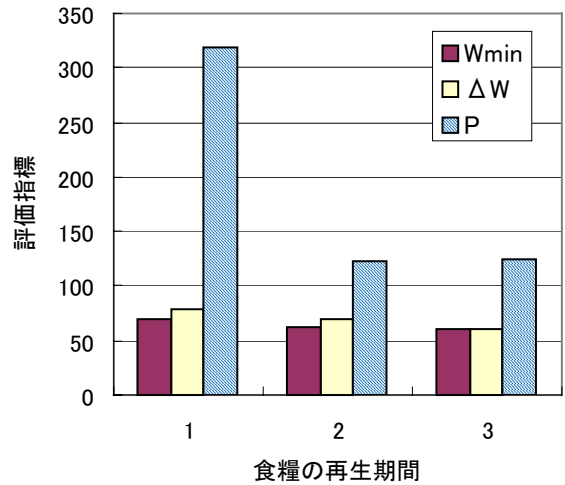


図 10 評価指標の変化

§4 ルールが適用されたエージェントの数

4.2 節 §2 で述べたように、財産の増加に伴い、エージェントの数も増加するような豊かな人工社会を生成することができる。その理由を考察するため、各行動ルールが実際に適用されたエージェント数を計測した。

表 9 行動ルールを実行したエージェント数の割合

手法	従来手法	本手法
移動ルール	24%	30%
収穫ルール	18%	33%
取引ルール	13%	8%
交配ルール	0.07%	0.3%

表 9 にこの結果を示す。これは、獲得したエリート個体を初期配置に適用し、染色体の行動ルールの適用順序を基に、期間ごとに生存するエージェントの中で、与えられた行動ルールを実際に行なったエージェント数を求めた。表 9 は全期間に渡るエージェントの総数に対する各行動ルールを実行したエージェント総数の割合である。

表 9 からわかるように、従来手法では移動ルールを実行するエージェント数が収穫ルールを実行するエー

エージェント数が多い。これと比べ、本手法は移動ルールより収穫ルールを実行するエージェント数が多い。これは、本手法は財産の増加に有利であるといえる。

また、従来手法と比べ、本手法を用いた場合、移動と収穫ルールを実行するエージェント数の割合が増え、取引ルールを実行するエージェント数の割合が減少していることがわかる。これは豊かな社会を生成するために取引ルールより、移動と収穫ルールに力を入れることが必要であると考えられる。交配ルールに関してはエージェント数の割合が従来手法より4強倍多い。これは人口の増加に有効である。これより、本手法を用いて行動ルールを有効に活用することができるといえる。

5. おわりに

行動ルールが時間的に変動する人工社会を対象として、GAを用いてルール組を獲得する方法について検討した。適応度と評価指標を比べた結果、従来のルールをそのまま適用することより、一定期間ごとにルール組を変化させて適用した方が、効率的に人工社会を設計することができることを確認した。

また、本手法を用いて獲得したエリートな個体を初期配置に適用し、人工社会を生成した。生成した人工社会に対して、各財産における人口の割合、ルールの適用比率、ルールが適用されたエージェント数の割合などにおいて考察した。

今後の課題として、文化伝播、戦争などの行動ルールの追加とそれにより生成した特定の人工社会に対する詳細なデータ解析を実施することが重要であると考えられる。

参考文献

- [Epstein 96] Epstein, J. and Axtell, R.: Growing Artificial Societies: social science from the bottom up, Brookings Institution Press, The MIT press, (1996).
- [Flentge 01] Flentge, F. Polani, D. and Uthmann, T.: Modelling the Emergence of Possession Norms Using Memes, *Journal of Artificial Societies and social Simulation*, Vol.4, No.4, (2001).
- [Gilbert 99] Gilbert, N. and Troitzsch, K. G.: Simulation for the Social Scientist, Open University Press, Buckingham, Philadelphia, (1999).
- [Kano 03] Kano, Hitoshi and Wu, Yun.: Evolutionary Design of Rule Changing Cellular Automata, *Seventh International Conference on Knowledge Based Intelligent Information and Engineering Systems (KES' 2003)*, pp.258-264, (2003).
- [Kurahashi 01] Kurahashi, S. and Terano, T.: Analyzing Norm Emergence in Communal Sharing via Agent-Based Simulation, *LNAI 2253*, pp.88-98, (2001).

- [倉橋 01] 倉橋節也, 寺野隆雄.: エージェントシミュレーションによる共同分配規範モデル, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J84-D-I, No.8, pp.1160-1168, (2001).
- [真坂 03] 真坂友子, 烏云, 狩野均.: 遺伝的アルゴリズムによる人工社会の進化, *情報処理学会, 第65回全国大会 1X-6*, (2003).
- [奥野 01] 奥野智江, 鈴木里珠, 狩野均, 加藤伸子.: セルオートマトンとGAを用いた仮想都市の時系列的生成手法, *人工知能学会*, Vol.16, No.1, pp.111-119, (2001).
- [烏 03] 烏云, 狩野.: 遺伝的アルゴリズムによるルール変化型一次元セルオートマトンの進化, *人工知能学会*, Vol.18, No.6, pp.325-332, (2003).
- [Wu 04] Wu, Yun. Kano, Hitoshi.: Evolutionary Design of Rule-Changing Artificial Society Using Genetic Algorithms, *Proc. Of 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2004)*, pp.258-264, (2004).

〔担当委員：和泉 潔〕

2004年10月28日 受理

著者紹介

烏云



1997年内蒙古工業大学機械工学部卒業。2002年筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了。2005年同大学大学院システム情報工学研究科博士課程修了。セルオートマトン・人工社会に関する研究に従事。博士(工学)。

狩野 均 (正会員)



1978年筑波大学第一学群自然科学類卒業。1980年同大学大学院理工学研究科修了。同年、日立電線(株)入社。同社オプトロシステム研究所において人工知能・ニューラルネットワークの応用に関する研究に従事。1993年より筑波大学電子情報工学系。現在、同助教授。知識システム・遺伝的アルゴリズム・人工生命の研究に従事。工学博士。1992年電気学会論文賞, 1999年WSC4論文賞, 2003年情報処理学会優秀研究報告賞受賞。人工知能学会, 情報処理学会, IEEE各会員。