

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

Modeling Time-series Virtual Cities Using Cellular Automata and Genetic Algorithms

奥野 智江 筑波大学理工学研究科

Tomoe Okuno Master's Program in Science and Engineering, University of Tsukuba.

鈴木 里珠 筑波大学第三学群情報学類

Rizu Suzuki College of Information Sciences, Third Cluster of College, University of Tsukuba.

狩野 均 筑波大学電子情報工学系

Hitoshi Kanoh Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba.

加藤 伸子 筑波技術短期大学電子情報学科

Nobuko Kato Development of Information Science and Electronics, Tsukuba College of Technology.

Keywords: genetic algorithm, cellular automaton, virtual city, modeling.

Summary

In this paper, we propose a novel method that enables automatically modeling of time series virtual cities. We apply cellular automata (CA) to lay out many buildings, and genetic algorithm (GA) to produce time series change of virtual cities. We produce virtual cities by giving cellular automata several states: vacant ground, a variety of buildings, two kinds of road. GA determines the sequence of applied rules so as to generate the virtual city required by users. Simulation models using CA have been developed to predict urban growth, but a large amount of historical data is needed to calibrate the system and a method to generate original cities is not discussed. We have developed a method that uses artificial life techniques to model original virtual cities that have the characteristics of actual cities. Examples of virtual cities verify followings. We can generate four types of virtual cities: a uniform city, a random city, an ordering city, and a city that has several areas as actual cities. The GA search of a sequence of rules works well to producing various types of virtual cities that users need and time series of changing virtual cities.

1. はじめに

最近、インターネットや 3D ゲームの普及に伴い仮想都市の利用が広がっている[原田 98, 広瀬 98]. 現在、インターネット上に存在する三次元の仮想都市は2つに大別される. 前者は、架空の都市を構築したもので、仮想ショッピングやコミュニケーションの場である仮想社会などがある[小池 97, 内藤 99, Act 99]. これに対して、後者は現実の都市を仮想空間上に再構築したデジタルシティ[石田 00]と呼ばれるものである. 本論文は、前者の仮想都市の自動生成に関するものである.

仮想都市は、そこで生活する人間にとって自然な空間であることが重要であり、建物の配置や街の発展の様相が現実

の都市と比べて違和感のないように生成する必要がある. そこで著者らは、市街地に特化地区(住宅街, 高層ビル街など)が形成されていること, ならびに、市街地形成のプロセス(都市の時系列的な推移)を表示できることを目標として仮想都市の自動生成手法を検討している.

以前著者らは、与えられた道路網上に遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて建物を配置する方法を提案した[Kato 98, 加藤 99]. この方法はランダムに配置された建物を、隣り合う建物間の類似度が高くなるようにGAで再配置することによって、建物の高さや敷地面積など都市を特徴付けるパラメータの似た建物が密集した「地区」を含む市街地を生成するものであった. しかし、市街地形成のプロセスを扱えないという問題があった.

本論文では、「地区」をセルオートマトン、市街地形成のプロセスをGAを用いて生成する方法を提案する。本手法は建物を配置する領域を2次元のセルに分割し、セルに空地・建物・道路の状態を持たせることで都市を表現するものである。セルの状態は、セル間の相互作用の強さからセルの状態変更ルールをもとに決定し、このルールの適用順で都市の時系列変化を表現する。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、ルールの適用順序をGAを用いて決定する[鈴木 99, 奥野 99]。

セルオートマトンを都市の時系列的生成に適用した研究として、都市の成長予測シミュレーション[Clarke 97, White 97]が提案されている。これは、都市の成長パターンを表すパラメータの値を過去の実際の都市データから決定し、その値を用いて将来の土地利用状況を予測するものである。したがって、新しいパターンの都市を生成する目的とは異なっている。また、GAやGP(遺伝的プログラミング)を用いてセルオートマトンの状態変更ルールを生成する手法[Andre 96]も研究されているが簡単なベンチマーク問題を対象としているため、都市生成のような複雑な問題に適用できるかどうかは検討されていない。また、GAをCADやアートに応用した研究[Una-May 98] [高木 98]も報告されているが、これらも大規模な問題は扱っていない。本論文では、実際の都市の特徴を有し、人手では生成できない数千軒以上の建物からなる実用規模の仮想都市生成を対象としており、上記の研究とは目的が異なっている。

以下ではまず研究分野の概要として都市の特徴と従来手法の問題点について述べる。次にセルオートマトンによる定式化とGAによるコード化、ならびにGAの適応度関数について述べる。最後に、GAを用いてユーザの要求に合った都市を生成した例とその時系列変化を示す。

2. 研究分野の概要

2.1 都市の特徴

通常の都市は、最初から現在の姿をデザインし、トップダウンに成長しているわけではない。局所的な相互作用によってボトムアップに変化しながら全体を形作っていると考えられる。そしてその結果、雑然とした中にも、特化地区のようなまとまりが見られる。特化地区には、住宅街・商店街・低層ビル街・高層ビル街などの特徴のあるものが多く、これら特徴のある地区がまちなみに大きく関係している。地区の組み合わせによって一つの都市が生成されていると考えれば、どこにどのような地区があるか、地区の分布状態で都市の特徴を記述できると考えられる。

また、都市は常に変化している。都市における建物の「時系列変化」に注目すると、住宅などの建物はお互いに無関係に変化しているわけではなく、関係しながら変化している。一般に都市の成長には水平方向への成長と、垂直方向への成長があると言われている[ブルーメンフェルト 73]。都市の

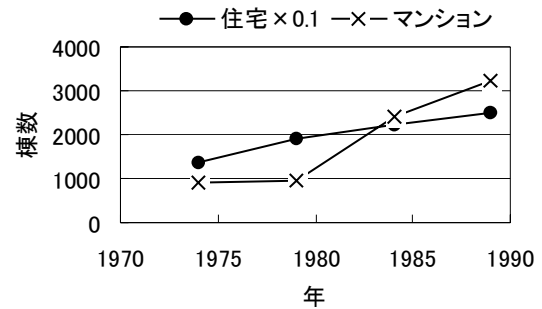


図 1 実際の都市における建物数の変化

初期段階は水平方向に成長する。すなわち、低層住宅など高さの低い建物が建つことで、都市が広がっていく。そして建物が十分建った後、都市は垂直方向へも成長していく。住宅数の増加に伴い、空地の減少や地価の高騰が起こる。そのため、より多くの人を収容できるマンションの数が増加する。

図 1 に、国土地理院の細密数値情報 [建設省 98] から引用した横浜市青葉区における建物棟数の変化の例を示す(住宅の棟数は表示の都合上 0.1 倍してある)。1980年以降にマンションの軒数が大きく増加しており、これに伴って住宅の増加率が減少していることがわかる。このように都市は建物同士お互いに関係しながら変化しているものと考えられる。

以上のような背景から、本論文では「地区」と「時系列変化」を都市の特徴と考える。すなわち、実際の都市に見られるような地区と時系列変化を有する仮想都市を生成することを目的とする。

2.2 従来手法の概要とその問題点

著者らは、敷地の大きさ・建物の高さ・壁面と道路間の距離・建蔽率の4つを都市の景観を特徴付けるパラメータと考え、次の基本方針をもとに仮想都市を生成する手法を提案した[Kato 98, 加藤 99]。

- (1) 都市を構成する単位をブロック(道路で区切られた領域)とし、特徴量の似たブロックの集合を「地区」と定義する。
- (2) 隣接するブロック間の類似度を適応度関数で表現し、ブロックの特徴量の分布をGAで求める。
- (3) GAにより得られた各ブロックの特徴量、道路データ、(あらかじめCAD等で作成された)建物データを基に、与えられた道路網上に建物を配置する。

しかしこの方法は次のような問題点があった。(a)建物間、道路・建物間の相互作用を考慮せず、各ブロックの特徴量をもとに建物配置を行っているため、実際の都市に見られるようなブロック内のかたよりが表現できない。(b)最終状態の都市をGAを用いて求めるため、時系列的変化を表現できない。

実際の都市では、「地区」は必ずしもブロック単位に生成されるわけではなく、道路沿いに生成されたりする。また同一ブロック内でも、隣接するブロックや道路種との関係によって高い建物や低い建物の集まる場所が異なるなどのかたよが見られる。従来手法でこれらのかたよりを表現するのは困難で

ある。また、時系列的変化を考慮していないために成長プロセスにおける相互作用も考慮することができず、これもまたブロック内のかたよりの表現が困難であることの要因と考えられる。

2.3 セルオートマトン

そこで著者らは、新たにセルオートマトン(CA)を導入した方式を検討した。CAは、従来のトップダウンの手法では解明困難である複雑な現象を、簡単なセル間の相互作用から再現できること、すなわち、複雑な現象も簡単なモデルで定義できることを特徴としている。CA法の基本原理をまとめると以下のようになる[加藤恭義 98]。

- (1) 同じ大きさの均一なセルを想定する。
- (2) 各セルは k 種類の状態をとることができる。
- (3) 次の時間の状態は現在の状態だけの局所的な規則により決まる。
- (4) できあがるパターンは初期のセルの状態と適用する規則によって決まる。

2次元 CA の時刻 t における位置 (x,y) のセルの状態を $a_t(x,y)$ とすると、次の時刻におけるセルの状態は一般に次のように書ける。

$$a_{t+1}(x,y) = F(a_t(x-r,y-r), \dots, a_t(x+r,y+r))$$

ここで F はセルの状態変更ルールである。

また、 r はセルが他のセルから影響を受ける範囲を表す。以下に CA の例(いわゆる、ライフゲーム)を示す。

$$a_{t+1}(x,y) = \begin{cases} 0 & (a_t(x,y)=1, \quad V \leq 1) \\ 1 & (a_t(x,y)=1, \quad 2 \leq V \leq 3) \\ 0 & (a_t(x,y)=1, \quad 4 \leq V) \\ 1 & (a_t(x,y)=0, \quad V=3) \\ 0 & (a_t(x,y)=0, \quad V \neq 3) \end{cases}$$

ただし、

$$V = a_t(x-1,y-1) + a_t(x,y-1) + a_t(x+1,y-1) \\ + a_t(x-1,y) + a_t(x+1,y) + a_t(x-1,y+1) + a_t(x,y+1) \\ + a_t(x+1,y+1)$$

この例ではセルの状態数 $k=2$ (各セルが 1 または 0 の状態をとる)、 $r=1$ である。ここで、 V は注目しているセルの 8 近傍(ムーア近傍)におけるセルの状態の和である。以下本論文では V をポテンシャル値と呼ぶ。

2.4 基本方針

2.2 節で述べた従来手法の問題を解決するために、本研究では CA を用い、次の基本方針に基づいて仮想都市を生成することにした。

- (1) 仮想都市を生成する領域を 2 次元のセルに分割し、セルの状態を空地、道路(幹線道路・区画道路)、建物(住宅・商店・マンション・オフィス)とすることで都市を表現する。

- (2) セルの相互作用を「場」として表現し、その種類と強さで建物間、道路・建物間の影響を考慮する。
- (3) セルの状態は「建物配置ルール」により決定する。ルールの適用順で都市の時系列変化を表現する。
- (4) 建物数の比、地区の規模、時系列変化パターンに対するユーザからの要求の充足度を GA の適応度関数とすることにより、ユーザの要求する都市を実現する。

都市をセルに分割することで、ブロックより細かいセル単位での「地区」を生成することができると考えられる。また、「場」を用いることで従来手法では困難だった、建物間、道路・建物間の相互作用を考慮した都市生成を行う。GA の染色体を、各都市における建物配置ルールの適用順とすることにより、都市の時系列的生成を可能とした。そのため成長過程の相互作用も考慮することができるようになった。また、要求に合った都市の時系列変化を生成することも可能になった。

ここで探索アルゴリズムとして GA を用いる理由は次のとおりである。ユーザからの要求の例として、「住宅街を中心とした郊外の都市を背景画像に使うために手軽に生成したい」という場合を考える。ユーザは、規模の大きい住宅街があれば良いのであって、住宅街の形状や配置までは指定していないケースが多い。この要求に対して、住宅街の形状や配置の異なる複数の仮想都市を生成して、ユーザのイメージに合った都市を選択してもらうというシステムが適していると著者らは考えた。また、この要求自体があいまいなので、最適解を求めるというより、むしろ多様な複数の準最適解を生成できることが重要であると考えた。GA は、集団内に多様な準最適解を複数個有しているので、本問題の探索アルゴリズムに適しているといえる。

3 提案する手法

3.1 セルの書式と場

セルの状態を表 1 のように定義する。ポテンシャル値は近隣セルの距離をもとに、セルの状態を変更する毎に以下のように計算する。ここでは、同種の場のみを重ね合わせで計算する。

時刻 t における位置 (x,y) のセルの状態を $a_t(x,y)$ とすると、 (x,y) から r セル以内の範囲にある状態 s のセルの総数は次のように書ける。

$$A_s(x,y,r) = \sum_{i=-r}^r \sum_{j=-r}^r \delta(s, a_t(x+i, y+j))$$

ここで、 δ はクロネッカーのデルタである。また、 (x,y) から距離 r にある状態 s のセル数は、

$$\Delta A_s(x,y,r) = A_s(x,y,r) - A_s(x,y,r-1)$$

となる。本論文ではこの $\Delta A_s(x,y,r)$ と表 2 の重み係数 $W(r)$ を用いて (x,y) における種類 s のポテンシャル値を次式で定義する。

$$V_s(x, y) = \sum_{r=1}^6 W(r) \cdot \Delta A_s(x, y, r)$$

ここで、表2の重み係数は予備実験の結果から適応度が高くなるように決めたものである。この値を大きくすると地区ができやすくなるが、建物が密集しすぎて不自然になってしまう。逆に小さくすると地区のない雑然とした市街地になってしまう。

表1 セルの状態

番号 s	0	1	2	3
状態	空き地	住宅	マンション	商店
番号 s	4	5	6	
状態	オフィス	幹線道路	区画道路	

表2 近隣セルからの距離と重み係数

距離 r	0	1	2	3	4	5	6
重み係数 $W(r)$	29	12	6	4	3	2	2

3.2 セルの状態変更ルール

ルールを現在のセルの状態と場の値をもとに状態変更ルールを確率的(3.3節参照)に適用し、次の時刻におけるセルの状態を決定する。本手法で用いるルールを表3に示す。ルール1～10は、空き地($a_t(x, y)=0$)に対して適用するルールであり、ルール11は、住宅地($a_t(x, y)=1$)に対して適用するルールである。また、これらのルールは以下のように定式化できる。ここでは、ルール1,2,11について示すが、他のルールも同様に定式化できる。ただし、 V_L は定数とする。なお、表3の適用確率は、予備実験の結果から、適応度が高くなるように決めたものである。

$$a_{t+1}(x, y) = \begin{cases} 1 & (a_t(x, y)=0, \quad V_6(x, y) \geq V_L, \\ & V_2(x, y) > 0) \\ 1 & (a_t(x, y)=0, \quad V_6(x, y) \geq V_L) \\ & \vdots \\ & \vdots \\ 0 & (a_t(x, y)=1, \quad V_3(x, y) \geq V_L) \end{cases}$$

3.3 GAによる都市の時系列変化の生成

本手法における概略の処理手順を図2に示す。一つの都市を生成するためのルールの適用順をGAの一個体で表現し、それを染色体として図3のようにコード化する。各遺伝子座にはルール番号が入る。

ここでは、全セルの状態を毎時刻変更しているのではない。表3に示した適用確率によってルールを適用するかどうかを図2の手順で決定している。

本手法では道路網はあらかじめ決められたパターンを決められた時刻に生成している(付録参照)。建物との相互作用を考慮するために道路もセルで表現しているが、道路セルにルールを適用することは行っていない。

表3 セルの状態変更ルール

ルール番号	状態変更ルール	適用確率
1	区画道路の場が大かつ、住宅の場が存在すれば、住宅を配置	0.03
2	区画道路の場が大なら、住宅を配置	0.01
3	区画道路の場が大かつ、住宅の場が大なら、住宅を配置	0.03
4	区画道路の場が大かつ、住宅かマンションの場が大なら、マンションを配置	0.01
5	区画道路の場が大なら、マンションを配置	0.01
6	区画道路の場が大かつ、マンションの場が大なら、マンションを配置	0.02
7	区画道路の場が大かつ、商店の場が大なら、商店を配置	0.05
8	幹線道路か区画道路の場が大かつ、住宅かマンションかオフィスの場が大なら、商店を配置	0.05
9	区画道路の場が大かつ、オフィスの場が大なら、オフィスを配置	0.05
10	幹線道路の場が大なら、オフィスを配置	0.005
11	商店の場が大なら、住宅を撤去	0.1

初期集団の生成

世代ループ {

全個体についてループ {

for $t=1, \dots, n$ (染色体上の全ルール) {

N = 全セル数 $\times t$ 番目のルールの適応確率

N 個のセルをランダムに選択

選択した全セルについてループ {

t 番目のルールを適用 }

適応度の評価 }

選択・交叉・突然変異 }

図2 本手法の概略の処理手順

	$t=1$	$t=2$	$t=3$	\dots	$t=100$
染色体	ルール 3	ルール 8	ルール 1	\dots	ルール 6

図3 染色体の例

3.4 適応度の評価

生成した都市がユーザの要求をどれだけ満たしているかを適応度関数で評価する。ユーザの要求は以下の指標の組み

合わせて表現する。カッコ内は、指標の取る値を表している。

- ・ 建物軒数の比(全建物数に対する割合で表現)
- ・ 地区の種類(住宅, マンション, 商店, オフィス)
- ・ 地区の数(1, 2, 3)
- ・ 地区の規模(大, 中, 小)
- ・ 増加率(ほとんど変化なし, 小さく増加, 大きく増加)
- ・ 時期(前期, 中期, 後期)

例えば,「住宅の軒数が全体の70%で, 規模が小の商店街が2つあり, 時系列的には前期に住宅が大きく増加するような都市」という要求があげられる。

適応度 Fitness を次式で計算する。

$$Fitness = F_1 + F_2 + F_3$$

$$F_1 = \sum_{i=1}^4 \omega_{1,i} \cdot f_1(R_i)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^4 \omega_{2,i} \cdot \frac{1}{N_i} (\sum_{j=1}^{N_i} f_2(S_{i,j}) - f_2(S_{i,(N_i+1)}))$$

$$F_3 = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^2 \omega_{3,i,k} \cdot f_3(T_{i,k})$$

ただし,

i : 建物種番号

(1:住宅,2:マンション,3:商店,4:オフィス)

k : 時期(0:前期,1:中期,2:後期)

$\omega_{1,i}$: 建物比に関する要求の重み係数

$\omega_{2,i}$: 地区に関する要求の重み係数

$\omega_{3,i,k}$: 時期に関する要求の重み係数

R_i : 建物比 = (建物種 i の数)/(全建物数)

j : 地区番号(地区のセル数の大きい順)

N_i : 建物種 i の要求された地区数

$S_{i,j}$: 地区の規模 = 建物種 i で j 番目に大きい地区のセル数の全セル数に対する比

$T_{i,k}$: 建物増加率 = 建物種 i に対する時期 k と時期 $(k-1)$ のセル数の比

関数 f_1, f_2, f_3 を図4に示す。これらは, 経験的に決めたものである。 F_1 は建物比に関する適応度で, ユーザより「建物比= H_i 」という要求があったとき, この H_i の値から関数 f_1 を用いて計算する。 F_2 は地区の規模に関する適応度で, 以下の手順で計算する。

[step1] 1つの場の種類に着目し, ポテンシャル値があるしきい値をこえたセルを4近傍で連結し, その連結成分をそれぞれ地区とする。

[step2] 生成された建物種 i の地区の中で, セル数の多い順に N_i+1 個の地区に注目する(N_i は要求された地区数)。

[step3] 関数 f_2 の値を N_i+1 個の地区について計算し, F_2 を求める。このとき, 要求された数より多くの地区ができてしまった場合の違反点数として, N_i+1 番目の地区に対しては,

関数 $f_2(S_{i,(N_i+1)})$ の値を F_2 から減点していることに注意。

F_3 は建物種 i の時期 k に関する適応度である。要求された時期の直前のセル数に対する要求された時期のセル数の割合から, 関数 f_3 より計算する。

4 評価実験

4.1 実験方法

セル数を 100×100 として実験を行った。GAの世代交代モデルとしては, 1世代に2個体交代する連続世代モデル(MGG モデル[佐藤 97])を用いた。染色体の長さ=100ルール, 集団サイズ=100都市, 世代の上限=8000世代とした。GAの遺伝的操作として, 交叉は一点交叉, 選択はルーレット戦略とエリート保存戦略を併用した。また, 時系列変化に関して, $t=1 \sim 50$ を前期, $t=51 \sim 75$ を中期, $t=76 \sim 100$ を後期とした。

以下の実験におけるユーザの要求内容を表4に示す。3.4節で示した指標の内, 要求のないものについては適応度の計算式から除いてある。ここで, 実験1は, 建物種の異なる地区を同時に生成した例である。また, 実験2は建物比が一定のときに異なる規模の地区を生成した例である。最後の実験3は, 時系列的な生成例となっている。

表4 各実験における要求内容

実験番号	要 求 内 容
実験1	・規模「中」の商店街が1つ ・規模「中」のオフィスビル街1つ
実験2-1	・規模「大」の住宅地区が1つ ・住宅:マンション:商店:オフィス = 0.5:0.2:0.2:0.1
実験2-2	・規模「小」の住宅街が3つ ・住宅:マンション:商店:オフィス = 0.5:0.2:0.2:0.1
実験3-1	・規模「中」のマンション街が1つ ・住宅は, 中期と後期に小さく増加 ・マンションは, 後期に大きく増加
実験3-2	・規模「中」の商店街が1つ ・住宅は, 中期に大きく増加, 後期にほとんど変化なし ・商店は, 中期と後期に小さく増加

4.2 生成した都市の分類

図5は, GAを用いないで, 人手でルール順を決定して生成した都市のセルの状態を示している。各セルは, 住宅を赤, マンションを緑, 商店を青, オフィスビルを黄, 幹線道路を紫, 区画道路を灰色で色分けしてある(以下同様)。図5から, 同じ建物種ばかりの均一な都市(左上), 地区のくっきりと分かれている計画都市のような整然とした都市(左下), ランダムに建物の建ち並ぶ雑然とした都市(右上), 雑然としたなかにもまとまりのある地区を含んだ都市(右下)を生成できることがわかる。

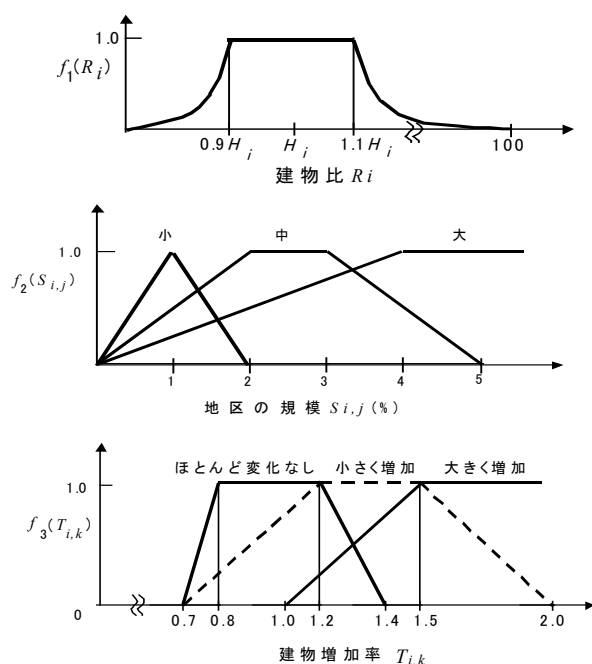


図4 適応度を計算するための関数

4.3 GA による探索の効果

図6は、実験1において世代ごとに適応度を示したものである。初期集団では最大適応度が 0.4 未満だったのに対し、探索後は 0.8 以上まで進化していることがわかる。また、図7に、初期集団からランダムに選んだ都市の商店街とオフィス街を白抜きにしたものを示す。また、図8に探索後の適応度が最大となった都市の商店街とオフィス街を示す。探索前では要求した地区が生成できていないのに対し、探索後は生成できている。すなわち、GAで探索することによって、要求に合った都市を生成できると考えられる。

4.4 要求に合った都市の生成

図9と図10に、それぞれ実験2-1, 2-2で生成したセルの状態、ならびに、あらかじめ用意した建物オブジェクトをセルに合わせて配置した仮想都市を示す。図9と図10は、建物比がほぼ同じであるが、配置の違いにより異なる特徴を持つ都市が生成されている。地区に関して異なる要求をした場合にも、それぞれ要求に合ったものが生成できていることがわかる。

4.5 時系列的な生成

まず、実験3-1の結果について述べる。図11, 図13, 表5は、それぞれ時系列に生成した都市、建物軒数の変化、時系列の要求に対する充足度(図4の関数 $f\beta$)を示している。これから以下のことがわかる。

- 図11のマンション街に注目すると、マンションがランダムに増加しているのではなく地区を形成しながら増加していることが分かる。すなわち、まず一つの小規模の地区

が形成され、これが成長して一つの中規模の地区が形成されている。

- 表5から、時系列の要求に対する充足度は 0.84 以上であり、時系列変化に関しても要求に合ったものを生成できることがわかる。

次に、実験3-2についても、同様のデータを図12, 図14, 表6に示す。これから以下のことがわかる。

- 図12の商店街に着目すると、商店が地区を形成しながら増加していることがわかる。この場合は図11とは異なり、最初に2つの小規模の地区が形成され、これらが合併して中規模の地区が形成されている。
- 図14の住宅軒数は、中期には前期より大きく増加し、後期はあまり増加しておらず、全体として S 字の形をしていることが分かる。
- 表6から、時系列の要求に対する充足度は 0.98 以上であり、時系列変化に関しても要求に合ったものを生成できることがわかる。

実際の都市において、小規模の地区が成長して中規模の地区が形成される過程で、図11と図12に見られる2つのパターンが一般に観測されている。また、図14のような S 字形も実際の都市の成長過程で観測されるものであり、本実験でもこれが再現されている。

以上の実験結果から、本手法により実際の都市の特徴を有する仮想都市が生成できているといえる。

表5 時系列の要求に対する充足度
(実験3-1: ()内は要求事項)

	中 期	後 期
住宅	$T1, \text{中期} = 1.58$ $f\beta(T) = 0.84$ (小さく増加)	$T1, \text{後期} = 1.26$ $f\beta(T) = 1$ (小さく増加)
マンション	(要求なし)	$T2, \text{後期} = 2.12$ $f\beta(T) = 1$ (大きく増加)

表6 時系列の要求に対する充足度(実験3-2)

	中 期	後 期
住宅	$T1, \text{中期} = 1.85$ $f\beta(T) = 1$ (大きく増加)	$T1, \text{後期} = 1.05$ $f\beta(T) = 1$ (ほとんど変化なし)
商店	$T3, \text{中期} = 1.19$ $f\beta(T) = 0.98$ (小さく増加)	$T3, \text{後期} = 1.33$ $f\beta(T) = 1$ (小さく増加)

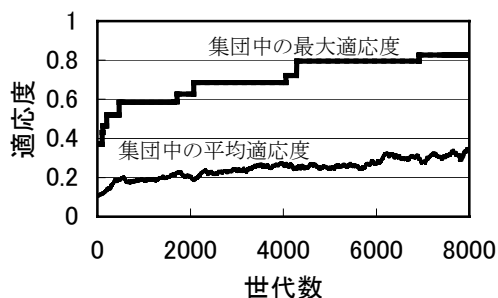
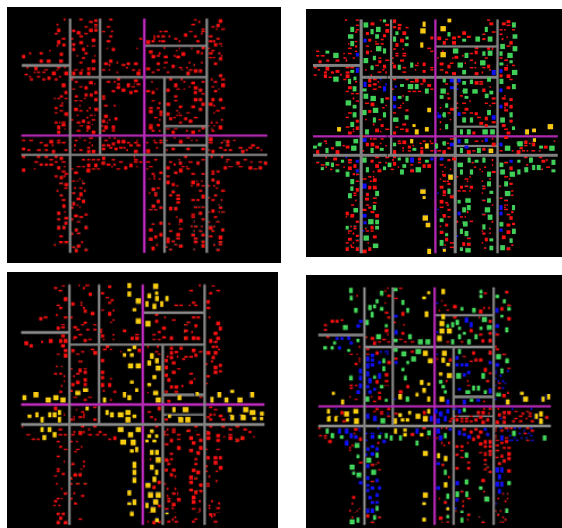


図6 世代ごとの適応度(実験1)



赤:住宅, 緑:マンション, 青:商店, 黄:オフィスビル,
紫:幹線道路, 灰:区画道路

図5 都市の分類(均一な都市:左上, 整然とした都市:左下,
雑然とした都市:右上, 地区を含んだ都市:右下)

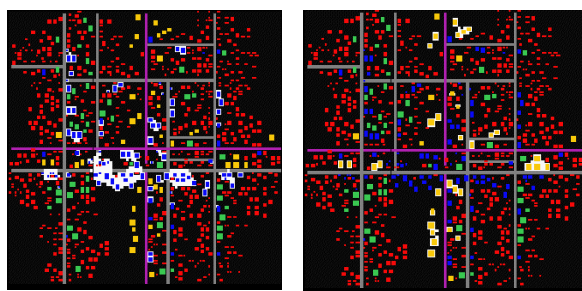


図 7 初期集団からランダムに選んだ都市(実験1)

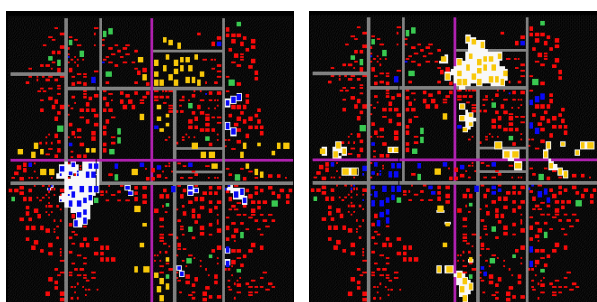


図 8 探索後に適応度が最大となった都市(実験1)

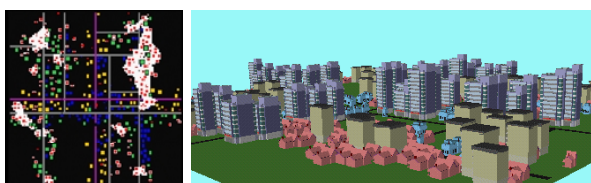


図 9 規模「大」の住宅地区 1 つ, と要求した生成例

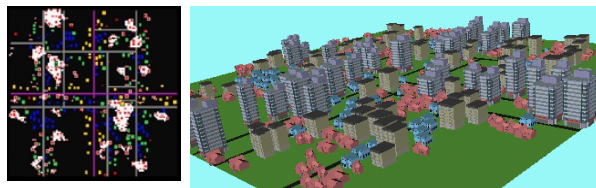


図 10 規模「小」の住宅地区 3 つ, と要求した生成例

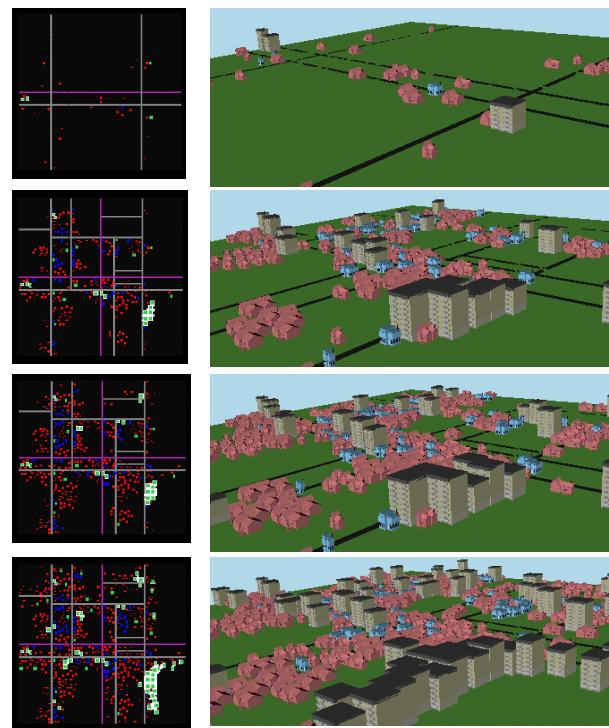


図 11 実験3-1で生成した都市とセルの時系列変化

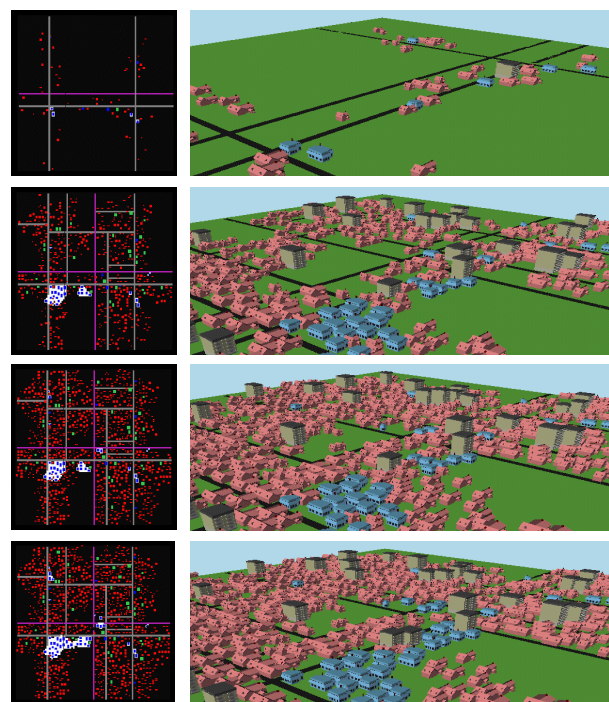


図 12 実験3-2で生成した都市とセルの時系列

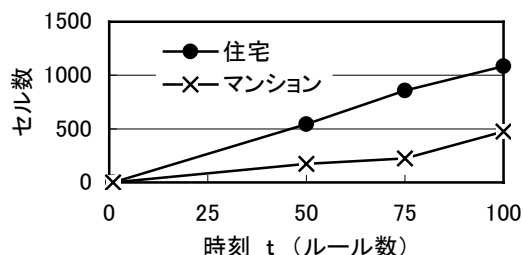


図13 セル数の時系列変化(実験3-1)

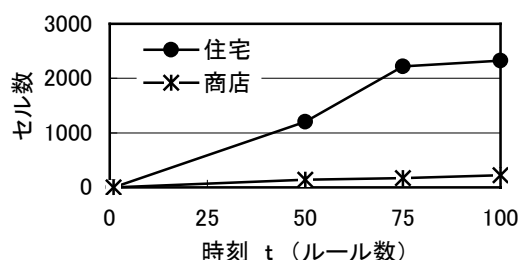


図14 セル数の時系列変化(実験3-2)

4.6 主観評価

生成した市街地が本物に似ているかどうかを被験者に問う実験を行った。大学生36人に対して、図11と図12の右側の図をプロジェクタに投影し、市街地形成プロセスとして、違和感がある場合を1、違和感がない場合を7として7段階で評価してもらった。回答の平均値と標準偏差は、図11が「 5.3 ± 1.5 」、図12が「 3.6 ± 1.9 」であった。また、図12に違和感がある理由としては、「密集しすぎている」という回答が多かった。

5 おわりに

本論文では、仮想都市の建物配置パターンをセルオートマトンで生成し、都市の時系列変化をGAを用いて生成する法を提案した。地区と時系列変化に関してユーザの要求に合った都市を生成できることを実験で確認した。

本論文では5つの生成例を基に議論したが、今後は実際にユーザに使用してもらうなかで評価・改良することが重要であると考えられる。また、ここでは道路セルに対するルールは未検討であった。すなわち、建物は道路の影響を受けるが、道路は建物の影響を受けないようになっている。この点は今後改善すべき重要な課題であると考えられる。また、ユーザの好みを適応度関数ですべて表現することは難しいと思われる。この対策としては、対話型進化計算法を併用することが有効であると考えている。

本手法は、今後、都市計画やまちづくり分野への展開が期待される。このためには以下の検討が必要であると考えている。まず、市街地形成の時間軸をルール数にとっているが、

1ルールが何年に相当するのか未検討であった。このためには、過去の実際の市街地形成プロセスと一致するように、ポテンシャル値やルールの適応確率などのパラメータ値をチューニングするとともに、適応度関数に建物の戸数を指定できるようにすることが必要である。また、建築基準法における接道義務や用途地区制・指定容積率などの制度をルールに取り入れることも必要となる。

従来、セルオートマトンは様々なパターン生成問題に利用されていたが、どのようなパターンが生成されるかを事前に予想することはあまり試みられていなかった。本手法は、GAと組合せることで要求に合ったパターンを生成できるところに特徴がある。この考え方は複雑なパターンの設計に応用できることが期待される。

[参考文献]

- [Act 99] Activeworlds. AlphaWorld.
<http://www.activeworlds.com/tour/alpha.html> (1999).
- [Andre 96] Andre, D., Bennett, F. H., Koza, J. R.: Evolution Of Intricate Long-Distance Communication Signals In Cellular Automata Using Genetic Programming, ALIFE V, pp.474-482 (1996).
- [ブルーメンフェルト 73] ブルーメンフェルト著, P.D.スプライリー編, 加藤源訳: 現代大都市論 その発生・成長・特性・計画, 鹿島出版研究会 (1973).
- [Clarks 97] Clarks, K. C., Hoppen, S.: A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol.24, pp.247-261 (1997).
- [原田 97] 原田: 仮想でない仮想都市-ミラーワールド構築を目指して-, 仮想都市研究会 第1回シンポジウム論文集, pp.49-54 (1997).
- [広瀬 97] 広瀬, 渡辺, 谷川, 片山, 田村: 移動車両搭載カメラを用いた電脳映像都市空間の構築(2)-実写画像を用いた広域仮想都市空間の生成-, 日本VR学会第2回大会論文集, pp.67-70 (1997).
- [石田 00] 石田: デジタルシティの現状, 情報処理, Vol.41, No.2, pp.163-168 (2000).
- [Kato 98] Kato, N., Okuno T., Okano A., Kanoh H., Nishihara S.: An Alife Approach to Modeling Virtual Cities, IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, pp.1168-1173 (1998).
- [加藤 99] 加藤, 岡野, 狩野, 西原: 遺伝的アルゴリズムを用いた仮想都市のための建物配置方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-II, No.10, pp.1766-1774 (1999).
- [加藤恭義 98] 加藤恭義他: セルオートマトン法, 森北出版株式会社(1998).
- [小池 97] 小池: コミュニケーション&ショッピング「まちこ」, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol.1, No.1, pp.25-30 (1997).

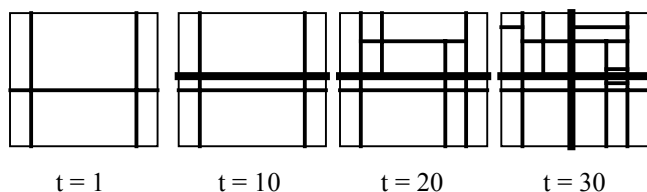
- [建設省 98] 建設省国土地理院:細密数値情報(10mメッシュ土地利用), (財)日本地図センター(1998).
- [内藤 99] 内藤, 松田:エージェント指向仮想社会の構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.2, pp.399-406 (1999).
- [奥野 99] 奥野, 鈴木, 加藤, 狩野, 西原:セルの相互作用とGAを用いた仮想都市の生成, 計測自動制御学会第26回知能システムシンポジウム, pp.239-244 (1999).
- [落合 97] 落合:商用化された仮想社会 people space の現状, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol.1, No.1, pp.13-18 (1997).
- [佐藤 97] 佐藤, 小野, 小林:遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価, 人工知能学会論文誌, Vol.12, No.5, pp.734-744 (1997).
- [鈴木 99] 鈴木, 奥野, 加藤, 狩野, 西原:セルの相互作用に基づく仮想都市創発, 第57情処大会, 3S-08 (1999).
- [高木 98] 高木, 畝見, 寺野:対話型進化計算法の研究動向, 人工知能学会誌 Vol.13 No.5, pp.692-703 (1998).
- [Una-May 98] Una-May O'Reilly, Ramachandran, G.: A Preliminary Investigation of Evolution as a Form Design Strategy, Artificial Life VI, pp.443-447 (1998).
- [White 97] White, R., Engelen, G.: Cellular Automata as the basis of integrated dynamic regional modeling, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol.24, pp.235-246 (1997).

[担当委員:沼尾正行]

2000年7月28日 受理

付録:道路網の生成

本実験で用いた道路網を付図に示す。決められた時刻に、あらかじめ用意したパターンを用いて、建物セルと空き地セルを道路セルに変更している。



付図 本実験で用いた道路網

著者紹介



奥野 智江

1998年筑波大学第三学群情報学類卒業。2000年同大学院理工学研究科修士過程修了。同年、凸版印刷株式会社入社。現在、同社 E ビジネス推進本部において、オンライン決済システムの開発に従事。在学中は、人工生命、仮想都市の生成に関する研究に従事。



鈴木 里珠

1999年筑波大学第三学群情報学類卒業。同年、日本電気株式会社入社。現在、同社交通・サービス業システム開発事業部において、SEとして民間企業のインターネットを利用したシステム構築に従事。在学中は、遺伝的アルゴリズム、仮想都市の生成に関する研究に従事。



狩野 均 (正会員)

1980年筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了。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論文賞受賞。日本認知科学会, 情報処理学会, 計測自動制御学会, IEEE等各会員。



加藤 伸子

1990年筑波大学大学院物理学研究科修士課程修了。同年、(株)東芝入社。同社研究開発センターにおいて主にVRの研究に従事。1995年より筑波技術短期大学助手。仮想環境構築, コンピュータ・グラフィックス, HIの研究に従事。博士(工学)。1999年WSC4 Best Paper and Presentation Award受賞。筑波大学非常勤講師。情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本認知学会等会員。