

仮想都市のためのL-systemによる道路網生成手法の検討

加藤 伸子

nobuko@a.tsukuba-tech.ac.jp
筑波技術短期大学 電子情報学科
〒305-0005 つくば市天久保 4-3-15

奥野智江, 岡野紋, 狩野 均, 西原 清一

筑波大学 電子・情報工学系
〒305-0006 つくば市天王台 1-1

近年、インターネット上でのバーチャルワールドの広がりや3Dゲームの普及にともない、多様な仮想都市を自動的に生成する手法が望まれている。我々は、人工生命の手法を用いて多様な仮想都市を自動的に生成する手法を提案する。人工生命の手法を用いることで、現実の都市の特徴を持ち、しかも多様なパターンの都市の生成を行えることが期待できる。本稿では仮想都市生成の第一段階である道路網生成をL-systemで行う手法について述べる。本手法は、幹線道路では枝別れ型L-systemを、区画道路では領域分割型L-systemを用いるものである。ここでは、道路網の生成手法と実際に道路網を生成した例について述べ、自動的に多様な道路網が生成できることを示す。

L-System Approach to Generating Road Networks for Virtual City

Nobuko Kato

nobuko@a.tsukuba-tech.ac.jp
Department of
Electronics and Information Sciences,
Tsukuba College of Technology
4-3-15 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki 305-0005

**Tomoe Okuno, Aya Okano,
Hitoshi Kanoh, Seiichi Nishihara**

Institute of
Information Sciences and Electronics,
University of Tsukuba
1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006

Automatic generation of various kinds of urban areas is an interesting problem in virtual reality. This paper proposes an Alife approach to automatic design of virtual cities, which we consider as a kind of artificial life. A virtual city is composed of a road network giving the basic structure of the urban area and a large number of buildings

In this paper, we show a set of rewriting rules of a L-system works very well to produce realistic road networks including road shapes, block shapes, and graphical topology. Some examples of the road maps produced by L-system techniques are shown, where we can see two kinds of road types: main roads and the other streets which are generated using Tree L-system and Map L-system, respectively.

1 はじめに

インターネット上での「仮想都市」の広がりや、3Dゲームの普及と共に、様々な仮想都市が利用されるようになってきている。しかし、これらの仮想都市の作成においては、従来、人手によるモデルの作成、配置が必要であり、大規模な仮想都市の作成が困難であった。

この問題を解決するために、実際の都市の写真を基に、仮想都市を構築する手法が研究されている [1]。この方法は、既存の都市については強力な手法となりうるが、新たな都市を作成することはできない。一方、様々な新しいパターンを生成するものとして、人工生命の手法が注目されている。著者らは、現実の都市の特徴を持ちながら、しかもオリジナルの都市を作成する手法として、人工生命を用いて仮想都市を構築する方法を提案する [2][3]。

本稿では仮想都市生成の第一段階である、道路網生成を L-system で行う手法について述べる。L-system は、単純な文字列に書き換え規則を適用するもので、樹木や細胞の形状等の自然構造の表現に用いられている [4] が、広域の道路網生成を行った例はみあたらない。ここでは道路網の構造から、幹線道路では枝別れ型 L-system を、区画道路では領域分割型 L-system を用いることにより、自動的に多様な道路網を生成できることを示す。

以下では、まず2章で、道路網の概要と L-system について述べ、次に3章において、道路網生成アルゴリズムについて述べる。最後に4章では、実際に道路網を生成した例を示し、本手法の有効性を確認する。

2 道路網の概要

2.1 道路網の基本的形態

道路網を構成する道の機能と街路パターン、更に道路網全体としてのパターンについて以下に述べる。

(1) 道の機能

一般に道はその主たる機能から、次の3つに分類されている [5]。

[つなぐ道] 2地点間をつなぐ働きをするもので、例えば地域相互を連結する街道筋や地形にそって発達する尾根道がそれにあたる。このような道の発展形態は自然発生的である。

[分割する道] 空間を二分する道であり、市街地における通りに多くみられる。このような道路の多くは計画的に生成されたものである。

[到達する道] 枝道的なあり方で、山林のような自然界において、もっとも普遍的にみられる。

(2) 街路パターン

一方街路パターンに注目すると、線の形状と交差点の形状という2つの要素に分解して分析することにより、客観的に捉えることができる。

[線の形状] 交差点間での道の形状であり、曲線と直線の2つに区分できる。一般に曲線に比して、直線は合理的、計画的であるといえる。

[交差点の形状] 交差点に集まる道路数に注目すると、基本的な交差点の形状として、主に十字、T字、L字の3タイプがある。

(3) 道の機能と形態

実際の道路網においてこれらの特徴をまとめると、表1に示すように分類できる。つなぐ道は曲線路であり、T、L字の交わり方をすることが多い。このような道で形成されるパターンは一般に枝状などの不規則な形状となる(図1(a))。一方分割する道は直線路が多く、つなぐ道に比べて十字の交わり方をすることが多い。この典型的な例は格子状の街路パターン(図1(b))で、分割する道が十字に交わったものである。到達する道は、袋路を形成し、都市においては細かい路地などに多くみられる。本稿では、つなぐ道、分割する道を対象とする。

また、一般的に道路は、幹線道路、補助幹線道路、区画道路の3つに区分できる。このうち、幹線道路、補助幹線道路はつなぐ道が多く、区画道路は分割する道が多いと考えられる。

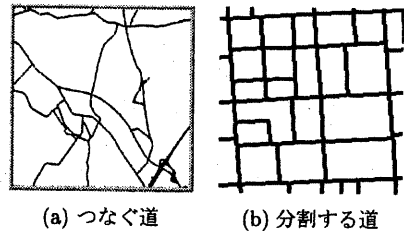


図1: 道の例

(4) 都市の道路網パターン

1つの都市の道路網は、いくつかの異なった街路パターンが集まってできている。例えば、格子状パターンの道路網にT、L字タイプの直線路が混在し、さらに曲線路が加わるなど、多様なパターンから構成されている。このように各々の街路パターンは形態的に独立しており、それら相互は幾何学的に明瞭に関係づけられていない。しかし、このようにしてできた道路網の形態は、全体としてみると統計的にフラクタル性を持つことが知られており、さまざまな都市についてフラクタル次元を求めるなどの解析が行われている。[6]

表 1: 道の機能と形態

道の分類	線の形状	交差点の形状	道の例	発生	形態
つなぐ道	曲線	T字, L字	街道 尾根道	自然発生的	枝状
分割する道	直線	十字 T字, L字	通り	計画的	格子状
到達する道	直線	(袋路)	路地 支尾根道		

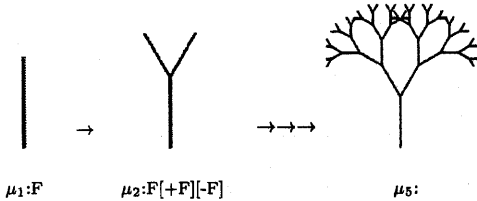


図 2: 樹木形状生成の様子

2.2 L-system

L-system は初期文字列に書き換え規則を繰り返し適用することで発生の様子を記述するもので、植物等の成長を記述するのに使われている [7].

L-system には、枝別れ型の L-system と領域分割型の L-system があり、前者は、1つの文字を枝として、樹木の成長を記述することができる [4]. この生成例を図 2 に示す。この図は、初期文字列 F に書き換え規則 $F \rightarrow F[+F][-F]$ を繰り返し適用したものである。μ_i は書き換えにより i 番目に生成された文字列で、文字列から図形への変換はタートル・グラフィックスの考え方をを用いて次のように行う。

F: タートルが一定の長さ前進する。

+, -: タートルの左右への回転をあらわす。

(,): 分岐をあらわす。

また、領域分割型の L-system にはグラフ L-system や Map L-system があげられ、卵割の様子や細胞の分裂の様子を記述することが可能である。

また、1つの文字に対して1つの書き換え規則が与えられている決定論的 L システムの他、条件や確率によって与えられる書き換え規則が異なるテーブル L システム、確率 L システム等がある [4].

2.3 道路網生成の基本方針

前述したように、都市の道路網はさまざまな街路パターンが集まって形成されており、各街路パターンは道同士の接続関係で記述できる。さらに、道路網全体とし

てみると統計的にフラクタル性を持つ。

一方、L-system は部分間のつながりだけを規則で記述し、次のステップを逐次的に決める手法であるため、フラクタル図形の表現にも用いられている。そこで、本研究では次のような基本方針に基づいて道路網を生成する。

- 道路網の交差点の形状を L-system の書き換え規則で表現し、確率 L-system を適用する。また、L-system の文字をリンクとし、道路網をリンクの集合として表現する。
- 主につなぐ道から構成される幹線道路と補助幹線道路の生成には枝別れ型 L-system を、分割する道からなる区画道路の生成には領域分割型 L-system を用いる。

3 道路網生成手法

3.1 処理の流れ

提案する道路網生成手順を図 3 に示す。道路網生成時には、まず幹線道路網（補助幹線道路を含む）を生成し、道路で囲まれた領域をループとして抽出する。次にすべてのループについて、区画道路網を生成し、都市全体の道路網とする。

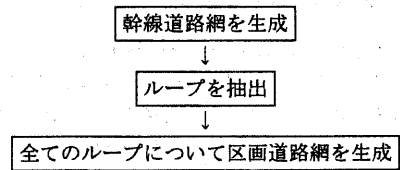


図 3: 道路網生成手順

3.2 幹線道路網の生成

3.2.1 幹線道路の定式化

道路網の交差点形状として直進と十字、T, Y 字の各分岐を考え、確率 L-system で表現する。それぞれの書き換え規則を次のようにする。

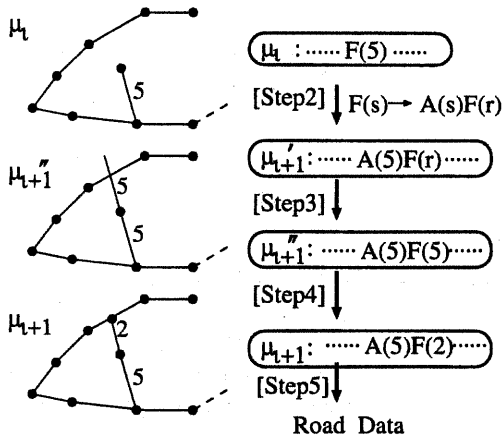


図 4: 幹線道路網生成時の文字列書き換え例

表 2: 交差点数

交差時の処理	十字交差点数	T字交差点数
十字交差のみ	$3N_c + N_t$	N_t
T字交差のみ	N_c	$2N_c + 2N_t$

$F(s) \rightarrow A(s)F(r) : p_s$ (直進)
 $F(s) \rightarrow A(s)[+F(r)][-F(r)]F(r) : p_c$ (十字分岐)
 $F(s) \rightarrow A(s)[+F(r)][-F(r)] : p_t$ (T,Y字分岐)
 $F(s):交差 \rightarrow A(s)F(s) : p_{nc}$ (十字交差)
 $F(s):交差 \rightarrow A(s) : p_{nt}$ (T字交差)
 ただし、

$$p_s + p_c + p_t = 1,$$

$$p_{nc} + p_{nt} = 1,$$

$A(s), F(s), F(r)$: タートルが長さ s または r 直進することを示す。

ここで、これらの書き換え規則は、

書き換え前の文字列:条件 \rightarrow 書き換え後の文字列:適用確率

という意味である。書き換え規則適用の際には、条件が記述されている規則を優先する。直進、十字、T、Y字分岐のどれか、十字、T字交差のどちらかは確率的に決定する。また、文字列を道路データに変換する場合には、 $A(s), F(s), F(r)$ の各文字を1リンク、リンクの両端をノードとする。

新たに生成されるリンクの長さは、まず、基本の長さにゆらぎを加えたものとして計算するが、このリンクが既存の道路リンクと交差した場合には、交差点までの距離をリンクの長さとする。交差したリンクは、十字交差をするか、T字交差するかを一定の確率で選択する。

ここで、十字交差とT字交差を生成するための書き換え規則を導入した理由は以下の通りである。

生成された道路網において、十字、T字などの各交差

点の数の分布により全体のパターンが大きく異なる。上記規則により生成される道路網においては、交差点は、分岐と交差により生成される。つまり、交差点数=分岐数+交差数という関係が成り立つ。表2に交差処理の違いによる交差点数の分布を示す。ここで、 N_c は十字分岐数を、 N_t はT字分岐数をあらわす。このように交差時の処理により交差点数の分布が大きく変化するので、全体のパターンを制御するためには、十字交差、T字交差の処理が必要である。

3.2.2 幹線道路網生成の処理手順

次のような処理手順に従い、幹線道路網を生成する。

[Step1] : $i = 1$ とし文字列 μ_1 に初期文字列を代入する。

[Step2] : μ_i に書き換え規則を適用し、 μ'_{i+1} とする。

[Step3] : $r = (\text{const} + \text{ゆらぎ})$ として、 μ''_{i+1} とする。

[Step4] : μ''_{i+1} において、他のリンクと交差があった場合には $r = (\text{交差するまでの長さ})$ として、最終的な文字列 μ_{i+1} とする。

[Step5] : 文字列を道路データに変換する。

[Step6] : 指定回数をこえるまで、または、書き換え可能な文字がなくなるまで $i = i + 1$ として Step2 ~ 5 を繰り返す。

この処理による生成の様子を図4に示す。この図は幹線道路網の生成過程において、 i 番目の文字列 μ_i 中の1文字 ($F(5)$) に着目し、その書き換えの様子を示したものである。また、道路データの例を表3に示す。自然な道路網を生成するため、変換する際の線分の長さ r 、線分同士の接続角度に、ゆらぎを与えている。

3.3 区画道路網の生成

3.3.1 区画道路網の書き換え規則

区画道路網の書き換え規則を下記に記す。

$F(s) \rightarrow F(s1)[+F(x)][-F(x)]F(s2) : p_c$ (十字分岐)
 $F(s) \rightarrow F(s1)[+F(x)]F(s2) : p_y$ (Y字分岐)
 $F(s) \rightarrow F(s1)[+F(x)][-F(x)] : p_t$ (T字分岐)
 $F(s) \rightarrow F(s1)[+F(x)] : p_l$ (L字分岐)

ただし、 $s = s1 + s2$ とする。

$s1, s2$ は置き換える前の長さ s を分割するものとなる。また、分岐する道路 $[+F(x)], [-F(x)]$ は領域を分割するようにはたらくため、長さ x は、既存の道路に交差するまでの距離となる。

表 3: 道路データの例

(a) ノード・データ		
ノード番号	x 座標	y 座標
1	10.0	10.0
2	10.0	20.0
3	5.0	30.0
4	15.0	30.0

(b) リンク・データ		
リンク番号	ノード番号	ノード番号
	始点	終点
1	1	2
2	2	3
3	2	4

3.3.2 区画道路網生成の処理手順

区画道路網生成処理について以下に記す。

- [Step1] : $i = 1$ とし文字列 μ_1 に初期文字列を代入する。
- [Step2] : μ_i に書き換え規則を適用し、 μ'_{i+1} とする。
- [Step3] : 乱数により $s = s_1 + s_2$ となる s_1, s_2 を求め、 μ'_{i+1} に代入し、 μ''_{i+1} とする。
- [Step4] : 全ての $F(x)$ について他のリンクに交差するまでの距離を求め最終的な文字列 μ_{i+1} とする。
- [Step5] : 文字列を道路データに変換する。
- [Step6] : 指定回数に達するまでまたは、書き換え可能な文字がなくなるまで $i = i + 1$ として Step2 ~ 5 を繰り返す。

区画道路生成は、幹線道路で囲まれた領域を分割しているため、分岐により生成された道路は必ず他の道路と交差し、道路網の変化は領域内にとどまる。区画道路網生成における書き換え例を図 5 に示す。

以上述べたように、本手法では接続角にゆらぎを与えることにより線の形状(曲線、直線)を表現することができる。また、書き換え規則と交差処理により、交差点の形状(L字、T字、十字)を表現することができる。さらに L-system により繰り返し書き換え規則を適用することにより、フラクタル性を持つ道路網全体を生成することができる。

4 実験

以下では幹線道路網、区画道路網、各々の生成例を示すとともにパラメータを変化させた場合の道路網の特徴の変化について考察を行う。ここでは道路網の特徴として、一般的に用いられている 2 つの指標 π 、 α [8] を用いる。

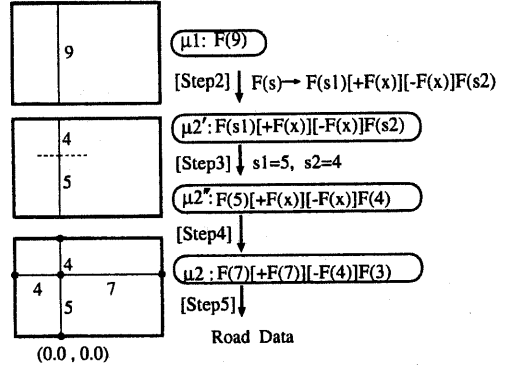


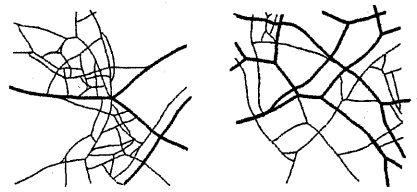
図 5: 区画道路網生成時の文字列書き換え例

4.1 幹線道路網の生成例

図 6 に、幹線道路網の生成例を示す。これは表 4 に示す 2 段階のパラメータを用いて、幹線道路から補助幹線道路を分岐させることにより、段階的な生成を行った例である。また、補助幹線道路のパラメータを表 5 を用いて変化させた場合の道路指標の分布例を図 7 に示す。図 7 から、本手法により多様な道路網が生成されていることがわかる。

表 4: 幹線道路網生成時のパラメータ

パラメータ	幹線道路	補助幹線道路
直進する確率 p_s	0.85	0.90
十字分岐する確率 p_c	0.08	0.05
T字分岐する確率 p_t	0.07	0.05
T字交差する確率 nb	0.5	1.0
角度のゆらぎの最大値	10 度	10 度



(a) $\pi = 12, \alpha = 0.26$ (b) $\pi = 13, \alpha = 0.22$
図 6: 幹線道路網の生成例

表 5: 補助幹線道路のパラメータ変化

パラメータ	Type A	Type B	Type C	Type D
直進する確率 p_s	0.9	0.95	0.9	0.8
T字交差する確率 nb	0.5	1.0	1.0	1.0

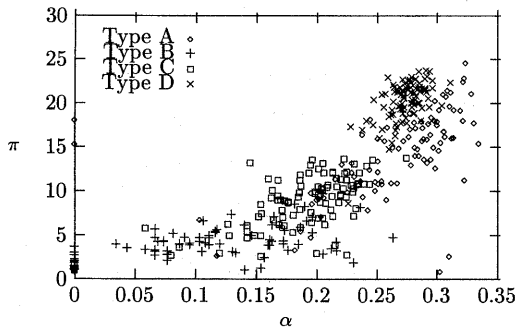


図 7: 本手法による幹線道路の $\alpha - \pi$ 分布

4.2 区画道路網の生成例

表 6 のパラメータを用いて区画道路網を生成した例を図 8 に示す。

これらの結果から、幹線道路網の生成手法により不規則な道路網パターンが、区画道路網生成手法により規則的な道路網パターンが生成できることがわかる。

表 6: 区画道路網生成時のパラメータ

パラメータ	区画道路
直進する確率 p_s	0.0
十字分岐する確率 p_c	0.5
T 字分岐する確率 p_t	0.1
T 字交差する確率 n_b	0.4
角度のゆらぎの最大値	2 度

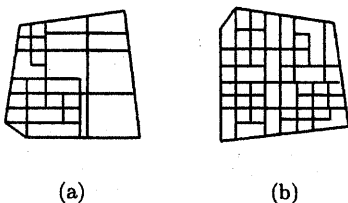


図 8: 区画道路網の生成例

4.3 応用例

生成した道路網をもとに文献 [3] の手法を用いて建物配置を行い、実際に仮想都市を生成した例を図 9 に示す。

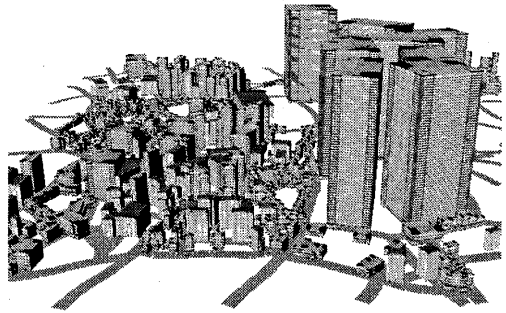


図 9: 仮想都市の生成例

5 おわりに

本稿では、多様な仮想都市を自動的に作成するための第一段階として、道路網を生成する手法を提案した。本手法は、幹線道路は枝別れ型の、市街地道路においては領域分割型の L-system の書き換え規則を用いて道路網を生成するものである。この手法をもとに、実際に道路網を生成し、多様な道路網が生成できること、幹線道路網、区画道路網の 2 つの生成手法により、自然発生的で不規則なパターンの道路網と計画的で規則的なパターンの道路網が各々生成できることを示した。

このように実際の都市の特徴をもった道路網を自動的に作成することで、各種交通シミュレーションなどのベンチマークとしても利用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 原田裕明: 仮想でない仮想都市—ミラーワールド構築をめざして—, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 1, No. 1, pp. 49-55 (1997).
- [2] 奥野智江, 岡野紋, 加藤伸子, 狩野均, 西原清一: L システムを用いた道路網の生成, 情報処理学会 第 56 回全国大会論文集, Vol. 4, pp. 108-109 (1998).
- [3] 岡野紋, 奥野智江, 加藤伸子, 狩野均, 西原清一: 遺伝的アルゴリズムを用いたバーチャルワールドの生成, 情報処理学会 第 56 回全国大会論文集, Vol. 4, pp. 110-111 (1998).
- [4] Prusinkiewicz, P. and Lindenmayer, A.: *The Algorithmic Beauty of Plants. (The Virtual Laboratory)*, Springer (1986).
- [5] 楳田彦: 見えがくれる都市, 鹿島出版会 (1980).
- [6] 水野節子, 掛井秀一: 都市街路形態のフラクタル解析, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 414, pp. 103-108 (1990).
- [7] 土居洋文: 生物のかたちづくり, サイエンス社 (1988).
- [8] 奥平耕造: 都市工学読本, 彰国社 (1976).