

# L-system を用いた仮想都市のための道路網生成手法

加藤 伸子<sup>†</sup> 奥野 智江<sup>††</sup>  
狩野 均<sup>†††</sup> 西原 清一<sup>†††</sup>

本論文では仮想都市生成の第1段階である道路網生成を L-system で行う手法を提案する。ここでは実際の道路網が自己相似性を持つことから、自己相似図形の表現に適した L-system を用いて道路網を生成する。すなわち、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。この際、その特徴の違いから、幹線道路網では枝分かれ型 L-system を、区画道路網では領域分割型 L-system を用いる。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、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す。

## L-system Approach to Generating Road Networks for Virtual Cities

NOBUKO KATO,<sup>†</sup> TOMOE OKUNO,<sup>††</sup> HITOSHI KANO<sup>†††</sup>  
and SEIICHI NISHIHARA<sup>†††</sup>

This paper proposes a novel method that enables automatic modeling of road networks that provides the basic structure of the virtual cities. We show a set of rewriting rules of an L-system works very well to produce realistic road networks including road shapes, block shapes, and graphical topology. The road networks are composed of two types of roads – arterial roads which are generated by using the Tree L-system and access roads which are generated by using the Map L-system. The fundamental structure of real road networks and generation procedures for road networks are described. Examples of road networks verify following: various type of road networks can be generated, and both of the irregular pattern and regular pattern of the road networks are generated successfully by 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ゲームの普及とともに、様々な仮想都市が利用されるようになってきている<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>3),4)</sup>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、しかもオリジナルな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検討している<sup>5),6)</sup>。

本論文では仮想都市生成の第1段階である道路網生成を L-system で行う手法を提案する。L-system は、単純な文字列に書き換え規則を適用するもので、樹木や細胞の形状などの自然構造の表現に用いられているが<sup>7),8)</sup>、広域の道路網生成を行った例はみあたらない。ここでは実際の道路網が自己相似性を持つことから、自己相似図形の表現に適した L-system を用いて道路網を生成する。すなわち、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。この際、その特徴の違いから、幹線道路網では枝分かれ型 L-system を、区画道路網では領域分

<sup>†</sup> 筑波技術短期大学電子情報学科  
Department of Information Science and Electronics,  
Tsukuba College of Technology

<sup>††</sup> 筑波大学理工学研究科  
Master's Program in Science and Engineering, University of Tsukuba

<sup>†††</sup> 筑波大学電子・情報工学系  
Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba

表 1 道の機能と形態  
Table 1 Classification by function and shape.

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		

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, 道路網の基本的形態を整理し, 次にこれを生成するための基本方針を説明する。3 章では, 幹線道路網と区画道路網の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

日本の都市における道を大まかに分類した例として表 1 がある<sup>9)</sup>。この表をもとに, 道路網を構成する道の機能と形態, さら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) 道の機能と形態

一般に道はその主たる機能から, 次の 3 つに分類することができる<sup>9)</sup>。

[ つなぐ道 ] 2 地点間をつなぐ働きをするもので, たと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, 最も普遍的にみられる。

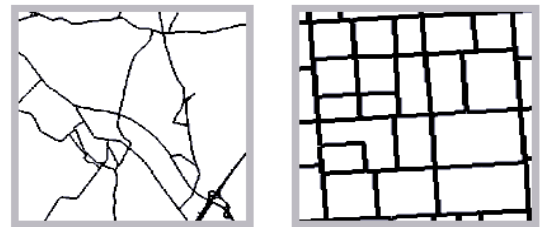
また, ここでは道の形態を線の形状と交差点の形状に分けて考える。

[ 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 ] 基本的な交差点の形状として, 交差点に集まる道の数が 4 本の十字, 3 本の T 字, 2 本の L 字の 3 タイプがある。

#### (2) 道の特徴

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



(a) つなぐ道(つくば市) (b) 分割する道(京都市)

図 1 道の例

Fig. 1 Examples of road networks.

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。本論文では, 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<sup>10)</sup>(付録 A.1 参照)。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。

#### (3) 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パターンが集まってできている。たとえば, 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自己相似性を持つことが知られており, 様々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<sup>11)</sup>。

### 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, 植物の成長などを記述するのに使われている<sup>12)</sup>。

L-system には、枝分かれ型の 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<sup>7),8)</sup>。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<sub>i</sub> 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<sup>13)</sup>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表す。
- [, ]: 分岐を表す。

なお、図 2 の例では、書き換えを行うたびにタートルの前進距離を半分にしている。また、領域分割型の L-system にはグラフ L-system やマップ L-system<sup>14)</sup> があげられ、卵割や細胞分裂の様子を記述することが可能である。

このほか、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-system のほか、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ンプル L-system、確率 L-system などがある<sup>8)</sup>。

2.3 道路網生成の基本方針

前述したように、都市の道路網は様々なパターンが集まって形成されているが、道路網全体としてみると統計的に自己相似性を持つ。

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、自己相似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 を適用するとともに、分岐角度にゆらぎを与えることにより線の自然な形状を表現する。
- 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分かれ型 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。

3.2 幹線道路網の生成

3.2.1 幹線道路の書き換え規則

幹線道路網の書き換え規則を表 2 に示す。

道路網の交差点形状として直進と十字、T 字の各分岐を考え、確率 L-system で表現している。

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し、条件にあてはまらない場合は、P<sub>1</sub>(直進)、P<sub>2</sub>(十字分岐)、P<sub>3</sub>(T 字分岐)をそれぞれ p<sub>s</sub>, p<sub>c</sub>, p<sub>t</sub> の確率で適用する。A(s), F(s), F(r) の各文字を構成する 1 文字がリンク(道路)に変換され、s, r がノード間のリンクの長さに変換される。A はこれ以上成長しないリンクを、F は成長を続けるリンクを表している。

新たに生成されるリンクの長さは、まず、基本の長さとして計算するが、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、つきぬけて十字交差となるか(P<sub>4</sub>)、突き当たって T 字交差(P<sub>5</sub>)となるかを確率 p<sub>nc</sub>, p<sub>nt</sub> で選択する。また、自然な道路網を生成するため、線分どうしの接続角度に、ゆらぎ角度 β を与えている。

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 P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub> を導入した理由は以下のとおりである。

生成された道路網全体のパターンは、十字交差点数と T 字交差点数の比率により大きく異なる。突き当たり処理(T 字交差 P<sub>5</sub>)を入れない場合は、交差する道路はすべて十字交差となる。すなわち、十字分岐で作成された交差点以外に多数の十字交差点が作成さ

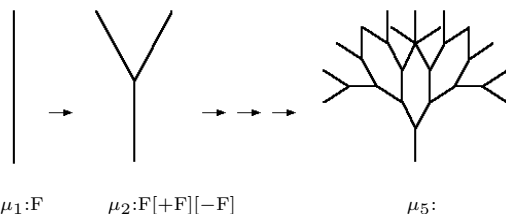


図 2 樹木形状生成の様子  
Fig. 2 Sample tree structures generated using a simple L-system.

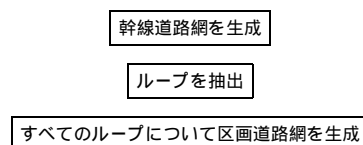


図 3 道路網生成手順  
Fig. 3 Procedure of generation.

表 2 幹線道路網生成の書き換え規則  
Table 2 Rewriting rules for arterial roads.

識別子	書き換え規則 (書き換え前の文字列:条件 書き換え後の文字列:確率)		備考
P1	F(s)	A(s)+(β)F(r):p <sub>s</sub>	直進(分岐なし)
P2	F(s)	A(s)[+(θ <sub>c</sub> +β)F(r)][-(θ <sub>c</sub> +β)F(r)]+(β)F(r):p <sub>c</sub>	十字分岐
P3	F(s)	A(s)[+(θ <sub>t</sub> +β)F(r)][-(θ <sub>t</sub> +β)F(r)]:p <sub>t</sub>	T字分岐
P4	F(s):交差	A(s)+(β)F(r):p <sub>nc</sub>	十字交差
P5	F(s):交差	A(s):p <sub>nt</sub>	T字交差

ただし, p<sub>s</sub>,p<sub>c</sub>,p<sub>t</sub>: 分岐確率(p<sub>s</sub>+p<sub>c</sub>+p<sub>t</sub>=1)  
 p<sub>nc</sub>,p<sub>nt</sub>: 交差確率(p<sub>nc</sub>+p<sub>nt</sub>=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.  
 +(θ), -(θ): タートルが角度 θ 回転することを示す.  
 β: ゆらぎ角度(-β<sub>max</sub><β<β<sub>max</sub>)

せるために、過密な道路網となり、道路網のパターンを任意に制御することができない。そこで、書き換え規則に P4, P5 を導入し、全体の交差点数の比率を制御することにより、任意の道路網パターンの作成することが可能となった。

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<sub>1</sub> に初期文字列を代入する。
- [Step2] : μ<sub>i</sub> 中のすべての文字に書き換え規則を適用し、μ'<sub>i+1</sub> とする。
- [Step3] : r = (基本の長さ), β = (一様乱数により決定したゆらぎ角度) とおいて、μ''<sub>i+1</sub> とする。
- [Step4] : μ''<sub>i+1</sub> において、他のリンクと交差があった場合には r = (交差するまでの長さ) として、書き換え後の文字列 μ<sub>i+1</sub> とする。
- [Step5] : 文字列 μ<sub>i+1</sub> を道路データに変換する。
- [Step6] : 書き換え可能な文字 (F) がなくなるまで、または、指定回数 N に達するまで i = i + 1 としして Step2~5 を繰り返す。

ここで、初期文字列は、1 点から M 方向に伸びる道路を表す文字列とする。すなわち、M を自然数、φ<sub>i</sub>, s<sub>i</sub> (i = 1, 2, 3, ..., M) を各々任意の角度、長さとする、初期文字列は [(φ<sub>i</sub>)F(s<sub>i</sub>)] の M 回の連結と表すことができる。

この処理による生成例を図 4 に示す。この図は幹線道路網の生成過程において、文字列 μ<sub>2</sub> の書き換えの様子を示した例である。また、μ<sub>3</sub> に対応する道路データの例を表 3 に示す。この道路データは、他のリンクとの交差判定に用いる。

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表 4 に示す。s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub> は書き換える前の長さ s を分割するものとなる。ま

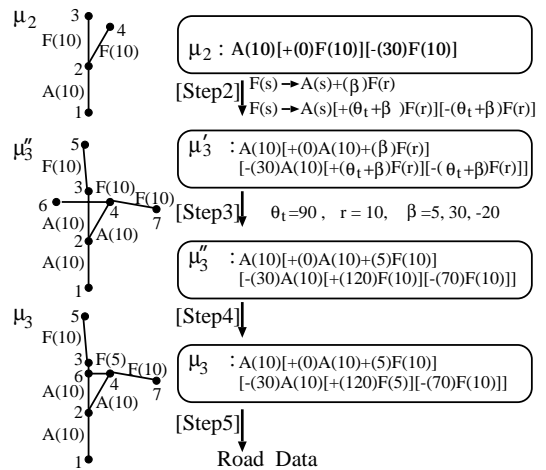


図 4 幹線道路網生成時の文字列書き換え例(図中の・はノードを、数字はノード番号を表す)

Fig. 4 Example of rewriting procedure for arterial road networks.

た、分岐する道路 [+F(x)], [-F(x)] は領域を分割するため、長さ x は、既存の道路に交差するまでの距離となる。

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<sub>1</sub> に初期文字列を代入する。
- [Step2] : μ<sub>i</sub> 中のすべての文字に書き換え規則を適用し μ'<sub>i+1</sub> とする。
- [Step3] : 一様乱数により β と s = s<sub>1</sub> + s<sub>2</sub> となる s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub> を求め、μ'<sub>i+1</sub> に代入し、μ''<sub>i+1</sub> とする。
- [Step4] : すべての F(x) について他のリンクと交差するまでの距離を求め、x に代入して、最終的な文字列 μ<sub>i+1</sub> とする。
- [Step5] : 文字列を道路データに変換する。
- [Step6] : 指定回数 N に達するまで i = i + 1 としして 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。初期文字列は、領域を2分割する道路リンクを表す文字とする。すなわち、 $\phi, s$  を各々任意の角度、長さとする。初期文字列は  $+(\phi)F(s)$  と表すことができる。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の書き換え規則を繰り返し適用することにより、自己相似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と区画道路網の生成例を示すと

表3 道路データの例

Table 3 Example of road network data.

(a) ノード・データ

ノード番号	x 座標	y 座標
1	0.0	0.0
2	0.0	10.0
3	0.0	20.0
4	5.0	18.7
5	-0.9	30.0
6	0.0	18.7
7	14.4	15.3

(b) リンク・データ

リンク番号	ノード番号	
	始点	終点
1	1	2
2	2	6
3	2	4
4	3	5
5	4	6
6	4	7
7	6	3

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  $\pi, \alpha$ <sup>15)</sup> (付録 A.2 参照)を用いる。

4.1 幹線道路網の生成例

図6にゆらぎ角度の最大値  $\beta_{max}$  変化させた場合の生成例を、図7に分岐確率  $p_s$  を変化させた場合の生成例を各々示す。ここでは、初期文字列を  $[(+90)F(10)] [-(90)F(10)]$ 、繰返しの指定回数  $N = 20$  として実験を行った。これらの図より、自然発生的で不規則な道路網が生成できること、パラメータを変化させることで多様な道路網が生成されることが分かる。

また、表5に示すパラメータを用いて本手法により生成した道路網と日本の4都市(大宮市, 宇都宮市, 土浦市, 大阪市)における道路網(図8)の道路指標の分布例を図9に示す。この図より次のことが分かる。

- Type A, B, C, Dの分布状況から、生成された都市の  $\alpha, \pi$  指標をパラメータによりある程度制御できる。
- パラメータを変化させて得た分布の中に、実際の

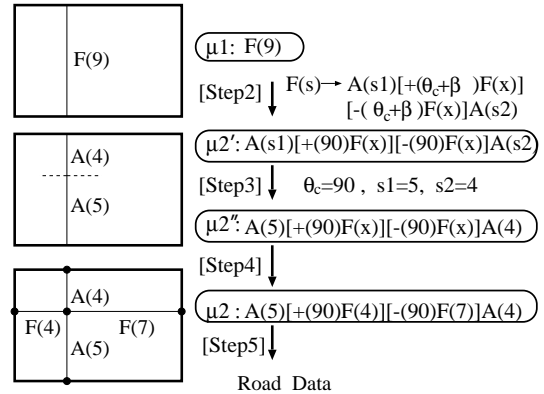


図5 区画道路網生成時の文字列書き換え例  
Fig. 5 Example of rewriting procedure for access road networks.

表4 区画道路網生成の書き換え規則

Table 4 Rewriting rules for access roads.

識別子	書き換え規則		備考
	(書き換え前の文字列: 条件)	書き換え後の文字列: 確率)	
P1	F(s)	A(s1)[+( $\theta_c + \beta$ )F(x)][-( $\theta_c + \beta$ )F(x)] + ( $\beta$ )A(s2): $p_c$	十字分岐
P2	F(s)	A(s1)[+( $\theta_t + \beta$ )F(x)] [-( $\theta_t + \beta$ )F(x)]: $p_t$	T字分岐
P3	F(s)	A(s1)[+( $\theta_o + \beta$ )F(x)] + ( $\beta$ )A(s2): $p_o$	横T字分岐
P4	F(s)	A(s1)[+( $\theta_l + \beta$ )F(x)]: $p_l$	L字分岐

ただし、s, s1, s2, x: 道路リンクの長さ (s = s1 + s2),  
 $p_c, p_t, p_o, p_l$ : 分岐確率 ( $p_c + p_t + p_o + p_l = 1$ ).  
 その他は、表2と同じ。

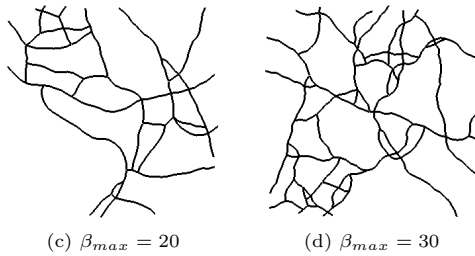
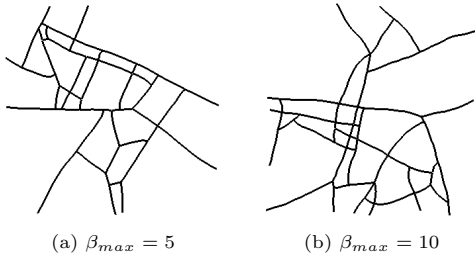


図6 ゆらぎ角度の最大値  $\beta_{max}$  を変化させた場合の道路網 ( $p_s = 0.9, p_c = 0.05, p_t = 0.05, p_{nb} = 0.5$ )  
 Fig. 6 Examples with different angles  $\beta_{max}$ .

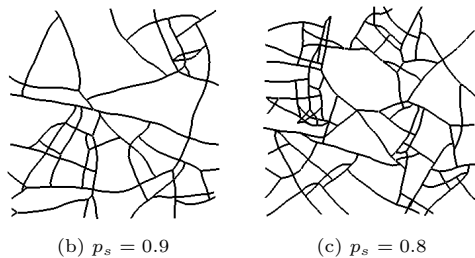
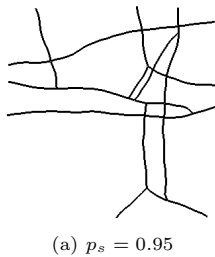


図7 分岐確率  $p_s$  を変化させた場合の道路網 ( $p_c = p_t = (1 - p_s)/2, p_{nb} = 0.5, \beta_{max} = 10$  度)  
 Fig. 7 Examples with different probabilities  $p_s$ .

都市も含まれている。

$\alpha$  は市街化の割合に応じて高くなることが知られている。十字、T字分岐確率を高くした場合 (Type D),  $\alpha$  が高い道路網, つまり大阪 (図8(d)) のような市街化の進んだ都市の道路網を作成できることが分かる。一方、直進する確率が高い場合 (Type C), 大宮、宇都宮、土浦など (図8(a), (b), (c)) の中小都市に近い道路網を作成できることが分かる。

表5 幹線道路のパラメータ変化

Table 5 Parameters for arterial road networks.

Type	A	B	C	D
分岐確率 (直進) $p_s$	0.9	0.95	0.9	0.8
分岐確率 (十字) $p_c$	0.05	0.025	0.05	0.1
分岐確率 (T字) $p_t$	0.05	0.025	0.05	0.1
交差確率 (T字) $p_{nb}$	0.5	1.0	1.0	1.0
ゆらぎ角度の最大値 $\beta_{max}$	10度	10度	10度	10度

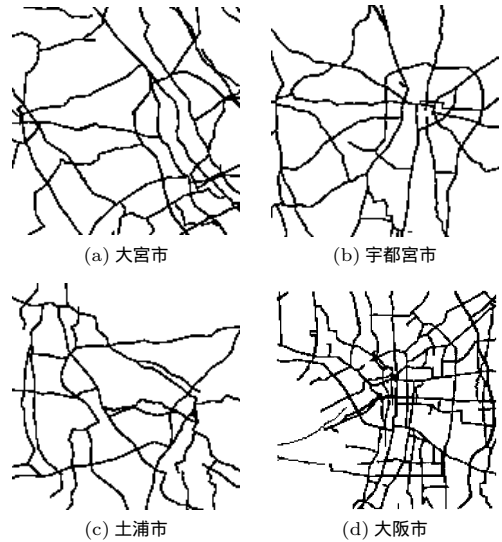


図8 実際の都市の道路網  
 Fig. 8 Actual arterial road networks.

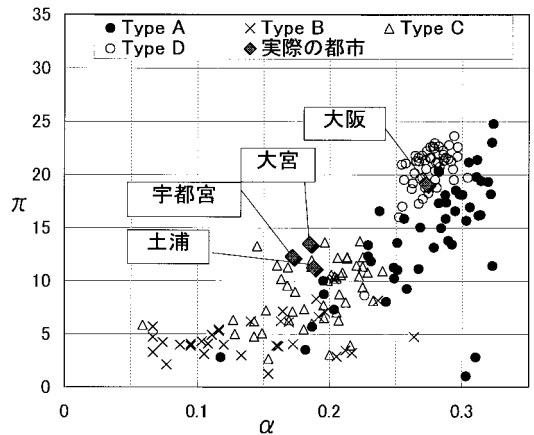
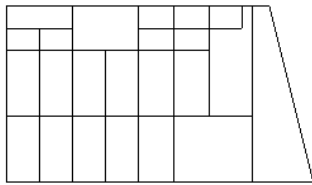


図9 本手法による幹線道路の  $\alpha$ - $\pi$  分布  
 Fig. 9  $\alpha$ - $\pi$  distribution.

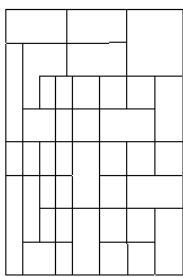
また、本手法により生成した道路網に比べて、大宮、土浦などの中小都市では  $\pi$  が高めとなっている。これは、大阪のような大都市に比べて、このような中小都市では、幹線道路網の曲率が高い傾向があるためと考えられる。道路網の構造が同じで、交差点間の道路

表 6 区画道路網生成時のパラメータ  
Table 6 Parameters for access road networks.

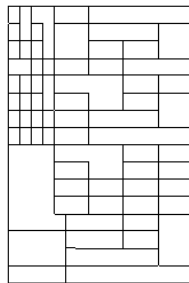
パラメータ	区画道路
分岐確率(十字) $p_c$	0.5
分岐確率(T字) $p_t$	0.3
分岐確率(横T字) $p_o$	0.1
分岐確率(L字) $p_l$	0.1
角度のゆらぎの最大値	0度



(a)  $N = 4$



(b)  $N = 5$



(c)  $N = 6$

図 10 区画道路網の生成例

Fig. 10 Examples of access road networks.

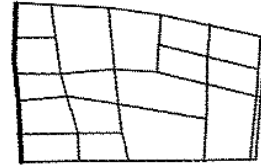
の曲率が高い場合には、 $\alpha$  は変化せず、 $\pi$  が高くなる。本手法では、このような制御は  $\beta_{max}$  を用いて行うことができる(図 6 参照)。

#### 4.2 区画道路網の生成例

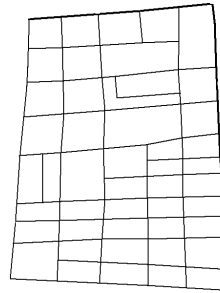
表 6 のパラメータを用いて区画道路網を生成した例を図 10 に示す。初期文字列として、 $+(0)F(10)$  を用いた。また、繰返しの指定回数  $N$  を 4, 5, 6 回と変化させて生成した区画道路網と都市における区画道路網(図 11)の道路指標の分布例を図 12 に示す。これらの図より次のことが分かる。

- 指定回数を変化させることにより、生成される都市の  $\pi$  指標をある程度制御できる。
- パラメータを変化させて得た分布の中に、実際の都市も含まれている。

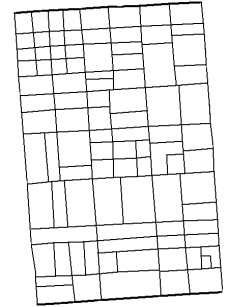
また、区画道路網生成手法を用いることにより、実際の都市(図 11)に見られるように、交差点間の道の形状は直線的で、基本的には格子状の道路網でありながら、十字、T字、L字の交差点が組み合わさって構成



(a) 大宮市



(b) 大阪市(中央区)



(c) 東京都(墨田区)

図 11 実際の都市の区画道路網

Fig. 11 Actual access road networks.

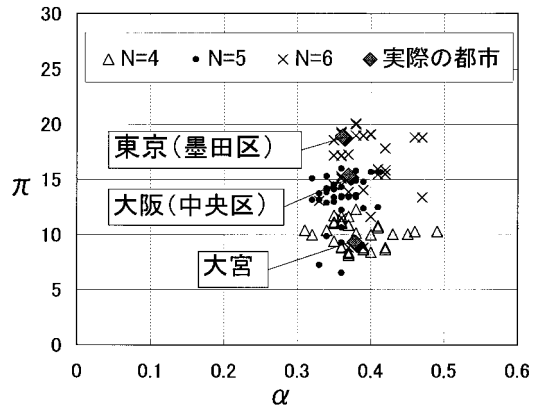


図 12 本手法による区画道路の  $\alpha$ - $\pi$  分布

Fig. 12  $\alpha$ - $\pi$  distribution of access road networks.

される道路網が生成できることが分かる。

#### 4.3 応用例

生成した道路網をもとに文献 16) 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 13 に示す。

#### 5. おわりに

本論文では、多様な仮想都市を自動的に作成するための第 1 段階として、道路網を生成する手法を提案した。本手法は、幹線道路は枝分かれ型の、区画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

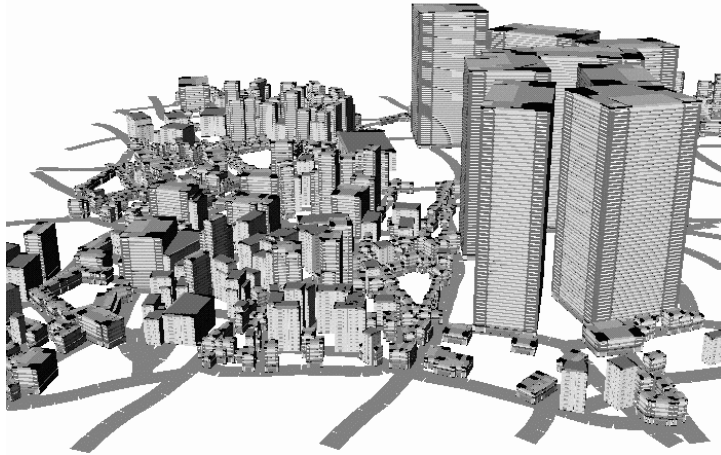


図 13 仮想都市の生成例  
Fig.13 Example virtual city.

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持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。

現状では、到達する道(2.1節参照)を生成する手法の検討は行っていないが、実際の都市の道路網では到達する道である路地が多く見られる。これを作成するためには、区画道路作成手法において道路の長さを制御することで、対応が可能であると考えられる。今後は、地形や建物などの環境を考慮した生成手法の検討を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 落合和正：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).
- 2) 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).
- 3) Langton, C.: *Artificial Life: An overview. (Complex Adaptive Systems)*, MIT Press (1997).
- 4) 上田完次，下原勝憲，伊庭斉志：人工生命の方法，工業調査会(1995).
- 5) 加藤伸子，奥野智江，岡野 紋，狩野 均，西原清一：人工生命の手法による仮想都市生成の基礎的検討，日本VR学会第2回大会論文集，Vol.2, pp.77-78 (1997).
- 6) 加藤伸子，奥野智江，岡野 紋，狩野 均，西原清一：Lシステムを用いた道路網の生成，情報処理学会研究報告CG，Vol.98, No.32, pp.13-18 (1998).
- 7) Prusinkiewicz, P.: A Look at the Visual Modeling of Plants Using L-Systems, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.1278, p.11 (1997).
- 8) Prusinkiewicz, P. and Lindenmayer, A.: *The Algorithmic Beauty of Plants.*, Springer (1990).
- 9) 榎 文彦：見えがくれする都市，鹿島出版会(1980).
- 10) 新谷洋二：都市交通計画，技報堂出版(1994).
- 11) 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).
- 12) 土居洋文：生物のかたちづくり，サイエンス社(1988).
- 13) Abelson, H. and diSessa, A.A.: *The Turtle geometry*, M.I.T. Press (1982).
- 14) Lindenmayer, A.: An Introduction To Parallel Map, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.73, pp.301-316 (1979).
- 15) 奥平耕造：都市工学読本，彰国社(1976).
- 16) 加藤伸子，岡野 紋，狩野 均，西原清一：遺伝的アルゴリズムによる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(D-II)，Vol.J82-D-II, No.10, pp.1766-1774 (1999).

### 付 録

#### A.1 道路の種類

一般的な道路は次のように区分されている<sup>10)</sup>。

- 幹線道路 都市全体に網状に配置され、車線数2以上の比較的高水準の規格を備えた道路。
- 補助幹線道路 近隣住区と幹線道路を結ぶ集散道路で、



車線数 2 の道路 .

区画道路 沿道宅地へのサービスを目的とし密に配置される道路 .

#### A.2 道路網を特徴づける指標

ある地域内の道路網に着目すると地域によりきわめて多種多様な構造となっているが、これらは通常次のような指標により分類されている<sup>15)</sup> .

- $\pi$  指標 :  $\pi = (\text{交通網の総延長}) / (\text{交通網の直径})$
- 閉路充足率 :  $\alpha = (\text{実際の閉路数}) / (\text{閉路の最大数})$

$\pi$  指標は、ある地域内の道路の込み具合を表すもので、その地域の都市化の度合いを知ることができる . 都市化が進んでいるほど  $\pi$  は大きくなる .

閉路充足率は、各道路網の交差点数  $v$  と交差点間を 1 つの辺と見なした場合の辺数  $e$  とすると、閉路の最大数は  $2v - 5$  となるので、 $\alpha$  は次のように求めることができる .

$$\alpha = (e - v + 1) / (2v - 5)$$

市街地道路においては、この  $\alpha$  の一般的な値はおおよそ 0.35 である .

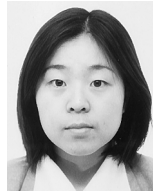
(平成 10 年 9 月 7 日受付)

(平成 12 年 1 月 6 日採録)



加藤 伸子 (正会員)

1990 年筑波大学物理学研究科修士課程修了 . 同年 (株) 東芝入社 . 同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、筑波技術短期大学電子情報学科助手 . 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 . 日本バーチャルリアリティ学会、日本認知学会等会員 .



奥野 智江 (学生会員)

1998 年筑波大学第三学群情報学類卒業 . 同年、同大学院理工学研究科入学 . 仮想都市生成の研究に従事 .



狩野 均 (正会員)

1980 年筑波大学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・神経回路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 年電気学会論文賞受賞 . IEEE、電気学会、電子情報通信学会、人工知能学会、計測自動制御学会等会員 .



西原 清一 (正会員)

1968 年京都大学工学部数理工学科卒業 . 同年、同大学大型計算機センター助手 . 1975 年より筑波大学電子・情報工学系 . 現在、同教授 . 工学博士 . グラフィックスと CAD、組合せ探索アルゴリズム、知識処理、制約充足問題、GA の研究に従事 . 1975 年情報処理学会論文賞受賞 . 著書に「データ構造」(オーム社) 等 . 電子情報通信学会、人工知能学会、ACM、IEEE 各会員 .