

# 時間変化する仮想都市における道路網の自動生成

山内 大介 本田 真望 水野 一徳 福井 幸男 西原 清一  
筑波大学 電子・情報工学系

**Abstract:** 都市は人間の活動の場であり仮想空間上に人間を描写する上でも欠かすことのできない存在である。本稿では、時間変化を伴いながら仮想空間上に都市を生成する手法のうち、都市の仮想道路網を自動生成する手法について述べる。本手法は都市の特徴量の変化による影響を受けながら、Lシステムの規則を確率的に繰り返し適用することで都市道路網の時間変化を再現する手法である。道路網の特徴およびそれに基づくLシステムの規則について述べるとともに、本手法により生成した仮想道路網の例を示す。

## Automatic Generation of Road-networks for Time-varying Virtual Cities

Daisuke Yamauchi Masanobu Honda Kazunori Mizuno Yukio Fukui Seiichi Nishihara  
Institute of Information Sciences and Electronics, Univ. of Tsukuba

**Abstract:** In this paper, we propose our approach for generating a time-varying road-network as one of the generating method for a time-varying virtual city. Our method generates virtual road-networks by repetitive applying L-system that represents developing of roads and effects of features of a city. We introduce characters of roads and our production rules of L-system, and show examples generated by our method.

### 1 はじめに

バーチャルリアリティは、現実の自然物や人工物あるいは現象を実質的に再現することを目的としている。都市は、人工物の集合でありながら有機的自然物とみなすこともでき、かつ時間変化を伴う現象と見ることもできる。仮想都市の生成は3次元ゲームの舞台として、あるいはインターネット上に展開されるデジタルシティ<sup>[1]</sup>として、今後のバーチャルリアリティの重要なテーマとなりつつある。

仮想都市の生成は、実在する都市の再現またはそれに基づく生成と、実在しない都市の創成とに大別できる。前者は、実際の都市の写真や映像、さらにはGISデータを用いる方法がある<sup>[2][3]</sup>。後者については都市工学の分野で、都市計画の景観モデル生成のコンピュータ化などが従来行われてきた。しかし近年、エンターテインメントをはじめ、さまざまな分野で架空または想像上の都市の需要も高まりつつある。近年、現実の都市らしさを持ちつつ諸条件の影響下でオリジナルな都市を生成する技術の開発が試みられている<sup>[4][5]</sup>が、これらは明確な都市モデルを持たないため都市計画等の分野に応用することができ

ない。

このような背景に対し我々は、都市モデルを構築し、都市の時間変化を再現する手法の研究を行っている<sup>[6][7]</sup>。本研究では都市を構成する重要な要素として建物と道路を考え、それらを都市の特徴変化に応じて生成・変更することで都市の時間変化を表現する。本稿ではそのうち、都市構造の骨格をなし各建物に交通を提供する道路網に注目し、都市の変化に伴い時間変化する仮想道路網の生成と、仮想空間上にその景観表示を行う手法について提案する。

### 2 都市について

本手法では、仮想都市モデルを経済的・機能的な活動の視覚的な表現と考え、それに基づいて道路網を生成する。本手法における道路の分類とその特徴について以下に述べる。

#### 2.1 道路の分類

都市には、機能や役割の違いによってさまざまな構造の道路が混在しているが、その機能の面から以下のように分類できる<sup>[8]</sup>。また、道路により囲まれた閉領域をブロックと定義し(図2-1)、都市の変化の

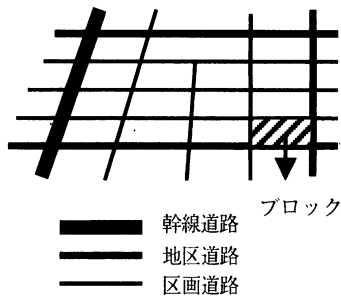


図 2-1 道路網の構成

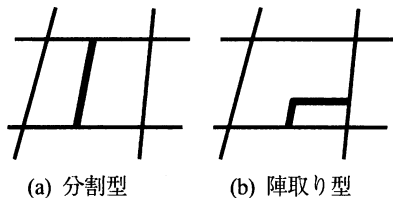


図 2-2 閉領域の形成パターン

最小単位と定める。

幹線道路：都市の骨格を形成する主要な道路

地区道路：幹線道路から分岐し幹線道路を補強するための道路

区画道路：沿道宅地に交通を提供する目的で密に配置される道路

## 2.2 道路網の特徴

道路は都市と都市、都市内の地域と地域など、人々が活動する場所同士を繋ぐものであり、その機能、役割に応じた特徴がある。

### (1) 形状の特徴

幹線道路は遠距離の連絡を目的とし、都市の中心から周辺地域へ向け放射状に伸長する性質を持つ。区画道路は幹線道路、地区道路から分岐し、都市空間を細密な閉領域に分割する。地区道路は幹線道路から分岐し都市内の2地点を連絡する幹線道路のような性質と、都市空間を分割し郊外に交通を提供する区画道路のような性質を兼ね備える。区画道路および地区道路による閉領域の形成には以下の2パターンが見られる。また、区画道路により形成されるブロックの形状には長方形が多く見られる。

陣取り型：周囲を陣取るように新たな閉領域を形成する変化(図 2-2 a)

分割型：道路により構成された閉領域の内部をより小さく分割していく変化(図 2-2 b)

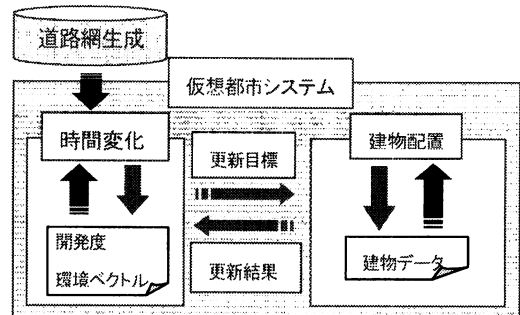


図 2-3 仮想都市システム全体の流れ

### (2) 構造上の特徴

幹線道路、地区道路の交差点間の距離はおおよそ 250m~300m となっている。それに比べ、区画道路の交差点間の距離はおおよそ 20m~100m ほどで、幹線道路、地区道路に比べかなり短い。

### (3) 時間変化の特徴

道路網は都市の発展に伴いその規模を大きくする。道路は、都市内のより開発された地域ほど多くの分岐を生じ、他の開発された地域との連絡や、未開発の地域への交通を提供する。幹線道路、地区道路はバイパス等に見られるように遠方からの影響も受けて敷設されるのに対し、区画道路は局所的な影響のみを受ける。

以上より、都市の道路網は、幹線道路および地区道路と、区画道路のそれぞれが独自の特徴をもちながら発展している。しかし一方で、幹線道路および地区道路は、区画道路とともにブロックを形成し沿道宅地への交通の提供も行うといった区画道路の性質も兼ね備えている。

## 2.3 仮想都市システム

我々は、現実の都市の特徴を持ちながら時間変化する仮想都市の生成システムの開発を行っている。本システムでは、都市をブロックの集合と捉え、ブロック内の特徴が相互に変化することで都市が時間変化するものと定義し、都市の特徴を表す特徴量として以下のパラメータを定めた。

経済指標  $\epsilon$ ：都市全体における経済的な好況・不況の度合い(安定状態で  $\epsilon=1.0$ )

環境ベクトル  $V=(v_1, v_2, v_3, d)$

生活度  $v_1$ : 居住施設の立地に適した度合い  
 消費度  $v_2$ : 商業施設の立地に適した度合い  
 生産度  $v_3$ : 労働施設の立地に適した度合い  
 開発度  $d$ : ブロック面積に対する建物の容積率

また、本研究で目標とするシステムは主に以下の3つのモジュールからなる。また、システムの流れを図2-3に示す。

道路網生成モジュール: Lシステムを用いて、仮想都市の道路網を生成し、更新する

時間変化モジュール: 各ブロックの特徴量をセルオートマトン等を用いて時間変化させる

建物配置モジュール: 各ブロックに、その特徴量に合わせて建物を生成し、配置する

本システムは、現実の都市のデータから導出できる都市道路網形状および特徴量を初期値とし、一定の都市モデルに則りそれらを変化させ景観データを生成することで、都市の時間変化をシミュレートすることを目標としている。そのため本システムは、都市計画および都市景観シミュレーション分野への適用も期待できる。

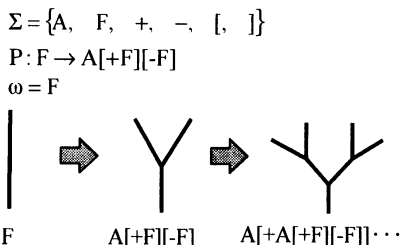


図3-1 Lシステムの例

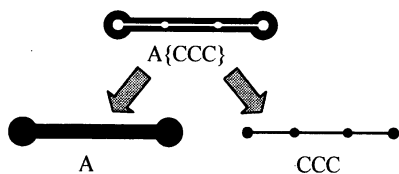


図3-2 オーバーラップLシステム

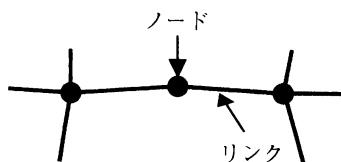


図3-3 道路網構造の表現

### 3 道路網生成システム

道路網生成システムにはLシステム用い、道路網形状を表す文字列を生成し、その後道路データに変換する。

#### 3.1 道路網生成Lシステム

(1) オーバーラップLシステムへの拡張

Lシステムとは、文字列を再帰的に書き換えることにより、複雑な分岐構造を表現できる手法である。Lシステムは記号集合 $\Sigma$ 、書き替え規則集合 $P$ 、初期記号列 $\omega$ から構成され、

$$L = (\Sigma, P, \omega)$$

と表現される。基本的なLシステムの例を図3-1に示す。この例は初期記号列 $F$ に対し、書き替え規則 $P$ を繰り返し適用したものである。分岐構造は、枝の開始を“[”、枝の終了を“]”で表現し、分岐の方向を“+”、“-”で指示している。

本手法ではこのLシステムを階層的に拡張し、既存の構造の一部に、より詳細な構造および性質を持たせることを考える。親となる文字に続けて、“{”、“}”で括られた子の文字列を生成することで、文字列の階層構造を表現する(図3-2)。これをオーバーラップLシステムと呼ぶ。

(2) 道路網のデータ構造

Lシステムで表現された道路網は、1文字に対し基本の長さを持つリンクの集合として表現する。またリンクの端点をノードとする(図3-3)。リンクの基本長は2.2節から以下のように定める。

幹線道路、地区道路: 250~300[m]

ブロックの長辺となる区画道路: 50~100[m]

ブロックの短辺となる区画道路: 20~50[m]

また、各リンクは特徴データとして道路種、道路幅などを持つ。

##### 3.1.1 全体の処理の流れ

本手法では、オーバーラップLシステムを用いて道路のリンクデータ、ノードデータを生成し、それを基に道路の景観を生成する。この処理の流れを図3-4に示す。

##### 3.1.2 Lシステムによる定式化

本手法では、2節で述べている道路種の特徴の違いから6つに大別してオーバーラップLシステムの

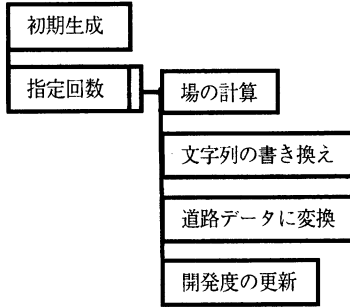


図 3-4 全体の処理の流れ

書き換え規則を定めた(図 3-5)。規則中の文字 A, F は幹線道路, B は地区道路, C, D は区画道路を表し, “+”, “-” は進行方向に対してそれぞれ左, 右に 90 度の回転, “[”, “]” は分岐を, “{”, “}” は道路の二重構造を表す。x は後へ続く文字列の繰り返しを表し, その値は規則適用の際に周囲の道路との位置関係や距離から計算される。また, 道路間の相互作用により力が働く領域として道路の場を導入する。道路の場はノードを中心にして円形に発生しており, 新規に構成される道路は既存の道路が発生する場から影響を受ける。文字の先端が場の範囲内にあるときを n, ないときを  $\bar{n}$  とする。

すでに分岐規則が適用されているリンクについては, 道路の分岐状態を調べ, 同方向への分岐規則の適用を避ける。

### 3.1.3 適用確率

2.2 節で述べたように, 道路網は都市の発展状況より影響を受ける。本手法ではブロックの開発度  $d$  を用いてこの影響を表す。ブロックの周囲への影響を表す発展の場を図 3-6 のように定め, その強さ  $T$  を変数として, 書き換え規則の適用確率を決定する。

$$b_n = \begin{cases} k_n & (n=1, \dots, 3) \\ \alpha_n \times T + k_n & (n=4, \dots, 25) \end{cases}$$

ここで,  $\alpha_n, k_n$  は定数である。T はある地点における発展の場の強さであり, 地区番号を  $i$  として以下の式で計算する。

$$T = \begin{cases} \max d_i \left( 1 - \left( \frac{r_i}{r_{\max}} \right)^2 \right) & (p_1 \sim p_{17} \text{ の場合}) \\ \max d_i & (p_{18} \sim p_{25} \text{ の場合}) \end{cases}$$

ここで  $r_i$  はブロック  $i$  からの距離,  $r_{\max}$  は影響を受

識別子: 前置の文字列: 条件 → 後置の文字列: 確率

(a) 幹線道路の直進・分岐ルール

$$\begin{aligned} p_1 : F : \bar{n} &\rightarrow AF : b_1 \\ p_2 : F : n &\rightarrow AF : b_2 \\ p_3 : F : n &\rightarrow AA : b_3 \\ p_4 : A : &\rightarrow A[+F][-F] : b_4 \\ p_5 : A : &\rightarrow A[+F] : b_5 \\ p_6 : A : &\rightarrow A[-F] : b_6 \end{aligned}$$

(b) 幹線・地区道路の分割ルール

$$\begin{aligned} p_7 : A : &\rightarrow A[+xB] : b_7 \\ p_8 : A : &\rightarrow A[-xB] : b_8 \\ p_9 : B : &\rightarrow B[+xB][-xB] : b_9 \\ p_{10} : B : &\rightarrow B[+xB] : b_{10} \\ p_{11} : B : &\rightarrow B[-xB] : b_{11} \end{aligned}$$

(c) 幹線・地区道路の陣取りルール

$$\begin{aligned} p_{12} : A : &\rightarrow A[x(+B)] : b_{12} \\ p_{13} : A : &\rightarrow A[x(-B)] : b_{13} \\ p_{14} : B : &\rightarrow B[x(+B)] : b_{14} \\ p_{15} : B : &\rightarrow B[x(-B)] : b_{15} \end{aligned}$$

(d) 幹線・地区道路の細分化ルール

$$\begin{aligned} p_{16} : A : &\rightarrow A\{xC\} : b_{16} \\ p_{17} : B : &\rightarrow B\{xC\} : b_{17} \end{aligned}$$

(e) 区画道路の分割ルール

$$\begin{aligned} p_{18} : C : &\rightarrow C[x(+D+C+D)] : b_{18} \\ p_{19} : C : &\rightarrow C[x(-D-C-D)] : b_{19} \\ p_{20} : D : &\rightarrow D[x(+C+D+C)] : b_{20} \\ p_{21} : D : &\rightarrow D[x(-C-D-C)] : b_{21} \end{aligned}$$

(f) 区画道路の陣取りルール

$$\begin{aligned} p_{22} : C : &\rightarrow C[+xD] : b_{22} \\ p_{23} : C : &\rightarrow C[-xD] : b_{23} \\ p_{24} : D : &\rightarrow D[+xC] : b_{24} \\ p_{25} : D : &\rightarrow D[-xC] : b_{25} \end{aligned}$$

図 3-5 道路網生成 L システムの規則

ける最大の距離を表す。上式のように T は周囲のブロックから発生する場の強さの中で最大の値とする。

## 3.2 道路網の景観生成

L システムによる 1 回の書き換えが行われた後, 新規に生成されたリンクについてその立体道路形状を生成し, 都市道路網の景観を生成する。景観生成

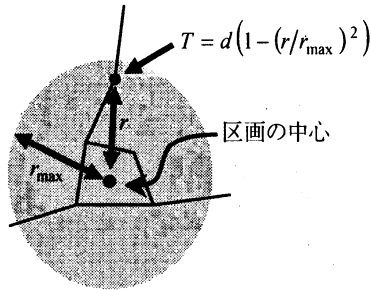


図 3-6 発展の場

のために、ノードおよびリンクの特徴データに応じて車線、歩道、交差点、信号機などのオブジェクトを配置する。

### 3.2.1 交差点領域の生成

はじめに各ノードについて、ノードを中心とする交差点の路面形状を以下の手順に従って生成する。

- 1) ノードに接続している全てのリンクの左右両側について、リンクより道路幅の半分離れたリンクの平行線を求める。この2本の直線を道路の外線と定義する(図 3-7 a)。
- 2) ノードに接続している全てのリンクについて、リンクの右側の外線と反時計回りに隣り合うリンクの左側の外線との交点を求める(図 3-7 b)。
- 3) ノードに接続している全てのリンクについて、2つの外線上にある交点のうち適切なものを選び、その交点を始点とし、もう一方の外線に向かって垂線を下ろす。
- 4) 3)で得た全ての垂線について、垂線を一辺とする長方形の領域を交差点の外側となる位置に生成する。
- 5) 以上の手順により、図 3-7 c に示すような交差点の路面形状を表す領域が得られる。この領域を交差点領域と定義する。

### 3.2.2 歩道領域の生成

ノードに接続しているリンクが歩道を持つ場合、交差点領域上に歩道を生成するための領域を生成する。前節で求めたリンクの外線を利用し、交差点領域の内側に歩道の幅に従って領域を生成する(図 3-7 d)。この領域を歩道領域と定義する。

### 3.2.3 交差点の立体形状の生成

ノードに接続している各リンクが持つ特徴データ

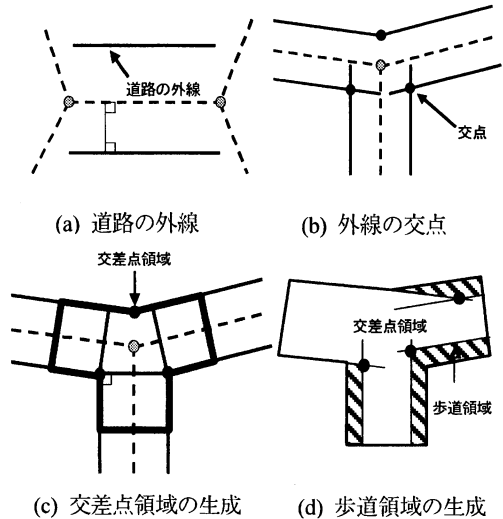


図 3-7 道路景観の生成過程

より、道路種と車線数に応じた優先度  $p_i$  を求める。接続している各リンクに対し  $p_i$  に応じて信号機、停止線、横断歩道の有無を決定し、交差点領域内にそれらの形状を生成する。ノードに  $p_i$  がある閾値  $th_p$  より大きいリンクが3本以上接続している場合は各リンクに信号機、停止線、横断歩道を生成する。2本である場合は、その2本のリンクを優先道路とし、他のリンクに停止線、横断歩道を生成する。また、歩道領域を立体化して歩道を生成し、横断歩道の有無等に応じて歩道の形状を整形する。

### 3.2.4 道路の立体形状の生成

最後に、ノードに接続している全てのリンクについて、ノードの位置からリンク中点まで道路の立体形状を生成する。ただし、交差点領域と重複する部分については除外する。中央線および歩道は各リンクの特徴データに応じて生成する。

## 4 実行結果

図 4-1 は本手法を用いて生成した道路網の、40 ステップごとの変化である。ブロックを一つ置いた状態を初期値とし、生成範囲を1キロメートル四方、1ステップを1年とした。ブロックの開発度は、ブロックを形成した時に閑静な住宅街となるよう与え ( $d=1.0$ )、毎ステップ増加するようにした。実行例よ

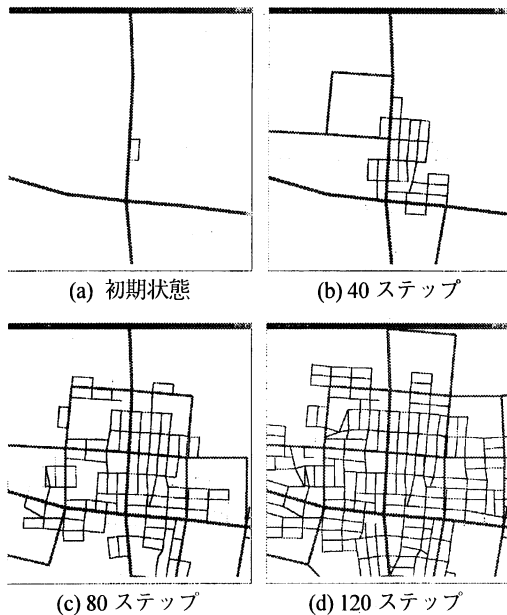


図4-1 生成道路網の変化

り、40 ステップの生成範囲の中央にブロックの密集地帯が発生し(図4-1b)、80、120 ステップと進むにつれて、生成範囲中央からその周囲へと道路網が広がっていることが分かる。また、図4-1b左上のように地区道路が郊外へ伸長すると、80、120 ステップの同地点では、さらに区画道路が分岐し周囲が開発される。以上より、本手法では時間の経過に伴う道路網の増加や、各道路種の働きを表現できているのが分かる。

また、本手法を用いて道路網の景観を生成した。図4-2は自動車からの視点を想定し、幹線道路同士の交差点付近の景観を示したものである。片側2車線の幹線道路を対象としたため、画面奥に中央分離帯が生成されている。また画面中央には横断歩道や信号機も生成されている。以上より、道路の特徴に合わせて、道路の立体形状が生成されていることが確認できる。

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、従来のLシステムを拡張し仮想都市道路網の生成手法を構築した。実行例より、本手法を用いて都市道路網の時間変化を表現できると考えら

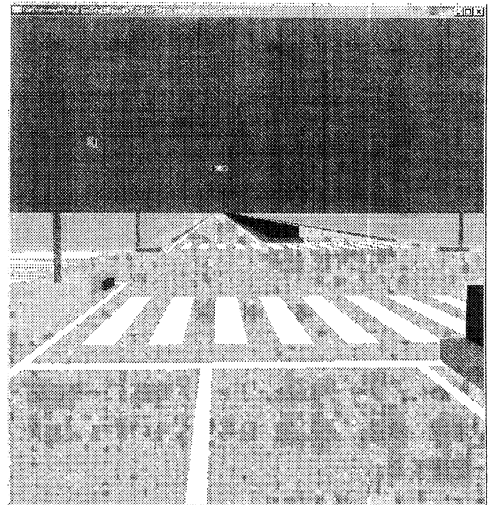


図4-2 道路網の景観

れる。しかしながら、Lシステムの規則の適用確率については経験的に与えたため、実際の道路網の変化を調査し調整する必要がある。

今後は、本手法により生成した仮想道路網上に、建物配置手法を用いてさまざまな建物を配置し、都市の時間変化を表現していきたい。また、立体交差や踏み切りなど、道路同士の干渉や道路以外のものの影響による3次元的な構造も取り入れ、より現実的で現代的な仮想都市を表現していきたい。

## 参考文献

- [1] 石田亨: デジタルシティの現状, 情報処理, Vol.41, No.2, pp.163-168(2000).
- [2] 池内, 坂内, 川崎, 高橋, 村尾, 佐藤, 甲斐: 全方位画像による仮想都市空間の生成, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.SIG13, pp.49-58(2001).
- [3] 村田雅彦: 3次元地図の製作と利用技術, 日本VR学会研究報告, Vol.8, No.4, pp.25-31(2003).
- [4] 加藤, 岡野, 狩野, 西原: 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).
- [5] I.H.Parish Y. and Muller P.: Procedural Modeling of Cities, SIGGRAPH2001, pp.301-307(2001).
- [6] 初田, 本田, 加藤, 福井, 西原: Lシステムを用いた都市道路網の自動生成, 情報処理学会第61回全国大会, 3V-06 (2001).
- [7] 本田, 水野, 福井, 西原: 時間変化を伴う仮想都市生成のための建物の形状生成と配置, 第19回NICOGRAPH論文コンテスト, pp.129-134(2003).
- [8] 都市計画教育研究会: 都市計画教科書第2版, 朝国社(1996).