

基礎論文

地形を考慮したLシステムに基づく仮想都市のための道路網の生成

本田 真望*¹ 加藤 伸子*² 福井 幸男*¹ 西原 清一*¹

L-system-based Generation of Road Networks for Virtual Cities.

Masanobu Honda*¹, Nobuko Kato*², Yukio Fukui*¹, Seiichi Nishihara*¹

Abstract - Virtual cities are emerging into the cyber space and other virtual environments such as web sites and computer games. Virtual cities are usually made from camera images or 3D data of real cities; however, it may be interesting to create completely new type of cities in the computer. We started a virtual-city project with road networks generated by using L-system. In this paper, we propose a method to generate road networks taking geographical environments into account as a factor that affects the geometrical and topological shape of road networks. The method makes use of an L-system modified so that each production rule may be applied referring to the geographical environments and depending its probability. We actually produced new road networks to compare with real ones.

Keywords : virtual cities, L-system, geography, road networks

1. はじめに

バーチャルリアリティは、現実の自然や人工物あるいは現象を実質的に再現することを目的の一つとしている。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、かつ時間的変化を伴う現象とみなすこともできる。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田として、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り、これらは仮想都市のウォークスルーを、ノンバーバルインターフェースを用いたVR技術を応用して達成しようとするものである。

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、地図データや3次元CADデータ、さらには実際の都市の写真や映像を用いる方法などがある^{[2][3]}。

後者については都市工学の分野で、都市の計画モデルの模型作成やコンピュータ化などが従来行われてきたが、VRの分野での試みは多くはない。しかし劇場用映画の例をはじめ、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^{[4][5]}。都市の道路網形状は、人工と自然の両面を具有した性格を持ち、また時間とともに変化してゆく現象と見ることもでき、そのための有効なアプローチとしてLシステムによるモデリングが提案されている^[6]。

本論文では、都市が配置される環境として地形を考慮

し、地形図より仮想道路網を生成する手法を提案する。また2章で道路の分類とLシステムによる生成の基本方針をまとめる。3章ではLシステムの拡張および生成記号列から道路網への解釈変換法を提案する。4章では実在の地形に本手法を適用し、得られた道路網を実在の道路網と比較し、アンケートおよび客観的指標による評価を行う。

2. 道路網とその生成法の方針

2.1 道路網の特徴

2.1.1 道路の分類

道路網は人や物を運ぶという基本的な都市活動を支える物流機構であり、かつ視覚的にも都市そのものの骨格を形成する基盤構造である。道路は機能の上から、次のように区分される^[7]。

- ・幹線道路：都市全体に網状に配置され、車線数2以上の幅員の比較的高水準の規格を備えた道路
- ・区画道路：沿道宅地へのアクセスなどを目的とし、より密に配置される比較的低公共性の低い道路

この中で、幹線道路は都市の骨格をなし、都市の形状に大きく影響する。そこで本論文では幹線道路網を対象とした生成法について述べる。

2.1.2 都市の道路パターン

幹線道路網の幾何形状に注目すると、幹線道路は分岐形状として十字、ト字、T字などの多様な分岐パターン^[8]をとり、全体として自己相似的な形状になっている^[9]。また地形に着目した場合、傾斜の緩やかな平地に道路が多いだけではなく、道路網には地形に特有の道路形状があり、主に海岸線に沿う道、山を迂回する道、谷に入り込む道といったものが見られる。

*1 筑波大学 電子・情報工学系

*2 筑波技術短期大学 電子情報学系

*1 Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba.

*2 Tsukuba College of Technology.

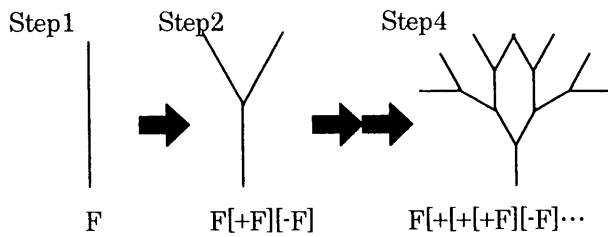


図1 樹木形状生成の例

2.2 Lシステム

Lシステムとは書き換え規則を繰り返し適用することで文字列を並列かつ再帰的に書き換える機構である^[10]。文字列はLOGOスタイルのタートルを用いたり、文字に対応した図形に置き換えたりすることで描画できる。また、規則は文字列の一部が次ステップでどう変化するかを記述したものであるため、自己相似図形を表現できる。図1は初期記号列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、Fは一定長の辺、+,-は左右方向への回転、[,]は分岐構造を示している。

2.3 生成法の基本方針

本システムはLシステムの拡張により、2.1.2節で挙げた自己相似的かつ地形に特有の道路形状を表現するものであり、文献[6]を基礎に基本方針を定めた。

- (1) 地形をセルごとに収められた標高データで入力し、8方向の値に近似した勾配ベクトルに変換する
- (2) 道路の分岐構造をLシステムの規則により表現し、勾配ベクトルを基に地形に合った規則を適用する。

本手法の処理の流れを図2に示す。以下で勾配ベクトルの計算方法とLシステムへの定式化について説明する。

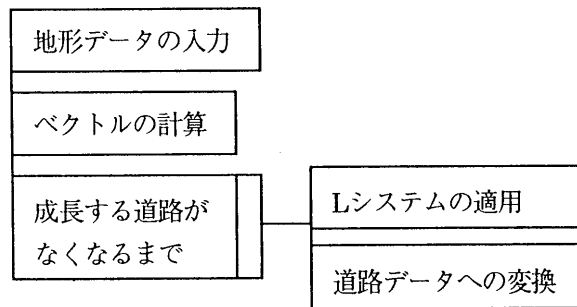
3. Lシステムに基づく道路網の作成

3.1 勾配ベクトルデータの生成方法

3.1.1 デジタル標高データからの生成

本手法では、地形を特徴付けるものとして傾斜に注目し、地形データとしてデジタル化された標高データを用いることにした。このデータは、地形図の有限範囲を格子状に区切り、区切られたセル毎にその中心点の標高値を記録した形式となっている。今回用いた国土地理院数値地図50mメッシュでは、縮尺1/25000の地形図中の10km四方に対応する領域を200×200セルに区切っている。

道路網の生成領域に対して標高データが入力されると、生成領域を入力データと同じ大きさ、個数のセルに区切る。そして近傍セル間の勾配を基に、入力データをセル毎に8方向の値に近似した勾配ベクトル \vec{v}_i ($i=0, \dots, 7$) (図



※処理は上から下へと流れる。□はループを示す。

図2 全体の処理の流れ

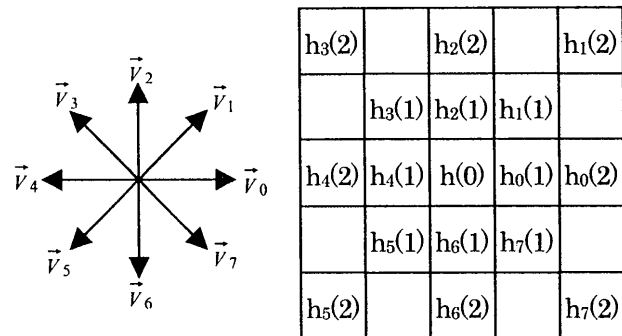


図3 参照するセルと方向

3左)に変換する。勾配ベクトル \vec{v}_i の長さはその方向への道路の伸びやすさを表し、Lシステムで道路網の分岐形状を決定するために用いる。本手法では、地形データが格子状に配置されていることに合わせ、勾配ベクトルを8方向の値に近似している。これは、山や谷の変化が連続的で、8方向の視線方向の標本化で十分近似できるからである。

3.1.2 勾配ベクトルの8方向近似

ここでは、生成領域上の全てのセルについて勾配ベクトルを生成する方法について詳細に述べる。地形データから勾配ベクトル \vec{v}_i ($i=0, \dots, 7$)に変換するには、まず注目しているセルから、8方向の近傍セルまでの傾斜 S_i ($i=0, \dots, 7$)を計算し、その大小によって海や崖などの地形を判断する。傾斜 S_i が大きい崖や道路ができない海の場合は、 $|\vec{v}_i|=0$ とし、その方向には進入不可とする。逆に傾斜 S_i が小さい平地の場合は、 $|\vec{v}_i|=1$ とし、その方向に対して道路が伸びやすくなる。傾斜 S_i がその間の値である場合、傾斜が緩やかなほど道路が伸びやすいように $|\vec{v}_i|$ の値を線形に決定する。式で示すと、閾値MAX, MINを用いて次式のようなになる。

$$|\vec{v}_i| = \begin{cases} 1 & (S_i \leq MIN) \\ 0 & (S_i \geq MAX) \\ 1 - \frac{S_i - MIN}{MAX - MIN} & (otherwise) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、注目しているセルからの距離をjセルとし、

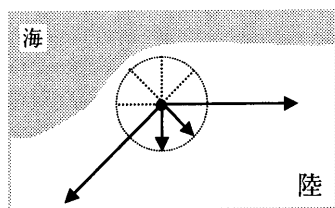


図4 地形沿いの勾配ベクトルの強調

傾斜 S_i は次式で計算する。

$$S_i = \max_{1 \leq j} \left\{ \frac{|h(0) - h_i(j)|}{j \times D} \right\} \quad (i = 0, \dots, 7) \quad (2)$$

ただし $j < j_{max}$ とし、 j_{max} は傾斜を参照する範囲とする。

3.1.3 地形に沿う場合の勾配ベクトル計算

(1)式で求めた勾配ベクトル \vec{v}_i は8方向に対して大きさが異なる変換しか行っていないため、前述の地形に沿うような道路形状を表現するためには勾配ベクトル \vec{v}_i に道路を地形に沿わせる意図を盛り込む必要がある。そこで、(1)式で得られた各セルの勾配ベクトル $\vec{v}_i (i=0, \dots, 7)$ のそれぞれについて、 $|\vec{v}_{i-1}| = 0$ または $|\vec{v}_{i+1}| = 0$ である勾配ベクトル \vec{v}_i を地形に沿うベクトルと考え、その大きさ $|\vec{v}_i|$ を定数倍して道路の伸びやすさを強調する(図4)。

3.2 Lシステムによる定式化

地形に特有の道路形状を再現するため、前述の勾配ベクトルを基に適用確率を計算し、規則の適用が左右されるようにLシステムを拡張した。実際に定式化したLシステムの規則を以下に示す。

記号集合	$\Sigma = \{A, F, +, -, [,]\}$
規則集合	$P = \{p_1, \dots, p_{10}\}$
初期記号列	$\omega = "[+F][-F]"$
$p_1:$	$F: \bar{n} \rightarrow AF \quad :B_1 \quad (\text{直進})$
$p_2:$	$F: \bar{n} \rightarrow A[+F][-F]F \quad :B_2 \quad (\text{十字分岐})$
$p_3:$	$F: \bar{n} \rightarrow A[+F]F \quad :B_3 \quad (\text{左T字分岐})$
$p_4:$	$F: \bar{n} \rightarrow A[-F]F \quad :B_4 \quad (\text{右T字分岐})$
$p_5:$	$F: \bar{n} \rightarrow A[+F][-F] \quad :B_5 \quad (\text{T字分岐})$
$p_6:$	$F: \bar{n} \rightarrow A+ \quad :B_6 \quad (\text{左折})$
$p_7:$	$F: \bar{n} \rightarrow A- \quad :B_7 \quad (\text{右折})$
$p_8:$	$F: \bar{n} \rightarrow A \quad :B_8 \quad (\text{行き止まり})$
$p_9:$	$F: \bar{n} \rightarrow AA \quad :B_9 \quad (\text{道路と連結})$
$p_{10}:$	$F: \bar{n} \rightarrow AF \quad :B_{10} \quad (\text{道路と交差})$

ここで、A, Fは一定長のリンクを、+, -は進行方向に対してそれぞれ右, 左回転を、[,]は分岐構造を表現する。F:の後の \bar{n} はリンクFの先端が道路の場合に入っていることを示し、 \bar{n} は入っていないことを示す。道路の場合とは、既存の道路に対して道路が伸びた際、ある距離まで接近するとそれらを連結しようとする力の働く場である。

規則中の B_n はその規則が適用される確率である。地形に合わせて分岐構造を決定するために、適用確率 $B_n (n=1, \dots, 7)$ を次式で計算する。この計算方法としては、平地における規則の適用確率を基本とし、勾配ベクトル \vec{v}_i を基にそれを変動させるアプローチをとった。

$$\begin{aligned} b_1 &= \alpha_1 \times f \\ b_2 &= \begin{cases} 0 & (f \times r \times l = 0) \\ \alpha_2 \times (f + r + l) / 3 & (\text{otherwise}) \end{cases} \\ b_3 &= \begin{cases} 0 & (f \times r = 0) \\ \alpha_3 \times (f + r) / 2 & (\text{otherwise}) \end{cases} \\ b_4 &= \begin{cases} 0 & (f \times l = 0) \\ \alpha_4 \times (f + l) / 2 & (\text{otherwise}) \end{cases} \\ b_5 &= \begin{cases} 0 & (r \times l = 0) \\ \alpha_5 \times (r + l) / 2 & (\text{otherwise}) \end{cases} \\ b_6 &= \alpha_6 \times r \\ b_7 &= \alpha_7 \times l \\ b_8 &= \begin{cases} 1 & (f + r + l = 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \\ B_n &= b_n / \sum_{i=1}^8 b_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここで α_n は文献[6]を参考に設定した確率の基本値で定数であり、 $\alpha_n (n=1, \dots, 7) = \{0.93, 0.03, 0.01, 0.01, 0.01, 0.005, 0.005\}$ となっている。また、変数 $b_1 \sim b_8$ に関しては、対応する規則による分岐方向の全てに対し道路が伸びやすいほど大きな値となるようにした。これを正規化して B_n を得る。また、 f, r, l はそれぞれ前, 右, 左方向への道路の行きやすさで、次式に定めた。

$$\begin{cases} f = \max \{ |\vec{v}_{k \bmod 8}|, |\vec{v}_{(k-1) \bmod 8}|, |\vec{v}_{(k+1) \bmod 8}| \} \\ r = |\vec{v}_{(k-2) \bmod 8}| \\ l = |\vec{v}_{(k+2) \bmod 8}| \end{cases} \quad (4)$$

この時、注目しているリンクFの伸長方向は、x軸を基準として反時計回りに θ とする。 k は次式で計算される。

$$k = \lfloor \theta / (\pi/4) + 0.5 \rfloor \quad (5)$$

以上の計算により、地形に合った分岐構造を導き出すことを実現している。

3.3 文字列の解釈と道路網データへの変換

Lシステムは単に文字列を書き換える機構であり、3.2節により得られるものは記号列であるため、それを解釈して道路網データに変換する。本手法では文字Fを書き換えて新たな文字Fを生成する規則を用いるので、得られた文字Fをリンクとして解釈し、その伸長方向および先端ノードの座標値を決定する。そこでまず、注目しているリンクFの進行方向の単位ベクトル \vec{f}_0 についてそ

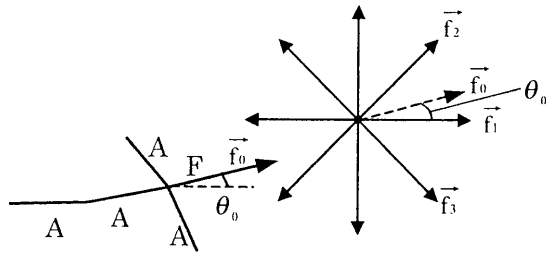


図5 参照するベクトルの決定

の方位角度を θ_0 , 先端座標を (x_n, y_n) とする. この進行方向は書き換え元となったリンクの進行方向を継承し, 先端座標値はそれに応じて決定する.

そして, 変換後の座標 (x_{n+1}, y_{n+1}) を以下のように計算する. まず, ベクトル \vec{f}_0 に対し, 先端 (x_n, y_n) の位置するセルの勾配ベクトル \vec{v}_i ($i=0, \dots, 7$) の中で, 方位角度の近い順に3つのベクトルを選択し \vec{f}_i ($i=1, 2, 3$) とする(図5). 次に, 伸長方向ベクトル \vec{F} を以下の条件によって決定する.

case1. $|\vec{f}_1|, |\vec{f}_2|, |\vec{f}_3| = 1.0$ のとき, 進行方向にランダムな揺らぎ角度 β を与える

case2. $|\vec{f}_1| = 0.0$ のとき, \vec{f}_2, \vec{f}_3 の2つのベクトルから片方を選びそのベクトルにランダムな揺らぎ角度 β を与える

case3. 上記のいずれでもない場合は, 次式で求める.

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^3 W_i \cdot \vec{f}_i \quad (6)$$

ここで β は β_{max} を揺らぎ角の最大として $|\beta| < \beta_{max}$ の範囲の乱数, W_i は \vec{f}_0 と \vec{f}_i とのなす角の \cos 関数である.

以上で得た \vec{F} に伸長距離 d を掛け, (x_n, y_n) に加算する. これにより (x_{n+1}, y_{n+1}) が得られる. ここで, d は1回の書き換えで道路が伸びる距離とする. この処理の結果, Lシステムで直交に道路を分岐するにもかかわらず, 分岐角度が揺らぎ, 新たな道路を少し斜めに生成できる.

4. 評価実験

4.1 実行例

数種の地形図に対し, 本手法を用いて仮想道路網を生成した. その地形図における実在の道路網と並べて, 図6~図8に示す. 地形データとしては前述の国土地理院数値地図50mメッシュを用い, 初期値は地形図上に存在する実際の都市において, 都市の中心であると思われるところに人手で与えた. パラメータとしては, セルの参照範囲 j_{max} は4セル, 考慮する傾斜の範囲 MIN, MAX は, 道路工学の知見に基づきそれぞれ0.05, 0.15とした^[11].

実在の道路網(a)と生成した道路網(b)を比較すると, 図6, 図7においては海岸線に沿う道路, 図7, 図8においては谷道が共通して見られる. 以上の手法で生成した道路



(a)実在の道路網

(b)生成した道路網

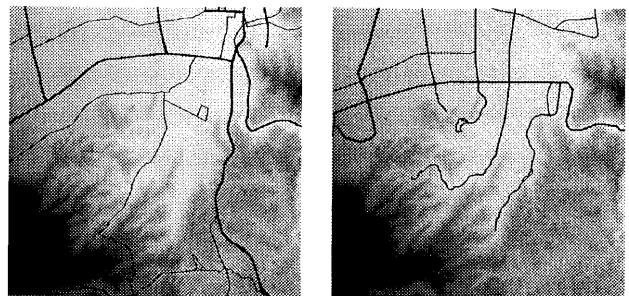
図6 生成例1



(a)実在の道路網

(b)生成した道路網

図7 生成例2



(a)実在の道路網

(b)生成した道路網

図8 生成例3

網形状を実際の道路地図と比較することを考える. このために, 実在の道路網の幾何的および位相的特徴を表現する指標として, 道路工学の分野で用いられている α 指標によって生成道路網を客観評価する. また, 特に地形に注目した道路網形状や, 実際に道路を利用した時の方向感覚にかかわると考えられる道路の接続状況については, アンケートを用いて主観評価する.

4.2 客観的指標による評価

道路網を, 交差点を頂点, 交差点間の道路を辺とする平面グラフとして捉えると, グラフ理論に基づいた指標により, その形状, 特徴を客観的な量として表現することができる^[11]. ここでは代表的な α 指標を用いた. α 指標は閉路充足率と呼ばれ, 対象とするグラフの閉路数と, そのグラフと同数の頂点で作ることができる平面グラフの最大の閉路数との比である. 頂点数を v , 辺数を e とし

たとき、閉路充足率 α は次式で定義される。

$$\alpha = \frac{e-v+1}{2v-5} \quad (7)$$

道路網に適用した場合、 α 指標は都市の道路交通の発展度、利便性および迂回性を示すため、道路網を評価する上で極めて重要である。また、 α が1を超えることはなく、グラフが完全な木の時は $\alpha=0$ 、完全な格子のときは $\alpha=0.5$ となる。実在の道路網ではおよそ0.12~0.30の値を取り、大都市ほどその値は高い傾向にある。

実験にあたっては、多様な都市を生成することを考え、本手法の制御パラメータとして、Lシステムによる1回の書き換えで道路が伸びる長さ d を変更した。 $d=n$ の時、道路は常にセルの1辺の長さの n 倍ずつ伸びる。またこの値は、得たい都市を想定してあらかじめ設定しておく。図6~図8で用いた地形図のそれぞれに対し、パラメータ d の値を1~3まで変更して50枚ずつ生成した。得られた各道路網の α 指標値の累積グラフを図9~図11に示す。得られた道路網の全ては互いに違った形状をしているが、これはLシステムによって道路の分岐形状を決定する際に確率を用いているためである。

参考までに実在の道路網では、図6(a)では0.24、図7(a)は0.18、図8(a)は0.16となっており、多様な指標値を取りうる事が分かる。これに対し本手法も、制御パラメータを変更することによって多様な指標値を持つ道路網が生成でき、かつ実在の道路網が取りうる指標値の範囲で道路網が生成できるといえる。

4.3 主観評価

前節において、 α 指標を用いて生成道路網を評価した。この指標はグラフとしての道路形状の評価に優れるが、地形に合った道路網形状であるかに関しては詳細ではない。そこで、その点についてはアンケートによる主観評価を行った。

4.3.1 主観評価の方式

地形に合った道路形状であるかを調査するため、「自然さ」を「道路網に注目したときに、その道路形状、接続状況が実際にありうるか」の度合いと定義し、これについて被験者に回答を求めた。設問の対象を3つの地形図とし、それらに対してそれぞれ実在の道路網と生成した道路網を用意した(図6~図8)。アンケートは対象地形図の地形状況に応じて設問分けされており、

- (1) 海岸付近に注目した場合
- (2) 谷部分に注目した場合

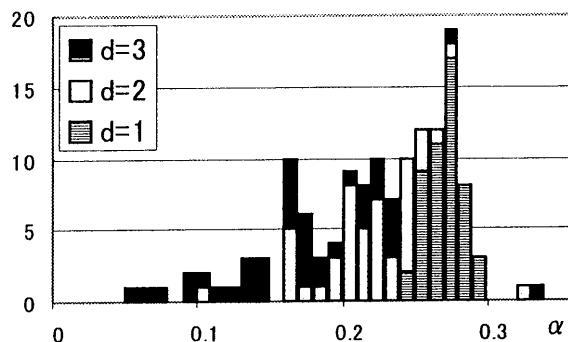


図9 図6の地形図における α 指標の分布

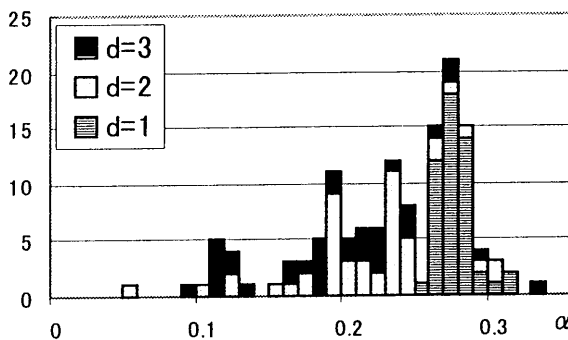


図10 図7の地形図における α 指標の分布

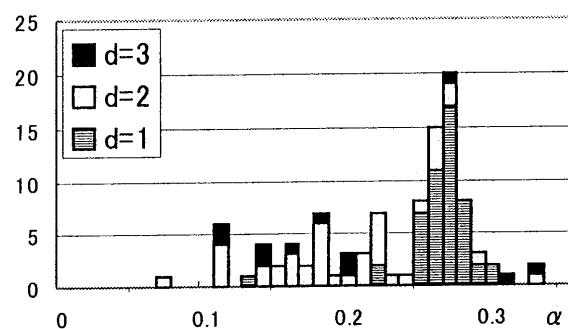


図11 図8の地形図における α 指標の分布

(3) 全体の道路網を見た場合

の3つの状況において、5段階の評定尺度(表1)を用いて道路網の「自然さ」を回答するものとなっている。また各設問において、同一地形図上の実在の道路網と生成道路網は組にしてランダムに配置してあり、被験者には実在の道路網が混在していることは知らせなかった。

4.3.2 主観評価の結果

10代~40代の男女21名を対象にアンケートを行い、その結果から平均評点と標準偏差を求めた。また、実在の道路網および生成道路網の評点間に有意差があれば、両者に大きな形状の差異があるということになるので、それぞれの項目について自由度 $n=20$ 、危険率5%のt検定を行い、有意差があるか調べた。その結果が表2である。

まず注目すべき点として、実在の道路網および生成道路網の両者で、評点の多くが3.0前後で得られていることが挙げられる。これはおそらく、被験者の多くが実在の

道路網に関しての知識を有しておらず、道路網形状の見た目の印象によって評点を付けているからである。道路網に関する知識を与えて評価を行った場合にどのような評点が得られるかについては検証していないが、今回は道路網の特徴的形状の差異を評価の対象としているため、十分だと考えている。

検定の結果、図7、図8を対象とした道路網には有意差があるとは言えない。よってこれらの例では、実在の道路網と生成道路網の両者に特徴の大きな差異はないと考える。しかし、図6の地形図の例では両者の間に有意差が見られた。ここで表2に注目すると、図6の例では海岸付近に注目した場合と全体を見た場合とで、平均評点および標準偏差が近い値を示している。このことから、海岸付近における形状の違いが有意差の原因となったと考えられる。実際に図6の2つの道路網を比較すると、生成道路網(b)では、海岸線に沿う道が図の左下の方まで伸びているが、実在の道路網(a)では海岸線に沿っているが次第に海岸から離れてゆく、といった違いが見られる。しかし、道路地図等で実在の道路網を調べた結果、図6(b)のような道路形状は多く存在していることが分かった。そのような道路網との比較を行った場合は有意差が現れないことが期待できる。

5. おわりに

5.1 結論

本論文では都市の周辺環境として地形を考慮したLシステムによる道路網生成手法を提案し、道路工学に基づく指標値およびアンケートを用いて評価を行った。以上の結果、本手法は実在の道路網の特徴的形状を再現し、地形に合った道路網を生成できるといえる。

5.2 今後の課題

本手法は幹線道路を対象としたものであり、今後は建物を配置するため、区画道路を生成し街割りを決定する手法を開発したい。また現実の都市では、山を越えるにはトンネル、河川を越えるには橋が利用されているので、これらにも対応したい。都市生成の最近の例として文献[13]の手法が開発されているが、我々は本論文の地形を考慮した道路網生成手法を発展させて、都市の要素の配置を決定するだけでなく、都市の発展そのものをシミュレートする手法の開発を目指している。

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)。

表1 主観評価に用いた評定尺度

5	自然だ
4	やや自然だ
3	どちらともいえない
2	やや不自然だ
1	不自然だ

表2 主観評価の結果

図6	海岸付近		全体	
	(a)	(b)	(a)	(b)
平均評点	3.0	3.6	3.0	3.6
標準偏差	1.3	0.8	1.1	0.8
有意差	t(20)=3.33, p<0.05 有り		t(20)=3.61, p<0.05 有り	

図7	海岸付近		谷部分		全体	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
平均評点	3.3	3.3	3.3	3.2	3.0	3.5
標準偏差	1.0	0.9	1.3	1.1	1.0	0.9
有意差	t(20)=0.91 p≥0.05 無し		t(20)=0.34 p≥0.05 無し		t(20)=2.64 p≥0.05 無し	

図8	谷部分		全体	
	(a)	(b)	(a)	(b)
平均評点	2.5	3.1	2.6	3.0
標準偏差	1.3	1.1	0.9	0.9
有意差	t(20)=2.72, p≥0.05 無し		t(20)=1.61, p≥0.05 無し	

- [2] 田村秀行(編)：「複合現実感」特集，日本VR学会論文誌，Vol.4，No.4 (1999)
- [3] 原田裕明：仮想でない仮想都市—ミラーワールド構築を目指して，日本VR学会研究報告，Vol.1，No.1，pp.49-55 (1997)。
- [4] 加藤，奥野，狩野，西原：L-systemを用いた仮想都市のための道路網生成手法，情報処理学会論文誌，Vol.41，No.4，pp.1104-1112 (2000)。
- [5] 加藤，奥野，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)。
- [6] 奥野，岡野，加藤，狩野，西原：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，3S-08 (1998)。
- [7] 新谷洋二：都市交通計画，技報堂出版 (1994)
- [8] 都市デザイン研究体：日本の都市空間，彰国社 (1995)。
- [9] 水野，掛井：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)
- [10] Prusinkiewicz, P. and Lindenmayer, A. : The Algorithmic Beauty of Plants., Springe (1990)
- [11] 奥平耕造：都市工学読本，彰国社 (1976)。
- [12] 本田，加藤，福井，西原：Lシステムによる仮想都市のための道路網の生成と評価，GCADシンポジウム2000，pp.21-26 (2000)
- [13] I.H.Parish Y. and Muller P. : Procedural Modeling of Cities, Computer Graphics (SIGGRAPH 2001), pp.301-307, 2001.

(2001年3月28日受付)