

樹木のCGのための地上部一地下部間の相互作用を考慮した 3 E-5-3 統合的生長モデル

大志田憲 村岡一信 千葉則茂
岩手大学

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) による自然物・現象の表現法に関する研究の中で、樹木のモデリングおよびレンダリング方法に関する研究はとりわけ活発に研究が行われてきた分野の一つである。それは、建設設計画や映画や自然景観のシミュレーションの他にも、樹木のような複雑な形状のCGによる表現法自体の魅力や様々な応用性を持っているためとも思われる。

筆者らも、これまで生長制御機能を考慮した樹木の生長モデルを提案しているが⁴⁾、本報告では、根の生長モデルを提案し、これまでの樹木の“地上部”的生長モデルと連携し互いの相互作用を考慮したモデルを提案する。

根は、植物体の固着と地中からの養水分の吸収を行う器官で、葉や枝の生長に密接な関係を持ち、地中の水分、重力にも反応して生長するものであり、このような地上部（幹や枝や葉）と地下部（根）の相互作用を考慮した樹木の統合的な生長モデルを開発することにより、盆栽、ガーデニング、および庭園設計などをテーマとした、シミュレーション型のアミューズメントシステムや、プレゼン支援システム、および教育支援システムに応用を持つものと考えられる。

これまで、樹木の根の生長シミュレーションに関する研究例としては、Prusinkiewicz⁵⁾らのものと、金山⁶⁾らのものとがある。前者は、水分を考慮し生長するものであり、後者は、乱数と重力で生長するものである。これらは、いずれも地上部と地下部との相互作用を考慮したものではない。

本論文で提案する樹木の地上部および地下部

の相互作用を考慮した生長モデルは、既提案の樹木の地上部の樹木の生長モデルの性質に加え、根の生長モデルに関して、重力屈性、横重力屈性、水分屈性、接触屈性の性質をもちながら、
・地下部の養水分量による地上部の生長抑制、促進
・地上部の受光量による地下部の生長抑制、促進といった地上部一地下間の相互作用を考慮したモデルである。

2. 根の生長モデル

2. 1 根について

根は、植物体の固着と地中からの養水分の吸収を行う器官で、葉や枝の生長に密接な関係を持ち、地中の水分、重力にも反応して生長するものである。

根の先端は根冠 (root cap) という組織を持っており、土壤中のさまざまなストレス、乾燥、土壤粒子との接触や水分方向の検索等根の生長を考える点で非常に重要な部分となっており、水分吸収は、根毛と呼ばれる個所から行われ、伸長体と呼ばれる根冠に近い部分に多く存在することが分かっている。おおまかに双子葉類や、裸子植物は主根型根系 (main root system, tap root system) を主に形成し、单子葉類 (イネ、小麦、トウモロコシなど) は、ひげ根型根系 (fibrous root system) を形成する。根の重要な性質として、以下のようない性質が上げられる⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

・重力屈性

根が重力の方向に伸びることを正常重力屈性 (gravitropism)、茎が反重力方向に伸びることを負の正常重力屈性 (orthogravitropism)、茎や主根にたいして垂直に伸びる地表面に対し

て水平な横重力屈性 (dia gravitropism) が挙げられる。

- ・水分屈性 (向水性)

植物の根が水分の多少を感知する能力を持つ事も伸長方向の制御に関与している。一般に根は水分の正の水分屈性 (hydrotropism) を持っている。

- ・接触屈性 (排他性)

接触屈性 (thigmotropism) は、物体や生物との接触方向を感知して物体側あるいは反対側に湾曲して屈曲生長する現象である。

重力屈性や、水分吸収は、根の先端に根冠とよばれる部分があり、その根冠部分が重力方向を検知し、同時に水分検出を行うことが報告されている。根の先端には、根冠の他に、細胞分裂を繰り返し伸長していく生長点と呼ばれるものがあり、さらに先端部分には根毛と呼ばれる細根 (鬚根や白根) が数週間存在し、これにより、根の先端部分の地中に接する面積を数倍にもし、水分吸収を行う。ただし数週間後には根毛は無くなり、徐々に木化していき、ほとんど水分を吸収できなくなる。

2. 2根の生長モデル

ここで提案する根の生長モデルは、根の形状を形作る上で以下の性質を考慮している。

- ・水分吸収を行うのは根の先端部分が多い。
- ・重力屈性 (重力方向への伸長、また水平方向への伸長) を持つ。
- ・根はそれぞれの種類に応じた属性 (主根、側根等) を持つ。
- ・互いの根を避けて伸長する、接触屈性を行う。
- ・養水分の方向を検知し伸長する。

ここでは、自然な根の分枝パターンが表現出来るよりシンプルな分枝モデルを開発する事を目標とし、生長モデルの簡単のため、根の分枝は単純3分枝モデルとし、その生長モデルは以下の様な生長規則をもつものとする。根の種類

Σ は、

$$\Sigma = \{ \text{主根}, \text{側根}, \text{垂下根}, \text{枝根} \}$$

とし、分枝規則は、

$$\begin{aligned} P = \{ & \text{主根} \rightarrow \text{主根}, \text{側根} \\ & \text{側根} \rightarrow \text{側根}, \text{垂下根}, \text{枝根} \\ & \text{垂下根} \rightarrow \text{垂下根}, \text{枝根} \\ & \text{枝根} \rightarrow \text{枝根} \end{aligned}$$

}

とする。これは、例えば側根は、側根、垂下根および枝根を分枝する可能性があることを意味し (矢印の右辺は分枝出来る根枝の種類の列挙)，必ずしも側根、垂下根、枝根を 1 本ずつ分枝するということではない。また、主根、側根等それに分枝頻度 (分枝確率) を持たせる (図 1 参照)。

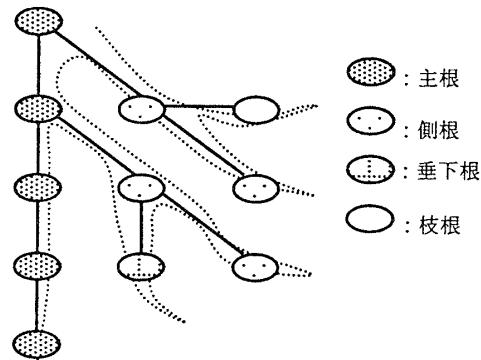


図 1 根の分枝図

分枝のパラメタは主根、側根等にそれぞれに対して別々に与えられて、それぞれの分枝方向を求めるものとする。

根の枝 (以下根枝とする) の伸長方向は、重力屈性、横重力屈性、水分屈性、および接触屈性により、生長 (分枝) 方向の制御を行う。これらの屈性を考慮し、総和することにより根の伸長方向 V の決定を行う。根の生長を制御するものとして、根の生長は根の先端部分である根冠で制御されることから、根の先端に仮想的に知覚範囲球 (先端部を中心とした球) を設けて、その範囲内で環境を感じることとする (図 2 参照)。

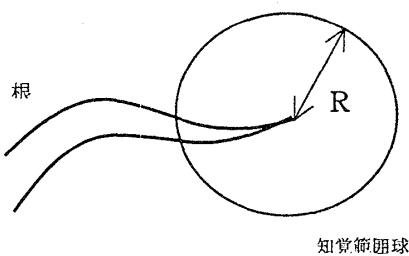


図2 知覚範囲球

これらの各屈性について、根が分枝する初期状態の方向ベクトル（分枝する根の親枝の伸長方向ベクトル）に各屈性のベクトルを重みづけることで実現する。

$$V = \alpha V_n + \beta V_g + \gamma V_d + \delta V_w + \varepsilon V_t$$

ただし、 $\alpha + \beta + \gamma + \delta + \varepsilon = 1.0$ とする。

α ：伸長方向性係数、 β ：重力屈性係数、 γ ：横重力屈性係数、 δ ：水分屈性係数、 ε ：接触屈性係数であり、 V_n ：伸長方向（初期状態）ベクトル、 V_g ：重力方向ベクトル、 V_d ：横重力方向ベクトル、 V_w ：水分方向ベクトル、および V_t ：非接触方向ベクトルであり、それぞれのベクトルは単位ベクトルとする。それぞれのベクトルの意味は以下のようである。

伸長方向ベクトル V_n ：

親枝の伸長方向ベクトルを、分枝する根の種類に応じた分枝角の範囲だけ任意の方向に回転させたベクトルとする。

重力方向ベクトル V_g ：

重力方向のベクトルとする。

横重力方向ベクトル V_d ：

分枝する根枝の方向を、重力方向に対して直角方向に回転したものとする。つまり、分枝した根に対してその伸長方向ベクトルをそのベクトルを含む垂直な面上で水平面に平行になる様に、回転させたベクトルとなる。

水分方向ベクトル V_w ：

地中のボクセル空間を用意し、ボクセル空間へ水分を格納する。これはボクセル中の水分の値はボクセルの各頂点に水分量が格納されているものとする。以下のステップで水分方向の

ベクトルを計算する。

Step1：根の先端から知覚範囲内に探査ベクトル（ランダム方向）を出す。

Step2：探査ベクトル点での水分量を計算する。ボクセル空間での各頂点の水分量をもとに線形補間を行い算出する。

Step3：探査ベクトルを単位ベクトル化し、そのベクトルに水分量を重みづける。

Step4：1から3を指定回数だけ繰り返す。

Step5：すべてのベクトルを総和し、水分がより多くある方向（ベクトル方向）を検知する。

非接触方向ベクトル V_t ：

物体や生物との接触方向を感じて反対側に湾曲して屈曲生長する現象である。この屈性も同様に、知覚範囲球を用い非接触方向（排他方向）を計算する。

Step1：根の先端に対する知覚範囲球内に存在する他の根の位置を検知する。

Step2：範囲球内に存在する他の根の方向のベクトルを総和する。

Step3：総和されたベクトルの逆ベクトルを排他方向のベクトルとする。

上記の屈性を用いて、分枝する根枝の伸長方向を決定する。（図3参照）

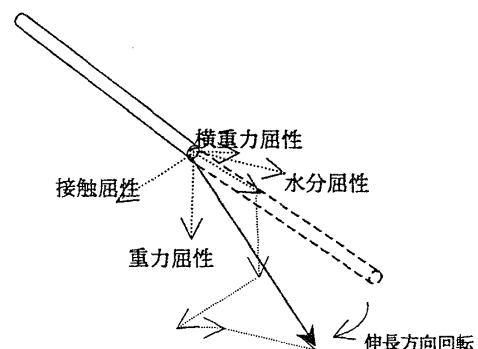


図3 根枝の分枝方向の決定

2. 2根の生長シミュレーション例

本節では、根の各性質の効果に関するシミュレーション例を示す。

(1) 水分屈性

図4は水分屈性のシミュレーション例で、根のモデルを上面から見たものである。図の側根についてのみ係数値を変化させたもので、左から右へ養水分屈性係数値 0.0, 0.3, および 0.6 の場合である。根が存在するボクセル空間（地中）は左から養水分濃度が 1.0 から右端で 0.0 まで、線形に減衰している空間である。水分屈性を考慮することにより水分が多く存在する方向へ伸長していくのが確認できる。

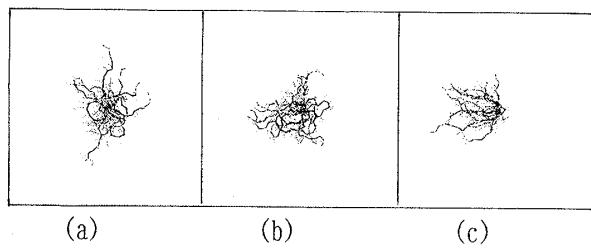


図4 水分屈性

(2)重力屈性

図5は重力屈性のシミュレーション例である。15世代（15回分枝する）まで生長シミュレーションを行ったものであり、側面から見たものである。図の根形を主に形作る部分（側根）について、重力屈性係数値が大きいほど、重力方向へと分枝していくのが確認できる。

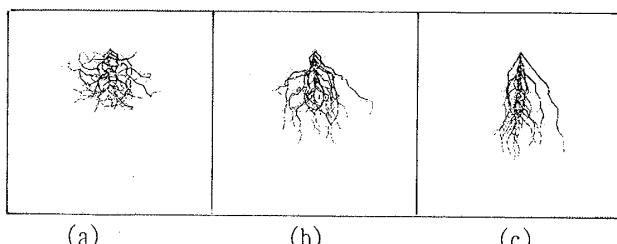


図5 重力屈性

(3)接触屈性

図6は接触屈性のシミュレーション例で、根のモデルを上面から見たものである。図の側根についてのみ係数値を変化させたもので、左から右へ接触屈性係数値 0.0, 0.3, および 0.6 の場合である。接触屈性値を上げることにより、他の枝と離れる方向へ根が広がって伸長しているのが確認できる。

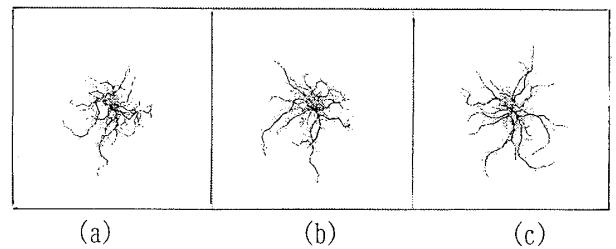


図6 接触屈性

3. 既開発の樹木の生長モデル

これまでに提案した樹木の生長モデルは、自然な樹木の形状の表現に効果的な性質として以下の特性を取り入れたものである⁴⁾。

- ・生長枝の向日性
- ・受光量不足による枝の枯死
- ・頂芽優性（側性枝の生長制御）

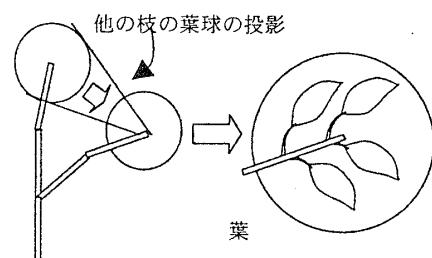
休眠芽の休眠打破と枝の幹化

- ・反重力屈性

これらの性質は、架空の植物ホルモンの存在を仮定し、樹木の生長枝がそれぞれに独立にホルモンの変化に応じて行動（発芽や生長）するという生長モデルにより実現されている。これは、分枝した枝に架空のホルモン濃度値を与え、隣接するすべての節間（枝）に平衡状態へと向かう様に平衡計算を行うものである。このホルモン濃度に応じて生長度合いを変化させる。以下簡単にこれらの性質を説明する。

- ・葉の受光量不足による枝の枯枝

受光量のしきい値（枯枝しきい値）と比較



することにより枝の枯枝、生存を決定している。

図7 受光量の計算

受光量計算は、生長枝の先端の葉群を球で近似し、その葉球を中心とした天球をスクリーンと

して他の葉球を投影することにより、求める。

・生長枝の向日性

樹木が光のある方向へと生長して行く性質であり、これは、受光量の大小に応じて、受光方向へ向うベクトルを大きく作用させることにより実現している。

・屈地性

反重力方向に生長しようとする性質であり、幹等の生長の勢いのある枝ほど強く現れるものである。分枝方向を重力方向に回転する事により実現している。

・頂芽優性、休眠打破、枝の幹化

頂芽優性とは、勢いのある枝が、他の枝の生長を抑制する性質である。休眠打破と枝の幹化はこの抑制が幹の切除などにより、解除されることにより生じる現象である。休眠打破は、幹などが剪定された場合に切り口の周りから新しい枝が多数発生するような事を意味する。これは、平衡状態に保たれている状態の節間の濃度が急激に変化した場合におこる。枝の幹化は、側生枝として存在していた枝が幹化することである。これは、ホルモン濃度がある一定値以上になった場合に幹化したと考えられる。

4. 地上部の生長モデルと根の生長モデルの相互作用モデル

樹木は地上部と地下部が密接な関係を持ちながら生長するものである。根で吸収された水や窒素は地上部の葉で光合成や蒸散のために利用される。つまり、葉が必要とする窒素や水を根から十分に吸収することが出来れば、生長が十分に行われることを意味する。しかし、根から地上部への水や窒素、または葉から生成された炭素の供給は構造的な要因だけでは理解されていない部分が多くあることもあげられている⁹⁾¹⁰⁾。

ここでは、水や窒素を樹木の生長に必要な養水分として同一なものとして考える。本モ

ルでは、地上部（樹木の生長モデル）で葉の受光量計算を行い、受光量に応じた養水分吸収が可能かどうかを根に問い合わせることにより、地上部、地下部の互いの分枝頻度（伸長しやすさ、抑制および促進）に影響を及ぼすものとしてモデル化を行う。地下部と地上部は、導管および師管によって養水分の伝搬を行っている。本モデルでは、これらの管を仮想パス（通路）として上下間の養水分の移動を行うものとする。

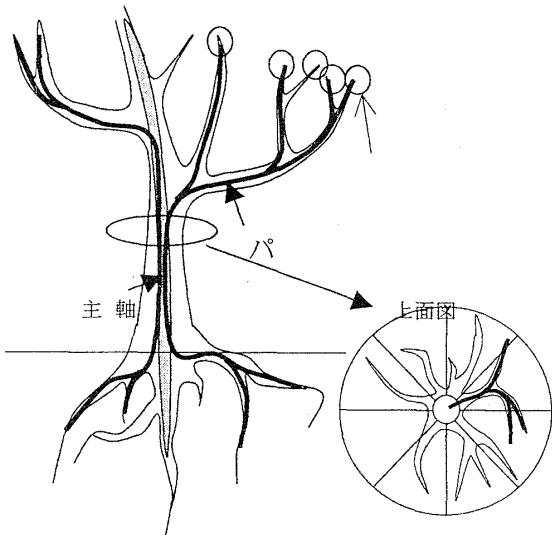


図8 地上部-地下部間パス

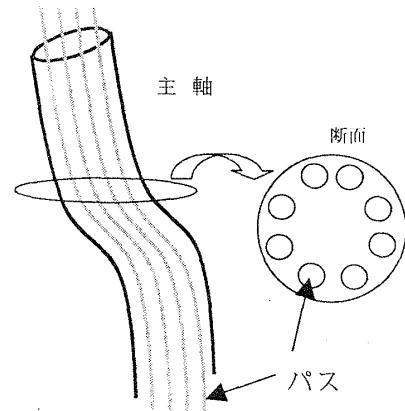


図9 パス

本モデルは、地上部と地下部間の養水分を伝搬する導管的役割を行う仮想パスを用いることにより、相互作用を考慮したモデルを提案する。地上部および地下部はそれぞれ主軸となる幹および、主根を本シミュレーションでは45度づつ分割し8本のパスによって養水分の伝搬

を行うものとする。(図9参照)

地上部でのパスの決定は、以下の様に行う。

- Step1 各先端枝すべてを根元の枝までたどって行き、各ルートのホルモン濃度の平均が一番高いルートを（一番生長の勢いが高い）を主軸幹とする。(図10(a)参照)
- Step2 主軸幹以外の各先端枝は先端から主軸幹まで根元方向へたどって行き、主軸にぶつかる部分の角度に応じて利用するパスを決定する。(図10(b)参照)

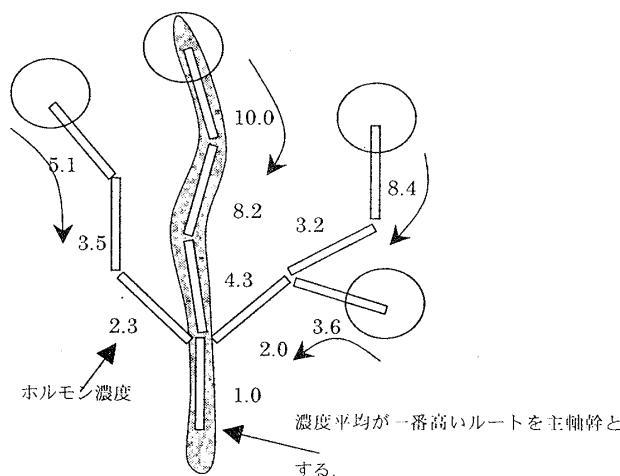


図10(a) パス決定 Step1

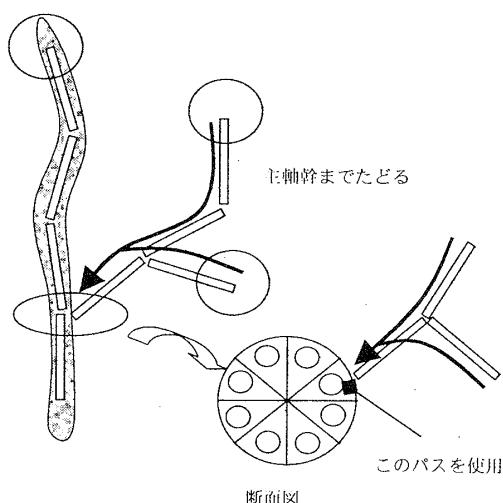


図10(b) パス決定 Step2

地下部のパスは地上部同様に各根の先端を主根までたどって行き主根に対して接続している

角度に応じて利用するパスを決定する。

これは、主根に対して側根や枝根がどの方向に接続するかによってどのパスを使って養水分を移動させるかを決定し、地上部では主軸幹に接続する位置でどのパスを使用して養水分を吸収するか意味する。

そしてそれぞれのパス上の上下間（地上部と地下部）の相互作用による生長制御（抑制および促進）を行うものとする。

統合的生長モデルでの生長シミュレーションは、以下のようなである。

- Step1 : それぞれのパス ($n=1..8$) における地上部での受光量 LP_n を計算する。

$$LP_n = \rho \sum L_i$$

ここで、 ρ は係数、 L_i は葉球 i での受光量で、 $\sum L_i$ はパス n に存在するすべての葉球についての和を表す。

- Step2 : それぞれのパスにおける地下部での養水分吸収可能量 WP_n を計算する。

$$WP_n = \tau \sum W_j$$

ここで、 τ は係数、 W_j は根枝 j の養水分吸収可能量で、 $\sum W_j$ はパス n に存在するすべての根についての和を表す。

- Step3 : パス n における地上部の分枝頻度 $Branch_n$ (生長制御) の計算

パスによる地上部の分枝頻度 $Branch_n$ を求める。これは、受光量に応じて十分な地下部からの養水分が吸収できるのであれば分枝しやすい（促進）ということを意味し、養水分量が確保出来なければ抑制されることを意味する。

$$Branch_n = \alpha_b \left(\frac{WP_n}{LP_n} - 1 \right)$$

ただし、 α_b はパス分枝頻度の範囲係数とす

る。ただし、 $WP_n/LP_n \geq 2$ ならば、 $WP_n/LP_n = 2$ とする。この範囲係数は、分枝制御の頻度範囲を定めるためのものである。

Step4 : パス n における地下部の分枝頻度 $Root_n$ (生長制御) の計算

パスによる地下部の分枝頻度 $Root_n$ を求め。これは地上部に対して十分な養水分確保できれば、根は伸長する必要がなく（抑制）され、養水分が確保できなければ、根枝を伸ばし養水分を確保しやすくするということを意味する)

$$Root_n = \alpha_r \left(\frac{LP_n}{WP_n} - 1 \right)$$

ただし、 α_r は、パス分枝頻度の範囲係数とする。ただし、 $LP_n/WP_n \geq 2$ ならば、 $LP_n/WP_n = 2$ とする。この範囲係数は、分枝制御の頻度範囲を定めるためのものである。

Step5 : 地上部の分枝を行う。

枝 a の分枝：枝 a 自体の分枝頻度 + $Branch_n$ で分枝決定をする。

Step6 : 地下部の分枝を行う。

根枝 b の分枝：根枝 b 自体の分枝頻度 + $Root_n$ で分枝決定をする。

Step7 : 指定世代まで 1 ~ 7 を繰り返す。

このそれぞれのパスを通して上下間での養水分の伝搬を行う手法を用いる事により、盆栽のように、根を部分的に刈り込むことにより、地上部の生長を抑制させることも可能となる。

6. 統合的生長モデルによる生長シミュレーション例

図 11 は本アルゴリズムを用いて生長シミュレーションを 20 世代行ったものである。図 12 は、地上部の空間の明るさ、すなわち地上部の天空光の強さを変化させた例である。左から一番右の天空光の強さに 0.5, 0.7 倍したものである。左および中央の図では、受光量が少ないた

めに枝がほとんど枯死することから、必要となる養水分が少なく根は分枝する必要がなく、根の分枝が抑制された状態となっている。図 13(b) は、地下部のボクセル空間の養水分量を(a) 図の状態 0.5 に対して 1.0 にしたものです。すなわち(a) 図の地下部は養水分が少ない土壤、(b) 図の土壤は養水分が非常に豊富な状態と考えることが出来る。(b) 図では少ない根でも地上部で十分に必要な養水分を吸収することでできることから根の分枝が抑制され、地上部では受光量に十分な養水分を吸収出来ることから、次々と分枝をくり返していくことができる。図 14 は、パスの影響をあらわしたものである。(a) 図は生長過程において地下部である根の右側のパスの根を常に強制的に刈り込みをおこなった場合の例である。右半分のパスを常に刈り込むことにより、樹木の右側のパスでの養水分の吸収が出来なくなるために地上部の右側のパスの部分の生長が抑えられた樹形となる。図 15 は図 14 の地上部のパスを色分けしたものである。図 16 は、根を含む樹木のレンダリング例である。

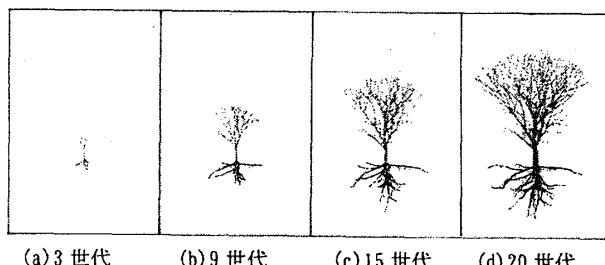


図 11 生長シミュレーション例

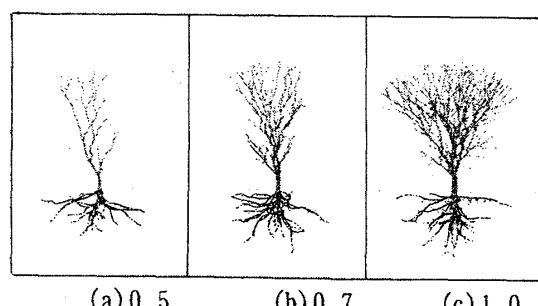


図 12 天空光の強さを変化させた場合

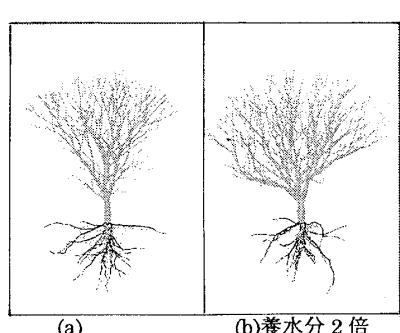


図 13 地中養水分を変えた場合

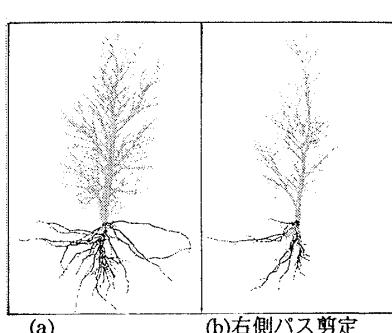


図 14 バスの剪定を行ったもの

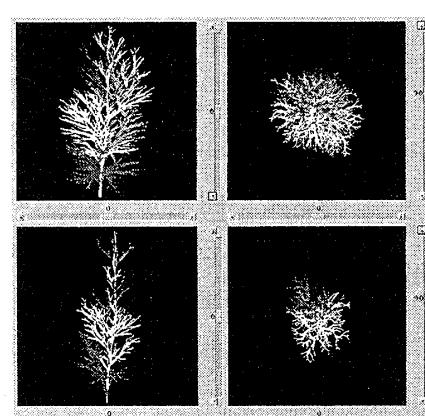


図 15 図 14 の地上部のバスを色分けしたもの



図 13 レンダリング例

7.まとめ

本報告では、根の生長モデルと、既開発の地上部の生長モデルとの相互作用を考慮した樹木の統合的生長モデルを提案した。実際の根の特性である重力屈性、水分屈性、および接触屈性を取り入れ、より表現力のある根の生長シミュレーションを可能とし、これまでの樹木の生長シミュレーション（地上部のみ）に仮想バスを用いて地上部－地下部の相互作用を実現し、土壤の養水分や光の量により互いに影響を及ぼす生長シミュレーションを可能とした。

今後の課題として、土壤の硬さに応じた伸長影響、盆栽のような鉢植えや街路樹の場合のコンクリートなどの障害物に対する回避伸長があげられる。さらに、樹木を群で植えた場合のシミュレーションの検証することも課題となる。

[参考文献]

- Computer Graphics, Proc. of SIGGRAPH94, pp.351-358(1993).
- 2) M.Aono and T.L.Kunii, Botanical Tree Image Generation, IEEE CG&A, Vol.4, No.5, 10-34(1984).
 - 3) 安居院猛, 福田智美, 中島正之, 景観表示のための樹木の生成手法, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.5, pp.618-625(1991)..
 - 4) N.Chiba,S.Ohkawa,K.Muraoka and M.Miura, Visual Simulation of Botanical Trees Based on Virtual Heliotropism and Dormancy Break, The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol.5, No.1, pp.3-15(1994).
 - 5) R.Mech,P.Prusinkiewicz, Visual Models of Plants Interacting with Their Environment, Computer Graphics, Proc SIGGRAPH96, pp.397-410(1996).
 - 6) 金山知俊, 増山繁, 植物根形の生長シミュレーション, 情報処理学会全国大会, 4-168(1998).
 - 7) 佐藤大七郎, 堤利夫, “樹木－形態と機能－”, 1957.
 - 8) 高橋英一, “「根」物語”, 研成社, 1994.
 - 9) 山内章, “植物根形の理想型”, 博友社, 1996.
 - 10) 根の事典編集委員, “根の事典”, 胡翁書店, 1998.

1) P.Prusinkiewicz, M.James, and R.Mech, Synthetic Topiary,