

# 空気力学を考慮した樹木の揺らぎアニメーション法

村岡一信\*, 菊池 淳\*\*, 藤本忠博\*\*, 千葉則茂\*\*

\*東北工業大学, \*\*岩手大学

## Animation Method of Swaying Trees Taking into Account Aerodynamics

Kazunobu Muraoka\*, Tadashi Kikuchi\*\*, Tadahiro Fujimoto\*\*, Norishige Chiba\*\*

\*Tohoku Institute of Technology, \*\*Iwate University

\*muraoka@tohtech.ac.jp, \*\*{fujimoto,nchiba}@cis.iwate-u.ac.jp

### アブストラクト

樹木の風による揺らぎのリアルタイムアニメーション法として, 著者らは  $1/f^\beta$  ノイズを葉の動きに, スプリングモデルを枝の動きに用いる手法を提案している. この手法では, 葉については自然な印象を受ける動きが表現されているが, 枝についてはスプリングモデルのため風下にしなるだけの単純な運動しか表現されない. 実際の枝は風下へしなるだけでなく, 垂直方向への動きも伴っている. 本論文では, 自然な印象を受ける枝の動作を表現するため, 枝の運動に空気力学を適用したシミュレーション法を提案する. また, シミュレーション例によりその効果を示す.

### Abstract

We previously proposed the real-time animation method for producing the trees swaying in the wind fields. This method used  $1/f^\beta$  noise to create the motion of the leaves, and applied the spring model to the branches. By using this method, we succeeded in generating natural motion of the leaves. However, the branches bend downwind simply because of the spring model. Actual branches not only bend downwind, but also flap in the perpendicular direction of the wind. In this paper, we propose a simulation method based on the aerodynamics for animating the natural motion of branches flapping in the wind field. Moreover, we show the effects of this method by demonstrating the examples of the simulation.

## 1. はじめに

風による樹木の揺らぎの表現は, 景観シミュレーションや仮想現実感等のリアリティを向上させるための要素として有用である.

これまでの樹木の揺らぎの CG 表現に関する研究としては, 枝の動きのみを考慮したもの[1-6]と, 葉の動きをも考慮したもの[7-9]とがある. 風に揺れる樹木のリアルな表現には, 葉の動きは視覚的印象にとって大変重要である. 葉の動きを考慮しリアルタイム動作が可能な手法として, Diener ら[7]はモーダル解析に基づく手法と GPU を用いて大規模な森林景観における風の影響を考慮した手法を提案しているが, 葉の動きは枝に追従するのみで, 風に吹かれて葉が細かく揺れる動きは表現されていない. Habel ら[8]は, 周波数応答をベースとした手法を提

案し, リアルな葉の動きも表現されているが, 葉の動きと枝の動きの相互作用については考慮されていない. 筆者ら[9]は枝の動きをスプリングモデルで, 葉の動きを  $1/f^\beta$  ノイズで表現する効率的なノイズベースアニメーション法を提案している. この手法では葉の動作は葉柄に対して上下, 左右, 回転の運動が生成されているが, 枝の動作は風下方向に単にしなるような運動しか生成されない. また, 他の研究と同様に, 葉の動きと枝の動きとの相互作用は考慮されていない.

図1は風に吹かれて揺れ動いている実際の樹木を撮影したビデオから抽出した画像である. 風は右から左に向かって吹いているが, 中央の赤の曲線で囲った枝は風下(左側)へしなるだけでなく, 風に対して垂直方向へも揺れ動いている. これは先端の枝とそれに付随する枝の集まり(葉群)が風から受ける力の作用によるものと考えられる. また, 枝先の揺れは枝全体に

伝搬し、その親枝の揺れにも影響を与えている。

本論文では先端の枝とその先に付随する葉群に作用する力を求め、その力を樹木全体に伝播させることにより揺れを表現する手法を提案する[11]。



(a) 枝が上方に浮いている



(b) 枝が下方に沈んでいる

図 1. 風の影響による実際の枝の動き

## 2. 樹木の揺らぎアニメーション法

ここで、本手法のベースである樹木の揺らぎアニメーション法[9]について簡単に説明する。

樹木の形状は幹、枝、葉から成る。樹木の揺れは、葉と枝の動作をそれぞれ別々に生成し、これらの動作を合成することによって表現する。

### 2.1 枝の動作

個々の枝は根元側を固定端、先端側を自由端とする板バネモデルで表す(図 2)。枝は 2 分木構造とし、幹側を親、枝先端側を子とする。また、枝の太さは親枝より子枝の方が細くなるように次式で定める(図 3)。

$$d^a = d_1^a + d_2^a \quad (1)$$

ここで  $d$  は親枝の直径、 $d_1$ 、 $d_2$  は子枝の直径、 $a$  は定数で 2.5 とした。

風による枝への X 軸および Y 軸に沿った負荷は次式で求める。

$$\begin{aligned} P_x(t) &= F_x(t) + P_B N_x(t) \\ P_y(t) &= F_y(t) + P_B N_y(t) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $t$  は時刻、 $F_x(t)$ 、 $F_y(t)$  は風の方向と強さ、 $N_x(t)$ 、 $N_y(t)$  は  $1/f^\beta$  ノイズ関数、 $P_B$  は最大動作角である。

時刻  $t$  における枝の X、Y 軸に沿った移動量は次式で求める。

$$\begin{aligned} \delta_x(t) &= \frac{P_x(t)}{k} \\ \delta_y(t) &= \frac{P_y(t)}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで  $k$  はバネ定数であり枝のしなり難さを表す。 $k$  は次式で与えられる。

$$k = \frac{EbT^3}{4L^3} \quad (4)$$

ここで、 $E$  は弾性係数、 $b$ 、 $T$ 、 $L$  はそれぞれ枝の幅、厚さ、長さを表し、 $b$ 、 $T$  は次式で定める。

$$b = T = r\sqrt{\pi} \quad (5)$$

ここで、 $r$  は枝の半径である。

枝の揺れ角  $\theta_x(t)$ 、 $\theta_y(t)$  は次式で求める (図 4)。

$$\begin{aligned} \theta_x(t) &= \sin^{-1} \frac{\delta_x(t)}{l} \\ \theta_y(t) &= \sin^{-1} \frac{\delta_y(t)}{l} \end{aligned} \quad (6)$$

個々の枝ごとに求めた揺れ角を、図 5 に示すように根から末端の枝に向かって累積することにより、樹木全体の揺れを表現する。

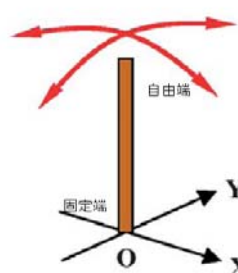


図 2. 個々の枝

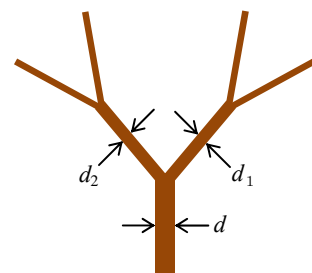


図 3. 2 分木構造

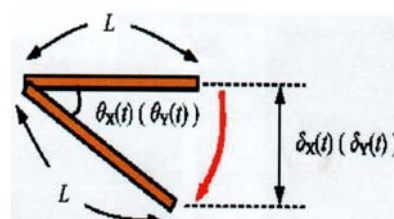


図 4. 枝の揺れ角

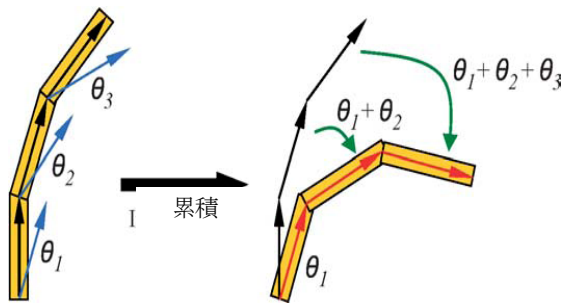


図5. 枝の揺れ角の累積

## 2.2 葉の動作

葉の動作は、それぞれの葉に対して葉柄の根元を原点とし、葉の表面に対して垂直な方向を縦軸 Y、平行な方向を横軸 X とするローカル座標系を考え、このローカル座標系において、葉柄軸の周りの水平運動、垂直運動、回転運動の3つの動作に分類する。この3つの動作それぞれに対して  $1/f^\beta$  ノイズ関数を使用することによって葉の揺れを表現する。それぞれの動作を図6,7に示す。

ローカル座標系において、X, Y 軸方向に  $1/f^\beta$  ノイズ関数を与えることにより、水平方向の動作角  $\theta_x$ 、垂直方向の動作角  $\theta_y$  を次式で求める。

$$\begin{aligned}\theta_x &= N_x(t)W_x \\ \theta_y &= N_y(t)W_y\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、 $W_x, W_y$  は最大動作角である。

葉の回転運動は、自然な葉の動作を表すのに特に重要である。また、実際の葉が風に吹かれると、風の力が葉の表面にあたる時、垂直運動が水平運動よりも大きいという事実が観測される。このため、 $1/f^\beta$  ノイズ関数を用いた回転角  $\theta_{NR}$  と、水平運動から得られる螺旋角  $\theta_{XR}$  の2つから回転角を求める。これらの角度は(8),(9)式で求める。

$$\theta_{NR} = N_R(t)W_R \quad (8)$$

$$\theta_{XR} = a\theta_x \quad (9)$$

ここで  $N_R(t)$  は  $1/f^\beta$  ノイズ関数、 $W_R$  は最大回転角、 $a$  は重み、 $\theta_x$  は水平運動の回転角である。

葉の最終的な回転角  $\theta_R$  は次式で得られる。

$$\theta_R = \theta_{NR} + \theta_{XR} \quad (10)$$

図8に螺旋角を使用した場合と使用していない場合の動作の違いを示す。

## 3. 空気力学を考慮した樹木の揺らぎ

従来法では、枝は風下側にしなる動きが主であり、実際の枝のように、風向に対して垂直方向への動きは表現されていない。枝のこのような動きは、風が葉に当たることによって発生した

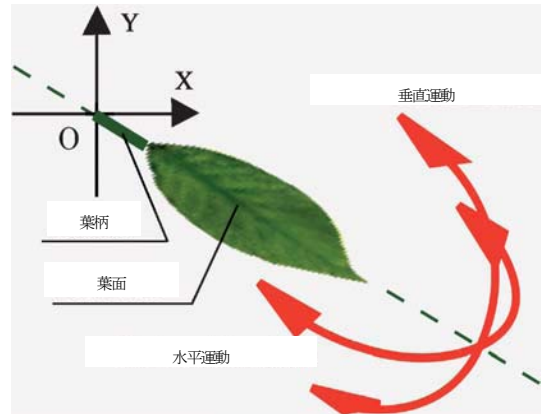


図6. 葉の垂直方向、水平方向の運動

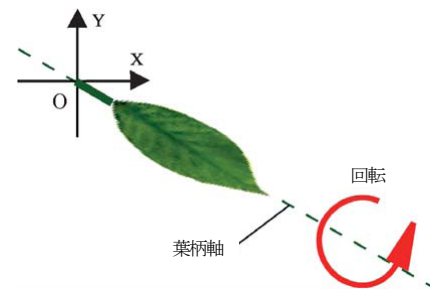


図7. 葉の回転運動

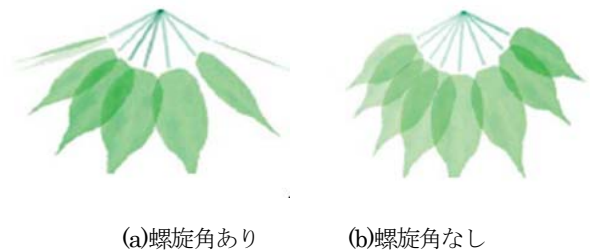


図8. 螺旋角の効果.

力が枝に作用するためであると考えられる。この厳密な計算には個々の葉に作用する力を求め、葉や葉柄のしなりを考慮して力を枝に作用させる必要があろう。しかしながら、計算量が膨大となりリアルタイム動作は不可能である。そこで、本手法では、個々の葉ではなく、先端の枝の葉群を平面で近似し、これに空気力学を適用することでリアルタイム動作を実現する。なお、個々の葉の動作の表現については従来法を用いる。

## 3.1 枝の動作の流れ

枝の揺れの表現の全体的な処理の流れを以下に示す。また、図9に枝に作用する力を決める順序（番号①～③）を示す。

- (1)子を持たない先端の枝が風から受ける力を、空気力学を用いて求める。
- (2)力が確定した子枝を持つ親枝が受ける力を、子枝が受ける力と、親枝が元に戻ろうとする力との合成により求める。

- (3)(2)の計算を、幹となる枝以外の全ての枝に対して行う。  
 (4)枝に作用する力より、個々の枝の揺れ角を独立に求める。  
 (5)幹側の枝から先端の枝に向かって(4)で求めた揺れ角を蓄積させ、各枝の揺れ角を確定させる。

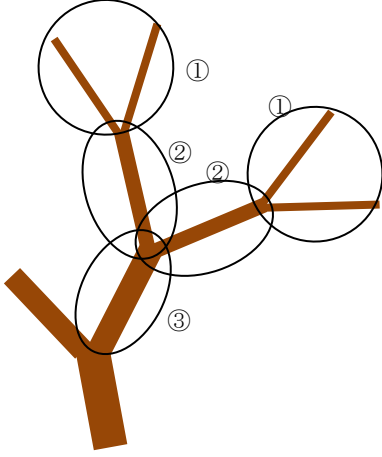


図9. 枝に作用する力を決める順序

### 3.2 先端の枝の動作

ある物体が流体中にある時、その物体は流れに対して垂直方向の力(揚力)と水平方向の力(抗力)の2つの力が作用する(図10)。これは飛行機の飛行の原理[10]と同一であり、本手法ではこれを樹木の枝の揺れに応用する。

本手法では、先端の枝とその先に付随する葉群(図11)を、図12のように1枚の平面で近似する。この平面が受ける揚力、抗力を計算することで先端の枝に作用する空気合力を求める。なお、平面による葉群の近似は枝の動作の計算にのみ用い、葉の表示そのものは従来法を用いている。

平面に作用する揚力 $L$ 、抗力 $D$ は次式で求められる。

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L(\alpha) \quad (11)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D(\alpha)$$

ここで、 $\rho$  は空気密度、 $V$  は風速、 $S$  は平面の表面積、 $C_L(\alpha)$ 、 $C_D(\alpha)$ は空気力学的迎え角 $\alpha$ の関数で表される揚力係数、抗力係数である。本手法で用いた揚力係数、抗力係数のグラフを図13に示す。なお、これは1枚の葉の係数ではなく、葉の集まり(葉群)に対する係数であることに注意されたい。

空気力学的迎え角 $\alpha$ は、風速ベクトルと平面との成す角であり、次式で求める(図14)。

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{W}) \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{N} \cdot \mathbf{W}$ は葉の上面を表す法線ベクトル $\mathbf{N}$ と、風向き方向を表す $\mathbf{W}$ との内積である。なお、揚力方向単位ベクトル $\mathbf{V}_L$ 、抗力方向単位ベクトル $\mathbf{V}_D$ は以下のように定義する。

$$\mathbf{V}_L = \frac{(\mathbf{W} \times \mathbf{N}) \times \mathbf{W}}{\|(\mathbf{W} \times \mathbf{N}) \times \mathbf{W}\|} \quad (13)$$

$$\mathbf{V}_D = \frac{\mathbf{W}}{\|\mathbf{W}\|} \quad (14)$$

ここで $\times$ は外積を表す。

以上より、先端の枝とその先の葉群が受ける空気合力 $\mathbf{F}_I$ は次式で得られる。

$$\mathbf{F}_I = L\mathbf{V}_L + D\mathbf{V}_D \quad (15)$$

上式による力のみでは、枝が制限なく動いてしまうため、初期位置に戻ろうとする復元力をバネで表現する(図15)。枝の先端の座標の初期位置からの移動距離をバネの伸びとし、バネによる力 $\mathbf{F}_2$ は次式で求める。

$$\mathbf{F}_2 = k\mathbf{V}_S \quad (16)$$

ここで、 $k$ は(4)式で求められるバネ定数であり、 $\mathbf{V}_S$ はばねの伸び成分を表すベクトルである。

枝には速度に比例した空気抵抗による減衰力 $\mathbf{F}_3$ が作用するものとし、風向き方向と逆向きに作用させる(図16)。

減衰力は次式で求める。

$$\mathbf{F}_3 = -D_k S_a \mathbf{V}_P \quad (17)$$

ここで、 $D_k$ はダンピング係数、 $S_a$ は平面の移動方向への投影面積、 $\mathbf{V}_P$ は平面の移動速度ベクトルである。

以上より、枝に作用する力 $\mathbf{F}$ は次式で求められる。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_I + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 \quad (18)$$

この力は先端の枝に作用するものであるが、先端以外の枝に作用する力 $\mathbf{F}_P$ は次式で求める(図17)。

$$\mathbf{F}_P = \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_S \quad (19)$$

ここで、 $\mathbf{F}_A$ 、 $\mathbf{F}_B$ は子枝に作用する力、 $\mathbf{F}_S$ は親枝のバネの力である。

各枝に働く力は、その枝の子枝に作用する力が確定次第、式(19)を用いて計算する。これにより先端の枝に作用した力が、順次、根の方向に伝搬されることになる。なお、幹に相当する枝については、この計算は行わない(幹は揺らさないものとする)。

各枝に作用する力が求められたなら、ニュートンの運動方程式によって加速度を求め、枝の先端の移動速度と位置をオイラー法で求める。枝の先端の位置が定まれば個々の枝の揺れ角が定まるので、これを、図5に示した方法で根元側から先端側へ累積させて、全ての枝の揺れ角を確定する。

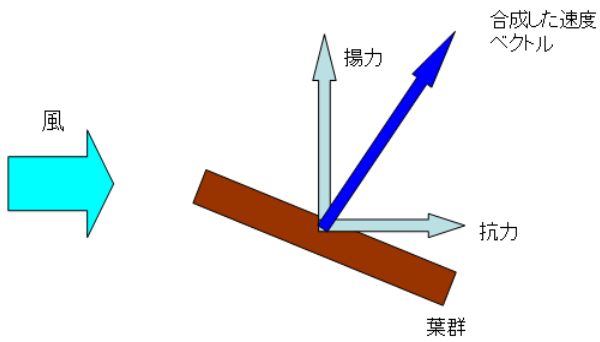


図 10. 葉群に作用する力

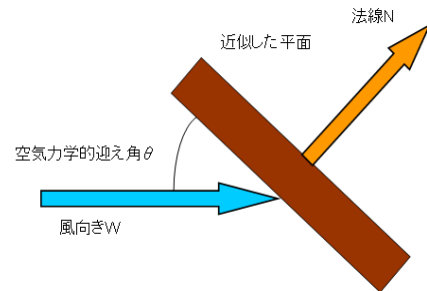


図 14. 空気学的迎え角

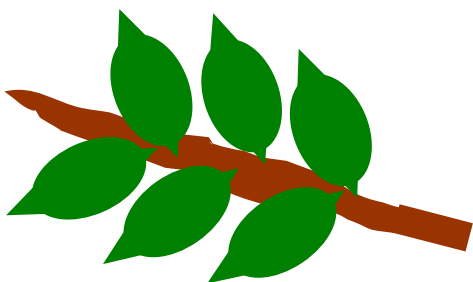


図 11. 先端の枝と葉群

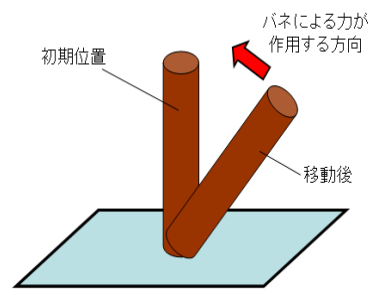


図 15. バネの働き

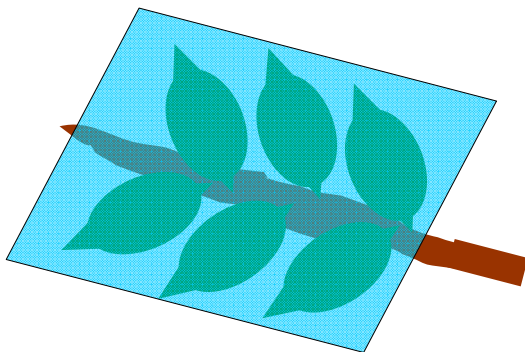


図 12. 枝の動きの計算のための葉群の平面による近似

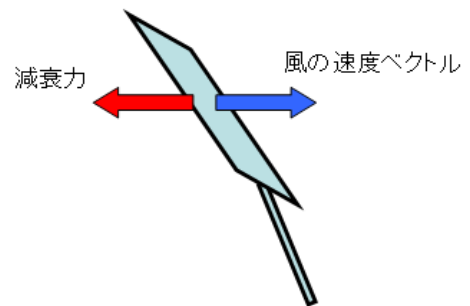


図 16. 減衰力

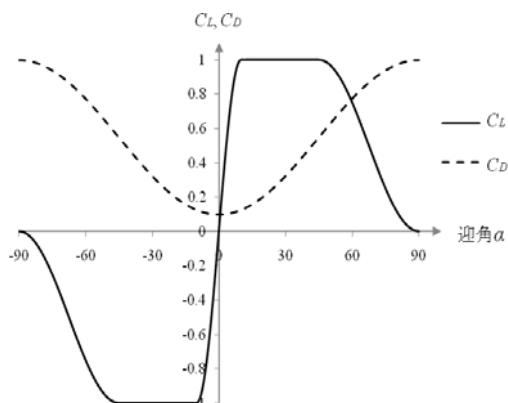


図 13. 揚力および抗力曲線

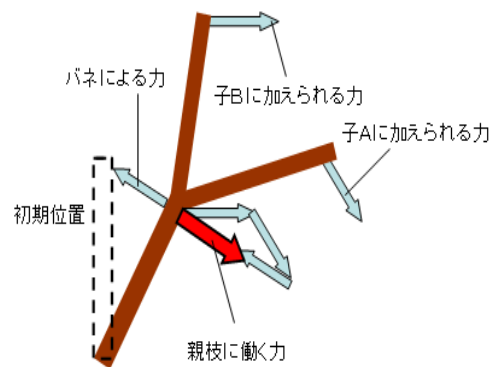


図 17. 親枝に作用する全ての力の構成



## 4. 風の表現

風が樹木の中を通過するとき、元々の風向きとは関係なく乱雑になり、乱流となる。これを物理モデルに基づき忠実に計算することは一般に高コストとなりインプリメントも容易ではない。そのため、本手法では2次元の  $1/f^\beta$  ノイズを3つ用いた、簡易的な風の乱流場を用いることにした。これら3つのノイズは図18に示すように互いに直交させて配置する。図中の青の矢印はノイズの要素を地面に対して平行に循環シフトさせることを表している。これにより乱流の動きを表現する。

空間中のある点  $(x,y,z)$  における乱流の風ベクトルは、 $(A(x,y), B(y,z), C(z,x))$  と定義する (図19)。

なお、3次元  $1/f^\beta$  ノイズでなく2次元  $1/f^\beta$  ノイズを3つ用いたのは、メモリの負荷を軽減するためである。

この他に風向を表す成分を加え、空間中の点  $(x,y,z)$  における風ベクトル  $\mathbf{W}$  を次式で表す。

$$\mathbf{W}(x, y, z) = \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2(x, y, z) \quad (20)$$

ここで、 $\mathbf{W}_1$  は方向性を表す風ベクトルであり、空間中のどの位置でも同じであるとする。 $\mathbf{W}_2$  は  $1/f^\beta$  ノイズを用いた乱流を表す風であり次式で表される。

$$\mathbf{W}_2(x, y, z) = (A(x, y), B(y, z), C(z, x)) \quad (21)$$

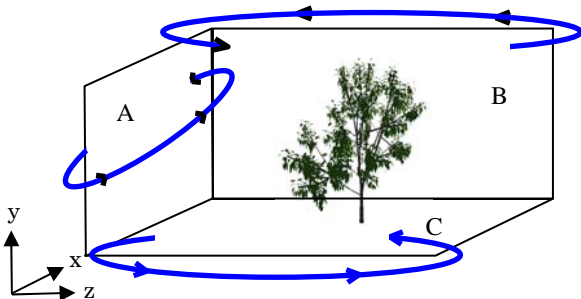


図18. 風の乱流場の表現

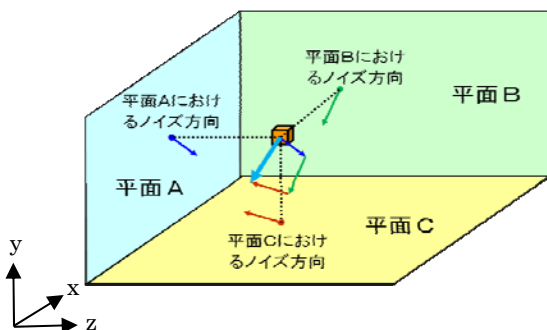


図19. 各地点における風ベクトルの定義

## 5. シミュレーション結果

使用した計算機環境は以下の通りである。

OS: Microsoft Windows XP

CPU: Pentium4 3.40GHz

物理メモリ: 1GB

ビデオカード: RADEON X600 PRO

グラフィックスライブラリ: OpenGL

実験に用いた広葉樹のモデルを図20に示す。(a)は葉が茂った状態、(b)は落葉の状態である。枝の数は1160本、葉を付ける先端の枝は546本、(a)では先端の枝1本当たり30枚の葉を付けている。葉が風から受ける力の計算は、この30枚の葉を1枚の平面で近似して行った。なお、画像左側の青い図形は方向性を示す風  $\mathbf{W}_1$  の向きを表示したものである。

風のシミュレーションは方向性を示す風  $\mathbf{W}_1$  を3.8とし、乱流を表す  $1/f^\beta$  ノイズの最大値を2.2とした。また、 $\beta$  の値は3とした。

図21に風による樹木の揺れのシミュレーションを一定間隔でキャプチャした画像の一部を示す。(a)は葉が茂っている状態、(b)は落葉の状態、(c)は(a)を拡大し、風上方向から見た画像である。動画は添付ファイルを参照されたい。

図21(a), (b)は、左やや奥から右手前に向かって風を吹かせたものである。(a)の動画を観察すると、先端の枝に作用する力がうまく伝播されていることが確認できる。また、従来法では実現されていなかった、風向に対して垂直な方向への枝の動作も確認することができる。図21(c)は、(a)を風上側から見た画像である。左側の赤で囲った枝が上下にやや大きく揺れていることがわかる。また、右側の赤で囲った枝も上下に揺れており、中央上の赤で囲った複数の枝は左右に揺れて、枝と枝との間隔が変化していることがわかる。このように風向に対して垂直な方向の揺れが再現されていることがわかる。

落葉のモデルのシミュレーション(図21(b))の動画の観察では、繁っている場合に比べて揺れが小さく、風向に垂直な方向への枝の動きも見られない。これは、枝に揚力が働かず空気流と接触する面積も少ないためである。従来法では、枝の動きは葉の影響を考慮していないため、枝の動きだけをみれば、落葉した木も繁っている木も同じであった。

本手法により、葉の影響を考慮した枝の動きを再現できることが確認できたが、シミュレーション結果の動画から、隣接する枝同士が互いに逆方向に動いたり、枝と枝が重なってしまうなどの問題もあることがわかった。

## 6. まとめ

本論文では、樹木の揺らぎアニメーション法の枝の動作に、空気力学を適用する手法を提案した。シミュレーション結果より、枝先の葉の影響を受けて風向に対して枝が垂直方向に揺れる動きが表現され、葉が繁っている樹木と枯れ木の動きの違いが表現できることを示した。しかしながら、隣接する枝同士が逆向きに動いたり、重なることがあるなどの問題点も残されている。

今後の課題としては、これらの問題点の解決が挙げられる。また、本研究では枝先の葉群を1枚の平面で近似したが、複数枚で近似した場合の動作のリアリティに対する効果と最適な枚数についての検討が必要である。さらに、より自然な樹木の揺

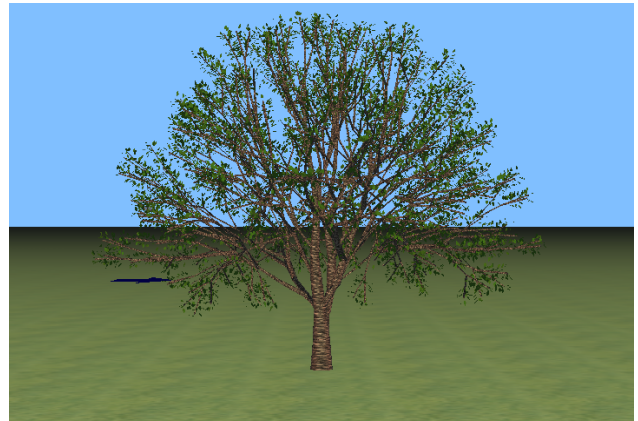
れを表現するために、方向性を示す風への揺らぎの導入や、針葉樹などの異なる樹種の樹木モデルへの本手法の適用、ノイズのみを用いた同様の運動を実現する手法との比較検討などが挙げられる。

## 謝辞

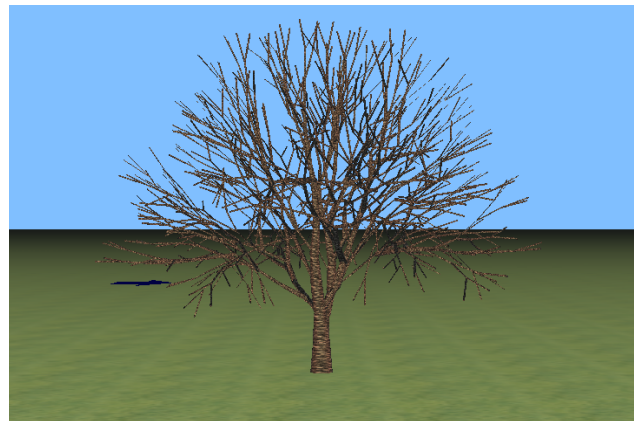
本研究の一部は、財団法人トステム建材産業振興財団研究助成による。

## 参考文献

- [1] Shinya M, Fournier A, Stochastic motion – motion under the influence of wind, EUROGRAPHICS'92, pp.C-119-C-128, 1992
- [2] 千葉, 河野, 佐藤, 村岡, 齊藤, ”風による樹木の揺らぎ画像生成法の検討“, 画像電子学会誌, Vol.22, No.5, pp.475-483, 1993
- [3] 金山, 増山, 樹木の揺れのアニメーション, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.7, pp.1843-1851, 1997
- [4] Stam J, Stochastic dynamics: simulating the effects of turbulence on flexible structures, EUROGRAPHICS'97, pp.159-164, 1997
- [5] Sakaguchi T, Ohya J, Modeling and animation of botanical trees for interactive virtual environments, Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST99), pp.139-146, 1999
- [6] Giacomo TD, Capo S, Faure F, An interactive forest, Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, pp.65-74, 2001
- [7] J. Diener, M. Rodriguez, L. Baboud, L. Reveret, Wind Projection Basis for Real-Time Animation of Trees, Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS 2009), Volume 28, Number 2, 2009
- [8] R. Habel, A. Kustering, M. Wimmer, Physically Guided Animation of Trees, Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS 2009), 28(2):523-532, 2009
- [9] S. Ota, M. Tamura, T. Fujimoto, K. Muraoka, and N. Chiba, "A Hybrid Method for Real-Time Animation of Trees Swaying in Wind Fields", The Visual Computer, Vol.20, No.10, pp.613-623, 2004
- [10] 東 昭, “機械工学選書 航空工学(I) 航空流体力学”, 裳華房, 1989
- [11] 村岡, 菊池, 藤本, 千葉, “空気力学を考慮した樹木の揺らぎアニメーション法”, 第26回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 2010



(a) 葉が茂った状態



(b) 落葉の状態

図 20. 広葉樹のモデル

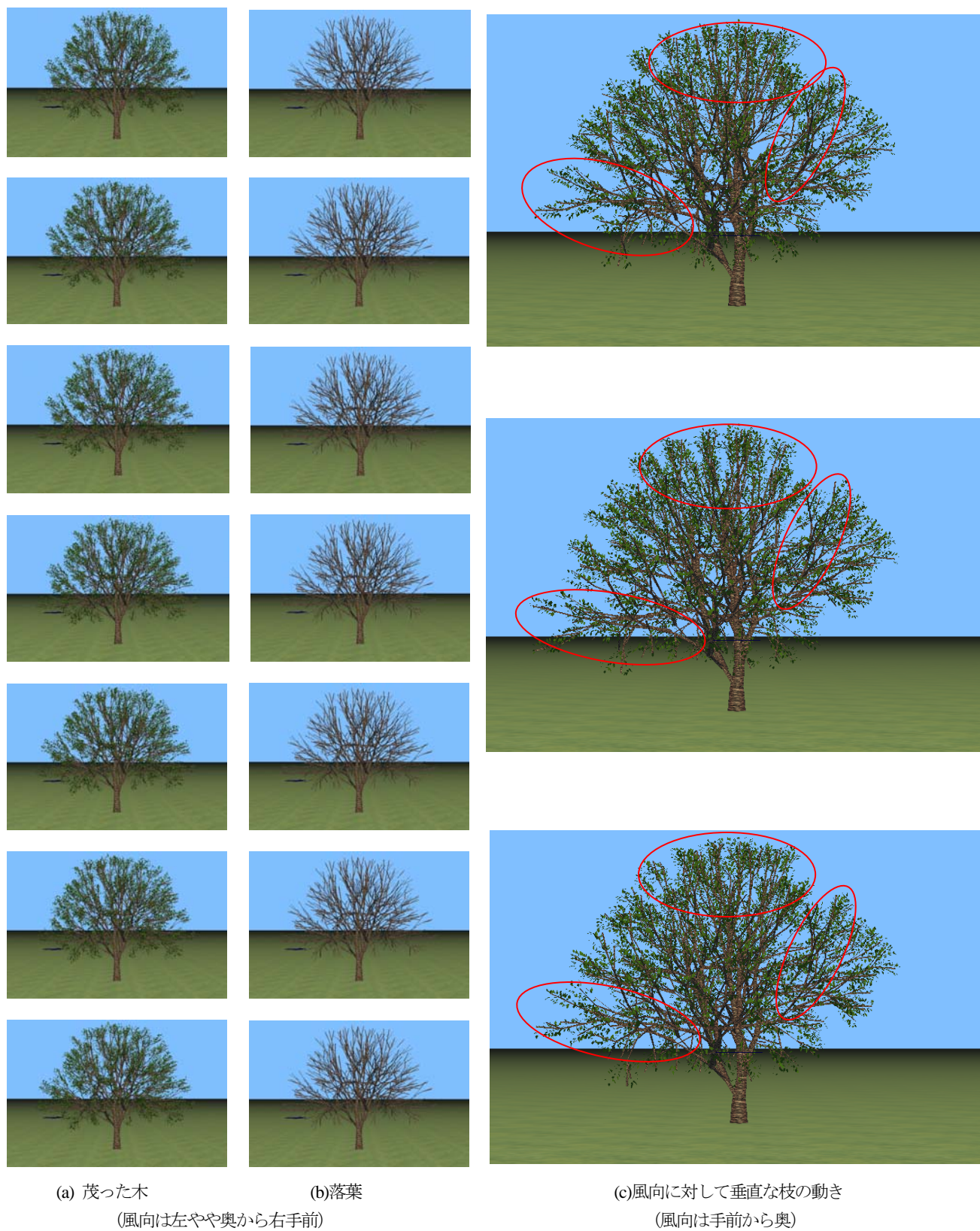


図 21. 風に揺れる樹木のシミュレーション