

揺らぎ現象のノイズベースリアルタイムアニメーションエンジンのコア技術の開発

千葉 則 茂 岩手大学工学部教授

1 研究の目的と背景

筆者は、1985年より、自然物・現象のCGによる表現法に関する技術開発を行ってきた。その間、長い間、流体シミュレーションなど物理シミュレーション技術を中心としたアプローチによる手法開発を行ってきた。また、実用化開発も行ってきたが、計算時間の点でコスト高であるため、開発した景観シミュレーションソフトを普及させることが困難であった。そのため、自然現象のリアルタイムアニメーション技術の重要性を認識し、2003年からノイズの活用について研究を開始してきている。これまでの研究により、枝葉の揺らぎ、穂波、カーテンのなびき、炎の揺らめきなど、風による自然な揺らぎ運動のアニメーションの効率的な生成法として、 $1/f^\beta$ ノイズ（以下、単にノイズという）を活用することが有効であることを示してきた [1-4]。本研究では、これまでの研究成果に基づき汎用的なツールを開発するために、そのコア技術となる、物体のスケルトンである基本的なリンク構造（1次元リンク、2次元リンク（グリッド）、木構造リンク）へのノイズの割り当て技術を開発することを目的とした。

リアリティの高い景観CG映像の生成においては、風による揺らぎ現象の表現が不可欠であり、これまでは主に物理シミュレーション法を中心としたアニメーション法が開発されてきている。しかしながら、風の場の生成を流体シミュレーションで行い、それによる物体の揺らぎ運動を弾性体力学シミュレーションにより生成するというようなアプローチは、計算量の観点で未だ高価であり、多くのアプリケーションをもつリアルタイムCGでの活用は困難である。ゲーム、建造物の建設計画、ランドスケープデザイン、および緑化計画などにおける景観シミュレーションは、現在ではインタラクティブなプレゼン環境で活用されることが多く、リアルタイム景観CG技術が求められている。

本研究は、これまで山岳地形や雲の密度分布など静的な物体の表現に使われることが多かったノイズを、揺らぎ現象の効率的なアニメーション生成へ適用するものであり、ノイズの活用分野を大幅に拡大するという波及効果もある。

2 ノイズベースアニメーションシステム

2-1 利用するノイズ

ここで利用するノイズは、 $1/f^\beta$ ノイズとか fBm (fractional Brownian motion) と呼ばれるものであり、自然界によく見られる揺らぎ（ノイズ）である [5, 6]（図1）。このノイズは、そのパワースペクトルが周波数 f の β 乗に反比例するという特徴付けられるものである。そのため、その生成は、以下のようなフーリエ変換 $F(k)$ を用意し、高速逆フーリエ変換（IFFT）を適用することにより行なえる [6]。

$$F(k) = S_k \cos(2\pi \cdot \text{rand}) + jS_k \sin(2\pi \cdot \text{rand})$$

$$S_k = \frac{W \cdot \text{Nrand}}{k^{\beta/2}}, \quad 0 < k < N/2$$

ここで、 W は調整用係数、 Nrand は正規乱数、 k は周波数、 N はデータ数である。なお、 $F(k) = F^*(N-k)$ （共役関係）となるように定め、ノイズが実数値として得られるようにする。同様に高次元のノイズの生成も可能である [6]。

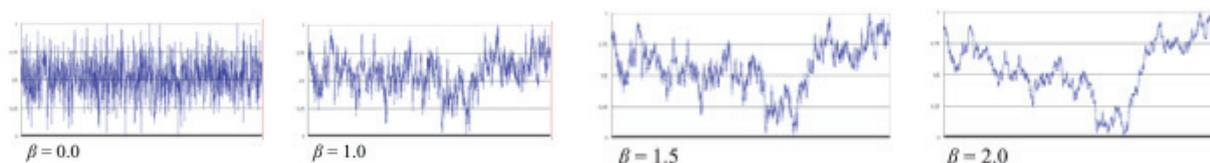


図1 fBm の例

2-2 ノイズベースアニメーションシステムの枠組み

ノイズベースアニメーションシステムの枠組みは図2のようである。以下，“animation loop”の各機能について説明を行う。

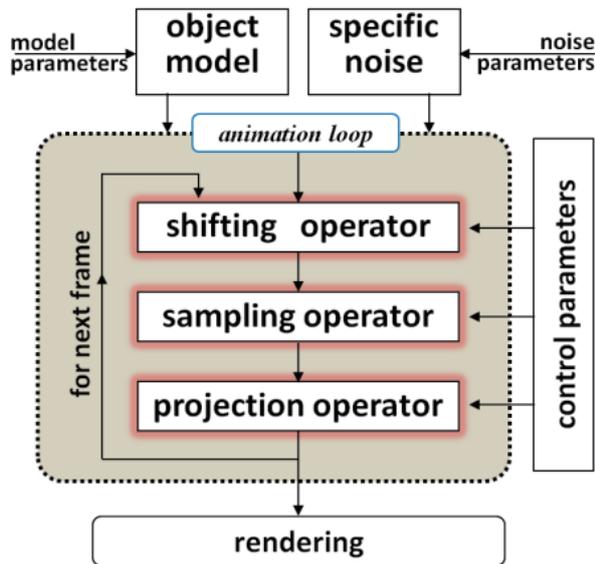


図2 ノイズベースアニメーションシステム

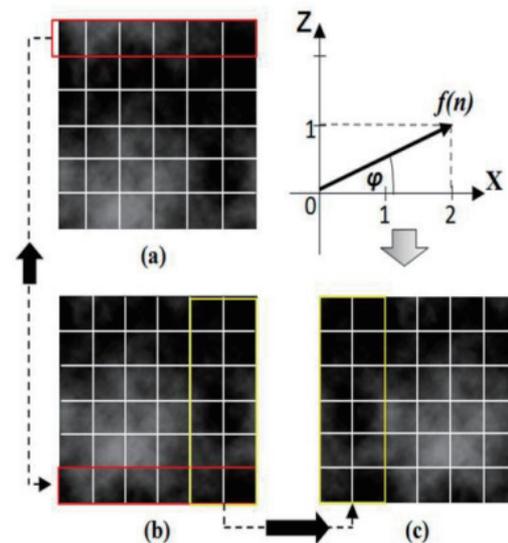


図3 Shifting Operator

(1) Shifting Operator

(離散) 高速逆フーリエ変換で作成したノイズは、例えば図3のような2次元のイズの場合、上下、左右の端で連続している（トーラス上にノイズが生成されていることと同等）という性質がある。そのため、有限のサイズのノイズでも必要に応じて、シフトして（物理的には運動させて）使用することが可能である。図3では、 $f(n)$ が移動ベクトルである。

(2) Sampling Operator

アニメーションにノイズを利用する場合に、サイズの大きな（長い）ノイズが必要になるとか、ノイズの大きさに偏りを与えたいなどの種々の要望が出てくる。その要望に応えるのがこの operator である。例えば、(1)で述べたノイズの性質から、図4(a)の白線のように、2次元のイズから1次元のイズを切り出してくると、見かけ上、無限長のノイズが得られる。また、(b)のように、上部に向かって大きくなる閾値を設けて、ノイズを表示すると、上部で消える炎のようなテクスチャが得られる。

(3) Projection Operator

風に吹かれる物体の揺らぎ運動を生成するために、(2)で定めたノイズを物体に与えるための operator である(図5)。ここでは、bending, color mapping, displacement, propagation の4つの operator を用意した。図6に、例として、bending と propagation の説明を示しておく。

bending は、同時刻のノイズを、全てのリンクの曲げ角に使うもので、propagation はノイズの時系列に従って、曲げ角に使うもので、時刻の進展に伴い、連結したリンク上をノイズが移動するものである。

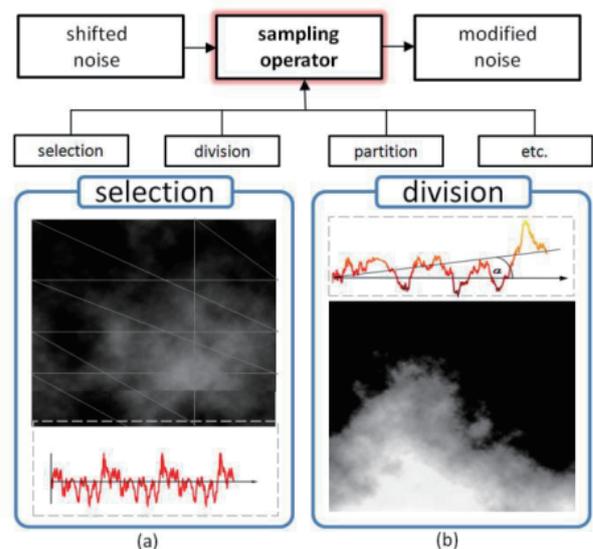


図4 Sampling Operator

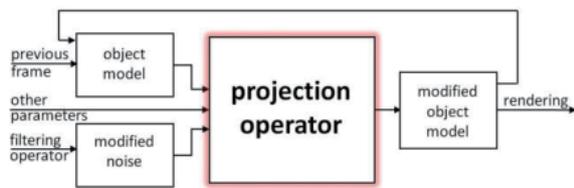


図5 Projection Operator

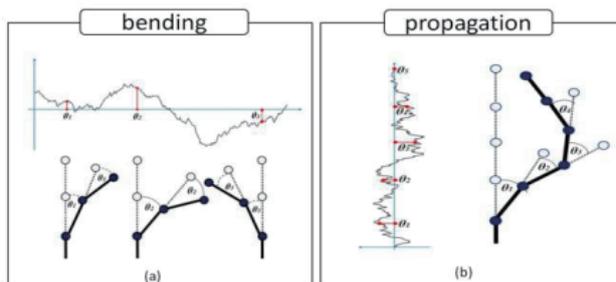


図6 Projection Operator の例

3. 揺らぎアニメーションの生成法

3.1 1次元リンク構造のアニメーション

ここでは、草原や動物の毛の風による揺らぎ運動の生成のためのノイズの利用法について述べる(図7)。草原の草や毛はその数が膨大であり、特に効率的なアニメーション法が期待される現象である。ここでは、草や毛を n 個のセグメント(リンク)からなるとする。ノイズは、Simiuの風モデル[7]で使われている β の値 $5/3$ を用いた2次元ノイズを用意した。

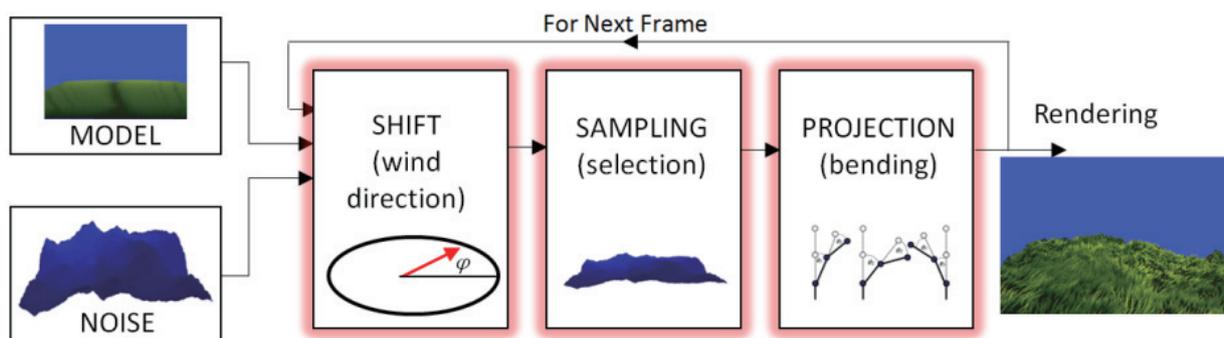


図7 草原や毛のためのアニメーションステップ

shifting operation は、2次元ノイズで表された“地表面の風”の移動を実現し、sampling operation は次のステップのbendingのための適切な角度に範囲を限定するための大きさのスケールリングを行う。また、風の方向の速さを与える $Wind-speed$ を1次元ノイズにより表す。リンク先端の変化分は以下の式で近似する。

$$\Delta x = Wind - speed \cdot \sin \theta \sin \varphi$$

$$\Delta y = Wind - speed \cdot \cos \theta$$

$$\Delta z = Wind - speed \cdot \sin \theta \cos \varphi$$

ここで、 φ は風の方向で、 θ は2次元ノイズのその位置での値である。草や毛のモデリング、すなわち位置、長さ、向きをやはりノイズを用いて与えている。草には、小さな β と大きなスケールリングファクタを、毛には大きな β と小さなスケールリングファクタを用いた。図8に、アニメーションからのフレームを示す。



(a)



(b)

図8 草原と毛のアニメーション

3.2 2次元リンク構造のアニメーション

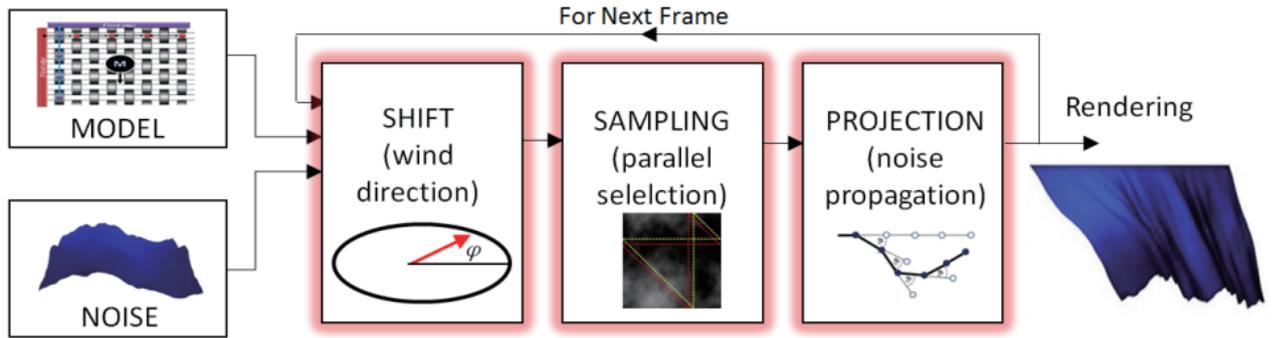


図9 カーテン状の物体のためのアニメーションステップ

ここでは、カーテンや旗のような2次元リンク構造（格子構造）で表される物体の揺らぎアニメーションのためのノイズの活用法について説明する（図9）。

風がカーテンにあると、カーテンをなびかせながら、カーテンに沿って風がながれる様子が可視化される。図9において、shifting operationの風の向きと速さは、カーテン上での風の向きと速さに対応する。図10に基本的なノイズの使用法を示す。ベースとなる揺らぎをカーテンに与えておいて（左下の図）、propagation operationとして、ノイズを上部（固定端）より下部（開放端）に向けて伝播させる。図11に旗や幟の表現を行った例も示す。

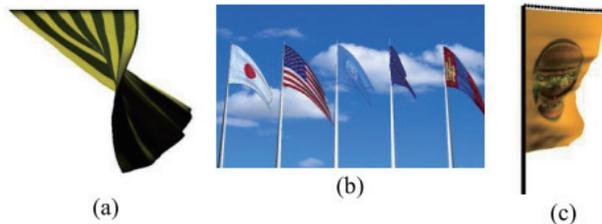


図11 アニメーション例

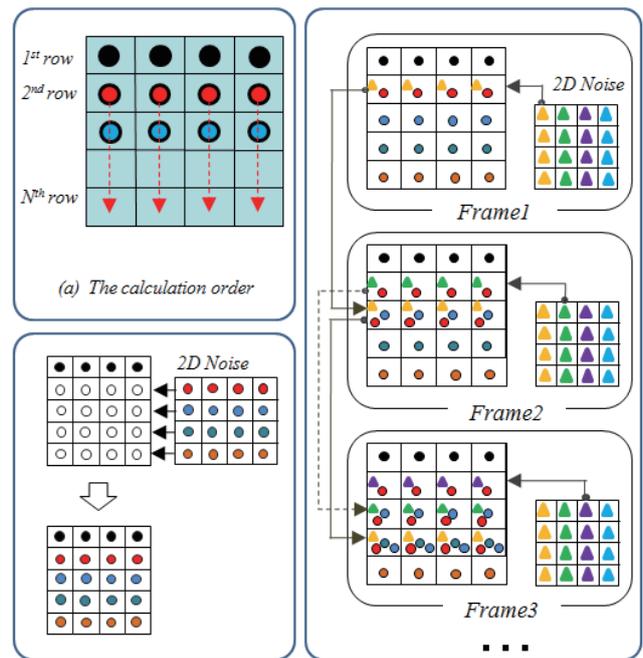


図10 カーテンへのノイズの与え方

3.3 木構造リンク構造のアニメーション

例えば、樹木の風による揺らぎは以下のような特徴がある。サクラやケヤキのような樹木の葉の葉柄は比較的固く、それぞれの葉の揺らぎは小さい。一方、ポプラのような葉の葉柄は柔らかく、風に良く揺らぐ。葉へのノイズの加え方は、文献1に準じて行い（図12）、その大きさは樹種による。また、近傍の葉には、2次元のノイズ上で、相関の高い近傍のノイズを与える。

枝の揺らぎについては、枝の太さと固さの関係から、先端枝に近い枝ほど揺らぎが大きい。また、観察から、風側の枝は上下運動が良く起こり、反対側の枝は水平運動が良く起こる。図13に、枝に揺らぎを与えるアニメーションステップを示す。ノイズは風側の方から反対側に向けて増加する閾値で分け、閾値以上のノイズ成分は上下運動のために与え（閾値の取り方から、風側によく起こる）、閾値以下のノイズ成分は、水平運動を与える（風の反対

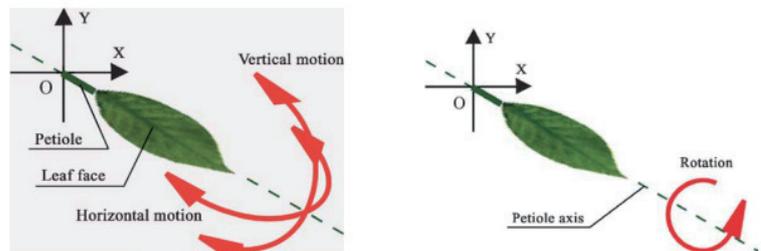


図12 葉に対するプロジェクション

側でよく起こる) ために使う。また、先端枝に近いほどノイズの値を大きく与え、枝の太さ(固さ)の効果を現す。具体的には、以下の角度 θ , φ により 3.1 節の式で傾きを決める。

$$\theta = \frac{W_{speed}(N_{vertical}(x,z) + \alpha_{vertical})}{dist_to_wind_side}$$

$$\varphi = W_{direction} + \frac{W_{speed}(N_{horizontal}(x,z) + \beta_{horizontal})}{dist_towind_side}$$

ここで、 W は風を表し、 $speed$ は速さを、 $direction$ は方向を表す。また、 N はノイズで $vertical$ は上下方向、 $horizontal$ は水平方向を表す。 α と β は適当な定数である。

4. 結論と今後の課題

本研究では、ノイズベースアニメーションのための、基本的なオペレーション群として、shifting, sampling, projection に分けて考えることが出来ることを示した。これはツールとして開発する際に、以降に開発される新しいオペレーションを容易に取り込める構造に出来ることが期待できる。

本論文で示したアルゴリズムの計算効率性は表 1 の用である。

今後の課題として、風の定義の仕方について、これまでの Kolmogorov などの風のスペクトルモデルに関する研究例を参考に、より統一的に使える風のモデルの開発が挙げられる。また、ノイズのみでは困難と思われる運動については、シンプルで効率的な力学計算を組み込んだ、ハイブリッドなアプローチによるアニメーション技術の開発が期待される。

前者については、特に建設分野で開発されてきた風のスペクトルモデルをベースとした 3 次元の風の場の生成法について、プログラム作成を行い実験も試みたところ、CG にとっては効果の不明なパラメタ(高度によって変化する風の平均速度など)が存在すること、そのため生成法が煩雑になっていることなどがあり、今後さらに検討する必要があること、シンプルな近似アルゴリズムを開発することなどが課題として挙げられることが分かった。

【参考文献】

1. 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
2. 千葉 則茂, ながれのビジュアルシミュレーション—リアルな表情を求めて—, 日本流体力学会 [ながれ] 特集, Vol.23, No.2, pp.97-105, 2004
3. T.Fujimoto, S.Miyauchi, T.Suzuki, N.Chiba, Noise-based Animation of Waving Phenomena, Proc.IWAIT2005, (IEICE technical report. Image engineering, Vol.104, No.545, pp.93-98),

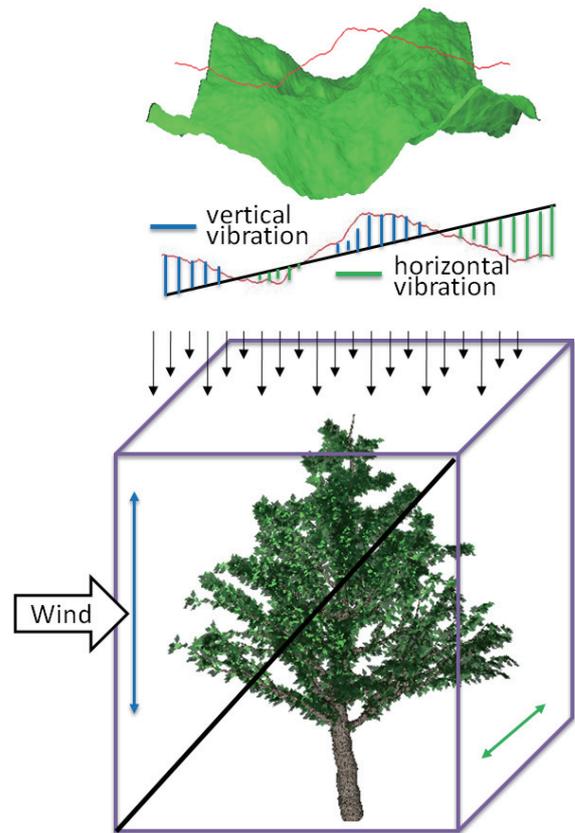


図 1 3 枝に対するアニメーションステップ

表 1 計算効率性

	Shifting	Sampling	Projection	Total
Grass field (100x100x10) N=100,000	0.1	0.05	0.2	0.35
Fur (200x150x10) N=300,000	0.3	0.15	0.57	1.02
Tree (256 branches 10000 leaves) N=105,536	0.1	0.05	0.13	0.23
Curtain (200x150) N=30,000	0.03	0.015	0.09	0.135
Flag (200x150) N=30,000	0.03	0.015	0.105	0.15

2005

4. 菅野研一, 千葉則茂, マイクロホンベースの風速センサの開発と実世界の風に揺らぐ樹木のリアルタイムアニメーションへの応用, 芸術科学会論文誌, Vol. 6, No. 4, pp. 207-214, 2007
5. R.F.Voss, Fractals in nature: from characterization to simulation. In The Science of Fractal Images, 21-70, 1988
6. H.O.Peitgen and D.Saupe (eds), The science of fractal images, Springer-Verlag, New York, 1988
7. Simiu, E., Scanlan.R.: Wind Effects on Structures. John Wiley and Sons, 1986

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Noise-Driven Approach for Animating Dynamic Natural Scenes	第26回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 芸術科学会	2010年9月24, 25日
Fundamental Study on Wind Models for Animating Flexible Objects	第26回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 芸術科学会	2010年9月24, 25日