

博士学位論文

インタラクティブCGのための  
マイクロホンベース風向・風速センサの開発

岩手大学大学院工学研究科

電子情報工学専攻

菅野 研一

# 1. 目次

1. 序論 .....	1
1.1 本研究の目的と背景 .....	1
1.2 関連研究 .....	2
1.3 本論文の構成 .....	3
2. マイクロホンと風雑音 .....	8
2.1 風雑音のメカニズム .....	8
2.2 周辺機器の周波数特性 .....	8
2.3 マイクロホンの風雑音 .....	10
2.4 風速と風雑音の関係 .....	11
2.5 風速への変換 .....	11
3. 樹木の形状モデルと枝葉の風による揺らぎの表現法 .....	21
3.1 樹木の形状モデル .....	21
3.2 枝葉の風による揺らぎの表現法 .....	21
3.2.1 $1/f^{\beta}$ ノイズ .....	22
3.2.2 枝揺れ .....	23
3.2.3 葉揺れ .....	24
3.2.4 強弱のある揺れの表現 .....	25
3.3 ビジュアルシミュレーション例 .....	25
3.4 効果音の生成 .....	26
3.5 まとめ .....	26
4. CGシステムへの実装 .....	37
4.1 風速センサの実装 .....	37
4.2 平滑化と遅延 .....	37
4.3 音声の分離 .....	38
4.4 評価 .....	38
4.5 騒音が風速に与える影響 .....	39
4.6 まとめ .....	40
5. 風向・風速センサへの拡張 .....	46

5.1	ウィンドスクリーン .....	46
5.2	マイクロホンの配置 .....	46
5.3	オーディオインタフェース.....	47
5.4	マイクロホンの校正 .....	47
5.5	風向による風雑音出力の変化.....	47
5.6	実装.....	48
5.7	“飛び”の除去.....	48
5.8	まとめ .....	49
6.	結論 .....	60
6.1	本研究の有効性.....	60
6.2	本研究の適用分野 .....	60
6.3	課題と改良 .....	60

# 1. 序論

## 1.1 本研究の目的と背景

実世界との高度な整合性を有する複合現実感 (Mixed Reality = MR) システムの構築には、風などの実世界の自然現象に応じて動作するアニメーションシステムの開発が重要である。実写画像と合成される CG 画像は周囲の環境に同期して生成することでより自然な画像となる。樹木と風を例にとれば、CG で生成される画像が実世界の風に合わせて揺らぐことにより実写画像とより一体化し、自然な合成画像となる。

MR システムなどのアプリケーションシステムでは実世界との同期のため、風速センサに限らず種々のセンサが必要となり、またヘッドマウント・ディスプレイ (HMD) などのように人体に装着されることも想定されるため、小型・軽量であることが望ましいと考えられる。また、普及型のエンターテイメント用途も考慮するとコストの低さも重要な要素となる。

これに対して、現状の風速計は測定器として製造され、高い精度が重要視されているため、サイズが大きいものや、コストが高いものとなっている。よく知られているものは風杯式やベーン式と呼ばれるもので、可動部を持つため小型化に限界があり、使用時の姿勢の制約が大きい(図 1-1)。可動部を持たないものとしては、超音波式と熱式がある。超音波式は、音の伝達速度が追い風の場合は風速に応じて速く、向かい風の場合は遅くなることを利用したものである。発信部と受信部を直交する向きに 2 対配置することで風向も測定できる。発信部と受信部の間に一定の距離をとることが必要であり、小型化には限界がある(図 1-2)。熱式は、ヒータに風が当たり温度が下がると抵抗値が小さくなることを利用したものである。センサは小型であるが、校正が複雑であり、そのため高価になりがちである(図 1-3)。

ポータブルな MR システムのような利用環境に適するものとして、小型マイクロホンに注目した。マイクロホンが風を受けると低周波域を中心に大きな雑音 (以下、風雑音という) を発することはよく知られている。この雑音を利用して風速を得ることができれば MR システムに適した小型で安価な風速センサが実現できる。

本研究では、まず小型マイクロホンの風雑音の周波数スペクトルや、通常の PC 用オーディオインタフェースの周波数特性を調査し、と小型マイクロホンの組み合わせ

せで風速を測定可能かどうかを検討した。検討した結果から、風雑音から風速を求めるシステムを開発し、CG システム[1][2][3][4]に実装して有用性を確認した。合わせて音声を分離し、風にのみ応答するための手法を提案した。最後に複数のマイクロホンを組み合わせて風向を得るシステムへの拡張を実現した。

## 1.2 関連研究

風雑音は通常の用途にとっては邪魔になるもので、取り除くべき対象あるため、風雑音を取り除く方法は広く研究されている。Michael R. Shustらは、マイクロホン近傍に設置した熱線式風センサにより風速を測定し、それから予測した雑音成分を差し引いて風雑音を低減する手法を提案した[5]。Shelds はインフラサウンドと呼ばれる超低周波音の観測において、風雑音低減のため、マイクロホンアレイに発生する風雑音の相関について調査した。ある程度距離が離れた点において観測した風雑音に対しては、相関が認められなくなる性質を利用して風雑音を低減する[6]。van den Bergの研究では、風雑音低減のため広く用いられている発泡素材や布製のウィンドスクリーンの論理的解釈を試み、音響信号の観測時に風雑音の影響を避ける方法を提案した[7]。Wilsonらは、マイクロホンアレイサイズが大きくなれば相関が小さくなることを可視化により再確認し、またマイクロホンアレイのサイズを小さくできる可能性などに言及した[8]。

しかし、風雑音を積極的に解析し、風速測定等に役立てようという研究は限られている。H.Bassらによる研究[9]では3つのマイクロホンアレイを用いて、それらの相互相関係数から風速を求める方法が提案されているが、一辺が数十 cm 程度の正三角形の各頂点にマイクロホンを配置する必要がある。藤田らの研究[10]では、1つのマイクロホンを用い、予め蓄積した高次の相関情報を活用し風速を推定する手法を提案している。

一方、マイクロホンに発生する風雑音の周波数パワースペクトルについて、文献[11]では「風速 10m/s 以下の場合、風速の2乗から3乗に比例して増加し、低音域に大きく分布する。またそれ以上では風切音により中～高域成分を含むようになる。」と述べられており、およそ 40Hz 以上の帯域について調査している。

マイクロホンを風センサとして利用した製品としては携帯ゲームなどに例がある。ただし、これらは風というより息を吹きかけたことをトリガにキャラクタの振る舞い

を変化させるといった大きな瞬発的な変動を利用した使い方をしている。また、風に反応する電子風鈴の電子工作キットの例[12]では 3~4Hz 以下の、可聴範囲外に発生する雑音を検出し、閾値を超えると発振器をトリガして鳴らすというもので、いずれも風の強弱の変動の検出・利用には至っていない。

近年の興味深い例としては D. Vlastic らの研究[13]や J. D. Wilson らの研究[14]がある。D. Vlastic らは、本研究の対象とする帯域とは異なるが、身体に装着する超音波センサとして通常の小型マイクロホンを利用した。マイクロホンの小型・軽量・安価であるという特性が、音声の収録を超えた広い用途に適用可能であることを示している。J. D. Wilson らは、海中に設置した水中マイクロホンをを用い、ハリケーンによって発せられた音響信号から、その規模を推定した。これも風の検出にマイクロホンを利用した事例と言える。

これらの事例からわかるとおり、マイクロホンを単なる音声の入力デバイスとしての働きを超え、超音波や超低周波(以下本論文では 20Hz 以下の帯域を超低周波と呼ぶ)を含む広い周波数帯域に対して適用し、様々なセンサとして利用しようとする研究はいくつか行われている。しかし超低周波から数百 Hz 程度にわたる領域に着目して、そこから風速を推定しようという試み、また CG システムにその風速データを利用した事例は見られない。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、研究の背景と関連研究について述べる。

第 2 章では、小型マイクロホンの風雑音に関する実験と考察をまとめる。風雑音は 20Hz 以下の超低周波を含むほか、風速の増大に伴い 4kHz 程度までの成分を含む。雑音出力は風速と一定の比例関係を持ち、4kHz 以下の帯域のエネルギーを利用すれば風速が求められることが分かった。また、通常の PC 用オーディオインタフェースの多くは、20Hz 以下の超低周波を扱うことが可能であることを確認し、風センサ用マイクロホンの入力ポートとして使用できることを示した。

第 3 章では、風向・風速センサを実装する対象となる CG システムである樹木の形状モデルと枝葉の風による揺らぎの表現法について述べる。

第 4 章では、第 3 章で述べた CG システムへの、風速センサの実装について述べる。

自然な揺らぎを表現するために平滑化や遅延を挿入する手法や、周囲の音声の影響を受けないように、風の有無・強弱によりローパスフィルタの遮断周波数を動的に変化させる手法などを開発した。開発したセンサは小型で存在に気づきにくく、被験者にうちわで画面をあおいでもらう実験を行ったところ、多くの者が驚きとともに興味をもち、高い評価を得た。

第 5 章では、風速に加え、風向を得るシステムへの拡張について述べる。特殊な形状のウィンドスクリーンを装着した複数のマイクロホンを組み合わせて、雑音出力の比から風雑音を求める手法を提案した。本手法により求められた風向の精度は高いものではなく、また、不規則に急激な変動を含む。CG システムへの応用において、精度の低さは問題とならないが、急激な変動が映像に影響を与えることを確認したので、この変動を除去し、自然な CG 画像を生成する手法を開発した。

第 6 章は結論であり、本研究の有効性、適用分野、今後の課題についてまとめた。



<http://satotech.com/>

図 1-1 可動部を持つ風速計





<http://www.weather.co.jp/>

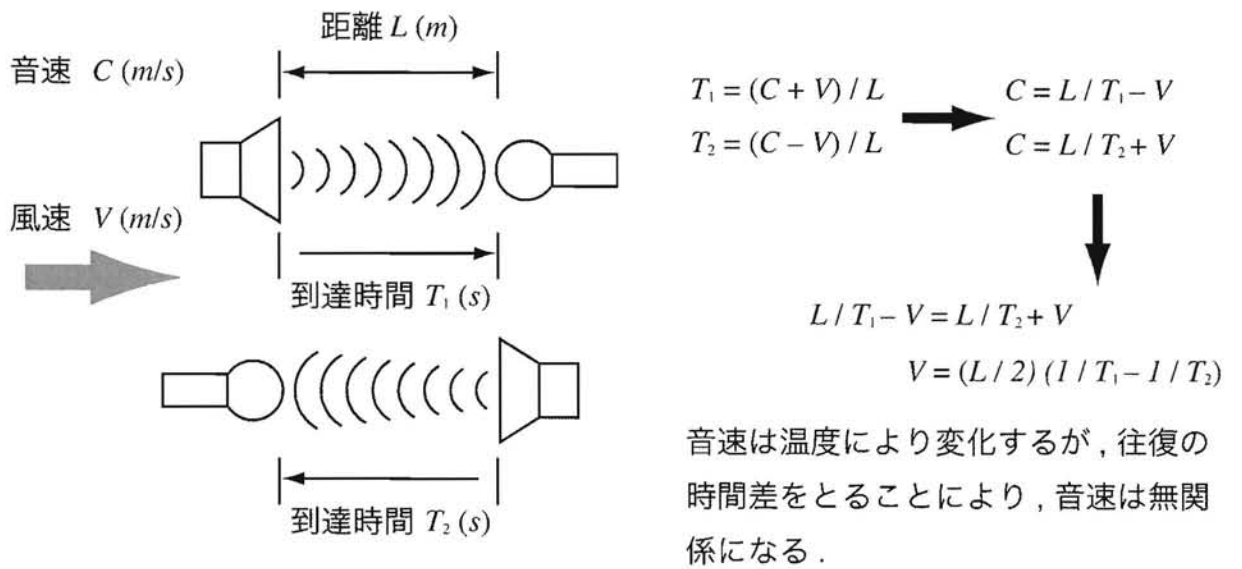


図 1-2 超音波式風速計



<http://www.kanomax.co.jp/>

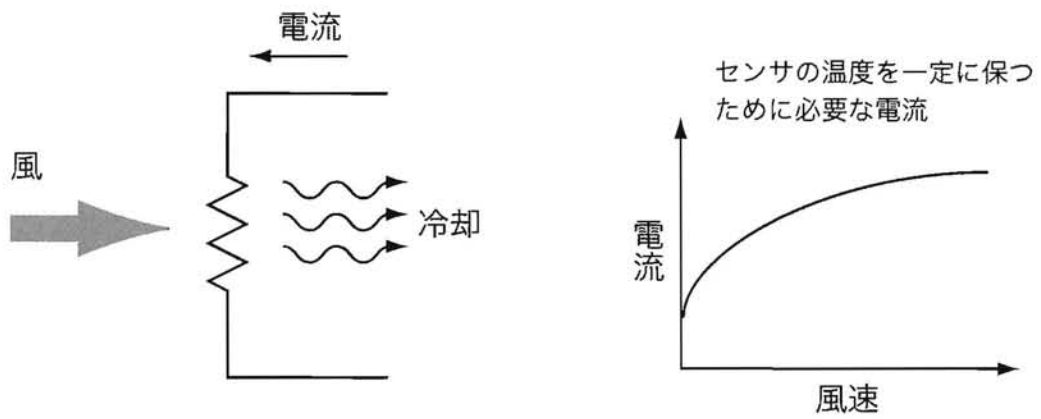


図 1-3 熱式風速計

## 2. マイクロホンと風雑音

### 2.1 風雑音のメカニズム

マイクロホンが風を受けたときに発する雑音の主な要因は以下の2つである。

1つは風の中に内在する乱流 (Turbulence) によるものがある[6]。風をある一定時間内部構造が変化しない風塊として扱う。風塊中にはさまざまな波長の乱流が含まれていて、移動する。この移動速度が風速である。風塊の通り道にマイクロホンをおくと流体が移動することにより発生する動圧を受けるが、動圧は乱流により変動し、雑音が発生する。動圧は流体の流速の2乗に比例することが知られており、風速が大きくなるほど風雑音も大きくなる。また、同じ波長の乱流により発せられる雑音の周波数は風速に比例することになる (図 2-1)。

他の1つは、マイクロホンそのものの形状や、取り付けてある支柱などの構造、ケーブルなどにより、これらに風が当たったときの、いわゆる風切り音によるものである[11]。風切り音のモデルとしては、円柱形の物体の周囲を流体が通るときに発生する、カルマン渦が用いられる。ケーブルや支柱はマイクロホンと機械的に接続されているため、渦による小さな振動もマイクロホンに伝達され、雑音として影響を与える (図 2-2)。カルマン渦は流体の速度が一定以上の場合に発生するので、これによる風雑音は、風速がある一定程度以上の場合に発生すると考えられる。カルマン渦によって発生する振動の周波数は流体の流速に比例することが知られている。

実際の風雑音はこれらの他、種々の要素からなる雑音が複合されて生成されると考えられる。

### 2.2 周辺機器の周波数特性

第1章で述べた通り、風雑音には超低周波成分を含むので、その帯域を扱うことができる周辺機器が必要となる。試作の段階では可能な限り特殊なハードウェアの設計・製作を少なくするのが望ましい。また利用者が通常保有している機器が、そのまま利用できれば導入が容易となる。今日のPCにはオーディオ入力ポートが装備されているのが一般的であるし、USBポート等を経由して接続できる低コストなオーディオインタフェースも容易に入手可能である。

オーディオインタフェースの中心となるデバイスは A/D コンバータであり、原理的には変換可能な周波数範囲の上限はナイキスト周波数により制限されるが、下限は DC 領域から可能である。A/D コンバータの前におかれるアナログ回路が超低周波域を遮断することがなければ、商業生産されている機器がそのまま風センサに利用できることになる。このことはソフトウェア開発の面から見ても、標準のオーディオ API が利用できることになるのでメリットは大きい。

そこで実際にいくつかのオーディオインタフェースの周波数特性を調査した。ファンクションジェネレータからの出力をオーディオポートに入れ、PC 上の録音用ソフトウェアのレベル表示から読み取る方法で行った。結果を図 2-3 に示す。オーディオ入力ポートはその入力電圧範囲により、便宜的にラインレベルとマイクレベルと呼ばれる2つの入力ポートに大別される。ラインレベルは CD プレイヤーなどのオーディオ機器を接続するためのもので、おおむね  $-10\sim+4\text{dbm}$  の信号を入力するように設計されている。マイクレベルは名前が示す通りマイクロホンに接続するためのもので、おおむね  $-60\sim-20\text{dbm}$  の信号を入力するように設計されている。図から分かるように、ライン入力に調査した2つの機器ともに超低周波に対する応答が認められたが、マイク入力は機器ごとに大きな差があり、機器 2 のマイク入力は本研究用途としては使用できない。

本研究で使用したマイクロホンがそうであるように、現在容易に入手できる小型で安価なマイクロホンは、ほとんどがエレクトレットコンデンサ型である。この型のマイクロホンはユニット内にヘッドアンプと呼ばれる回路をもち、それを作動させるための数 V の電圧を供給する電源供給回路が必要となる。この電源はマイクロホン内部に電池を装着して供給する場合もあるが、PC 用のマイクロホンの多くは信号線を利用して PC 側から供給されるため、図 2-4 上に示すような直流を遮断するコンデンサが信号経路に挿入される。なお、この給電方式はプラグインパワーと呼ばれることが多い。

第5章ではマイクロホンを4個使用するため、音楽録音スタジオ等で使用される多チャンネルのオーディオインタフェースを使用するが、同様の問題を考慮する必要がある。これらのマイク入力はコンデンサマイクの使用を考慮した電源供給回路を備えていることが多い。コンデンサマイクは内部のユニットに加えるバイアス電源として 48V 程度の高い電圧を必要とする。これは平衡型伝送路の信号線とグラウン

ド間を利用して供給されるが、この場合も図 2-4 下に示すように信号経路にコンデンサが挿入される。このような電源供給方式はファントム電源として広く知られている。

これら電源供給回路の設計条件により超低周波領域に対する応答に差異が生じると考えられる。この影響を避けるため、本研究では図 2-5 に示すプリアンプ (電圧利得 26dB) を外部に置き、マイクロホンはプリアンプを経由してライン入力ポートに接続することとした。このプリアンプは電子工作キットとして入手可能なものに、超低域特性を改善するための改造を施したもの(図 2-6)であるが、オペアンプなどを利用して新たに製作するのも困難なことではない。

### 2.3 マイクロホンの風雑音

2.1 節で述べたように、風雑音はさまざまな要因の複合により発生する。風速と風雑音の関係はマイクロホンの種類や形状によって変化すると考えられるので、実験によって求めることとした。マイクロホンに実際に風を当てて雑音出力を観測した。簡易なダクトを製作して工業用送風機の前にマイクロホンと風速計を設置し、発生する雑音の周波数スペクトルを観測した(図 2-7)。低い周波数域の分解能を確保するため、サンプリング周波数は 8kHz, FFT サイズは 2048 に設定した。風速 1m/s から 6m/s について 1m/s ずつ変化させて観測した結果を図 2-8 に示す。D/A 変換部が飽和することがないように、6m/s で予めレベルを適正に調整した後他の風速について観測し、相対的なレベル差を比較した。送風機自体がかなりの騒音を発するため、風の吹き出し口の正面を避けた近傍にマイクロホンを置き出力を測定したが、風雑音の出力は相対的に非常に大きく、無視できる程度であることを確認した (図 2-9)

(1) 雑音のスペクトル分布は低い周波数ほどエネルギーが大きく、超低周波成分まで含む。1/3 オクターブ毎に分割したグラフで見るとほぼ平坦な領域が見られ、1/f ノイズ (ピンクノイズ) に近い雑音と見られる。

(2) 風速 1~3m/s においては、流れとしての風雑音がマイクロホンの振動板に作用して発生する雑音と見られ、ノイズの分布にあまり大きな乱れは見られない。

(3) 風速 4m/s 以上では、400Hz 以上の中・高域の雑音が目立ち始めている。6m/s のスペクトル分布で顕著であるが 800Hz 以上では特定の周波数でのピークが見られるようになる。これらは風切り音によるものと考えられる。文献[11]の記述よりか

なり弱い風で発生が始まっていることが分かる。

## 2.4 風速と風雑音の関係

前節の実験により、風雑音はおおむね 4kHz 以下の範囲の周波数成分を持つことが分かった。そこで、4kHz 以下の成分のエネルギーと、風速との関係を調査した。オーディオインタフェースが標準的に対応している、標本化周波数 44.1kHz、量子化 16bit でデジタル化した信号を、100ms ごとに 4096 点取り出し、窓関数としてハミングウィンドウをかけて FFT 処理をおこなう。10 回分の平均をとり 1 秒ごとに数値で表示させ読み取った。

風速 1m/s, 2m/s, 4m/s の 3 点で風雑音出力を観測した。その結果本研究で使用したマイクロホンでは、風速が 2 倍になると雑音出力が約 15dB 増加するという傾向が見られた。これを電圧比で考えると、 $20\log_{10}(V_2/V_1)=15$  より、 $(V_2/V_1)=10^{(15/20)}\approx 5.62$  となり、電圧が約 5.62 倍になることを意味する。このことから風速と風雑音出力の関係は  $\log_2 5.62 \approx 2.485$  乗に比例して風雑音が増加するといえる。したがって次式 (2.1) において  $k=2.485$  とすることにより雑音出力電圧  $V_{out}$  から風速  $S_{wind}$  が求められる。

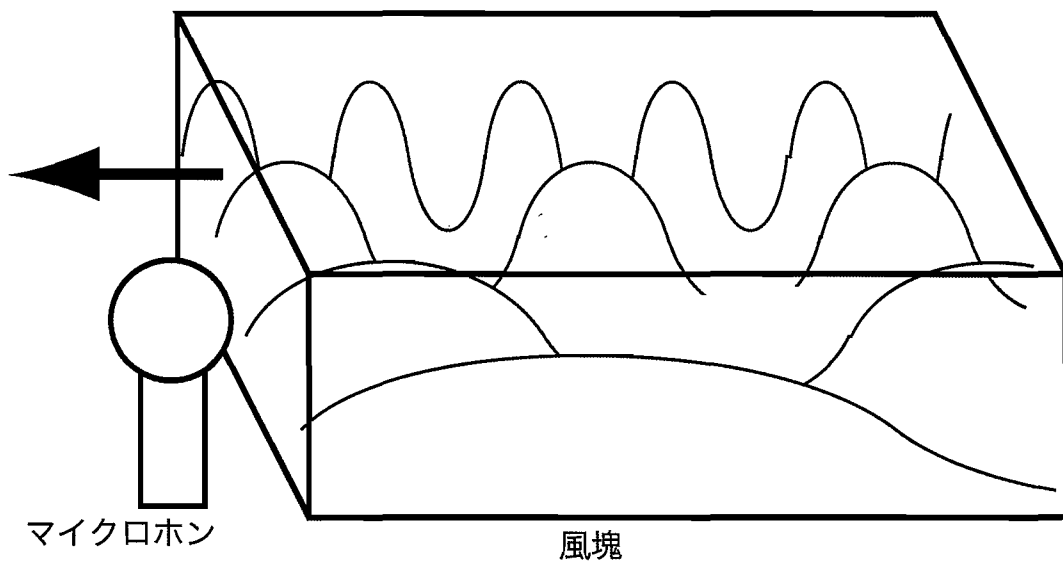
$$S_{wind} = ((V_{out} - V_0) \times g)^{1/k} \quad (2.1)$$

ここで  $V_0$  は主にオーディオインタフェースのアナログアンプ部の雑音出力に相当する分を差し引くもので、無風時に風速の出力が 0 となるように設定する。パラメタ  $g$  はアナログアンプ部のゲインの差異を補正するためのもので、風速が既知である風を当てて正しい風速を出力するように設定する。本研究と異なるマイクロホンやオーディオインタフェースを使用する場合も、この節で述べた方法で校正し、 $V_0, g, k$  を変更することで対応可能である。

## 2.5 風速への変換

式 (2.1) の演算処理を施す処理を実装し、風センサに送風機の風を当て、風速 1m/s, 2m/s, 3m/s, 4m/s および 5m/s のときのシステムの風速表示を読み取った。その結果を図 2-3 に示す。なお、前節と同様、10 回分の平均値をとり 1 秒ごとに風速を表示するようにしてある。風速の表示値が変動するのでその範囲をグレーの帯で表した。その結果、ほぼ実際の風速にそった風センサの表示が得られた(図 2-10)。風速が

大きくなるにつれ、表示が実際の風速より大きくなる傾向が見られるが、この点については $k$ の値の調整で改善することが可能である。また、風速が大きいほど表示の変動幅が大きくなる傾向が見られた。参照用に使用した風速計はベーン（回転翼）の慣性があり、風速の周期の短い変動を拾わないのに対し、マイクは拾うことが可能であることが原因とも考えられるし、雑音出力の特性上、不安定さを持っている可能性もある。この変動については、実装対象のCGシステムが自然現象のシミュレーションである場合、元のシステムが揺らぎを含んでいるので、大きな影響を与えないと考えられる。従ってここでは詳しく議論しない。



マイクロホン

風塊

図 2-1 風塊による風雑音発生モデル

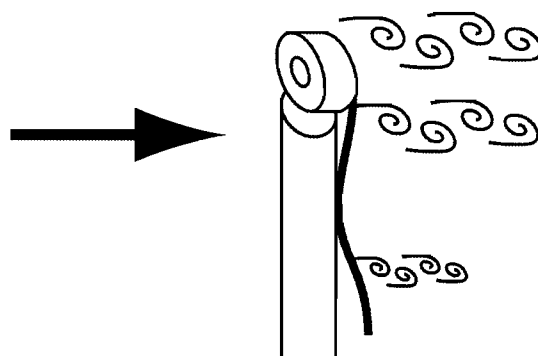


図 2-2 カルマン渦による風雑音発生



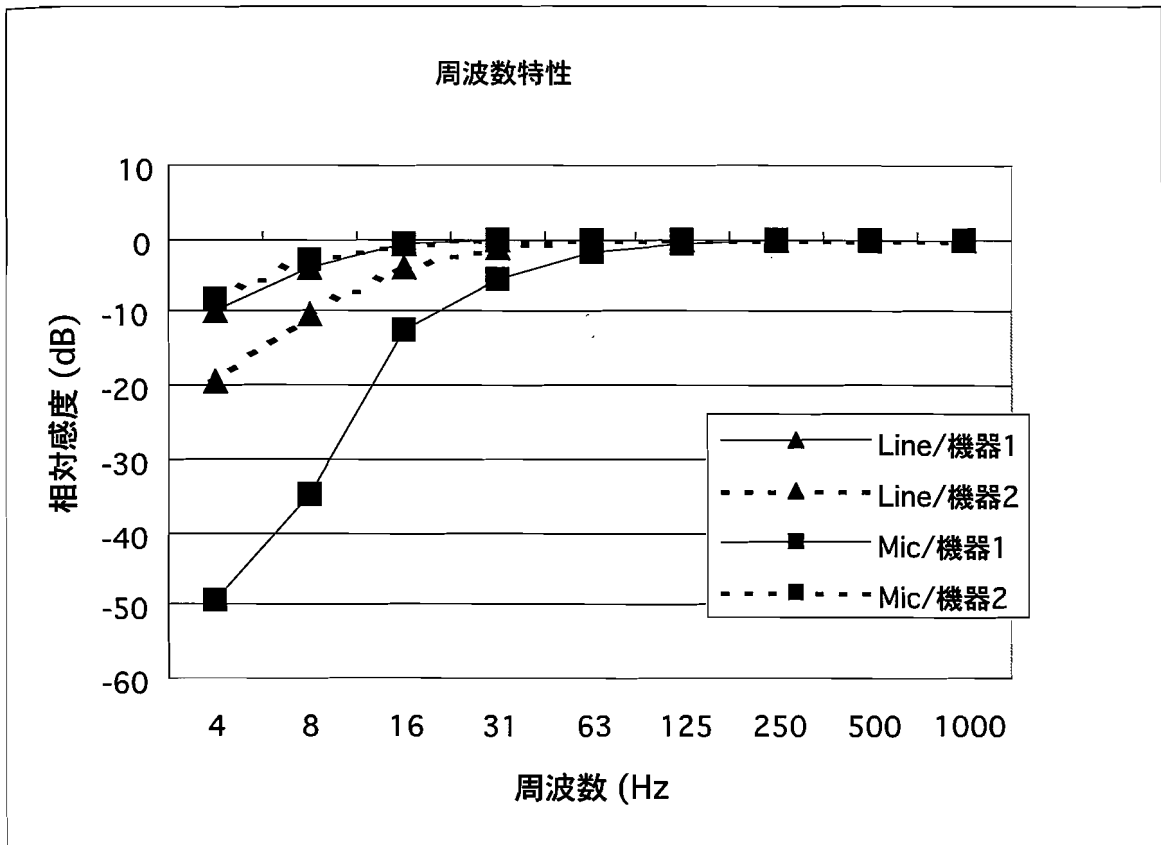


図 2-3 オーディオインタフェースの周波数特性

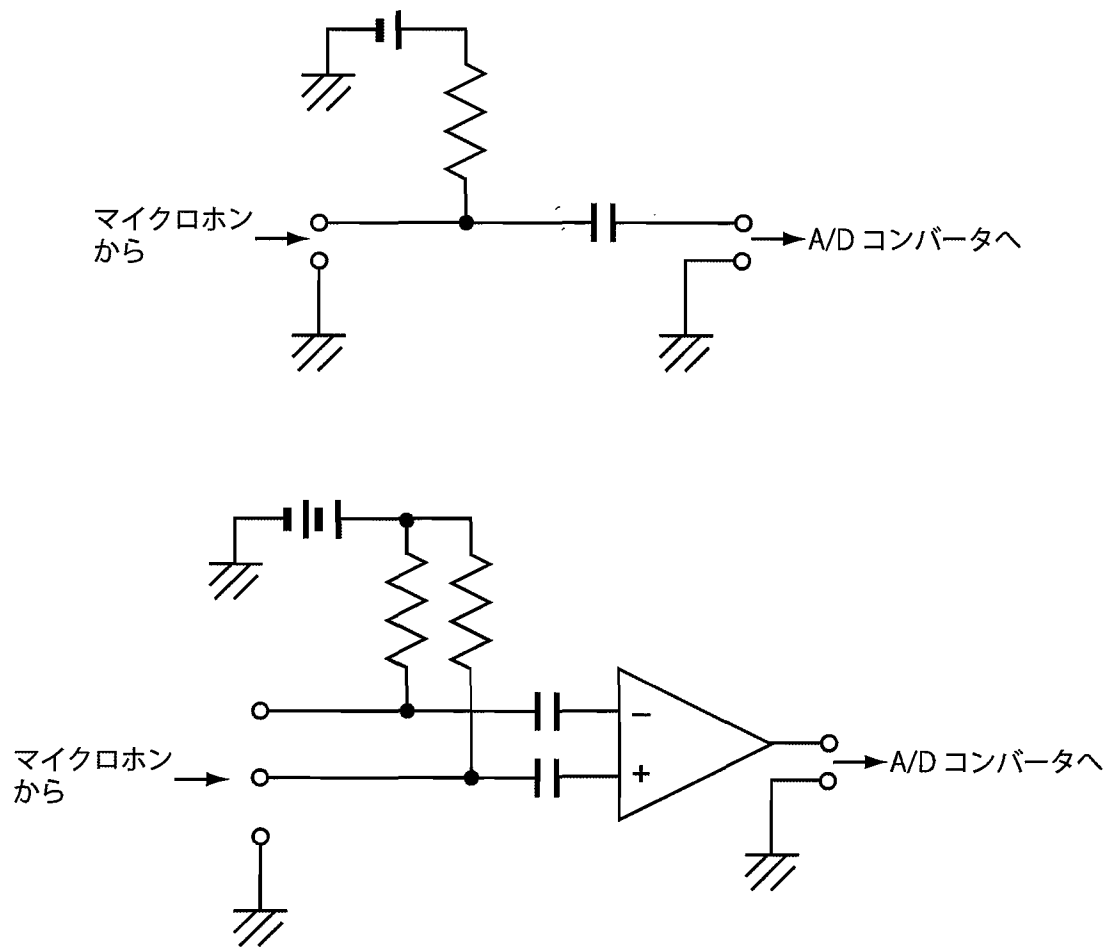


図 2-4 マイク入力ポートの電源供給回路のモデル

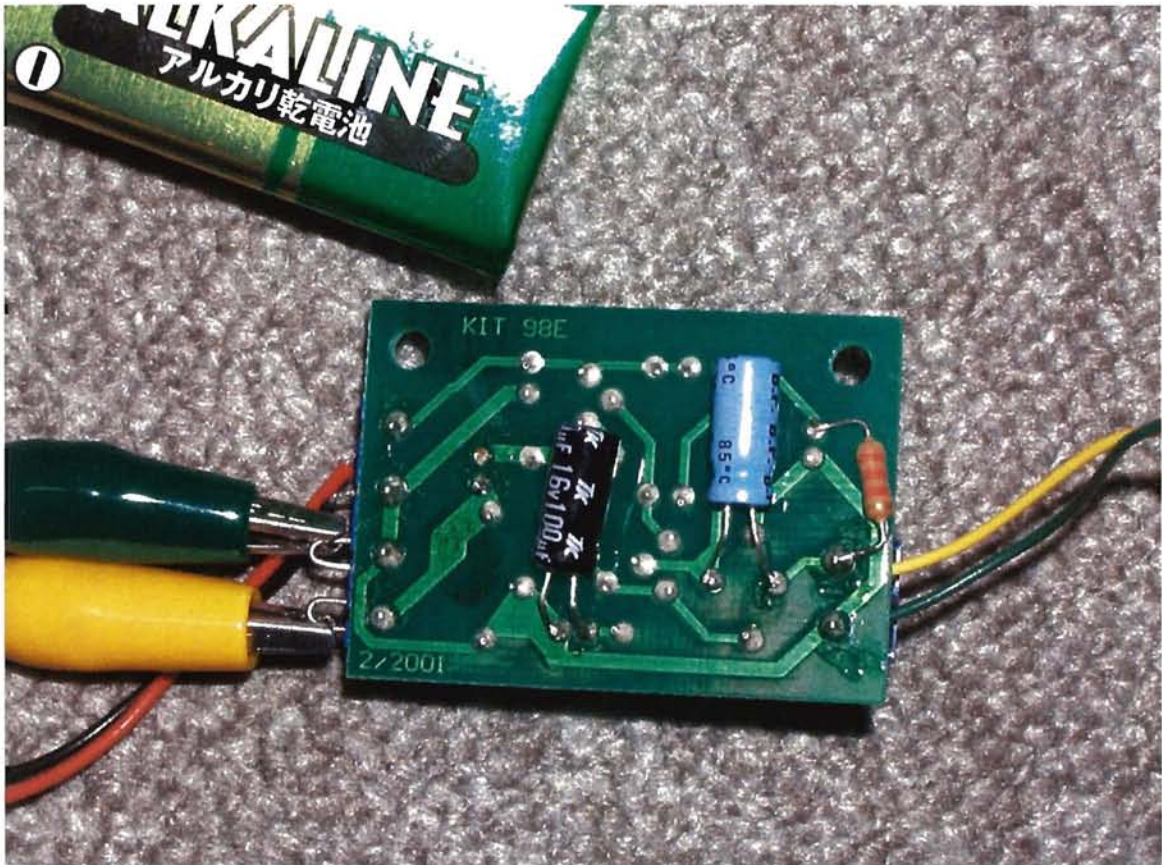
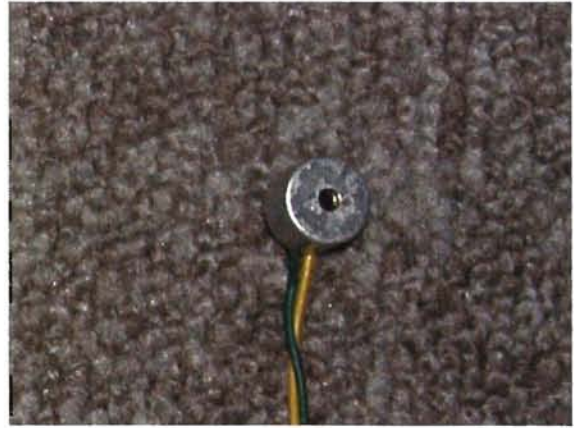


図 2-5 マイクロホンとプリアンプ

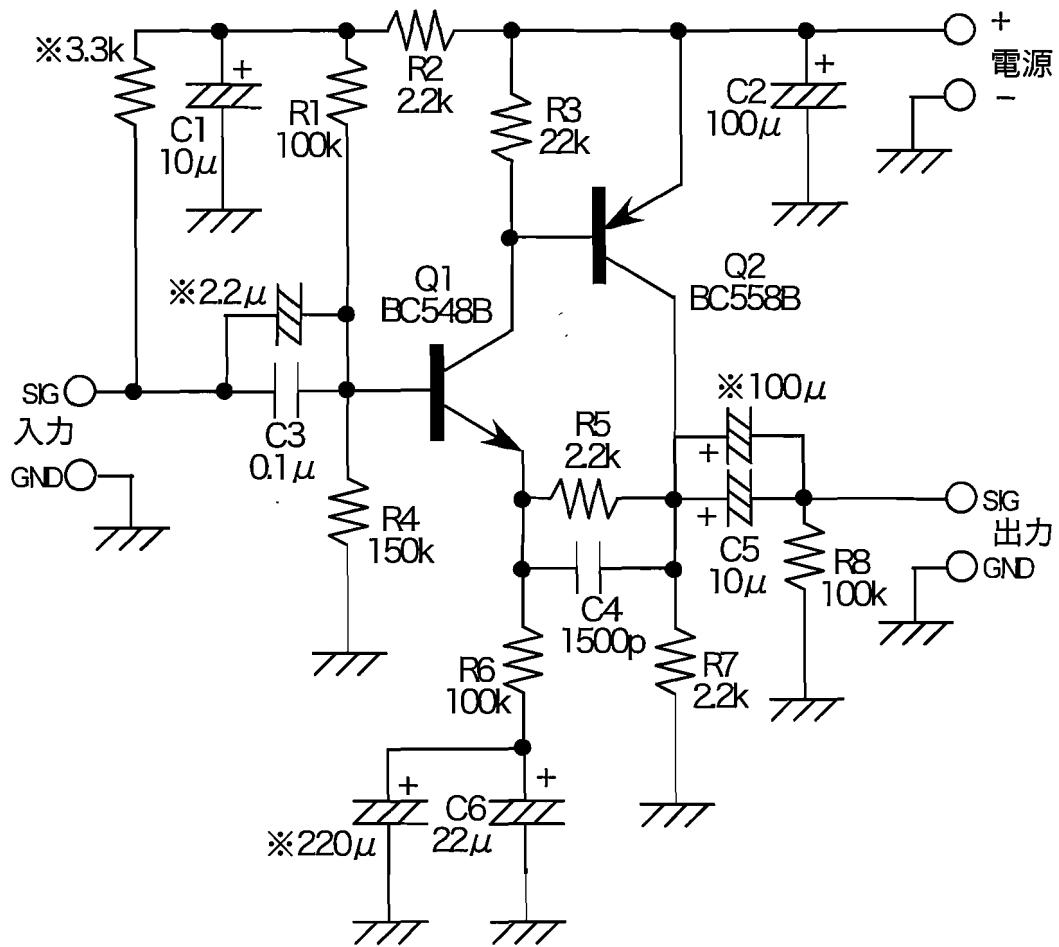
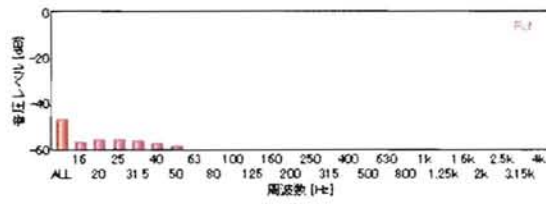


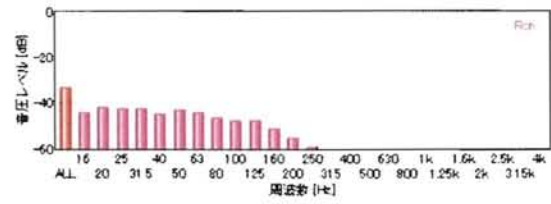
図 2-6 プリアンプの回路図



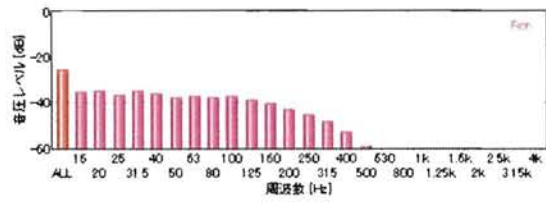
図 2-7 送風機と風速計



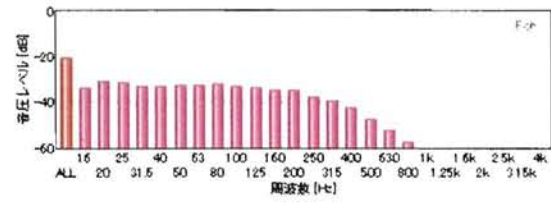
風速 1m/s



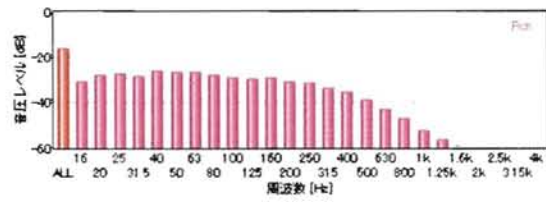
風速 2m/s



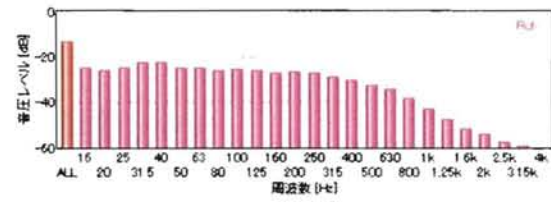
風速 3m/s



風速 4m/s



風速 5m/s



風速 6m/s

図 2-8 風雑音のスペクトル

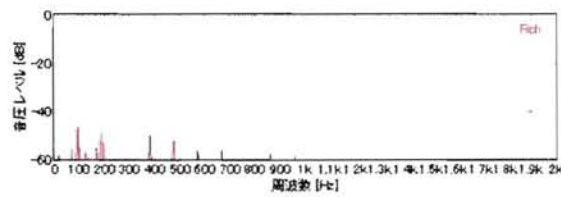


図 2-9 送風機の騒音

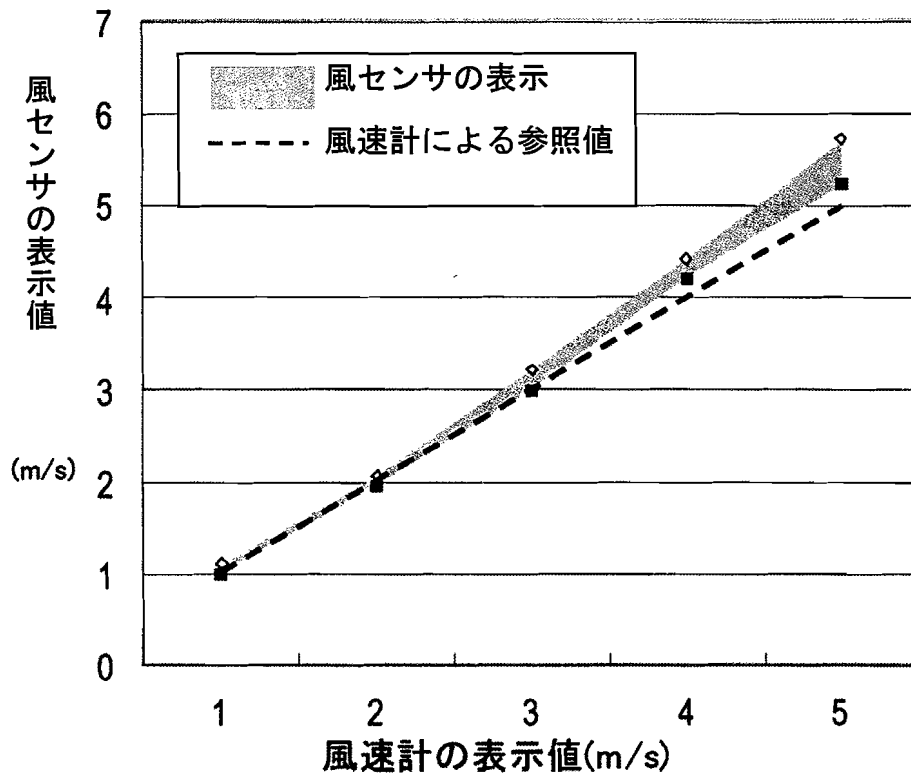


図 2-10 風速計の風速表示と風センサの表示値

### 3. 樹木の形状モデルと枝葉の風による揺らぎの表現法

#### 3.1 樹木の形状モデル

樹木の形状モデルには、これまで提案されている樹木の形状モデルの生成に関する手法 [15][16][17][18] が適用できる。

樹木の枝を表現するモデルとして 図 3-1 に示すように枝の節間を円柱または円錐台で近似したものを採用する。樹木全体のデータ構造は木構造となっており、親と子が相互に参照できるようにする。これにより揺らぎに使用するここの枝の揺れ幅の累積が容易に求められる。ここで、枝が子を持たないときに枝は円柱となり、子を持つときは枝と子それぞれの直径による円錐台となる。また、各々の枝には根元から枝先に向けて向きを定義する。すなわち始点  $P_s$ 、終点  $P_e$  および直径で枝を表現する。

樹木の葉を表現するモデルとして、図 3-2 に示すような、葉柄を線分、葉身を長方形で近似したものを採用する。葉身は葉柄データをもとに作成され、葉身の大きさは葉柄の長さに比例する。葉揺れの表現のために葉柄座標系を定義する。それは点  $P_0$  を原点とし、点  $P_0$  から点  $P_l$  へ向かうベクトルを  $z$  軸、 $z$  軸と鉛直上向きベクトルとの外積を  $x$  軸、 $z$  軸との外積を  $y$  軸とする。この葉柄座標系は静的で、葉揺れは葉柄座標系でその揺れ具合を表す。葉柄と葉身との接点で、重力を考慮して葉身をたれ下げる。従って点  $P_0$  は葉身の面上には存在しない。

#### 3.2 枝葉の風による揺らぎの表現法

枝の風による揺らぎの生成法には [1][2][3] で提案されているノイズベースの効率的な手法を用いる。

CG における樹木の生成について、樹木の形状モデリングに関してはこれまで多くの研究がなされ、様々な手法が実現されてきた [15][16][17][18]。一方、樹木に対して風の揺らぎのような動きを付加するテーマについては研究例が少ない [1][2][3][19][20][21][22]。枝葉の風による揺らぎの生成法には太田らが提案したノイズベースの効率的な手法 [1][2][3] を用いる。他の手法は枝の揺れのみを考慮したものであり、自然な樹木の揺れを表現するのに重要と思われる個々の葉の揺れまでは実



現されていない。これらの多くは各枝にかかる力を考慮した運動方程式に基づく力学シミュレーションによる方法であるため、風などによる外力の影響や枝同士の力の作用をより忠実に再現する反面、膨大な計算時間が必要であり、リアルタイムでの実行が困難である。さらに、自然なシミュレーション結果を得るためにはシミュレーション対象となるデータ群が詳細かつ正確なモデルに基づいている必要がある。

以上のことから本研究では、リアルタイムに動作する枝および葉の揺れの生成を必要とするため、計算時間のかかる運動方程式に基づくシミュレーションは用いずに自然な樹木の揺れを生成する効率的な手法を用いる。3.2.1 節で  $1/f^\beta$  ノイズについて、3.2.2 節で枝揺れ、3.2.3 節で葉揺れについてそれぞれ説明する。

### 3.2.1 $1/f^\beta$ ノイズ

$1/f^\beta$  ノイズは、周波数領域上でのスペクトル密度 (振幅の二乗平均) が周波数  $f$  に対して  $1/f^\beta$  に比例する大きさを持つようなノイズである [23][24]。  $\beta$  の値は時間軸にそったノイズ値の相関を決定するものであり [23]、図 3-3 に示すように、  $\beta$  の値が小さいほど乱雑さが大きく、大きいほど乱雑さが小さくなる。このノイズは、風の吹き方、心臓の鼓動、音楽、さらには高速道路上の車の流れといった、様々な現象に見出すことができる [24]。自然な風の中に  $1/f^\beta$  ノイズが観察されることに注目し、風による樹木の揺れをその現象面から捉え、この  $1/f^\beta$  ノイズを効果的に利用することで、枝葉揺れのモデル化を行う。

$1/f^\beta$  ノイズ関数は、FFT 法を用いる方法 [23] により、時間軸にそった離散的な  $1/f^\beta$  ノイズ値を 1 次元配列中に格納しておくことで実現した。任意の時刻  $t$  におけるノイズ関数値は、その時刻  $t$  の近傍の配列中に格納されているノイズ値を補間することで求められる。これにより、時刻  $t$  の連続的な変化に対応する滑らかな枝葉の揺れを得ることが可能となる。また、FFT 法を用いた方法で生成されたノイズ値は周期性をもつ。この性質を利用し、配列の最後まで値を使用した後、配列の先頭へ戻り、繰り返し使用することが可能である。これにより、限られた配列の大きさでも、長時間の葉揺れを実現することが可能となる。図 3-3 に示すように、  $\beta$  の値を変化させることで、異なる揺れの効果を実現することが可能となる。また、上記の方法でノイズ値の配列を一つだけ用意し、時間軸を伸縮して波長を変えること、また、任意の開始位置を選び位相を変えることで、異なるノイズ関数を生成することが可能である。このノイズ関数に与えるパラメータによって、葉の揺らぎの複雑さや速度を目

的のシーンに合わせて自在に、かつ、自然な揺らぎになるよう制御することが可能である。

### 3.2.2 枝揺れ

$1/f^\beta$  ノイズを用いて枝の揺らぎを表現する手法は、まず、個々の枝ごとの揺れ幅を求める。これは 図 3-4 に示すように、枝の向きと直交する面上で  $x, y$  軸をとり、枝の下の節点を原点とした揺れ幅を両軸に対して与える。

最大揺れ幅を  $x, y$  軸方向で共通の値とし、 $1/f^\beta$  ノイズ関数も同じ  $\beta$  値のものを、波形を変えて適用する。 $x, y$  軸方向の揺れ幅を  $\theta_x(t), \theta_y(t)$ 、最大揺れ幅を  $W_B$ 、 $1/f^\beta$  ノイズ関数を  $N_x(t), N_y(t)$  とすると、以下のようになる。

$$\theta_x(t) = W_B N_x(t) \quad (3.1)$$

$$\theta_y(t) = W_B N_y(t) \quad (3.2)$$

これにより得られた個々の枝の揺れ幅を樹木の根から子の節点に向けて累積することで、樹木全体の枝揺れを求める。図 3-5 に示すように、樹木の根から子の節点に向けて、順次各枝の揺れ幅を加算していくことで、樹木全体の枝揺れを決定する。

これで、指向性のない風による枝揺れは表現できる。これに加えて、特定の意図した方向から吹く風を表現するために片手はりの板バネモデルに  $1/f^\beta$  ノイズを適用する。この手法はリアルタイム性を維持する。バネ定数  $k$  は、弾性係数  $E$  に依存している [1]。ここで  $E$  は樹種に固有の値であり、枝の長さや太さにはよらない。バネ定数は以下の式で決定される。

$$k = \frac{Ebs^3}{4l^3} \quad (3.3)$$

上式にある、板バネモデルの幅  $b$ 、太さ  $s$ 、スパン長  $l$  は枝の形状データから決定できる。これを用い、枝に荷重  $P$  をかけた場合のたわみ幅  $\delta$  を求める。

$$\delta_x(t) = \frac{P_x(t)}{k} \quad (3.4)$$

$$\delta_y(t) = \frac{P_y(t)}{k} \quad (3.5)$$

各枝に対して、図 3-4 に示す  $x, y$  軸方向それぞれについて、次式による荷重  $P_x(t), P_y(t)$  を与える。

$$P_x(t) = F_x(t) + P_B N_x(t) \quad (3.6)$$

$$P_y(t) = F_y(t) + P_B N_y(t) \quad (3.7)$$

$F_x(t), F_y(t)$  は指向性荷重を, また,  $P_B$  は最大荷重,  $N_x(t), N_y(t)$  は  $1/f^\beta$  ノイズ関数であり, 無指向性荷重を表す. 以上で求められた個々の枝のたわみ幅から, 揺れ幅の累積を求めることで樹木全体の枝揺れを求める (図 3-5).

### 3.2.3 葉揺れ

葉の揺れも枝の揺れと同様に, 個々の葉に対して  $1/f^\beta$  ノイズによる揺れを与える方法を採用する. これは, 実際の風による樹木の枝揺れは, 葉の大きさ, 形状, 葉柄の長さ, 太さ, 葉と葉柄の柔らかさ, そして, 風といった, 複雑な要素に加え, 膨大な数の葉を処理しなければならないため, この複雑な葉の揺れを効率的に表現する手法として提案されたものである. 葉の動きを縦横方向の揺れ (図 3-6) および葉柄軸周りの回転運動 (図 3-7) に分け, それぞれに対してノイズを使用して揺れ幅および回転幅を与える. 葉の形状モデル (図 3-2) で定義した  $x$  軸と  $y$  軸をそれぞれ横方向, 縦方向とし,  $z$  軸を中心とする回転方向それぞれの, 時刻  $t$  における揺れ幅  $\theta_x(t), \theta_y(t)$  および回転幅  $\theta_r(t)$  を次式で決定する.

$$\theta_x(t) = W_x N_x(t) \quad (3.8)$$

$$\theta_y(t) = W_y N_y(t) \quad (3.9)$$

$$\theta_r(t) = W_r N_r(t) \quad (3.10)$$

揺れ幅は角度で与えることとする. 上式において,  $W_x, W_y$  は最大揺れ幅,  $W_r$  は最大回転幅,  $N_x(t), N_y(t), N_r(t)$  は  $1/f^\beta$  ノイズ関数を表す. 最大揺れ幅は葉が揺れる範囲を決定し, 風力あるいは樹木の違いを表現するためのパラメータとなる. [1] では, 自然な揺れとするためには, 微風時の揺れを発生させるためには 2.5 ラジアン以下, 強風の場合には 3 ラジアン程度の値が適切であるとしている. 葉柄が柔らかい樹種では縦方向と横方向の揺れ幅を近い値にし, 葉柄が堅い樹種では縦揺れを小さく横揺れを大きくとることで, より自然な揺れが実現される.

回転幅に関して, これに, 葉が横方向に揺れる際には, それに伴う葉柄軸周りの回転を考慮して, ねじれ角を,  $xr$  連動係数  $a$  を用いて, 次式で定義する.

$$\theta_{rx}(t) = a\theta_x(t) \quad (3.11)$$

結果的に葉の回転角  $\theta_r$  は,

$$\theta_r(t) = \theta_{ry}(t) + \theta_{rx}(t) \quad (3.12)$$

とする。図 3-8 に回転のない横揺れと回転を伴う横揺れの例を示す。樹木全体の葉揺れは、個々の葉に対して位相の異なるノイズ関数を適用することで表現できる。これを枝揺れのデータとの整合性を考慮して枝に貼付けることで、樹木の葉揺れを表現する (図 3-5)。

### 3.2.4 強弱のある揺れの表現

アニメーションを作成する場合などには、時間の経過に伴う自然な風の間を模擬するように、樹木全体の動きに対して適切な強弱をつける必要がある。そこで、枝葉の最大揺れ幅および最大荷重を  $1/f^\beta$  ノイズにより自動的に遷移 ( $1/f^\beta$  ノイズ変調) させる手法を適用する。変調された最大揺れ幅  $W'(t)$ , 最大荷重  $P'(t)$  を以下に示す。

$$P'(t) = (1-m_B)P_B + m_B P_B N(t) \quad (3.13)$$

$$W'(t) = (1-m_L)W + m_L W N(t) \quad (3.14)$$

$W$  と  $P_B$  は基準となる最大揺れ幅, 最大荷重であり,  $N(t)$  は変調のための  $1/f^\beta$  ノイズである。また,  $m_B, m_L$  はノイズ変調適用率であり, 0 から 1 の値をとる。葉と枝で共通のノイズ関数を使用することで, 両者の揺れに同様の強弱が生まれる。これにより, 葉と枝の動きに統一感がとれ, 風が自然に吹いているような印象を与えることができる。式 (3.13), (3.14) に使用するノイズ関数は, 個々の枝や葉の揺れに使用するノイズ関数に比べて,  $\beta$  値の大きな, 乱雑さが少ないゆるやかなものを用いる。

ノイズ変調適用率  $m_B, m_L$  は, 全体に共通の揺れをどれだけ与えるかを定める係数である。実際にアニメーションを作成し, 実験を行ったところ  $m_B$  または  $m_L = 1$  とした場合には,  $N(t) = 0$  となるとき,  $W'(t)$  および  $P'(t)$  が 0, すなわち, 完全に揺れが停止する瞬間が生じてしまい, 不自然な印象を与えた。 $m_B, m_L$  値を 0.3 ~ 0.9 程度にした場合に揺れに自然な強弱がつくことが確認された。

### 3.3 ビジュアルシミュレーション例

本節ではこれまでに説明した樹木の形状と揺らぎアルゴリズムを実装し, パラメータの影響についての検討を行う。図 3-9 は風に指向性を与えた実行例である。式 (3.6), (3.7) による指向性の要素がより自然な揺らぎを表現している。

図 3-10 は風の強さの違いによる実行例である。図 3-10 (a) では, 枝の  $1/f^\beta$  ノイ

ズ関数  $N_x, N_y$  の  $\beta$  値は各 2.0, 最大荷重  $P_B$  は 0.0 である. 葉の  $1/f^\beta$  ノイズ関数  $N_x, N_y, N_r$  の  $\beta$  値に 1.9, 2.0, 2.0 を, 最大揺れ幅および回転幅  $W_x, W_y, W_r$  は 2.0, 0.2, 0.5,  $xr$  連動係数  $a$  は 0.0 を用いた. 強弱表現のための  $1/f^\beta$  ノイズ関数  $N$  の  $\beta$  値は 2.5 で,  $m_B, m_L$  はどちらも 0.0 である. (b) では, 枝の値は 1.9, 10.0, 葉には 1.5, 1.6, 1.3, 1.0, 0.8, 1.5, 2.0, 強弱表現には 2.5, 0.0, 0.3 の各値をそれぞれ用いた.

図 3-11 は弾性係数  $E$  の違いを示す. 式(3.3) で求められるバネ定数  $k$  が小さい場合では式 (3.4), (3.5) にあるように, 枝が簡単に曲がり, 樹木の動きが大きくなる. 図 3-12 は葉柄の堅さによる違いを示す. 図 3-13 は拡大したシーンのスクリーンショットである. 図 3-14 は大きな樹木モデルに揺らぎを適用した例である. 枝の値は 2.0, 15.0, 葉には 2.0, 2.0, 2.0, 2.0, 1.0, 0.5, 強弱表現には 2.5, 0.2, 0.8 の各値をそれぞれ用いた.

### 3.4 効果音の生成

この CG システムはさらに樹木のモデルデータや風速データによりリアルタイムで効果音を生成する方法が提案され, 拡張されている[25]. 本研究で開発する風センサを実装すると実世界の風にあわせて樹木が揺らぐだけでなく, それに同期した効果音も生成されることになる.

### 3.5 まとめ

本章では風センサで得た風速データを与え, 実際に動作を確認するために実装する対象の CG システムについて述べた. 風センサから得られた風速データに応答させるためには樹木の揺らぎをリアルタイムで表現する必要があり, そのために  $1/f^\beta$  ノイズを用いた表現を採用し, 適用例を示した.

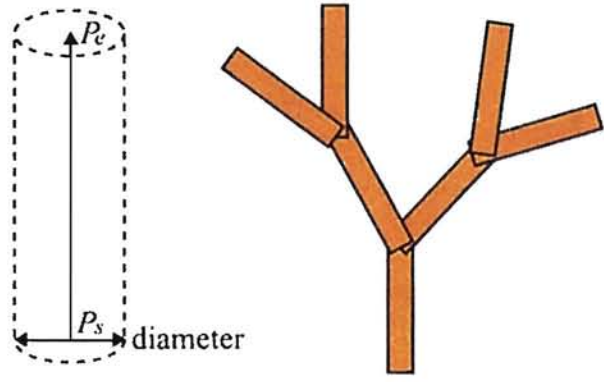


図 3-1 樹木の枝モデル

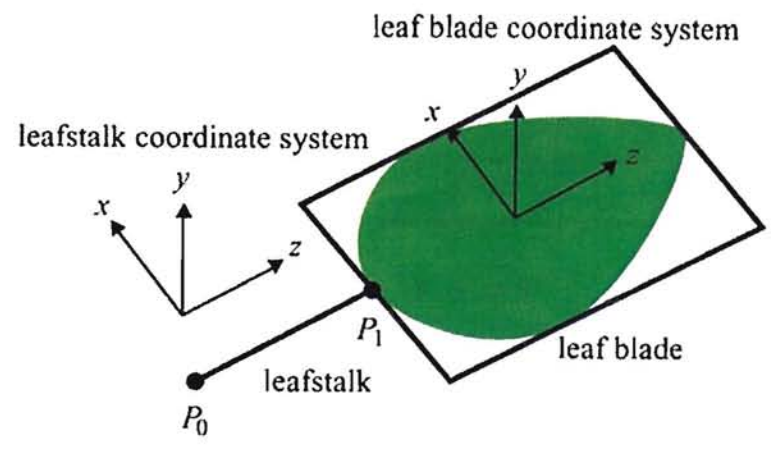


図 3-2 葉の形状モデル  
葉柄座標系と葉身座標系

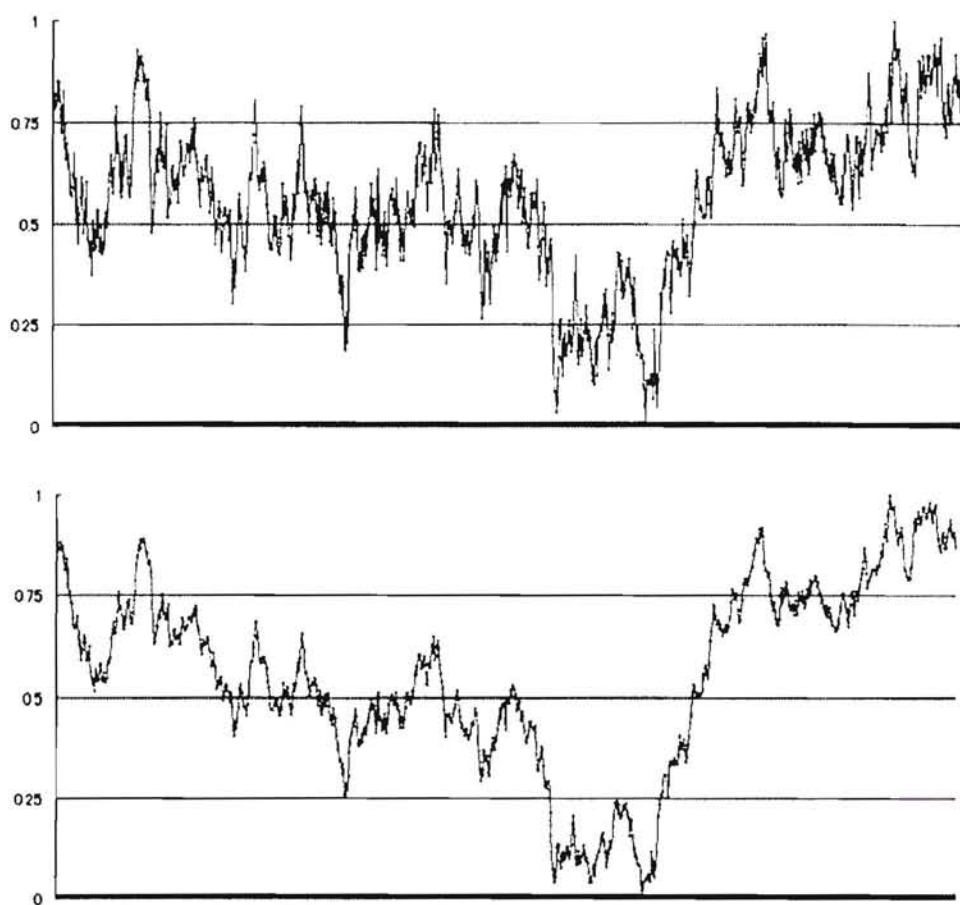


図 3-3  $1/f^\beta$  ノイズ  
上:  $\beta = 1.5$ , 下:  $\beta = 2.0$

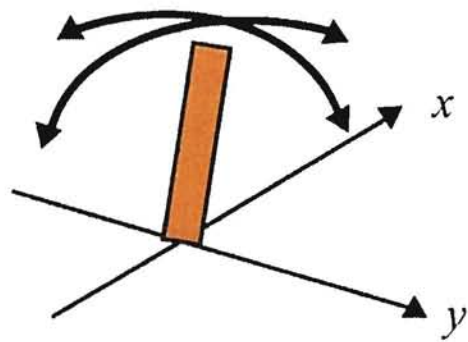


図 3-4 枝の  $x, y$  軸方向の揺れ

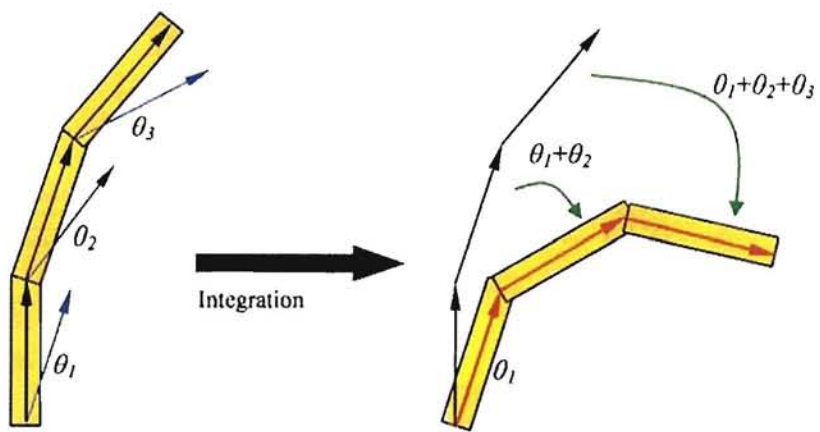


図 3-5 揺れ幅の累積



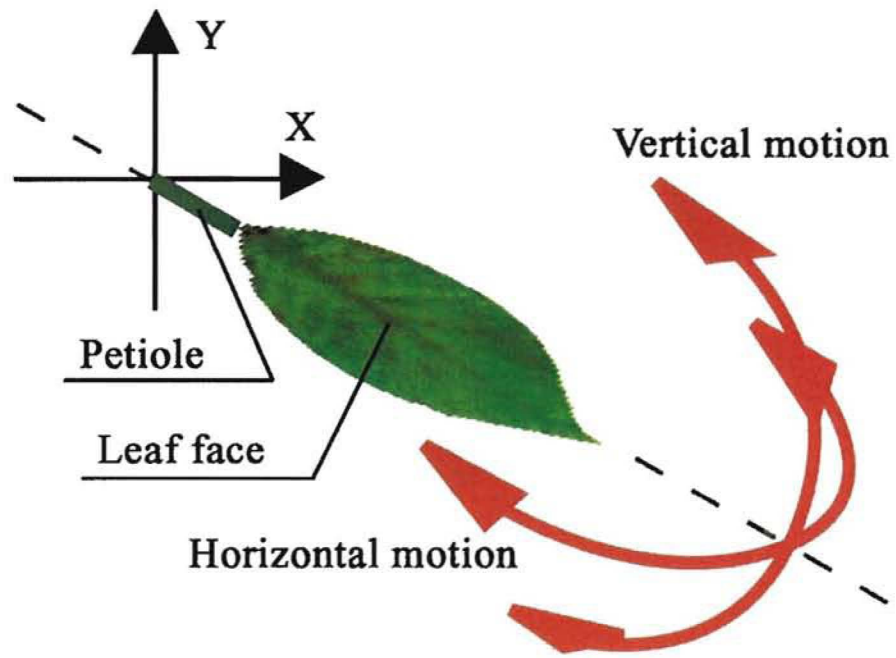


図 3-6 葉の縦横方向の揺れ

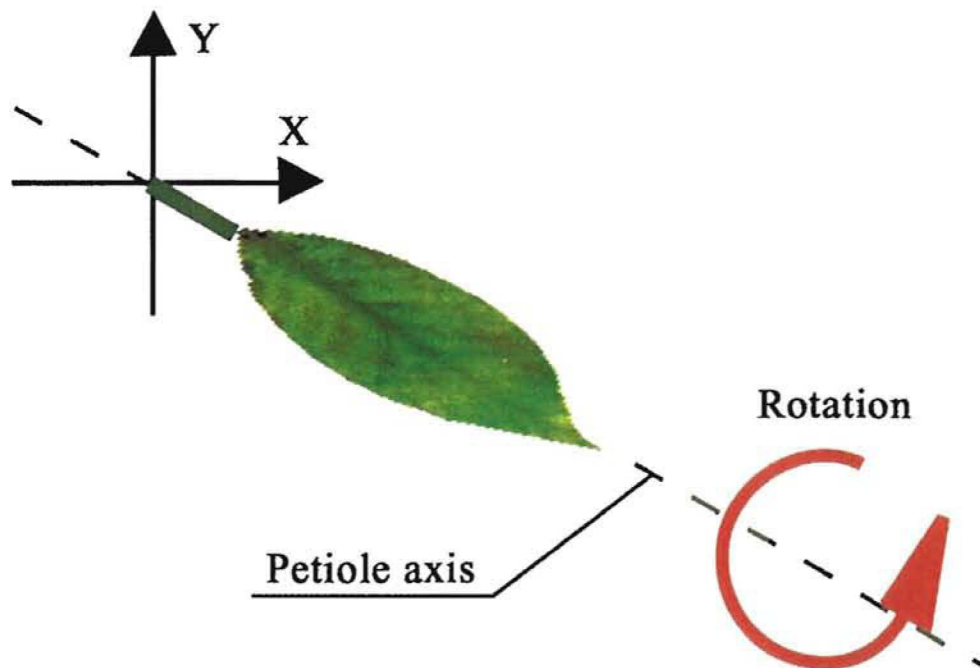


図 3-7 葉柄軸周りの回転

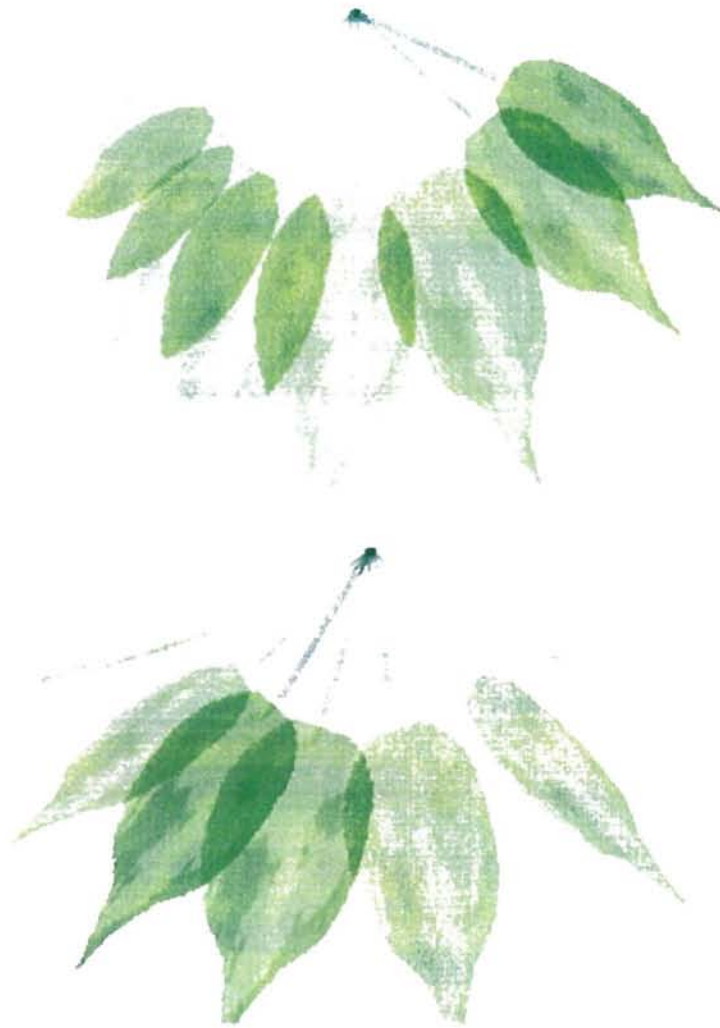


図 3-8 回転のない横揺れと回転を伴う横揺れ

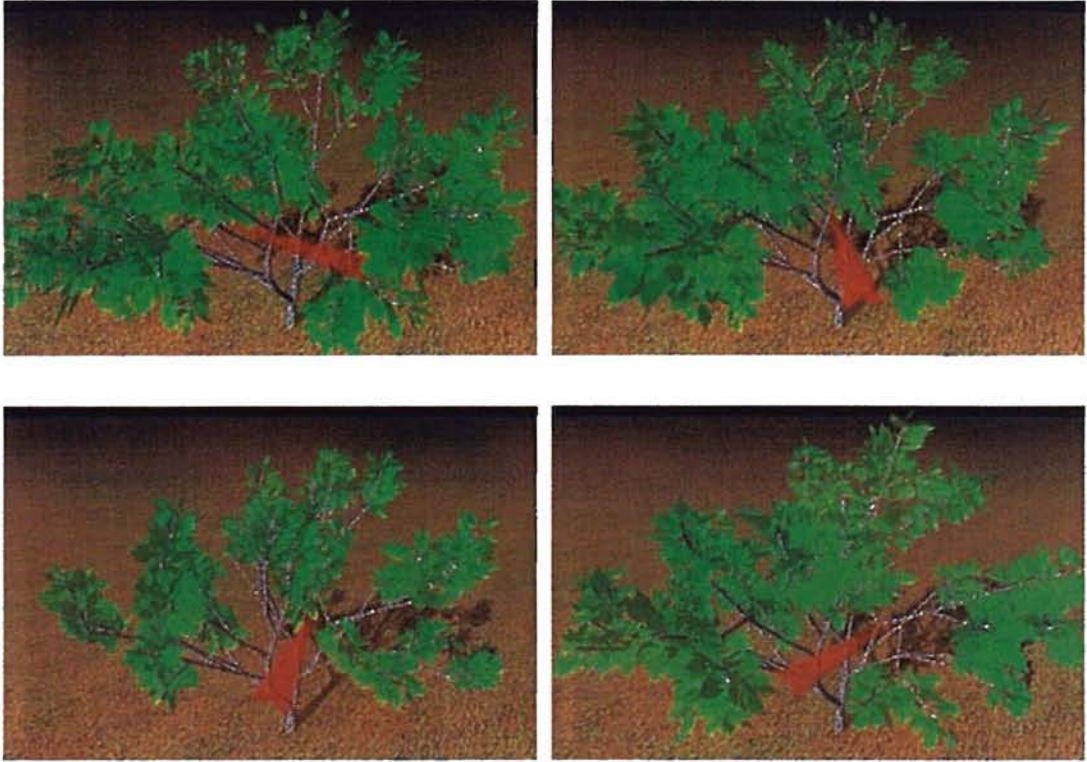


図 3-9 指向性のある風  
赤い矢印は風の持つ指向性を示す。



図 3-10 風の強さの違いによる表現

(a): そよ風, (b): 強風

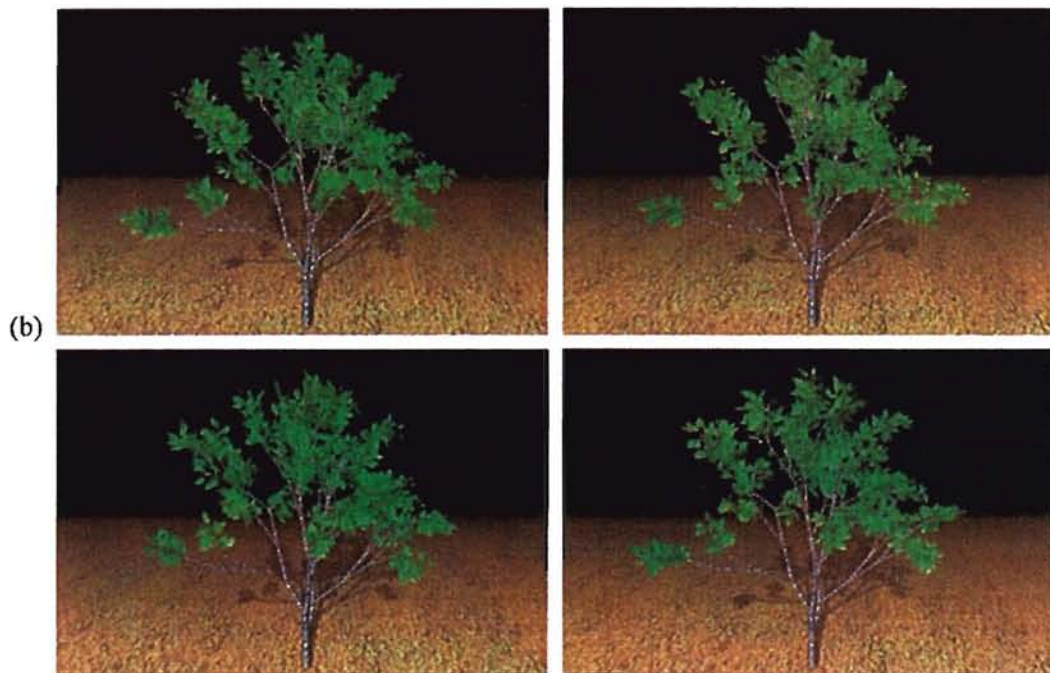
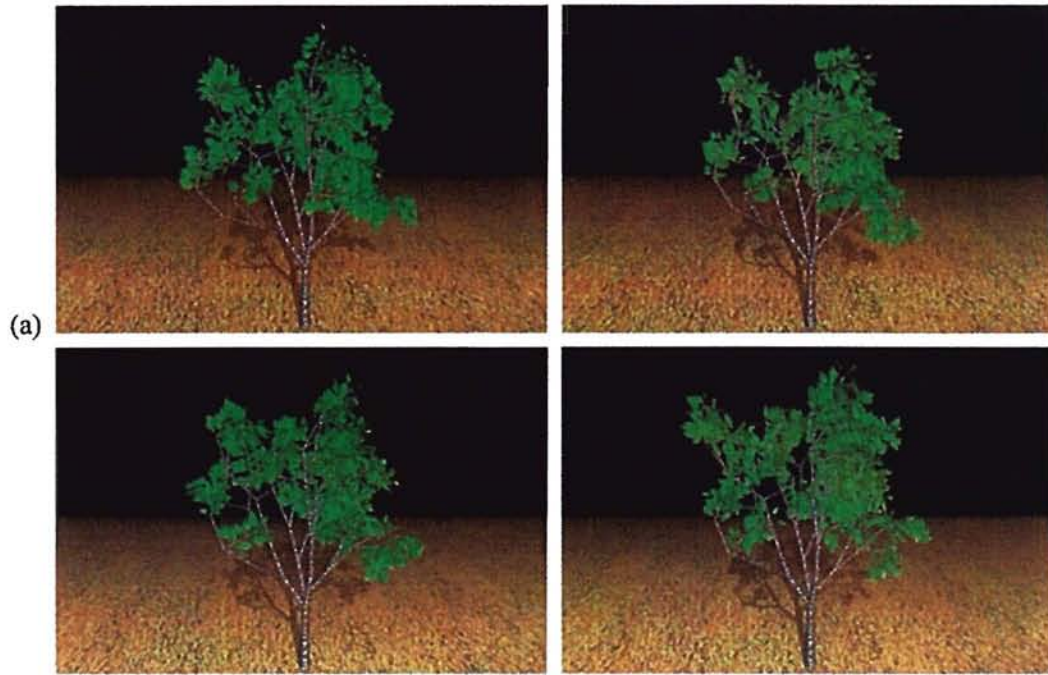


図 3-11 弾性係数の違い

(a):  $E$  値が小さい, (b):  $E$  値が大きい.

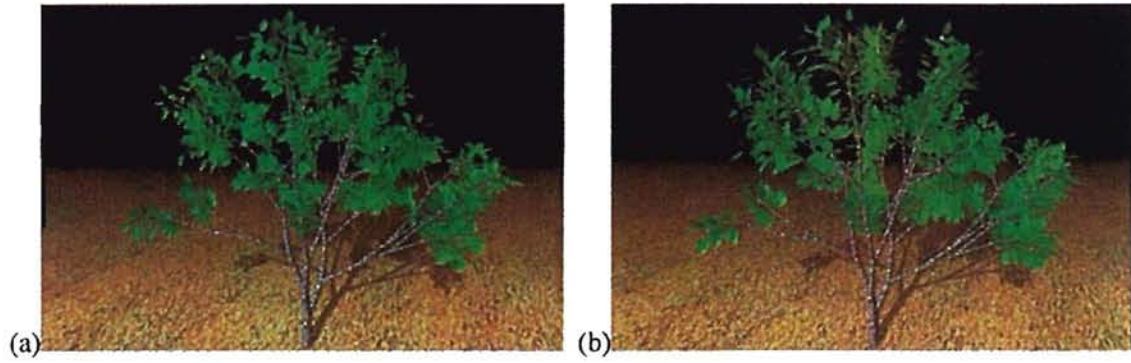


図 3-12 葉柄の堅さの違い

(a): 柔らかい, (b): 固い

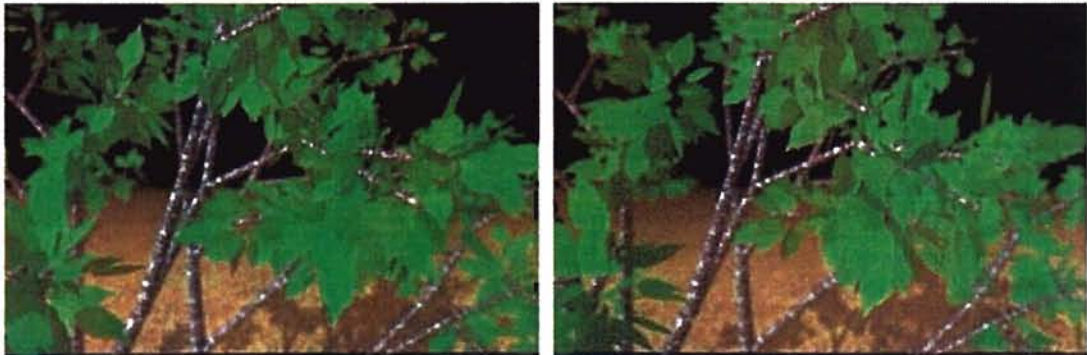


図 3-13 拡大したシーンのスクリーンショット



図 3-14 大きな樹木モデルに適用した例

## 4. CG システムへの実装

### 4.1 風速センサの実装

第3章で解説したCGシステムに風速センサを実装する。式(3.13)および(3.14)において、 $1/f^\beta$  ノイズにより枝葉の最大揺れ幅および最大荷重を遷移させ、樹木全体の動きに対して強弱をつけている。したがって、ここで  $1/f^\beta$  ノイズ の代わりに実世界の風速を与えることにより、樹木全体が実世界の風に同期して揺らぐことになる。式(3.13), (3.14) の  $1/f^\beta$  ノイズを、風センサによる風速の観測値  $S_{wind}$  に置き換えると、次式が得られる。

$$P'(t) = (1-m_B)P_B + m_B P_B S_{wind} \quad (4.1)$$

$$W'(t) = (1-m_L)W + m_L W S_{wind} \quad (4.2)$$

本研究では効果の分かりやすさを優先し、アニメーションシステムの枝葉の揺らぎ運動と与える風速の関係の妥当性については十分な検討は行っていない。風速値をそのまま与えているため、0~1の間で変化する  $1/f^\beta$  ノイズによる揺れに比べ、大きな揺れとなる。実験に使用した通常の扇風機で得られる風速は3~4m/sであり、この値をそのまま与えた。本CGシステムは物理シミュレーションによるものでなく、風速の単位について言及されていないので正確な値を求めることはできないが、3~4m/sの風に対するCG画像の樹木の揺れは、視覚的には数倍から10倍程度大きいように見える。

### 4.2 平滑化と遅延

風雑音は44.1KHzでサンプリングされ、100msごとに得られる4410サンプル中の、4096サンプルに対して窓関数処理およびFFT処理を施して風速値に変換される。従って風速値は100msごとに求められる。この風速値を単純にシステムに与えると、周期の速い変動を多く含むため、樹木の大きさに対して揺れの大きさが激しく変動し自然な揺れとならない。

風速値の変動を平滑化するため、測定値の移動平均をとり、風速として与える。移動平均により平滑化されるとともに遅延が生じるが、モデル対象の樹木のサイズや種類に応じて移動平均のステップ数を調整することで樹木の自然な揺れを再現することが可能となる。本研究ではステップ数を50とした。これにより風が停止してか



ら樹木の揺らぎが停止するまで5秒の遅延を持つことになる。この遅延は枝の重量感、すなわち、枝の質量に応じた慣性により、枝の揺れ始めや揺れ終わりが、なだらかに変化する様子の表現に効果がある。

### 4.3 音声の分離

風センサは4kHzまでの帯域を監視するので、このままでは周囲の音声などを風と認識して風速を出力してしまう。例えば、風センサ近傍での会話などに反応して枝が揺れてしまう。そこで音声の分離を試みる。センサの超低周波数成分は、通常の空間では発生していない。相当に大きい音量の音源がマイクロホン近傍にあっても、この帯域に出力は現れない。したがって通常は超低周波成分のみを監視し、その強度からおおまかな風速を推定し、それにあわせて必要な周波数までの帯域を取り出して風速を求めればよい(図4-2, 表4-1)。本研究では超低周波成分のみから求めた風速の概算値とローパスフィルタの遮断周波数を表4-1に示すように設定した。遮断周波数や、風速のステップ数は、必要な帯域を遮断することがない程度に設定すればよく、厳密な計算に基づく必要はない。

これにより音声には応答せず、風にのみ応答するセンサが完成する。処理フローを図4-3に示す。実際の割り込み処理はOSのタイマの安定度等を考慮し、半分の50ms周期でオーディオ入力バッファをローカルのバッファにコピーし、必要なサンプル数のデータがそろそろ度風速を計算している。

### 4.4 評価

風センサとなるマイクロホンを、CGを表示するディスプレイのフレームに取り付け、扇風機などで風を当てる実験を行った(図4-1)。4.1節で述べたように、樹木の揺れは数倍~10倍程度に誇張された表示となる。扇風機により発生する風の強さは、たかだか3m/s程度であるので、この倍率により樹木に十分な揺らぎを起こすことができる。風を当てるとリアルタイムでCGの樹木が揺らぎ、風の強弱が変化するタイミングと揺れの対応も自然な印象でのアニメーションが得られた。

本システムをイベント会場等に展示し、不特定多数の被験者に使用させた。その際、センサの存在にはふれずに、単に団扇で画面をあおぐように説明した。センサは直径10mmにも満たない小型マイクロホンであり、被験者はそれにほとんど気づくこと

がなく、あたかも画面に風を当てると CG の樹木がゆれているように見える。通常、PC の画面と実世界の間には明確な境界が存在し、両者を結ぶものはキーボードやマウスといったユーザインタフェースに限られる。本システムは、あたかも実世界と PC の画面がシームレスであるように見えるという、意外性がある。驚きと共に非常に好意的な評価が得られた。この評価から風速と樹木の揺れの大きさの対応が正確であることより、揺らぎ始め、揺らぎ終わりといった、変化を認知しやすい部分の表示の自然さが重要であることがわかる。

#### 4.5 騒音が風速に与える影響

本センサは無風時の騒音はほぼ完全に遮断できるが、騒音のある環境下で風を受けた場合、騒音のエネルギーが風雑音に加えられ、実際の風速より大きな値を出力することになる。4kHz 以上の騒音に対しては、ローパスフィルタにより常時遮断されるが、それ以下の周波数は影響を及ぼす。ここでは、騒音が風速にどれだけの影響を及ぼすか議論する。まず、ある風速における風雑音と等価となる騒音を測定により求めた。騒音源にはスピーカから白色雑音を発生したものをを用いた (図 4-4)。その結果、70dB(A) の騒音が 1m/s の風による風雑音に相当するという結果が得られた。

風速と等価なエネルギーを持つ騒音がマイクに与えられた場合、騒音が無い場合に比べてマイクが出力するエネルギーは 2 倍になるが、これは出力が 3dB 大きくなることになる。風速の誤差として考えると、風速が 2 倍になるごとに風雑音が 15dB 増加することから、 $2^{3/15} \approx 1.15$  となり、15%程度過大な風速値を出力すると見込まれる。実際に風速 1m/s において、70dB(A) の騒音下と静寂な環境下での風速値を比較したところ、騒音下での値が 10%から 15% 大きく、計算値とほぼ一致した。この程度の誤差であれば、CG システムへの応用としては表示が著しく不自然になるほどのものではない。

15% の誤差を生じさせる騒音は当然、観測している風速によって変化し、図 4-5 のようになると考えられる。このことから 風速 0.5m/s 以上の領域において、静かな事務室程度の環境 (50dB(A))であれば必要な精度が得られる。図 4-5 の直線より上の領域は、風雑音より騒音のエネルギーが大きいことを意味し、誤差は急激に増大し、風センサとしての機能は失われる。

#### 4.6 まとめ

通常入手可能な小型で安価なマイクロホンにより風速を求め、マイクロホンベースの風速センサを開発し、実世界の風に対応して動作するアニメーションシステムを開発することができた。このセンサは通常環境では周囲の音声には応答せず、風のみ応答する。

被験者に対し実際に使用させたところ好意的な反応が得られた。

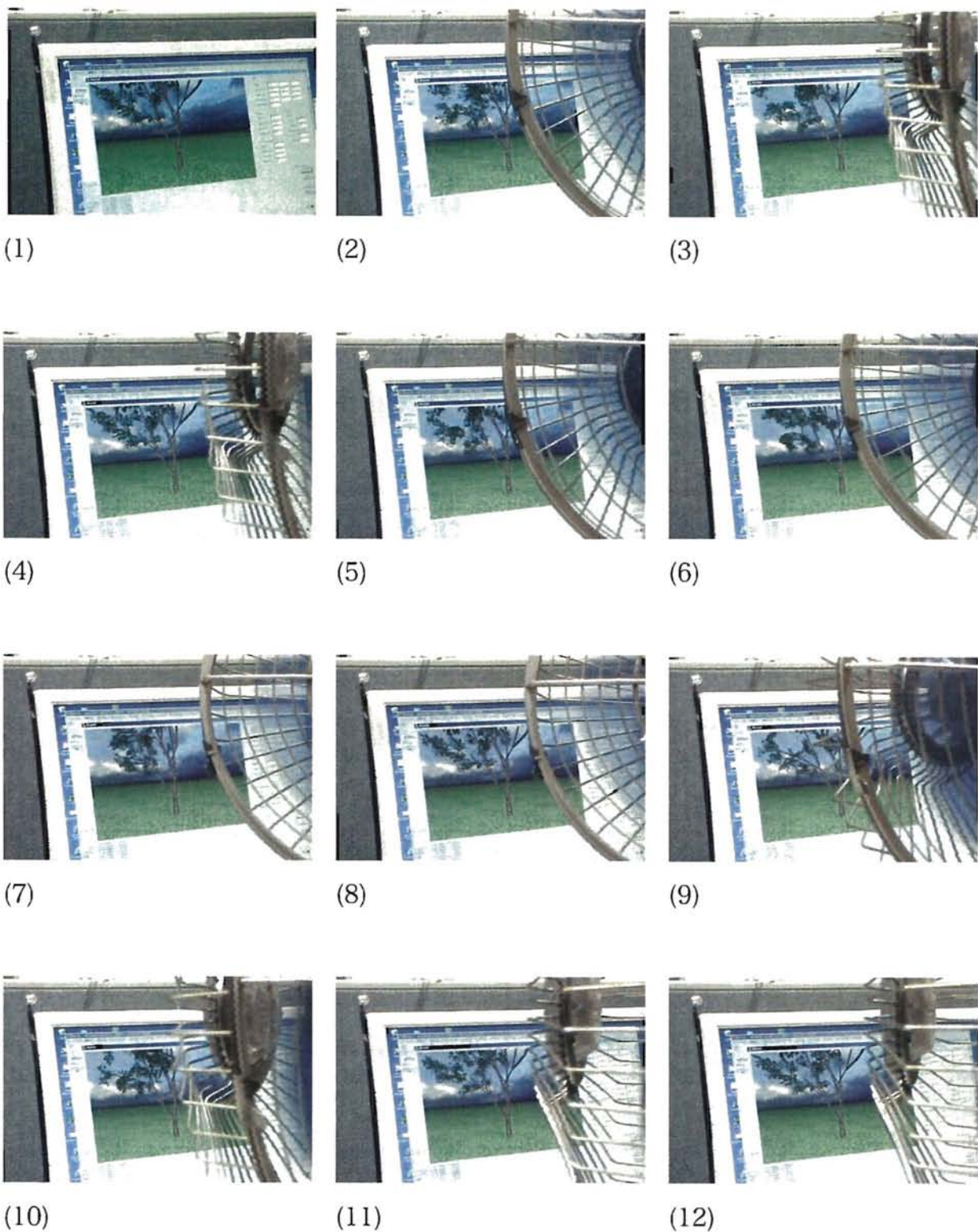


図 4-1 実世界の風に应答する CG システム

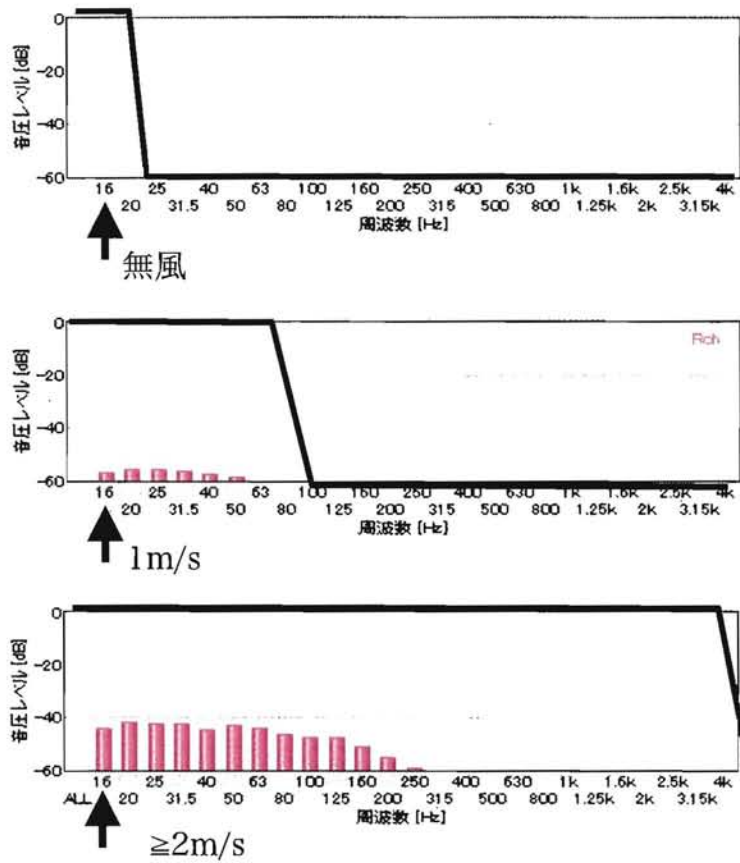


図 4-2 音声を分離するためのフィルタリング例

表 4-1 風速に応じた遮断周波数

風速の概算値 (m/s)	遮断周波数 (Hz)
<0.1	10
0.1~0.2	100
0.2~0.3	250
0.3~0.4	500
≥0.4	4k

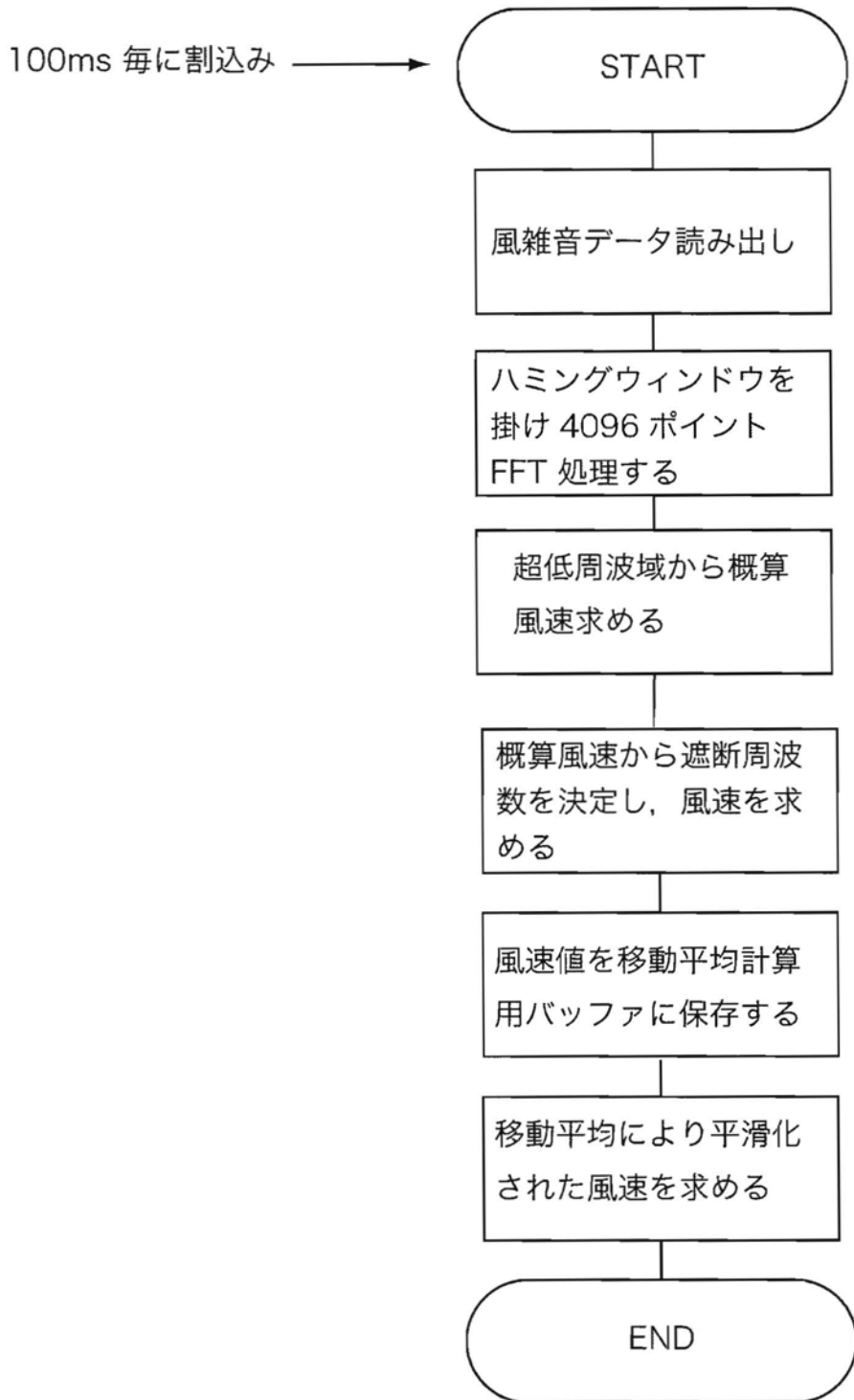


図 4-3 風速測定処理フロー

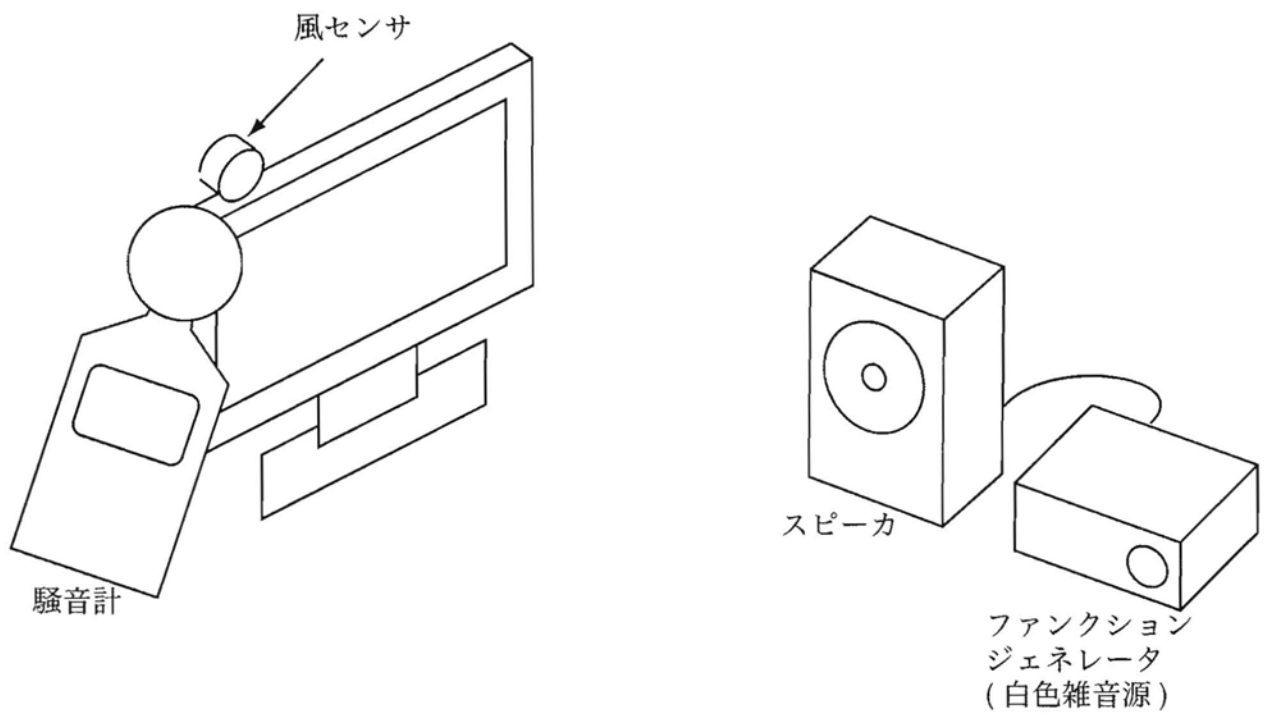


図 4-4 騒音源と騒音計の配置

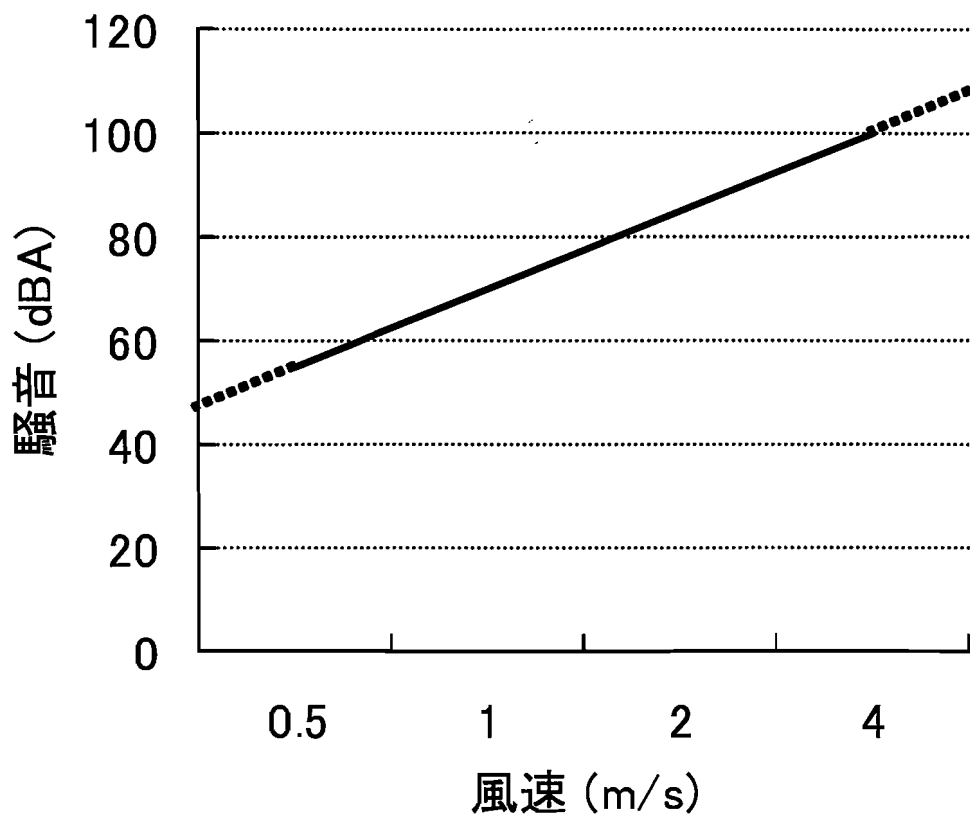


図 4-5 風センサの実用域 (直線の下側)



## 5. 風向・風速センサへの拡張

### 5.1 ウィンドスクリーン

マイクロホンが指向性を持っていれば、風向を求める可能性が期待できる。しかし、本研究で使用しているものも含め、小型マイクロホンの多くは無指向性マイクロホンである。また単一指向性などの指向性を有するマイクロホンでも周波数が低くなるに従い指向性が失われて行くのが一般的である。さらに本研究でマイクロホンが検出しているのは本来の音声ではないため、マイクロホン自体の指向性を利用するのは困難である。

そこで本研究ではマイクロホンに特殊な形状のウィンドスクリーンを装着したものを複数個配置し風向を求めることを試みた。ウレタンフォームを加工し、図 5-1 に示す形状のウィンドスクリーンを装着した。通常音声収録に使用されるウィンドスクリーンはあらゆる方向の風を防ぐものであるが、本研究は正面からの風に対してはマイクロホンに直接当たる必要がある。

本研究で作成したプロトタイプはウィンドスクリーンの加工を 1 個ずつ手作業で行ったため、形状が安定していない。それにより各マイクロホンの指向特性には差異が生じる。図 5-5 に各マイクロホンの指向特性を示す。

### 5.2 マイクロホンの配置

仮に前節で述べたマイクロホンを 30 度間隔で 12 個配置すれば、単純に最も雑音出力の大きいマイクロホンを調べるだけで 30 度の分解能で風向を求められる。しかしこれはハードウェアの規模やコストの面から現実的でない。本研究で製作したウィンドスクリーンにより得られた指向特性は図 5-5 に示す通り、正面から 90 度外れるところまでは強い指向性を持ち、風向の識別に利用できると見られるが、それより大きな角度、すなわち、後方からの風に対してはそれ以上の風雑音の低減が見られず方向の判別が不可能と見られる。そのため、本研究ではマイクロホンを 4 個、90 度間隔で配置することで、各々のマイクロホンでは正面から 90 度までの範囲の風向検出を受け持たせる (図 5-2)。今後の説明のため、マイクロホンには正面から反時計回りに MIC 0 から MIC 3 と番号をつける。

### 5.3 オーディオインタフェース

4 個のマイクロホンを使用するため、4 チャンネル以上の入力を持つオーディオインタフェースが必要である。PC の内蔵ハードウェア等では 2 チャンネルを超える入力を持つものは少ないが、マルチトラックレコーディング (MTR) あるいはデジタルオーディオワークステーション (DAW) と呼ばれる用途に向けた、多チャンネル入力を備えたインタフェースが商業的に生産・販売されており、入手可能である。4 個のマイクロホンは 2.2 節で述べた、超低周波特性を改善するように改造したプリアンプを通して接続される。本研究で使用したオーディオインタフェースを 図 5-3 に示す。

### 5.4 マイクロホンの校正

マイクロホンは個体ごとに感度が 3dB 程度のばらつきを持つ。選別により感度を揃えたり、あらかじめ選別したものを組み合わせた、ペアマイクとして生産されているものを入手する方法もあるが、いずれもコストが高つく。本研究ではあらかじめこの差を測定し、ソフトウェアにより補正する。各マイクロホンに正面から風を当て、約 1 分間のノイズレベルの平均値を求め、感度が最も低いマイクロホンにそろえるように校正係数を決定する (表 5-1, 図 5-4)。

### 5.5 風向による風雑音出力の変化

風向がマイクロホンに対し正面からずれるに従い雑音出力が小さくなる。4 個のマイクロホンを使用するので正面から 90 度までの範囲の雑音出力の変化を利用する。自然のシミュレーションを対象とする CG システムでは高い精度は必要としないので、正面から風を受けたときと 90 度方向から風を受けたときの 2 点における雑音出力を求め、その間は線形補間により角度を求めることとした。雑音出力はマイクロホンのキャリブレーションと同様に、約 1 分間の測定値の平均を採用する (図 5-5)。5.2 節で述べたように、90 度より大きい角度、すなわち後方からの風を受けたときの雑音出力はあまり変化しておらず、むしろ 180 度方向からの雑音の方がわずかに大きくなっているマイクロホンもある。このことから 90 度より大きい角度ではこれ以上雑音出力が低下せず、角度の判別に利用できないと考えられる。

なお、ウィンドスクリーンの形状にばらつきにより、正面と 90 度方向における雑音出力の比率がマイクロホンごとに異なったり、+90 度方向と -90 度方向で雑音出

力が異なったりする。本研究ではすべてのマイクロホンの指向特性が同じであると仮定し、MIC 0 の正面・90 度比率を代表値として用いる(表 5-2)。専門加工業者などにより安定した形状のウィンドスクリーンが製作されれば、精度を向上させることが可能である。

これらの測定データをもとに、以下のように風向を求める。正面から風を受けているときは正面と隣接するマイクロホンの間で観測データの通りの比で雑音出力があり、正面から外れるに従い比は小さくなり 45 度において隣接するマイクロホンとの出力は等しくなる。この間の変化を線形補間すれば良いので式 (2) により正面からのずれ *Offset* を求めることができる。

$$Offset = (N_s / N_f - R) / (1 - R) \times 45 \quad (5.1)$$

$N_f$  は最も出力の大きい、すなわち風に対して最も正面に近いマイクロホン  $f$  ( $f=0\sim3$ ) の雑音出力、 $N_s$  はマイクロホン  $f$  に隣り合うマイクロホン  $s$  ( $s = \text{mod}(f+1, 4)$  または  $s = \text{mod}(f+3, 4)$ ) のうちの雑音出力の大きい方、 $R$  は測定データから求めた 90 度/正面比で、本研究では 0.34 を採用した。ウィンドスクリーンの形状の問題等により、 $V_s/V_f < R$  となる可能性があるが、その場合は  $R=0$  とみなし  $Offset = 0$  とする。

角度がわかれば、 $N_f$  から MIC  $f$  が正面から受けた場合の雑音出力が計算できるので、これにより風速も求められる。

## 5.6 実装

以上の機能を CG システムに実装する。風向・風速センサシステムは 100ms 毎に風速を求めるため、50ms ごとのタイマ割り込みによって起動され、オーディオ入力バッファのデータをチェックする。CG システム内ではその他に、樹木の揺らぎ画像の更新と、効果音生成の 2 つのプロセスがタイマ割り込みにより起動される。システム図を図 5-9 に示す。

## 5.7 “飛び” の除去

風向を求めるソフトウェアを CG システムに実装し、生成される CG 画像を観察した。対象となる CG システムが樹木であるため、風向の精度が低い点については、表示されるアニメーションからは問題として認識されなかった。しかし、時折きわめて短時間に大きな風向値の変動 (飛び) が発生した。これはビデオをカット編集した

ような不自然な画像として現れる。この飛びの原因は、風雑音が図 5-5 に示すような変動を持っていることに由来する。雑音出力は各マイクロホン毎に異なる周期や位相で変動しているため、風向データにも変動が生じ、それが急激で大きいものになる可能性がある。また、風向が変化し、2 つのマイクロホンの中間に相当する角度付近になると、最も正面に近いと判断されるマイクロホンが、頻繁に変更されるので、マイクロホンの指向特性のばらつきなどにより、変動を大きくすると考えられる。

この不自然さを取り除くため、1 サンプルごとの差分の絶対値の上限をしきい値  $th$  として定める。差分が  $th$  を超えた場合は観測された風速を、1 時刻前の値に  $th$  を加えた (または減じた) で置き換えることにする。

この処理により、急激な変動が現れた場合は、観測値に一致するまで一定の勾配でゆっくりと変化するが、それ以外の場合は観測値をそのまま風向値として CG システムに与えるようになる。

本研究では  $th = 3.0$  度を採用した。風向は 1/10 秒ごとに求めるので、これにより風向の変化は 30 度/秒 以下に制限される (図 5-8)。この値で画像の不自然な点は現れなくなった。 $th$  の値は実装対象の CG システムの特性により調整することが可能である。

本手法を実装し、風をセンサの各方向から当て、得られた測定値を図 5-6 に示す。なお送風機を固定し、センサの方を約 1 分ごとに 45 度ずつ回転させて測定したものである。45 度回転させるときには 10 秒程度かけて徐々に角度が変化するようにした。本システムでは風向データは 0 から 360 の値で得られるが、グラフが見やすいように測定開始時付近において 270 度以上の値になった場合 360 を引いて風向を負の値で表示してある。“飛び” が除去される様子を示すため、特に飛びが多く発生している部分を拡大し、図 5-7 に示す。

なお、非常に弱い風を受けている状態において、このセンサは周囲の騒音などにより、風向として意味をなさない不安定な値が出力させる。これは同様に樹木の揺らぎに飛びを生じさせるが、この処理により同様に取り除かれる。

## 5.8 まとめ

“飛び” の除去を実現したシステムに、実際に風を当てて動作させている様子を図 5-10 に示す。樹木の性質上、明確に風向を示すわけではないので効果が分かりにく

い点もあるが、送風機の風を当てる方向に合わせて枝が揺れている。風向が徐々に変化する場合も自然に追従した画像が生成される。

現時点での精度は充分とは言えない。特に MIC 3 の指向特性が特異的であり、+ (MIC 0) 側へ 90 度ずれてもほとんど雑音出力に変化が見られないため、270 度から 360 度 (= 0 度) 付近の測定値は誤差が大きい。この問題は、ウィンドスクリーンの形状が安定することで改善されるとみられる。

5.6 で述べたように樹木の揺らぎの画像更新と効果音生成に加え、本研究で風向・風速センサの処理をスレッドとして追加した。しかし、リアルタイム性は失われておらず、Pentium4 - 3.3GHz / RAM 2GB 程度のシステムでも、問題なくリアルタイム動作している。

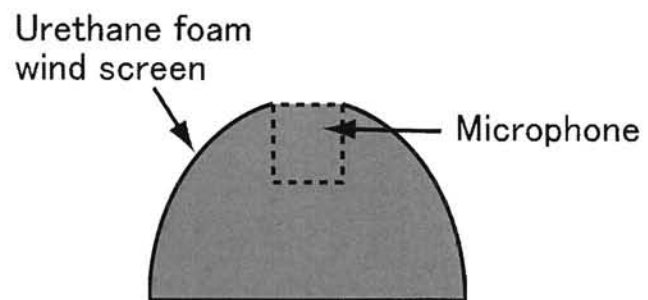


図 5-1 ウィンドスクリーンの構造



図 5-2 4個のマイクロホンの配置



図 5-3 多チャンネル入力オーディオインタフェース

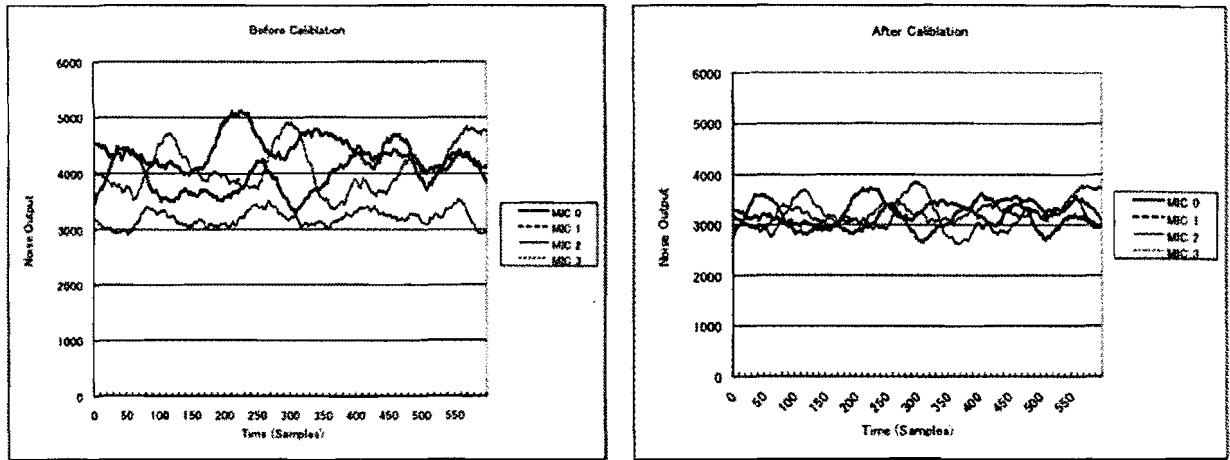


図 5-4 マイクロホンの個体差と校正

表 5-1 マイクロホンの感度偏差

	出力平均値	相対感度比	補正係数
MIC 0	3968.375	0.903	0.805
MIC 1	4395.425	1.000	0.727
MIC 2	3195.800	0.727	1.000
MIC 3	4085.786	0.930	0.782



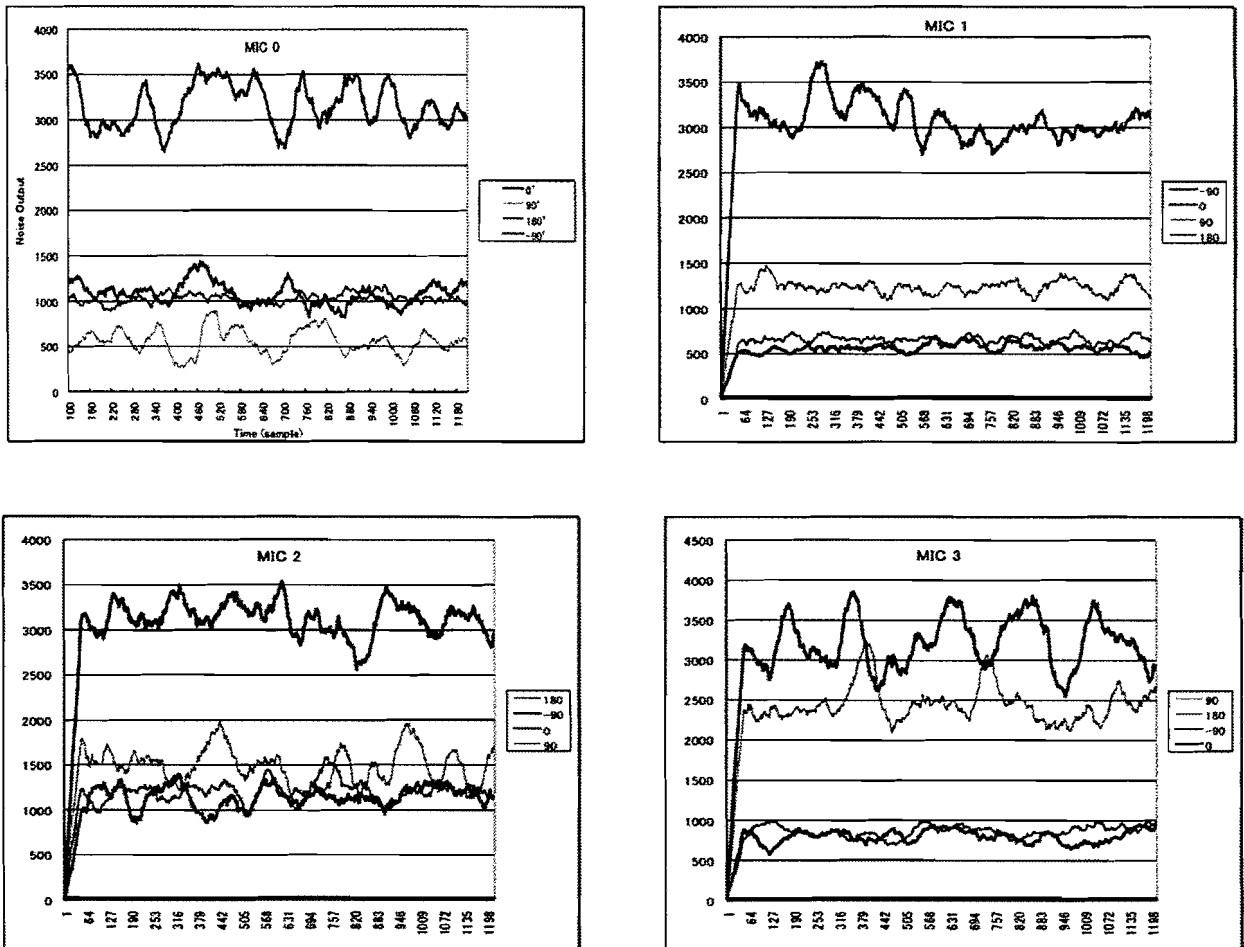


図 5-5 指向特性

表 5-2 MIC0 の指向特性

direction (degree)	-90	0	90
Level	1082.605	3156.998	556.041
Rathio	0.343	1.000	0.176

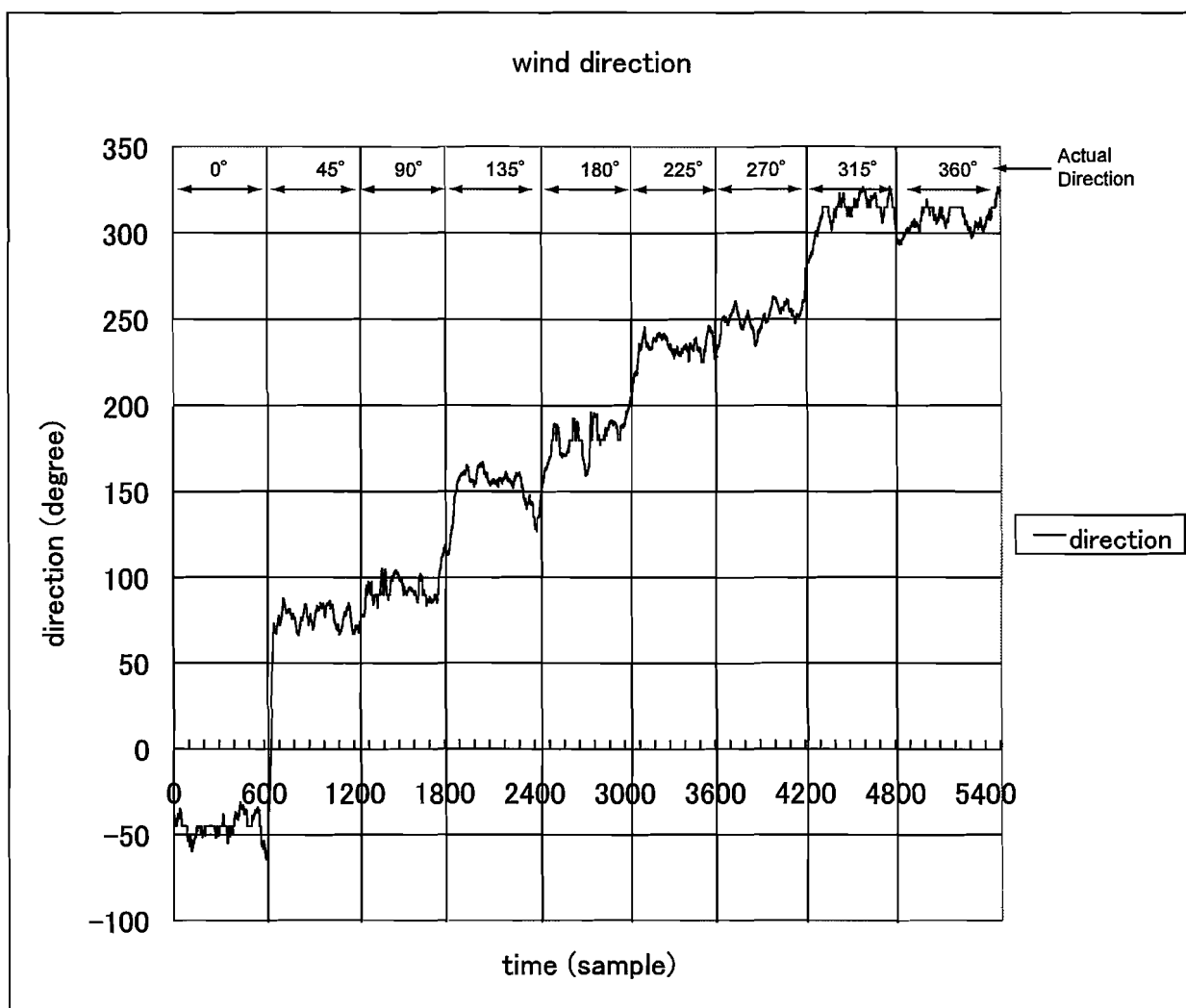


図 5-6 風向の検出結果

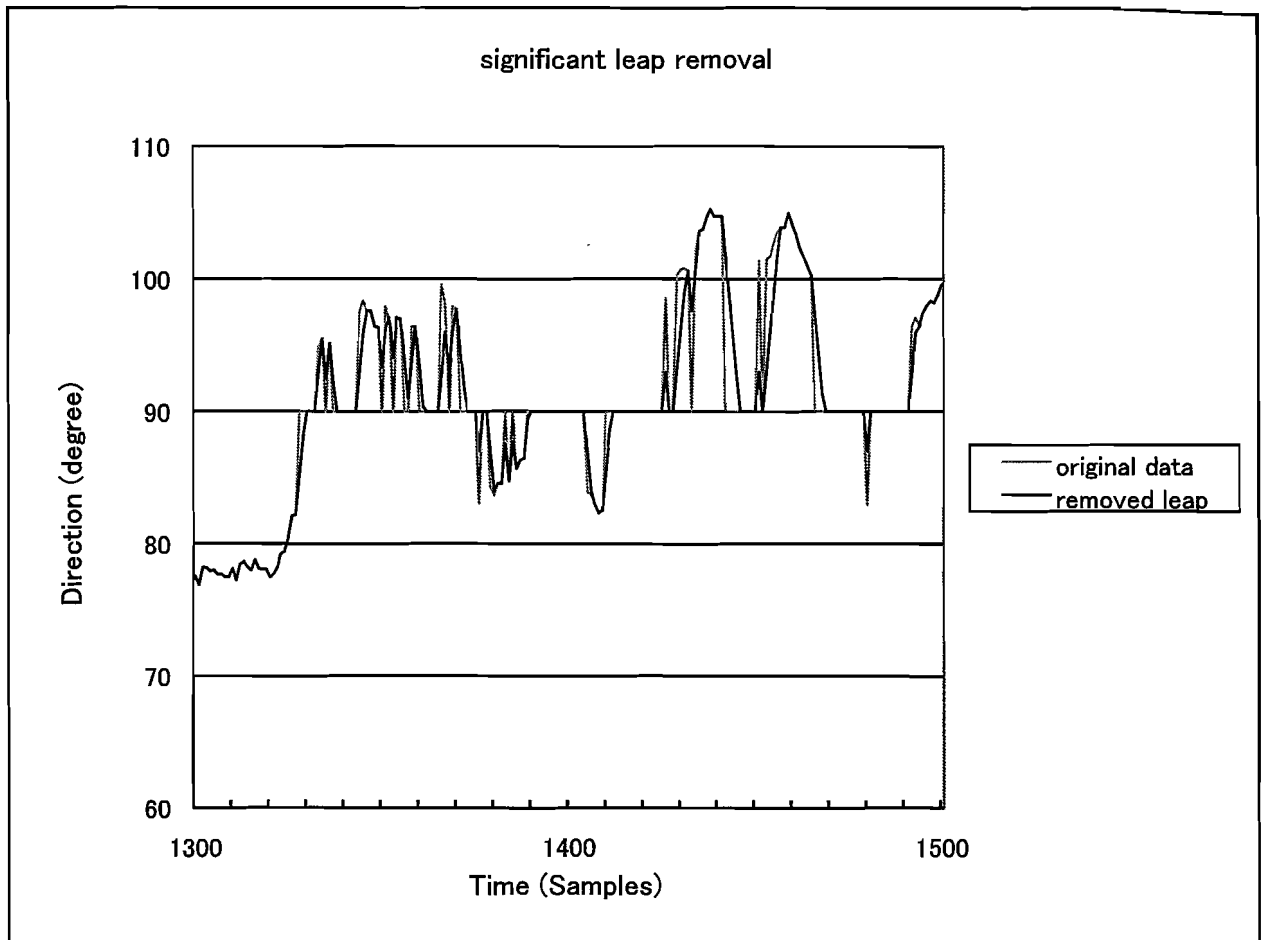


図 5-7 飛びの除去

```
if ( $|\Delta d| > th$ )  
     $d_t = d_{t-1} + th \times (\Delta d / |\Delta d|)$ ;  
else  
     $d_t = m$ ;
```

$m$ : 雑音出力から計算された風向

$d_t$ : 現在の風向

$\Delta d = m - d_{t-1}$

$th$ : 変動幅の上限

図 5-8 飛び除去アルゴリズム

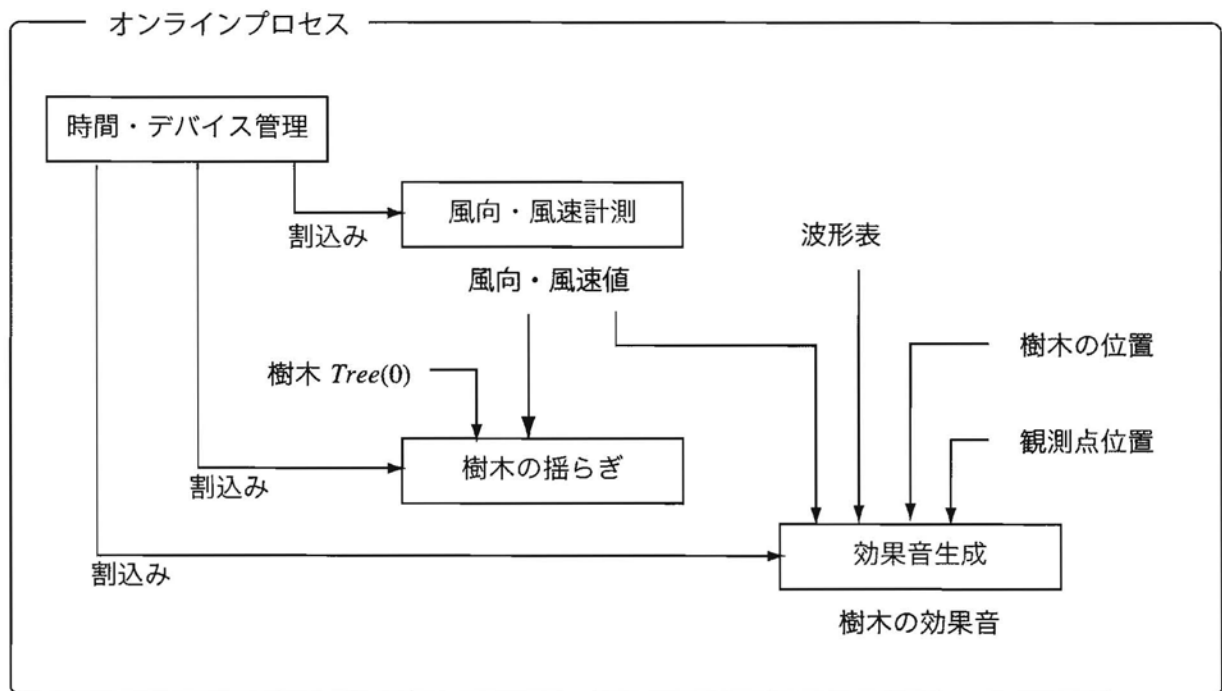
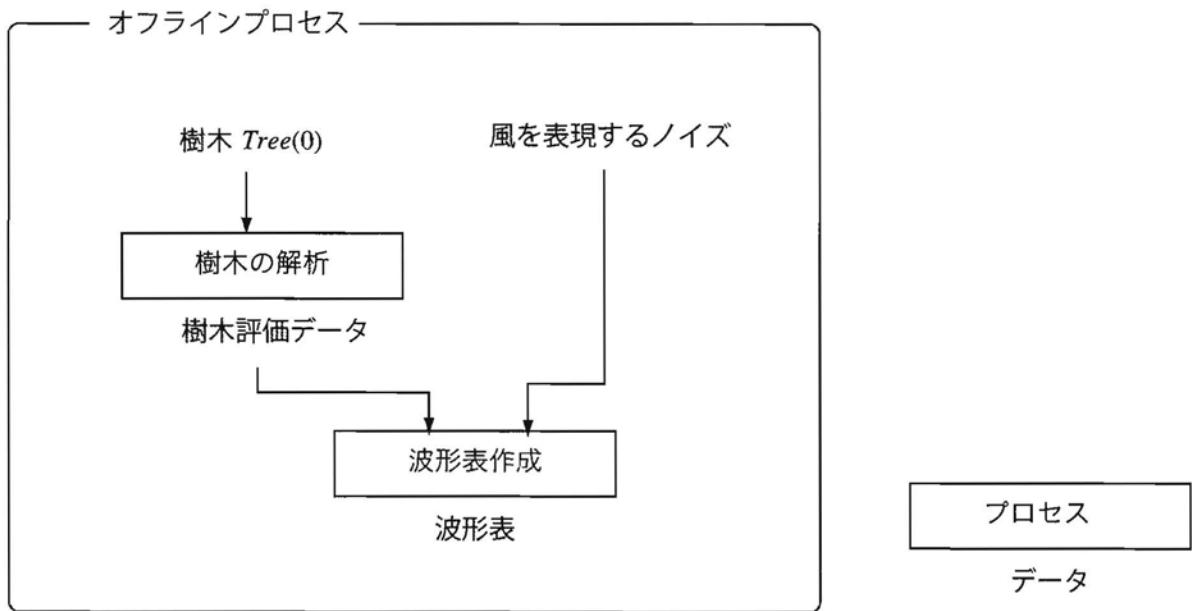
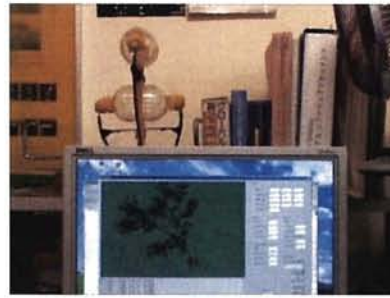


図 5-9 システム構成図



(1)



(2)



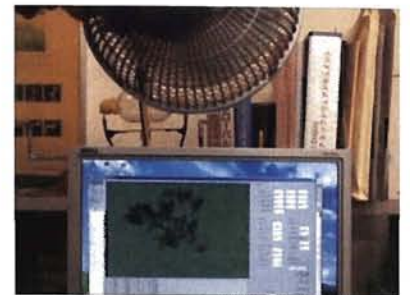
(3)



(4)



(5)



(6)



(7)



(8)



(9)



(10)



(11)



(12)

図 5-10 風向・風速センサの動作

## 6. 結論

### 6.1 本研究の有効性

小型で低コストなマイクロホンを用いて簡易的に風向・風速を求めるセンサを開発した。それを風に揺らぐ樹木の CG システムに実装することにより、自然のシミュレーションの CG システムへの適合性が確認された。

このシステムはマイクロホン以外のハードウェアについても、オーディオインタフェースなど通常の音声の入力用に設計・生産されているものであり、容易に入手可能である。ソフトウェア開発の面から見ると、通常のオーディオの入力処理がベースであり WDM, ASIO, Core Audio といった標準的な API で処理可能である。ソフトウェア、ハードウェア共に特殊なものを必要とせずに構築できることは本システムの大きな特徴である。

### 6.2 本研究の適用分野

本研究で開発したセンサは自然現象のシミュレーション分野の CG にはよく適合すると考えられる。ろうそくのような炎の揺らぎ、蝶のような風の影響を強く受けながら飛翔する動物などが例としてあげられる。一方工業製品、例えば風見鶏のようなものを CG 画像として生成しそれに対してこのセンサを適用すると精度の問題や不安定な揺らぎが目につく可能性がある。

### 6.3 課題と改良

マルチチャンネルのオーディオインタフェースは入手は容易であるが、入出力コネクタの規格等の制約から筐体サイズが大きい。4 チャンネルの入力のみ限定したハードウェアを設計し、プリアンプも一体化すれば、ノート型 PC と共に持ち運び可能な程度に小型化が可能である。

ウィンドスクリーンはウレタンフォーム製であり、試作時は均一な形状での加工が困難であるが、商業的に生産する場合は均一な形状にすることが可能である。また機械的強度の低いウレタンフォームに代わる素材を検討することも考えられる。

ウィンドスクリーンを装着したことと、複数のマイクロホンを使用することによ

り、風速のみのセンサに比べセンサのサイズも大きくなるが、センサを筐体などの周囲に分散させて取り付けるなどの工夫により、存在を使用者に意識させないようにすることも可能である。本研究では全てマイクロホンの特性がほぼ一致することを前提に、線形補間により風向を求めたが、全周にわたって 45 度単位などいくつかのポイントにおいて、各マイクロホンの雑音出力の比率を求めておき、それをもとにデータテーブルを作成し、風向を求めるようにすれば、ディスプレイの左右端などに取り付けた同一円周上にないマイクロホンにより風向を求めることも可能になる。これにより風センサを製品に目立たない形で取り付けることも可能であろう。

当面の主な課題は以下の通りである。

- (1) 炎や飛翔する動物など他のアプリケーションへの適用による、本システムの有効性の検証
- (2) より高い精度で風向を得るための、ウィンドスクリーンの製造法や、ノイズ比の補間法の検討



## 参考文献

- [1] 太田真, 田村真智子, 藤田邦彦, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂:  $1/f^\beta$  ノイズによる枝葉の風による揺らぎの効果的な表現法, 第17回NICOGRAPH論文コンテスト論文集, pp. 56-61, 2001
- [2] S. Ota, M. Tamura, K. Fujita, T. Fujimoto, K. Muraoka, N. Chiba:  $1/f^\beta$  noise-based real-time animation of trees swaying in wind fields, Proceedings of the Computer Graphics international 2003 international conference, pp. 52-59, 2003
- [3] 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, pp613-623, 2004
- [4] K. Matsuyama, T. Fujimoto, K. Muraoka and N. Chiba: Generation of Tree Movement Sound Effects, The Journal of Computer Animation and Virtual Worlds, 2005
- [5] Michael R. Shust and James C. Rogers: Electronic Removal of Outdoor Microphone Wind Noise, Acoustical Society of America 136th Meeting, 1998
- [6] Shields F. Douglas: Low-frequency wind noise correlation in microphone array, The Journal of Acoustical Society of America, Vol. 117, No. 6, pp3489-3496, 2005
- [7] G. P. van den Berg: Wind-induced noise in a screened microphone, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 119, No. 2, pp824-833, 2006
- [8] D. Keith Wilson, Roy J. Greenfield, and Michael J. White: Spatial structure of low-frequency wind noise, The Journal of Acoustical Society of America, Vol. 122, No. 6, pp223-228, 2007
- [9] H. Bass, R. Raspet and J. Messer: Experimental determination of wind speed and direction using three microphone array, The Journal of Acoustical Society of America, Vol. 97, No. 1, pp695-696, 1995.

- [10] 藤田幸史, 太田光雄, 高桑誠明: 高次相関情報を活用した風雑音からの風速計測法, 第 43 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp283-284, 1999
- [11] 中島平太郎: オーディオ工学, pp40-41, 実教出版, 1973
- [12] そよかぜふうりん KPS-3202 組み立て説明書, イーケイ・ジャパン
- [13] D. Vlastic, R. Adelsberger, G. Vannucci, J. Barnwell, M. Gross, W. Matusik and J. Popovic: Practical Motion Capture in Everyday Surroundings, ACM Transactions on Graphics, Vol. 26, No. 3, Article 35, 2007
- [14] J. D. Wilson and N. C. Makris: Ocean acoustic hurricane classification, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 119, No. 1, pp. 168-181, 2006
- [15] M. Aono, T. Kunii: Botanical tree image generation, IEEE CG&A, Vol.4 No.5, pp. 10-34,1984
- [16] P. Reffye, C. Edelin, J. Francon, M. Jaeger, C. Puech: Plant models faithful to botanical structure and development, Computer Graphics, Proc SIGGRAPH 88 Vol.22, No.4, pp. 151-158, 1988
- [17] N. Chiba, K. Oshida, K. Muraoka, M. Miura, N. Saito: A growth model having the abilities of growth-regulations for simulating visual nature of botanical trees, Computers & Graphics Vol. 18, No. 4, pp. 469-479, 1994
- [18] R. Mech, P. Prusinkiewicz: Visual models of plants interacting with their environment, Computer Graphics, Proc SIGGRAPH 96, pp. 397-410, 1996
- [19] M. Shinya, A. Fournier: Stochastic motion — motion under the influence of wind, EUROGRAPHICS '92, pp. 119-128, 1992
- [20] J. Stam: Stochastic dynamics: Simulating the effects of turbulence on flexible structures, Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS '97), Vol. 16, No. 3, pp. 159-164, 1997
- [21] T. Sakaguchi, J. Ohya: Modeling and animation of botanical trees for interactive virtual environments, ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '99), pp. 139-146, 1999
- [22] T. Giacomo, S. Capo, F. Faure: An interactive forest, Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, pp. 65-74, 2001

- [23] H. Petigen, D. Saupe: The science of fractal images, Springer-Verlag, 1988
- [24] 武者利光: ゆらぎの発想 1/f ゆらぎの謎にせまる, NHK 出版, 1994
- [25] 松山克胤: 風による樹木の揺らぎの効果音の生成法に関する研究, 岩手大学大学院工学研究科 (学位論文), 2005

## 謝辞

本論文の執筆にあたり、終始懇切なるご指導、ご鞭撻を賜り、常に暖かい激励をいただいた、岩手大学工学部情報システム工学科 千葉則茂教授に深く感謝いたします。

本論文の執筆にあたり多くの懇切なご指導を賜りました、岩手大学工学部情報システム工学科 厚井裕司教授、安倍正人教授、今野晃市准教授、藤本忠博准教授、原美オサマ助教に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、終始ご協力を頂きました、岩手大学 那須川徳博技官ならびに千葉研究室、藤本研究室の皆さんに深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、さまざまな形で協力を頂いた、勤務先である岩手県立産業技術短期大学の諸氏に感謝します。

最後に私事ではありますが、研究生活を支えてくれた家族に感謝します。

## 発表論文

### 学術論文

- [1] 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, 2007.12

### その他の論文 (口頭発表, 国際会議での発表)

- [1] Ken-ichi Kanno, Norishige Chiba: MICROPHONE-BASED WIND VELOCITY SENSOR AND ITS APPLICATION TO INTERACTIVE ANIMATION, IWAIT 2009, 2009.1 (発表予定)
- [2] 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揺らぎアニメーションへの応用, NICOGRAPH 2007 SPRING, 2007.3
- [3] 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複合現実感への応用, 平成18年度第2回 情報処理学会東北支部研究会, 06-3-5-20, 2007.1
- [4] 菅野研一, 千葉則茂: マイクロホンベースの風センサの開発に向けた風雑音特性の解析, 平成15年度第3回 情報処理学会東北支部研究会, 03-3-7-3, 2004.1
- [5] 菅野研一, 那須川徳博, 藤本忠博, 千葉則茂: マイクロホンベースの風センサの開発に向けた基礎実験, 平成17年度電気関係学会東北支部連合大会, 2H-3, 2005.8

## 図表目次

図 1-1 可動部を持つ風速計 .....	5
図 1-2 超音波式風速計 .....	6
図 1-3 熱式風速計 .....	7
図 2-1 風塊による風雑音発生モデル.....	13
図 2-2 カルマン渦による風雑音発生.....	13
図 2-3 オーディオインタフェースの周波数特性.....	14
図 2-4 マイク入力ポートの電源供給回路のモデル .....	15
図 2-5 マイクロホンとプリアンプ .....	16
図 2-6 プリアンプの回路図.....	17
図 2-7 送風機と風速計 .....	18
図 2-8 風雑音のスペクトル.....	19
図 2-9 送風機の騒音.....	19
図 2-10 風速計の風速表示と風センサの表示値 .....	20
図 3-1 樹木の枝モデル .....	27
図 3-2 葉の形状モデル .....	27
図 3-3 $1/f^p$ ノイズ .....	28
図 3-4 枝の $x, y$ 軸方向の揺れ.....	29
図 3-5 揺れ幅の累積.....	29
図 3-6 葉の縦横方向の揺れ.....	30
図 3-7 葉柄軸周りの回転.....	30
図 3-8 回転のない横揺れと回転を伴う横揺れ .....	31
図 3-9 指向性のある風 .....	32
図 3-10 風の強さの違いによる表現 .....	33
図 3-11 弾性係数の違い .....	34
図 3-12 葉柄の堅さの違い.....	35
図 3-13 拡大したシーンのスクリーンショット .....	35
図 3-14 大きな樹木モデルに適用した例.....	36
図 4-1 実世界の風に応答する CG システム .....	41
図 4-2 音声を分離するためのフィルタリング例.....	42

図 4-3	風速測定処理フロー .....	43
図 4-4	騒音源と騒音計の配置 .....	44
図 4-5	風センサの実用域 (直線の下側).....	45
図 5-1	ウィンドスクリーンの構造.....	51
図 5-2	4 個のマイクロホンの配置.....	51
図 5-3	多チャンネル入力オーディオインタフェース .....	52
図 5-4	マイクロホンの個体差と校正.....	53
図 5-5	指向特性 .....	54
図 5-6	風向の検出結果 .....	55
図 5-7	飛びの除去 .....	56
図 5-8	飛び除去アルゴリズム .....	57
図 5-9	システム構成図 .....	58
図 5-10	風向・風速センサの動作.....	59