

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

菅野研一* 千葉則茂**

*岩手県立産業技術短期大学校 **岩手大学

E-mail: kanno@iwate-it.ac.jp , nchiba@cis.iwate-u.ac.jp

マイクロホンを利用した簡便でローコストな風速センサを開発した。本論文では、このセンサの原理について、すなわちマイクロホンが風を受けたときに発生する雑音から、その他の音の影響を除去し、風速を求める方法を提案する。また、このセンサの、実世界の風に合わせて揺らぐ樹木のリアルタイムアニメーションシステムへの応用例を示し、その有効性を示す。

Development of a Microphone-based Wind Velocity Sensor and Its Application to Real-time Animation of a Tree Swaying in Real World Wind

Ken-ichi Kanno* Norishige Chiba**

*Iwate Industrial Technology Junior College **Iwate University

E-mail: kanno@iwate-it.ac.jp , nchiba@cis.iwate-u.ac.jp

We developed a simple and low cost wind velocity sensor based on a small microphone. In this paper, we first present the mechanism of the sensor, i.e., how to find the wind velocity from the output wind noise of a microphone by successfully suppressing the influence of other sounds existing in the environment. Then, we demonstrate the effectiveness of the sensor by showing the application to the real-time animation of a tree swaying in real wind.

1. はじめに

実世界との高度な整合性を有する複合現実感(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。本研究では、このような利用環境を想定し、樹木の枝葉の風による揺らぎ運動を例にとり、実世界の風にリアルタイムに応じて動作する仮想樹木のアニメーション



図1 風による樹木の揺らぎのアニメーションの 1 シーン

システムの開発を行っている。アニメーションシステムとしては、文献[1,2]で提案されている効率的な樹木の揺らぎアニメーション技術を用いる。図1にアニメーションからのフレームを示す。

MRシステムなどのアプリケーションシステムでは、風速センサに限らず種々のセンサが必要となり、また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ン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。

本研究では、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、小型マイクによる簡便な風センサの開発を進めている。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。風雑音は通常の用途にとってはやはり雑音であるため、風雑音を取り除く方法は広く研究されている。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 [3] 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[4]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[5]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。

また、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[6] の例では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。

これらの例からも推察されるように、風雑音について20Hz以下の成分(以下、超低周波という)を含むスペクトル分布等の特徴を調べることにより、風速を計測できることが期待できる。しかし、風により発生する超低周波の雑音は流体と音響にわたる領域であり、充分には研究されていない。

本研究では、風速と風雑音のレベルの関係を調べ、風雑音から風速を求め、実世界の風の強弱に合わせて揺らぐ樹木のCGシステムを開発することができたので以下に報告する。

2. マイクの風雑音

風雑音のエネルギーや周波数スペクトルを調べるため、図2 に示すように参照用風速計の近傍にマイクロホンを置き、送風機で実際に風を当て雑音出力を観測した。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3に示す。この結果から風雑音について、以下のような特徴が見られる。

- (1) 風速が2倍になると雑音出力が約 15dB 大きくなる。
- (2) 風速が大きくなるにつれ、超低周波の出力が飽和する傾向が見られ、かわって周波数の高い成分へ分布が広がる。

これらのことから、超低周波成分だけを利用すれば、風の有無の検出は可能であるが、数m/s までにわたる風速を測定するには 4kHz 程度までの帯域について、雑音出力を観測する必要がある。風速が 2 倍になると風雑音が 15dB 増加するということは、風速の約2.485乗に比例し出力電圧が増加することとなり、式(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。

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

3. 風雑音から風速への変換

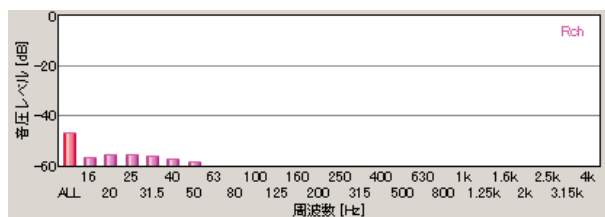
前章の実験をもとに式(1)の演算処理を施し、風速を表示するシステムを作成した。一般的に入手可能なオーディオインターフェースに対応できるよう、標準化周波数44.1kHz、量子化ビット数16bitとした。100msごとに4096点取り出し、窓関数をかけてFFT処理をおこない、10回分の平均をとり1秒ごとに数値で表示させたものを読み取った。風センサに送風機の風を当て、風速 1m/s, 2m/s, 3m/s, 4m/s および 5m/s のときのシステムの風速表示を読み取った結果を図4 に示す。風速の表示値が変動するのでその範囲をグレーの帯で表した。

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。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る。

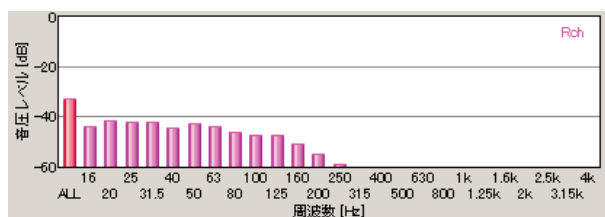


図2 送風機、風速計とマイク

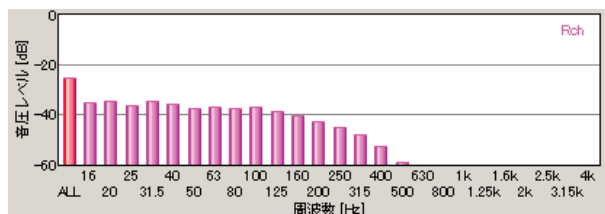
参照用に使用した風速計はペーン（回転翼）の慣性があり、風速の周期の短い変動を拾わないのに対し、マイ



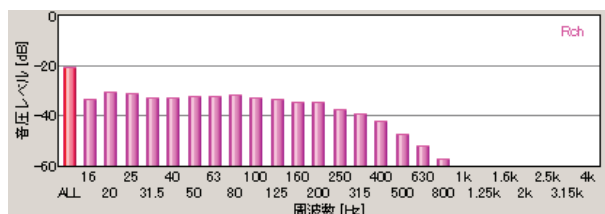
風速 1m/s



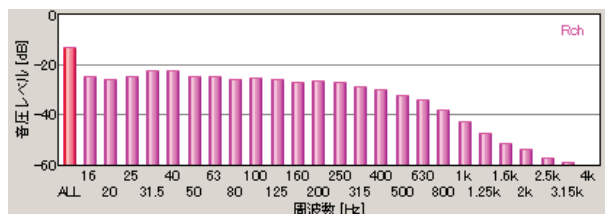
風速 2m/s



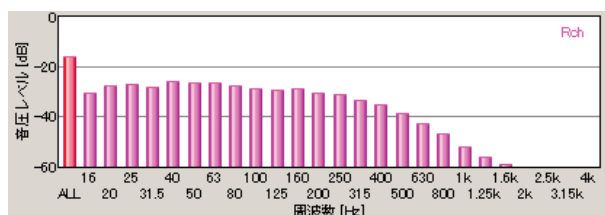
風速 3m/s



風速 4m/s



風速 5m/s



風速 6m/s

図3 風雑音のスペクトル分布

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

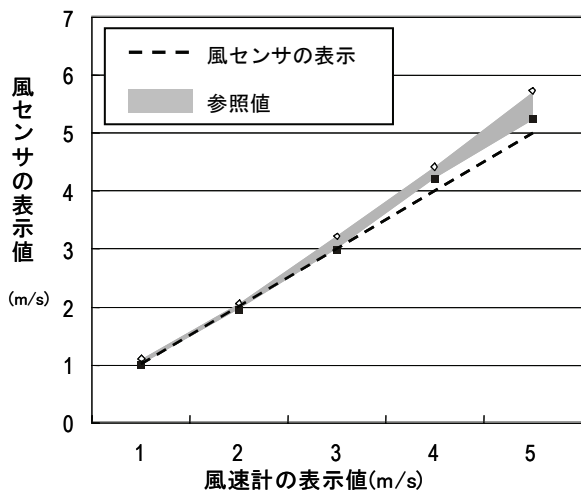


図4 実際の風速と風センサの表示

4. 音声との分離

第2章で述べたとおり、風雑音から風速を求めるには4kHz程度までの帯域にわたり雑音出力を測定する必要があり、このままでは無風時でも周囲の音声を風速として計算し、出力してしまう。

超低周波数成分は、通常の空間では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、出力として現れない。したがって、通常は超低周波成分のみを常時観測し、超低周波成分が発生している場合のみ、他の帯域を合わせて風速を計算すればある程度の音声との分離が可能となる。さらに、風と音声をあわせて受けたときの影響を最小限とするため、超低周波成分のみから、大まかな風速を推定し、それに合わせて必要な周波数までの帯域のみを取り出して風速を求めるようにすることも可能である。

特に、風速が小さい場合に騒音の影響を大きく受けるため、本システムでは、風速の概算値がおおむね0.4m/s未達の領域において、フィルタの遮断周波数を4段階に変化させ、騒音の影響を受けにくくした。それ以上の風速においては、4kHz以下の帯域を用いて風速を計算するようにした(表1)。なお風速の概算値は帯域の一部のみから求めるため、実際の風速値より小さ

い点を考慮して遮断周波数を決定する。

表1 フィルタの遮断周波数

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

5. CGシステムへの実装

5.1. 実装対象としたCGシステム

実装対象としたシステムは、枝葉の揺らぎ運動の生成に、力学シミュレーションと統計的な手法からなるハイブリッドなアプローチ[1]を用いたアニメーションシステムである。また、樹木の形状と風速から、風きり音や、葉の摩擦音をリアルタイムで生成する[2]ことも可能となっている。

5.2. マイクロホン

風を積極的に受けるのが目的であるので、風防が装備されたり、ケースに収められたりしていない、無指向性のエレクトレットコンデンサマイクロホンユニット(イーケイジャパン AP-207)を単体で使用した。他のマイクユニットを使用する場合でも、風速が既知である風を当て雑音出力を測定し、 k の値を校正することで使用可能である。

5.3. サウンドインタフェース

サウンドインタフェースは10Hz程度まで低い周波数を扱えるものが多くある。あらかじめ超低周波に対する周波数特性を測定し、超低周波を遮断していないことを確認して使用する。ノートPCのサウンド入力ポートなども使用可能なものがあり、この場合、外部に接続するものは小型のマイクのみとなり、きわめてコンパクトにできる。

本研究では超低周波に対する安定した特性を得るた

めに、外部に接続する方式のサウンドインタフェースのライン入力に、プリアンプを介してマイクを接続した (図5). このプリアンプはイーケイジャパン PU-2103 に、低周波の特性を改善するための小規模な改造を施したものである (図6). サウンドインタフェースは EDIROL UA-3D および M-AUDIO DELTA 1010 の2機種について検証した.

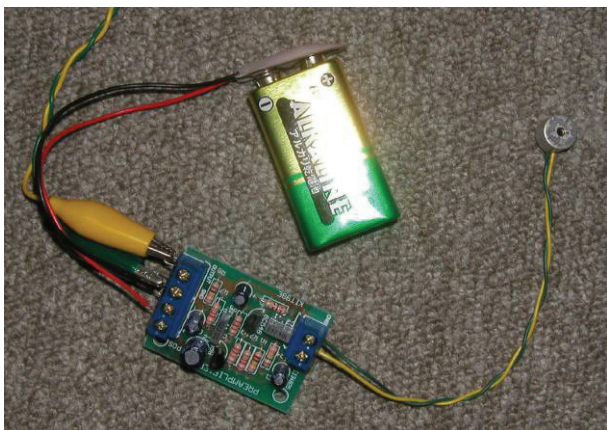


図5 マイクとプリアンプ

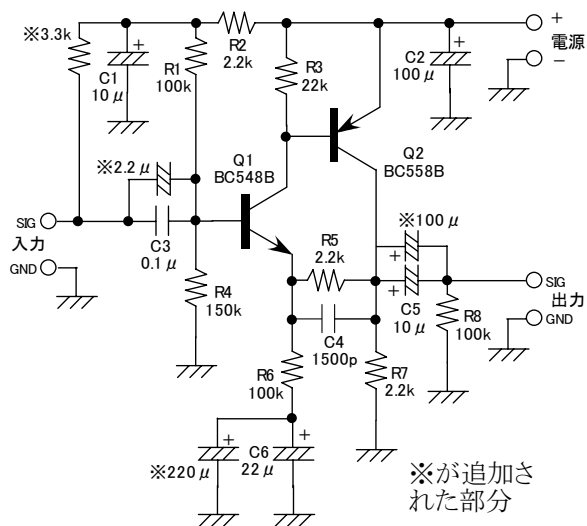


図6 プリアンプの回路図

5.4. ソフトウェア

5.1 の CG システムに、第2章、第3章で述べたソフトウェアを実装する. ただし、本 CG システムは枝の質量をシミュレートしていないため、慣性を再現できない. 単純に実世界の風速を与えると、風の吹き始めと停止するとき、枝が急激に動き始めたり、停止するという不

自然さが残る.

元のシステムでこの不自然さを除去するために利用している $1/f^\beta$ ノイズに対し風速データを乗じることで、風速データに自然な揺らぎを持たせるようにした. 風雑音は 4096 ポイントの FFT によるフィルタ処理を行っており、サンプリング周波数は 44.1kHz に設定しているので、100ms ごとに風速を求めている. そのままでは周期の短い変動を多く含むので 10 回分の移動平均をとり、変動の平滑化と遅延を与え、風が停止したときなどの不自然さを抑えた (図7). 移動平均の回数を変えることにより樹木の種類や大きさにあわせ、最適な遅延を設定することも可能である.

使用するサウンドインタフェースによってアンプのゲインなどが変わるので、式 (1) の V_0 と g を調整できるようにした (図8).

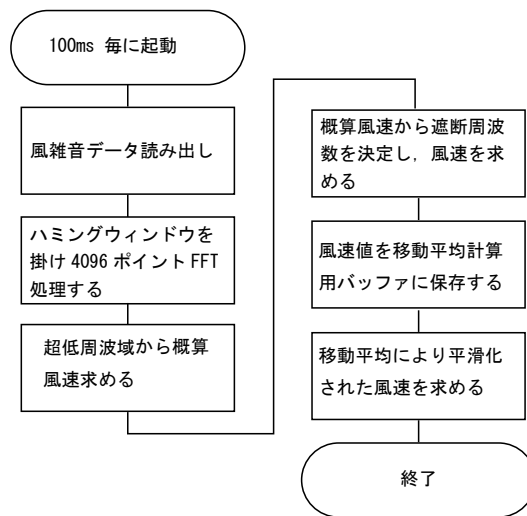


図7 風速測定処理フロー

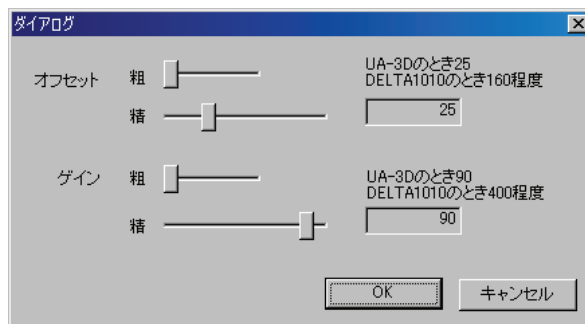


図8 キャリブレーションパネル

6. 評価

6.1. 実行結果

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10)。これらにより発生する風の強さは、ただか3m/s程度であるので、CGシステムには実際の風速を10倍して与え、樹木の揺れは大幅に誇張してある。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。

センサの存在を知らせず被験者に見せた場合、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ため、意外性もあり、驚きと共に非常に好意的な評価が得られた。当初は、樹木の揺らぎ始めや、風が無くなった時の揺らぎの停止が瞬時であるため、一部不自然な印象があったが、枝などの慣性を考慮し、運動に遅延を入れることにより改善された。本システムでの遅延時間は1秒に設定してある。遅延時間は5.4節で述べた移動平均の段数により可変であり、対象となるCGシステムの特性に合わせて適切な値に変更可能である。

6.2. 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、騒音の影響を受け、実際の風速より大きな値を出力することになる。ここでは、騒音が風速にどれだけの影響を及ぼすか検討する。

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用いた。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ことがわかった。

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、

$2^{\frac{3}{15}} \approx 1.15$ となり、15%程度の誤差が発生すると見込まれる。実際に風速1m/sにおいて、70dB(A)の騒音下と静か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9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9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。

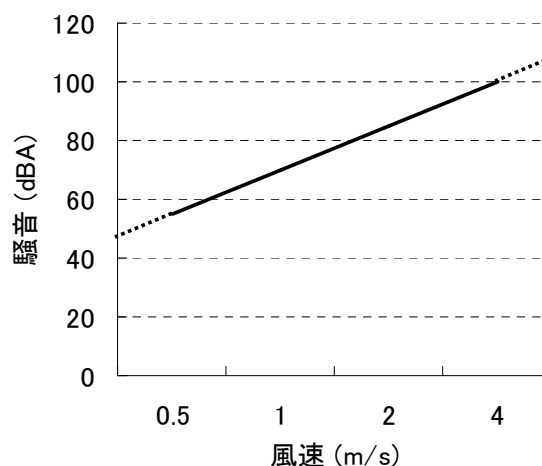


図9 風速センサの実用域

7. まとめと今後の展開

マイクロホンベースの風速センサを開発し、実世界の風に応じて動作するアニメーションシステムを開発し、複合現実感などへの応用について良好な感触を得た。今後の課題としては、

- (1) 風向も検出できるセンサへの拡張
- (2) 風速と樹木の揺らぎアニメーションとの関係の調査に基づく樹木の揺らぎアニメーションとの整合性の向上
- (3) 風に揺らぐ樹木の実映像とのリアルタイム合成による整合性に関する詳細な検討
- (4) 映像解析による風速のソフトセンサなどとの組み

合わせによる、広範囲な地点についての測定の可能な風センサの開発などがあげられる。

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] K.Matsuyama, T.Fujimoto, K.Muraoka and N.Chiba, Generation of Tree Movement Sound Effects, The Journal of Computer Animation and Virtual Worlds, Vol 16, No.5, pp.531-545, 2005
- [3] H. Bass, R. Raspet and J. Messer: "Experimental determination of wind speed and direction using three microphone array", J. Acoust. Soc. Am., 97(1), pp695-696, 1995.
- [4] 藤田幸史, 太田光雄, 高桑誠明: 高次関連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
- [5] 中島平太郎: オーディオ工学, pp40-41, 実教出版, 1973
- [6] 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



菅野 研一

昭59年 金沢工業大学情報処理工学科卒, 昭59~平2 (株)田村電機製作所 (現, サクサ(株)) 勤務, 平2岩手県立宮古短期大学 (平10年から岩手県立大学宮古短期大学部) 経営情報学科助手, 平11年~現在岩手県立産業技術短期大学校講師, 平13岩手大学大学院工学研究科博士前期課程情報工学専攻終了 (工学修士), 現在岩手大学大学院工学研究科博士後期課程電子情報工学専攻在学. 情報処理学会会員.



千葉 則茂

昭50岩手大学工学部電気工学科卒. 昭50~53 (株)日本ビジネスコンサルタント (現, (株)日立情報システムズ) 勤務, 昭59東北大学大学院博士課程情報工学専攻修了 (工学博士), 以降, 東北大学工学部助手, 仙台電波高専情報工学科助教授, 岩手大学工学部情報工学科助教授を経て, 平3同教授. コンピュータグラフィックスに関する研究に従事. 電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE, ACM, などの会員.

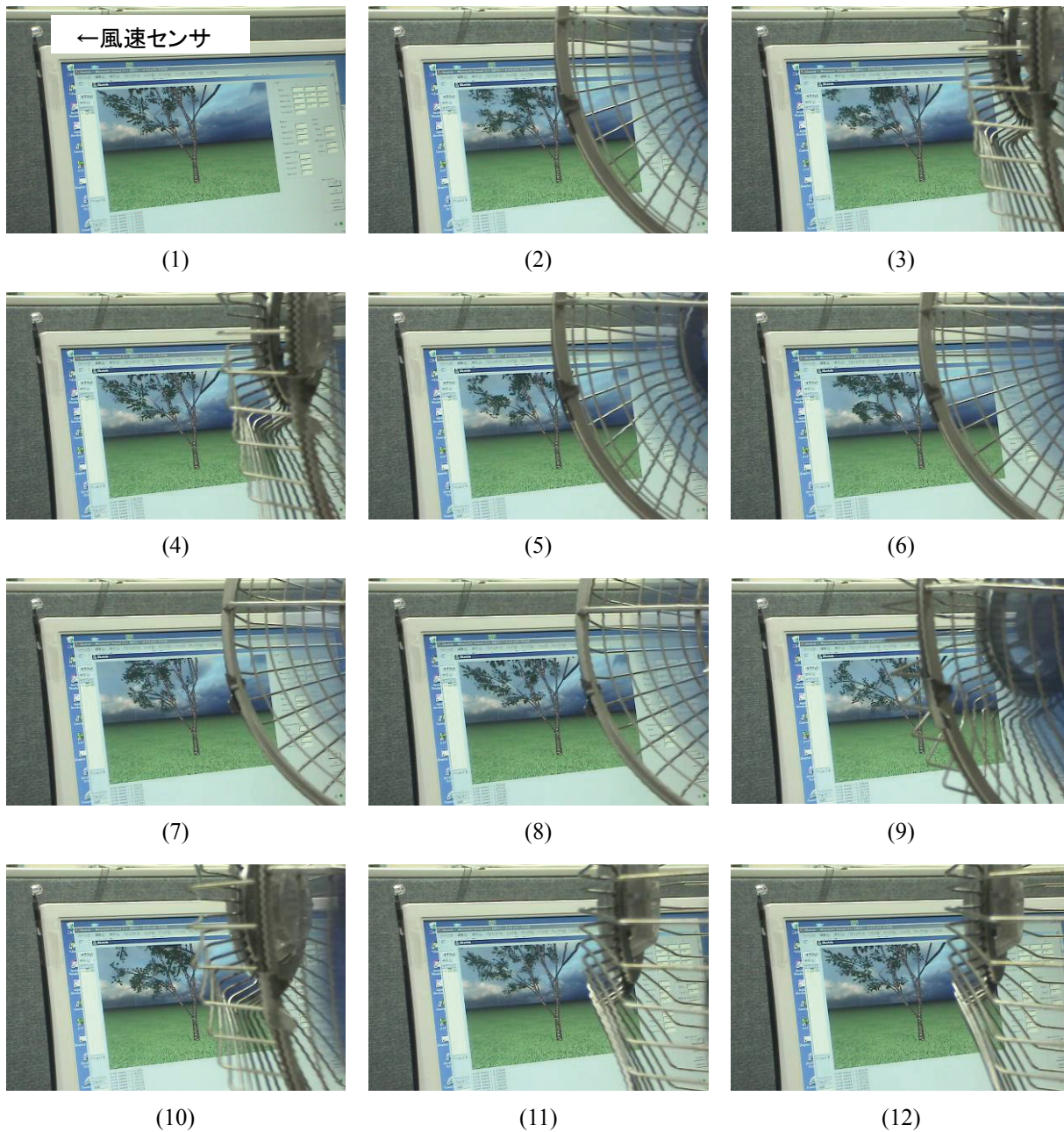


図10 CGシステムに実装し、実際に作動中の風速センサ