

風デザインシステムの開発  
Kite Design System

神谷 佳祐\*

白杵 深†

三浦 憲二郎‡

Keisuke Kamiya

Shin Usuki

Kenjiro T, Miura

1. 緒言

近年、IT技術の著しい発達により、製品の設計においてコンピュータによる設計支援システム、いわゆるCAD/CAEが頻繁に用いられるようになった。設計にコンピュータが用いられるようになる以前には、試作品を実際に作成し、製造工程の検証、性能試験をおこなわなければ製品のデザイン、性能の細かな検証はできず、試作品作成に多大なコストや非常に多くの時間が必要とされていた。

しかしながら、コンピュータの普及とそれに伴うCAD/CAEの登場によって、実際に試作品を作成しなくてもコンピュータ上で設計、性能評価のシミュレーションがおこなえるようになり、試作品作成にかかるコストや時間は大いに改善された。このようにCAD/CAEは製品設計の効率を大きく向上させたが、これらのシステムを用いるには設計に関する知識と解析用シミュレーションに多くの時間が必要とする。そのため、基本的に工場のような大がかりな施設を用いて大量生産する製品に利用され、例えば、ぬいぐるみやペーパークラフトなどのような我々がホビーへと利用する小規模なアイテムには利用されることはほぼない。

ユーザが直感的にデザインでき、ユーザデザインの入力を受けて即時解析をおこなうというユーザインタラクティブなデザインシステムの開発が望まれており、本研究では、先行研究で岡本らが開発した風シミュレータ[1]のための風モデルをデザインするシステムを開発する。

2. 風の運動シミュレータ

本章では先行研究である風シミュレータについて紹介する。風の運動を図1に示す風に加わる力より計算する。風に加わる力は形状抵抗、重力、風糸からの引張力である。これらの合力から風の平行移動を、風糸と風の接続点まわりのモーメントの合計から風の回転運動を計算する。また、風の尻尾やたわみの影響も考慮する。

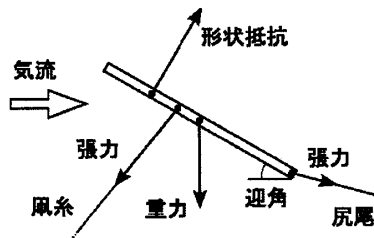


図1: 風に加わる力

2.1 形状抵抗

物理シミュレーションにおいて、固体と流体とのインタラクションに関する研究は盛んに行われているが、風のような厚みのない固体の上下面における圧力差をFEMのような要素の離散化による計算手法で高速に求めることは非常に困難である。そこで、2次元風に関する実験データより作成されたグラフ[2]を用いることで、次式で与えられる風に加わる形状抵抗 $D_p$ を効率よく計算する(図2)。

$$D_p = \frac{1}{2} C_p \rho S \|\mathbf{U}\|^2 \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで、 $C_p$ は形状抵抗係数、 $\rho$ は空気密度、 $S$ は風の投影面積、 $\mathbf{U}$ は気流と風との相対速度、 $\mathbf{n}$ は風の面法線である。本研究で用いるグラフは、迎角 $\alpha$ に対する $C_p$ のグラフと $\alpha$ に対する $D_p$ の作用点位置を表すグラフであり、それらのグラフより $C_p$ と $D_p$ の作用点位置を算出する(図3)。

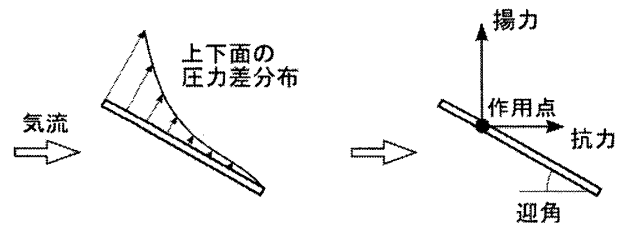


図2: 計算の効率化。左図のように離散的に圧力差を計算するにはコストがかかる。そこで、グラフを用いて右図のように積分値の大きさと作用点位置のみ求める。

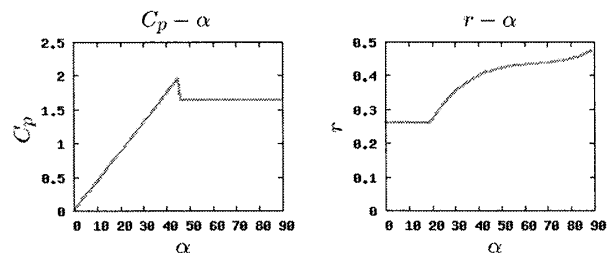


図3: 迎角 $\alpha$ に対する形状抵抗係数 $C_p$ グラフ(左図)。迎角 $\alpha$ に対する前縁から作用点までの距離を風の長さの比 $r$ で表わしたグラフ(右図)。

\*静岡大学工学部機械工学科

†静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点

‡静岡大学創造科学技術大学院情報科学専攻

## 2.2 形状抵抗の3次元への拡張

図4に示すように、形状抵抗の作用点を風の中心線上で2次的に求めることで風の運動計算を3次元へと拡張する。また、3次元への拡張にあたってピッチ回転モーメントだけでなくロール回転モーメントも求めなくてはならない。回転モーメントを求める際には、図4(b)(c)に示すように気流をY-Z平面とX-Z平面にそれぞれ投影することでピッチ回転モーメントとロール回転モーメントを別々に算出する。

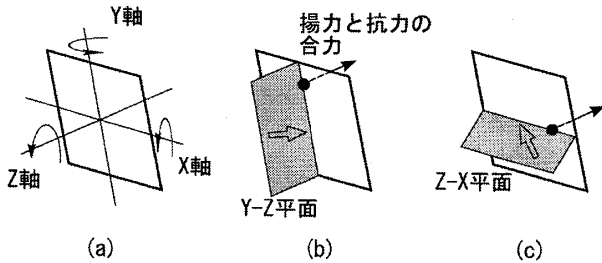


図4: 3次元への拡張。形状抵抗は3次元風の中心線上にかかる。X軸まわりのピッチ回転モーメントを求める際にはY-Z平面に投影した気流成分を、Y軸まわりのロール回転モーメントを求める際にはX-Z平面に投影した気流成分を計算に用いる。

## 2.3 風の尻尾

図5に示すように、風の後縁に取り付けられた尻尾は風に気流方向の力を加える。この作用により、風は迎角を浅くし姿勢を安定させる。ここでは、風の尻尾の近似モデルとして質点-ばねモデルを用い、尻尾が風に加える力を計算する。

尻尾を構成する質点に加わる力としては、重力、抗力 $D$ 、ばねによる力 $F$ があり、 $D$ 、 $F$ は次式で与えられる。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho S_t \|U_t\| U_t \quad (2)$$

$$F = k_s \Delta l_s + k_d v \quad (3)$$

ここで、 $C_D$ は抗力係数、 $S_t$ は尻尾の面積、 $U_t$ は気流と尻尾の相対速度、 $k_s$ はばね係数、 $\Delta l_s$ はばねの伸び、 $k_d$ は減衰係数、および $v$ はばねに接続された2質点の相対速度である。尻尾が風に加える力は風と尻尾を接続する質点に加わる力とする。

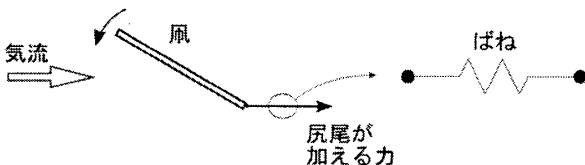


図5: 風の尻尾。気流方向の力が後縁に加わることで前縁が下がり、迎角が浅くなる。尻尾の近似モデルとして質点-ばねモデルを用いて力の計算をおこなう。

## 2.4 風のたわみ

気流中での風のたわみを表現するため、風を構成する骨のたわみ量を計算する。骨のたわみ量 $d$ は以下の式で求める。

$$d = \frac{P}{48EI} (1 - 2x)(l^2 + 2lx - 2x^2), \quad I = \frac{1}{12} bh^3 \quad (4)$$

ここで、 $P$ は風糸からの引張力、 $E$ は骨のヤング率、 $I$ は骨の断面2次モーメント、 $x$ はY軸からの距離、 $l$ は骨の長さ、 $b$ は骨断面積の幅、 $h$ は骨断面の高さである。

## 3. ユーザインタラクション

風の運動に影響を与える外的な要因は気流とユーザの風糸操作である。気流の挙動はグリッドベースの流体シミュレータで計算し、ユーザが持つと想定する風糸の端点位置はハプティックデバイスを用いて操作する。ユーザは特定の流体グリッドに外力を加えることで気流を操作することができる。また、ハプティックデバイスを操作することにより風糸を引っ張ることができるとともに、シミュレータからフィードバックされた力を受ける。

### 3.1 流体シミュレータ

流体の状態は速度場 $u$ と圧力場 $p$ によって表される。各タイムステップにおける $u$ と $p$ は次式で表されるナビエ・ストークス方程式を解くことにより求められる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

ここで、 $\nu$ は動粘性係数、 $\mathbf{f}$ は外力である。ここではStamの方法[3]を用いて式(5)、(6)を解くことで気流の挙動を求める。気流の向きは、例えば計算空間の特定面上の $\mathbf{f}$ をユーザが変化させることで操作する。

### 3.2 風糸の操作

風糸の操作にはペン型ハプティックデバイスのPHANTOM Omniを用いる。風糸の端点にユーザのデバイス操作量に対応した移動量を与えることで風に引張力を与える。そのため、風糸の近似モデルとして質点-ばねモデルを用い、端点と風の運動を考慮してばねの伸びを求め、引張力を計算する。

## 4. デザインシステム

本章では、デザインシステムの開発を行うにあたって、直接風シミュレータに入力することが可能な風デザインのためのデータを生成するための手法を提案する。図6に風デザインシステムのイメージ、図7に風デザインシステムの概要を示す。

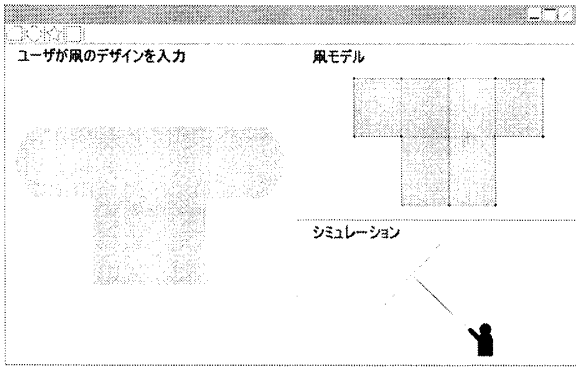


図6: 風デザインシステムのイメージ

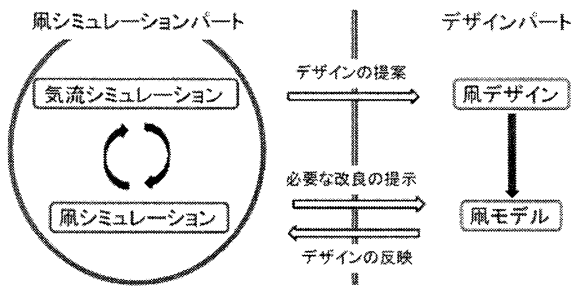
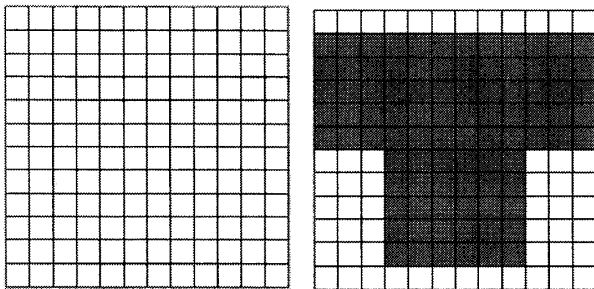


図7: 風デザインシステムの概要

#### 4.1 デザイン方法

ユーザーがデザインを入力するためのインターフェースとしてグリッド(図8(a))を用いる。グリッドのそれぞれのマスをクリックすることにより ON・OFF、つまり、実体のあり・なしを切り替えてデザインをする(図8(b))。



(a) 表示されるグリッド (b) やっこ風のデザイン

図8: デザイン画面

#### 4.2 長方形分割アルゴリズム

風シミュレータのパラメータ計算は現在、長方形に対しての計算しか対応していないので、デザインされた図形を長方形に分割する必要がある。できるだけ計算コストを抑えるためには最少数の長方形に分割することが望ましい。そこで大附らの手法を用いる[4]。最小分割のフローを図9に示す。

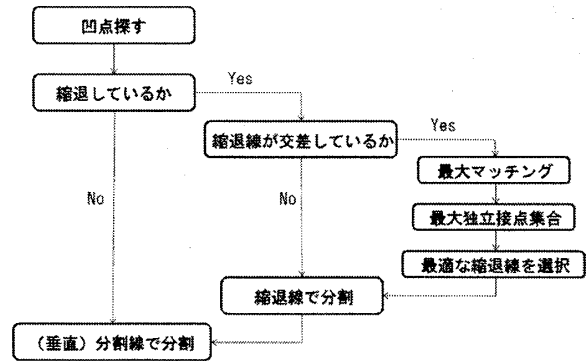
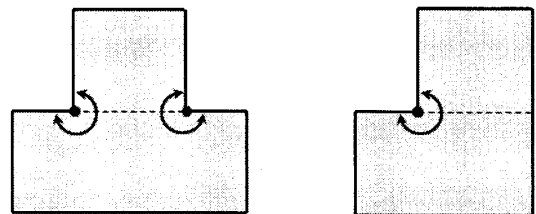


図9: 最小分割のフロー

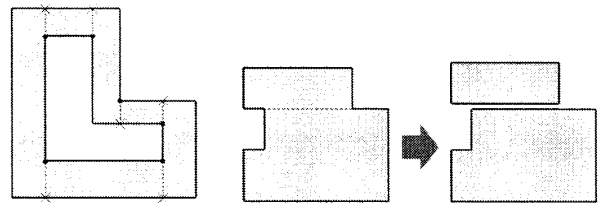
最小分割法は縮退線を用いて行う。ここでいう縮退とは、同じ X または Y 座標上の二つの凹点(内角が270°)間が領域内であるかそうでないかを表しており、領域内であるとき縮退しているといい、そうでないとき縮退していないという(図10参照)。縮退していた場合、その二つの凹点を結んだ線を縮退線という。



(a) 縮退している (b) 縮退していない

図10: 縮退

縮退していない場合は、各凹点に対して垂直に線を引く、この線を分割線という。分割線で分割をすれば最少数の長方形に分割できる(図11(a))。縮退していた場合は、まず、縮退線で切断して別々の複合長方形領域に分ける(図11(b))。



(a) 縮退していない場合 (b) 縮退している場合

図11: 分割法

これを縮退線がなくなるまで繰り返すことにより、縮退していない複合長方形領域が複数できる。それぞれの縮退していない複合長方形領域の凹点に対して垂直に分割線を引けば最少数の長方形に分割できる。切断しないで分割線を引いた場合に比べて切断した場合には、切断に使った縮退線の数だけ最終的な長方形の数が減る。

### 4.3 複雑な図形

図13(a)のような2本の縮退線が交差している複雑な図形の場合はどの縮退線で切断するかで最終的な長方形の数が変わる場合がある。この場合は、縮退線の数だけ最終的な長方形の数が増えるため、複合長方形領域の独立な縮退線の最大集合を求める必要がある。これを求めるために、まず縮退線の交差を2部グラフで表す。複合長方形領域の各縮退線を節点で表し、水平な縮退線と水平な縮退線、あるいは、垂直な縮退線と垂直な縮退線では交差することはないので、水平と垂直で分類し、もし2本の縮退線が交差するならば対応する2節点間を枝で結ぶ。このようにして得られた2部グラフから最大マッチングを求める。マッチングとは、グラフ中の枝集合で、互いに端点を共有しないものことで、枝数が最大のものを最大マッチングという。

2部グラフの最大マッチングは、左側に湧き出し、右側に吸い込みを置いて最大流問題を解くことで求めることができる[5]。湧き出しから左側の集合のすべての節点に向かう辺を追加する。同様に右側の集合のすべての節点から吸い込みに向かう辺を追加する。2部グラフの辺の向きを左側の集合から右側の集合へ向かうものとみなす。次に、深さ優先探索で湧き出しから吸い込みへのパスを探し、探索に使ったパスの向きを逆にする。これを湧き出しから吸い込みへのパスがなくなるまで繰り返す。最終的に2部グラフの右側から左側に向かっている辺をマッチングとして選択する(図12)。

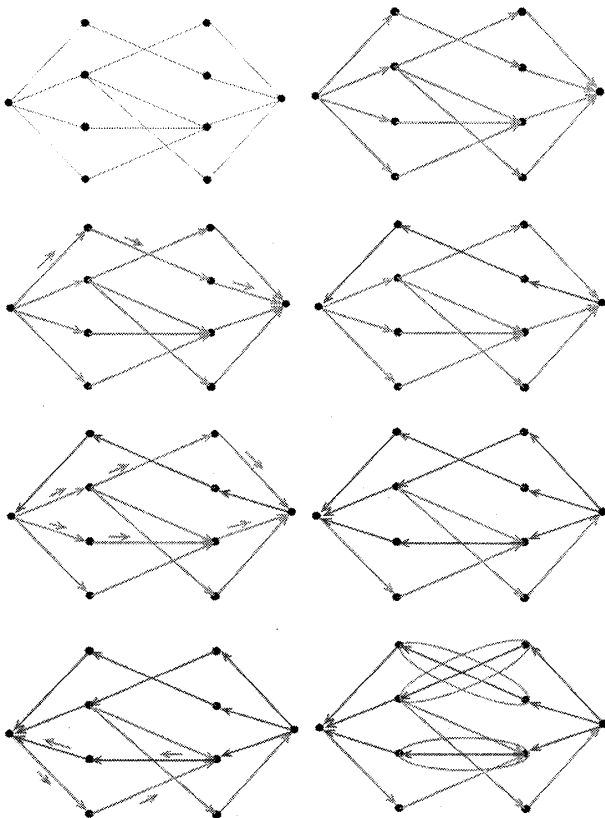
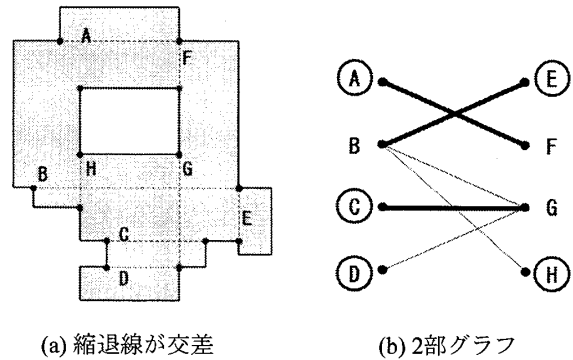


図12: 最大マッチングの求め方

最大マッチングが求めれば最大独立節点集合も容易に求められる[6]。マッチングしている2つの節点ではどちらか一方、枝の少ない、つまり交差の少ない節点を選択し、マッチングしていない節点はすべて選択する。こうして選ばれた節点の集合が最大数の独立節点集合となる。この最大独立節点集合は独立な縮退線の最大集合を表しているのので、求めた節点集合でそれぞれ分割し、その後、残った凹点から垂直に分割線を引き、分割すれば最少数の長方形に分割することができる。

図13(b)に図13(a)の縮退線の交差を表した2部グラフを示す。ここで、太線が最大マッチングを、丸印が最大独立節点集合を表している。

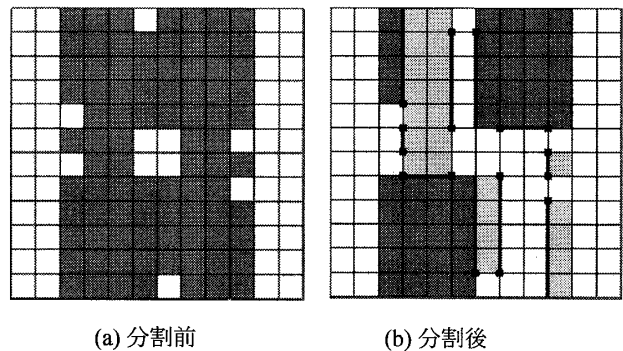


(a) 縮退線が交差 (b) 2部グラフ

図13: 複雑な図形と縮退線の交差を表す2部グラフ

### 4.4 デザイン例

図14(a)の図形に対して、上記のアルゴリズムを用いて長方形分割を行うと図14(b)となる。



(a) 分割前 (b) 分割後

図14: デザイン例

### 5. 風シミュレータへ反映

入力されたデザインを風シミュレータに反映させるために、分割したそれぞれの長方形から、長方形の数、各長方形のグリッド数、グリッド番号を読み取り(図15)、風シミュレータに値を渡す。これらの値を使いアスペクト比や重心、慣性モーメントを求め、デザインを風シミュレータに反映させる。

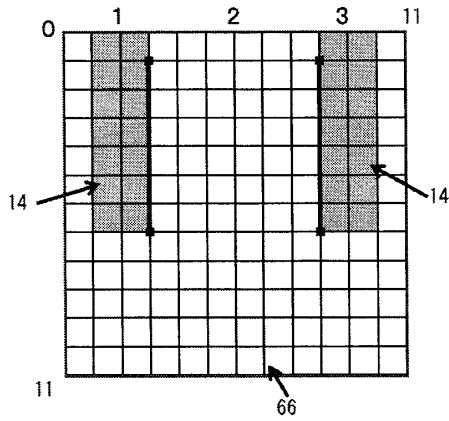


図15: デザインからデータ抽出

デザインプログラムで作成した凧をシミュレータに反映させた様子を図16, 図17に, シミュレーションの様子を図18, 図19に示す. 図16はやっこ凧を少しアレンジした形で, やっこ凧よりも横幅が狭いので左右のバランスをとりづらく, 体勢が安定しづらい. 図17は長方形の凧の中心に穴をあけたもので, 同じ大きさの長方形の凧で穴のないものと比べると, 安定せず, 常に風に対して垂直方向に動き続けた. これは, 穴がある分だけ揚力が減少しているからだと思われる.

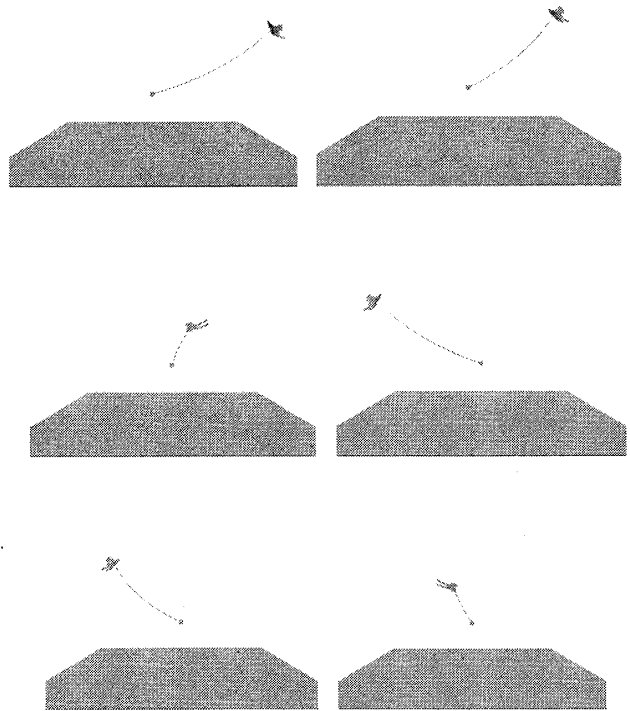
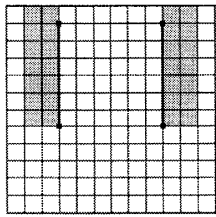
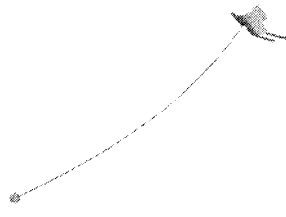


図18: 図16のデザインをシミュレーションした様子

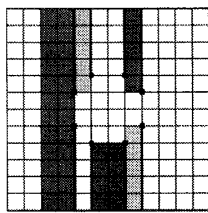


(a)

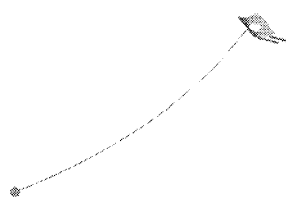


(b)

図16: デザインした凧(a)とそのシミュレーション(b)



(a)



(b)

図17: デザインした凧(a)とそのシミュレーション(b)

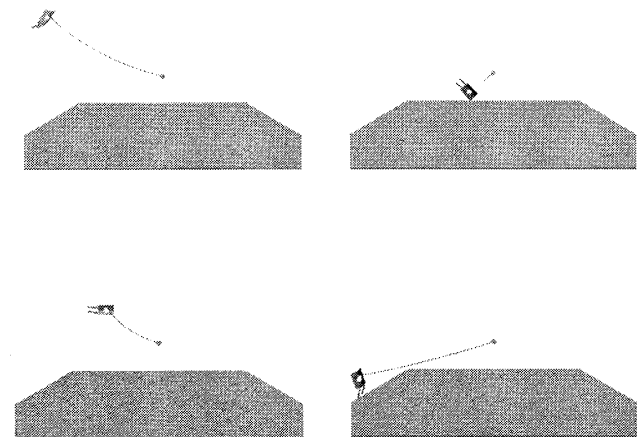


図19: 図17のデザインをシミュレーションした様子

## 6. 結言

本研究では、インタラクティブな風デザインシステムの開発にあたり、ユーザがデザインを入力し、そのデザインを風シミュレータに反映させるデザインパートの開発を目的とした。ユーザがデザインを入力するためのインターフェースとして、ユーザが理解しやすく、直観的にデザインしやすいグリッドのマスをクリックすることで実体のあり・なしを切り替える ON・OFF を実装した。また、入力されたデザインをシミュレーション速度を考慮しつつ風シミュレータに反映させるために、長方形の最少分割のアルゴリズムを実装した。さらに、入力されたデザインから長方形のデータを風プログラムに渡すことにより、重心や慣性モーメントが求まり、デザインを風シミュレータに反映させた。

今後の課題としては、現段階ではデザインプログラムと風プログラムが別々になっているため、デザインプログラムを風プログラムに組み込み、デザイン後すぐにシミュレーションできるようにすること。さらに、入力デザインを反映した風シミュレーションが実際の風揚げと比べて正しく動いているかを検証するとともに、よりユーザインタラクティブなデザインシステムにするための改良することなどが挙げられる。

## 参考文献

- [1] 岡本太一, “風デザインのためのインタラクティブシミュレーションシステムの開発”, 平成20年度静岡大学大学院修士論文, (2008).
- [2] 佐藤崇雄, 藤澤誠, 三浦憲二郎, “紙の物理特性を考慮した2次元展開図からの対話的なペーパークラフトシミュレーション”, Visual Computing/グラフィクスとCAD合同シンポジウム, (2008).
- [3] 伊藤利朗, 小村宏次, “風の科学”, 小学館, (1979).
- [4] 大附辰夫, 佐藤政生, 橘昌良, 鳥居司郎, “複合長方形領域の最小分割”, 情報処理学会論文誌, Vol.24, No.5(1983).
- [5] Even.S, “Graph Algorithms”, Computer Science Press, (1979).
- [6] Hopcroft.J and Karp.R, “An  $n^{5/2}$  algorithm for Maximum Matchings in Bipartite Graphs”, M Comput, Vol.2, No.4, (1973).