

# 凧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

岡本太一\*

藤澤誠†

三浦憲二郎‡

## 1 はじめに

近年, CG 分野における物理シミュレーションの効率化, 高速化は著しく, これらをぬいぐるみやペーパークラフトなどの型紙デザインの良否の判定に利用しようとする試みがある [1, 2]. 本論文では, 日本人に馴染み深い凧のデザインをターゲットとして, 凧づくりの専門知識を持たない一般ユーザであってもコンピュータ上で凧の飛行性能を評価でき, さらにゲーム感覚でコンピュータ上で凧を揚げて楽しむことができるユーザインタラクティブな凧の運動シミュレーションシステムを提案する.

## 2 凧の運動シミュレータ

本研究では凧の運動を図 1 に示す凧に加わる力より計算する. 凧に加わる力は形状抵抗, 重力, 凧糸からの引張力である. これらの合力から凧の平行移動を, 凧糸と凧の接続点まわりのモーメントの合計から凧の回転運動を計算する. また, 凧の尻尾やたわみの影響も考慮する.

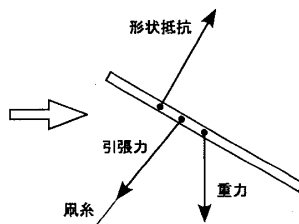


図 1: 凧に加わる力.

### 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, 凧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, 本研究では, 2次元凧に関する実験データより作成されたグラフ [3] を用いることで, 次式で与えられる凧に加わる形状抵抗  $D_p$  を効率よく計算する (図 2).

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

ここで,  $C_p$  は形状抵抗係数,  $\rho$  は空気密度,  $S$  は凧の投影面積,  $U$  は気流と凧との相対速度,  $n$  は凧の面法線である. 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).

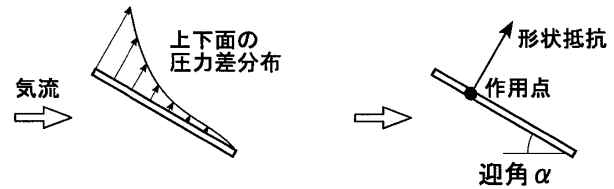


図 2: 計算の効率化. 左図のように離散的に圧力差を計算するにはコストがかかる. そこで, グラフを用いて右図のように積分値の大きさと作用点位置のみ求める.

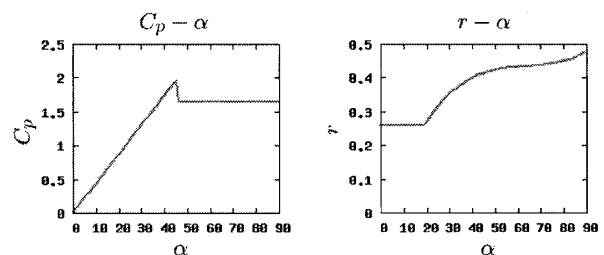


図 3: 迎角  $\alpha$  に対する形状抵抗係数  $C_p$  グラフ (左図), 迎角  $\alpha$  に対する前縁から作用点までの距離を凧の長さの比  $r$  で表わしたグラフ (右図).

### 2.2 形状抵抗の 3 次元への拡張

本研究では図 4 に示すように, 形状抵抗の作用点を凧の中心線上で 2 次元的に求めることで凧の運動計算を 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.

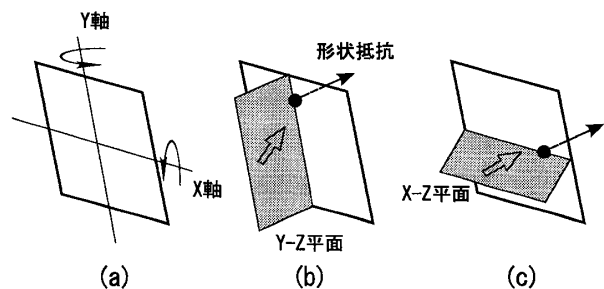


図 4: 3 次元への拡張. 形状抵抗は 3 次元凧の中心線上にかかる. X 軸まわりのピッチ回転モーメントを求める際には Y-Z 平面に投影した気流成分を, Y 軸まわりのロール回転モーメントを求める際には X-Z 平面に投影した気流成分を計算に用いる.

\*静岡大学大学院工学研究科機械工学専攻

†奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

‡静岡大学創造科学技術大学院情報科学専攻

### 2.3 凧の尻尾

図5に示すように、凧の後縁に取り付けられた尻尾は凧に気流方向の力を加える。この作用により、凧は迎角を浅くし姿勢を安定させる。本研究では、凧の尻尾の近似モデルとして質点-ばねモデルを用い、尻尾が凧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。尻尾が凧に加える力は凧と尻尾を接続する質点に加わる力とする。

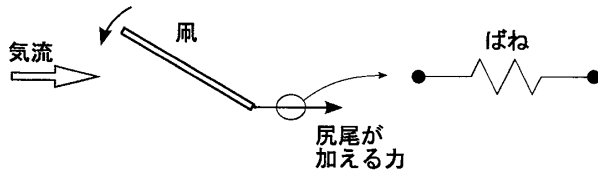


図5: 凧の尻尾。気流方向の力が後縁に加わることで前縁が下がり、迎角が浅くなる。尻尾の近似モデルとして質点-ばねモデルを用いて力の計算をおこなう。

### 2.4 凧のたわみ

本研究では気流中での凧のたわみを表現するため、凧を構成する骨のたわみ量を計算している。骨のたわみ量  $d$  は以下の式で求める。

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

ここで、 $P$  は凧糸からの引張力、 $E$  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、 $b$  は骨断面の幅、 $h$  は骨断面の高さです。

## 3 ユーザインタラクション

凧の運動に影響を与える外的な要因は気流とユーザの凧糸操作である。本研究では、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凧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凧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。

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

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (6)$$

ここで、 $\nu$  は動粘性係数、 $f$  は外力である。本研究では

Stamの方法[4]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  $f$  をユーザが変化させることで操作する。

### 3.2 凧糸の操作

凧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。本研究では、凧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凧に引張力を与える。そのため、凧糸の近似モデルとして質点-ばねモデルを用い、端点と凧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 結果

凧はたわみを表現するために  $8 \times 2$  個の四辺形ポリゴンでモデル化し、凧糸は20本のばね、尻尾は10本のばねでモデル化した。気流の挙動計算のための流体シミュレータには  $16 \times 16 \times 16$  グリッドを用いた。また、タイムステップ幅  $\Delta t$  は0.01秒としてシミュレートした。各ステップに要した計算時間はPentium4, 3.0GHzで約0.0025秒であった。

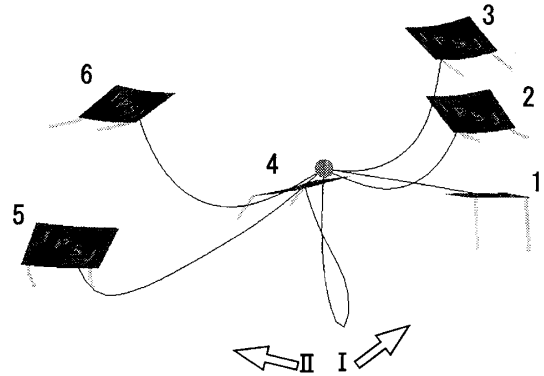


図6: 凧シミュレーション結果。手前から奥に向かうIの気流を受けて揚がった後(1~3)、右から左に向かうIIの気流を受けて舞う様子(4~6)。

## 5 まとめ

本研究では、実験データにより作成されたグラフを用いることにより長方形凧の運動を高速にシミュレートした。また、ユーザの操作をシミュレーションに反映させるため、特定の流体グリッドへ外力を加えることで気流を操作し、ハプティックデバイスを用いて凧糸の端点を操作した。

### 参考文献

- [1] Y. Mori, T. Igarashi, "Plushie: An Interactive Design System for Plush Toys", *ACM Transactions on Graphics*, Article No.45, 2007.
- [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*, 17, 2008.
- [3] 伊藤利朗, 小村宏次: 凧の科学. 小学館, 1979.
- [4] J. Stam, "Stable Fluid", *Proceedings of SIGGRAPH '99*, pp.121-128, 1999.