

I-056

# 気流によって揺れる布のリアルタイムシミュレーション Real Time Simulation of Whipped Flags in the Wind

岡本太一\*

藤澤誠†

三浦憲二郎‡

Taichi Okamoto Makoto Fujisawa Kenjiro T. Miura

## 1 はじめに

本論文では気流に揺れる旗の挙動をリアルタイムでシミュレートする手法を提案する。剛体や布のような固体と流体とのシミュレーションにおいて、それらの境界での処理は一般に適応的グリッドの生成を伴うため計算コストが高い。本研究では適応的グリッドの生成を回避するために、視覚的に重要度の低い旗から気流への作用を考慮しないことにより高速化を図る。さらに、旗の自己衝突処理をその質点と三角形ポリゴンとの衝突に限定することにより単純化・高速化する。また、旗と気流との相互作用を気流から旗への作用のみに限定したため旗布のはためきは計算上では発生しないが、ノイズ関数を用いてそれらを疑似的に発生させることで旗の挙動のリアリティを向上させる。

## 2 流体シミュレータ

流体の状態は速度場  $\mathbf{u}$  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  $\mathbf{u}$  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。

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $\nu$  は動粘性係数、 $\mathbf{f}$  は外力である。本研究では Stam によって提案されたセミラグランジュ法 [1] を用いて式 (1), (2) を解く。

## 3 旗シミュレータ

現実の旗と気流の間には相互作用が働くが、本研究においては、旗は気流から力を受けるが、旗から気流へは力を返さないものとしてシミュレートする。

旗布の挙動の計算には近似モデルとして、図1に示すような質点-ばねモデルを用いる。本研究では、各ばねが影響を与えるのは直接接続している2質点のみとする。モデルを構成する質点に加わる重力  $\mathbf{F}$  と抗力  $\mathbf{D}$  は次式で与えられる。

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2} C_D \rho S (|\mathbf{u}| - |\mathbf{v}|) \mathbf{v} \quad (3)$$

ここで、 $m$  は質点の質量、 $\mathbf{g}$  は重力加速度、 $C_D$  は抗力係数、 $\rho$  は気流密度、 $S$  は質点の擬似的な投影面積、 $\mathbf{u}$  は気流速度、および  $\mathbf{v}$  は質点の速度である。また、ばねによる力  $\mathbf{F}_s$  と減衰力  $\mathbf{F}_d$  も考慮する。力の作用する質点を  $m_1$ 、それにばねを介して接続する質点を  $m_2$  とし、それらの位置、速度をそれぞれ  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ 、および  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$  とすると  $\mathbf{F}_s, \mathbf{F}_d$  は次式で与えられる。

$$\mathbf{F}_s = k_s \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1|} \Delta l, \quad \mathbf{F}_d = k_d (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \quad (4)$$

ここで、 $k_s$  はばね係数、 $\Delta l$  はばねの伸び、 $k_d$  は減衰係数である。

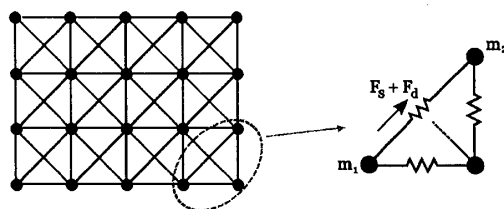


図1: 質点-ばねモデル

## 4 はためき

現実の気流に揺られる旗は、旗竿と気流との作用によるカルマン渦、および旗布と気流との間で発生する乱流境界層の影響によってはためく。カルマン渦は、図2に示すように、一様な流れの中に垂直に円柱を置いたとき、円柱下流側で発生する渦列である。この渦列は、円柱の左右から流れが交互に剥離することで発生し、反対方向に回転する渦が互い違いに2列をつくる。

乱流境界層は、図3に示すように、旗布表面の下流側に発生する乱流である。現実の気流は粘性を持つため、旗布表面では速度0であるが、表面から離れると速度が急変する。この速度の急変する層が境界層であるが、下流側に向かうにつれて流れに乱れが混じり、最終的には完全な乱流域が発生する。これらがはためきの発生する原因であるが、本研究では気流は旗から影響を受けないため、カルマン渦と乱流境界層が発生することはない。そこで、本研究では、まず実験によりはためきを観察し、視覚的に同様の効果を与えるために旗布の法線方向に変位を加えることではためきを疑似的に発生させる方法を提案する。



図2: カルマン渦

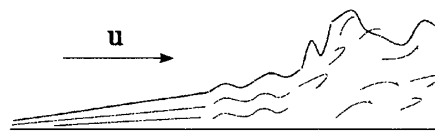


図3: 境界層

\*静岡大学大学院工学研究科機械工学専攻

†静岡大学大学院理工学研究科設計科学専攻

‡静岡大学創造科学技術大学院情報科学専攻

4.1 実験

旗布のはためきを観察するために、一様流を受ける旗の挙動を観察する実験をおこなった。旗布は絹製の54cm×54cm、旗竿は直径11cmを用い、家庭用扇風機で約2m/sの速度の気流を送った。実験結果を図4に示す。

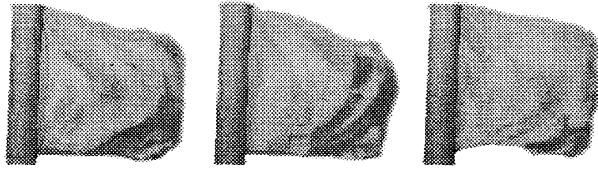


図4: 実験

4.2 擬似的なはためき

上述の実験により、波は旗布の旗竿側中央部から発生し、2次曲線状に伝播していくことが観察された。そこで、旗布を伝わる波の近似モデルとして、図5(a)に示すように、x方向に進行する波をy座標に依存させて2次曲線状に変化させたものを用いる。波には、乱流の影響を表現するため、周期性とランダムな振幅を持つ1次元のPerlin noise[2]を用いる。また、図5(b)に示すように、旗竿へ旗布を固定している点の中で最も近い点からの距離Lに応じて振幅A(L)を決定する。なお、Lが閾値L<sub>max</sub>以上の場合、A(L)は一定とする。本研究で用いる波は次式で定義される。

$$z = u_p A(L) f_n(x - vt - a(1 - y)y) \quad (5)$$

ここで、u<sub>p</sub>は旗竿周りの代表気流速度、f<sub>n</sub>( )はノイズ関数、vは波の伝播速度、およびaは2次曲線の形状を決定する係数である。

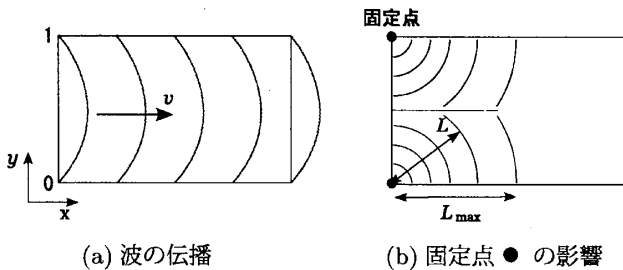


図5: 擬似的なはためき

4.3 シミュレーション

式(7)を実装したシミュレーションの結果を図6に示す。ここでは、はためきを観察するために流体シミュレータは用いず、さらに重力も無効とし各質点にx軸正方向への引張力を加えている。

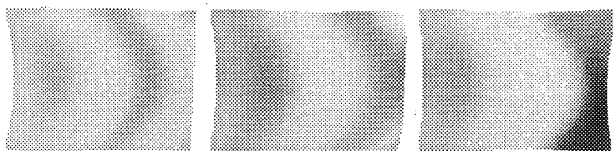


図6: はためきのシミュレーション

5 結果

流体シミュレータに対しては空間を16×16×16のグリッドで離散化し、布シミュレータに対しては旗布を8×11の質点でモデル化した。また、タイムステップ幅Δtは0.01秒

としてシミュレートした。実際に各ステップに要した計算時間は約0.02秒であった。図7に矢印方向の気流を受ける旗のシミュレーション結果、図8にアニメーションでの利用を想定したPOV-Rayでのレンダリング結果を示す。

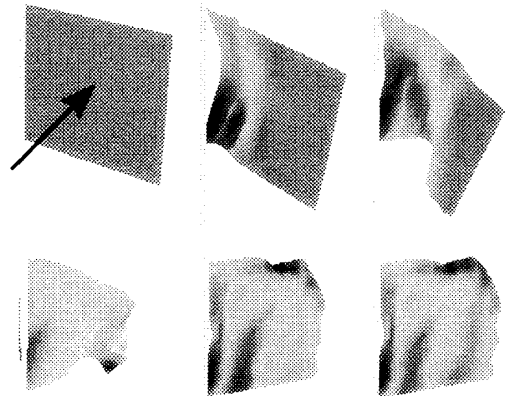


図7: シミュレーションの結果

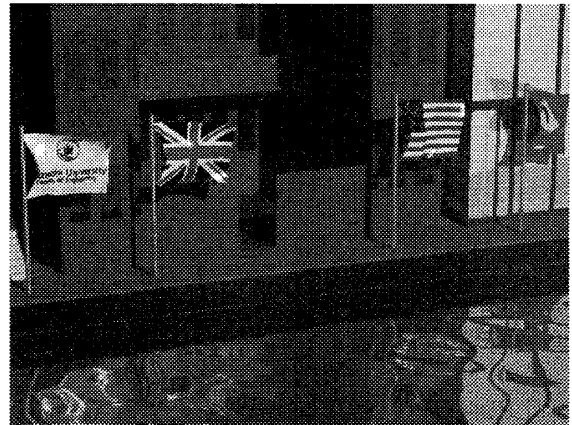


図8: POV-Rayによるレンダリング

6 まとめ

本研究では、旗から気流への作用を考慮しないことで気流中の旗の挙動を高速にシミュレートした。実行時間は、1フレームあたり約0.02秒(50fps)であり、リアルタイム処理可能な速度がえられた。また、はためきを擬似的に加えることで一様流中での旗の挙動のリアリティを向上できた。しかしながら、擬似的なはためきは旗布に直接変位を加えることで発生させているため、流れ場が急激に変化する場合に不自然な挙動を示すことがある。今後は旗布に直接変位を加えるのではなく、流れ場に乱流を生成することで自然に旗布がはためく方法を考案する。乱流場生成法としては[3]が利用できると考えられる。

参考文献

[1] J. Stam, "Stable Fluid", *Proceedings of SIGGRAPH '99*, pp.121-128, 1999.  
 [2] K. Perlin, E. M. Hoffert, "Hypertexture", *Proceedings of SIGGRAPH '89*, pp.253-262, 1989.  
 [3] R. Bridson, J. Hourihan, M. Nordenstam, "Curl-Noise for Procedural Fluid Flow", *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, 2007 (to appear).