

自由形状の竹とんぼのインタラクティブデザインシステム

中村 守宏 小山 裕己 坂本 大介 五十嵐 健夫*

概要. 本研究では, 自由形状の翼を持つ創造的な竹とんぼをインタラクティブにデザインするためのシステムを提案する. 創造的な竹とんぼを誰にでもデザインできるようにするために, システムは次のような幾つかの有用な機能を提供する. まず, ユーザが竹とんぼをデザインしている最中に現在の竹とんぼがどのように飛ぶかのシミュレーション結果を可視化する. 次に, 本システムは *spin quality* (どの程度安定して回転するか) と *flight quality* (どの程度高く, 長く飛ぶか) が高くなるように現在のデザインを最適化する機能を提供する. 自由形状の紙飛行機をデザインするための既存手法 [14] を竹とんぼに適用できるように拡張することとでこれらの機能を実現した.

1 はじめに

竹とんぼは回転対称の幾枚かの翼を持ち, 回転することによって飛ぶ伝統的なおもちゃである. 紀元前 400 年に中国で生まれて以来, たくさんの人々を魅了してきた [7]. しかしながら, 典型的な竹とんぼは限定的な形をしている. ほとんどの竹とんぼは 2 枚ではば長方形の形の翼を持つ. この理由の一つとしては, 2 枚の翼が一つの竹片から作られることにある. しかしながら, 昨今のデジタルファブリケーション装置の広がりによってデザインの幅が広がった. それにも関わらず, 創造的で機能的な竹とんぼをデザインすることは *spin quality* (どの程度安定して回転するか) と *flight quality* (どの程度高く長く飛ぶか) の両方を考慮しなければならず, 依然困難である.

本研究では, 自由形状の翼を持つ創造的な竹とんぼをインタラクティブにデザインするためのシステムを提案する [9]. 本システムでは, たとえ非対称のものであっても, レーザー加工機や 3D プリンタといったデジタルファブリケーション装置を用いて作ることができる創造的で機能的な竹とんぼをユーザがデザインすることを可能にする (図 1). ユーザは形を描くことでその形の平板翼のデザインと翼がどのように棒につくかの指定をインタラクティブにすることが可能となる. 創造的な竹とんぼを誰にでも

デザインできるようにするためにシステムは有用な機能を提供する. まず, ユーザが竹とんぼをデザインしている最中に現在の竹とんぼがどのように飛ぶかのシミュレーション結果を可視化する. 次に, 本システムは *spin quality* (どの程度安定して回転するか) と *flight quality* (どの程度高く, 長く飛ぶか) が高くなるように現在のデザインを最適化する機能を提供する.

竹とんぼのデザインは紙飛行機のデザインと類似点が多い. 梅谷ら [14] によって提案された紙飛行機のデザインを支援する研究に基づいて, それらに非自明な拡張をすることで竹とんぼに適用した. 竹とんぼの飛行軌跡をシミュレーションするために, 翼を同心円状に分割した, これは梅谷らの手法とは違うものである. 空気力学に関連した物理的な係数を得るために梅谷らが行ったデータドリブンの手法を拡張し, 竹とんぼに適用した. データドリブンや最適化では竹とんぼに特化した定式化を行っている. 梅谷らの手法では *flight quality* しか考慮していないが, 我々の手法では竹とんぼに重要な *spin quality* も最適化の目的関数に組み込んでいる. 竹とんぼの *spin quality* を定式化するために, Bächer ら [3] が提案した回転体のデザインに関する手法を拡張する.

図 2 は我々の手法の概観である. 本研究の貢献は以下の 3 点である. なお, 詳細については文献 [9] を参照されたい.

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学

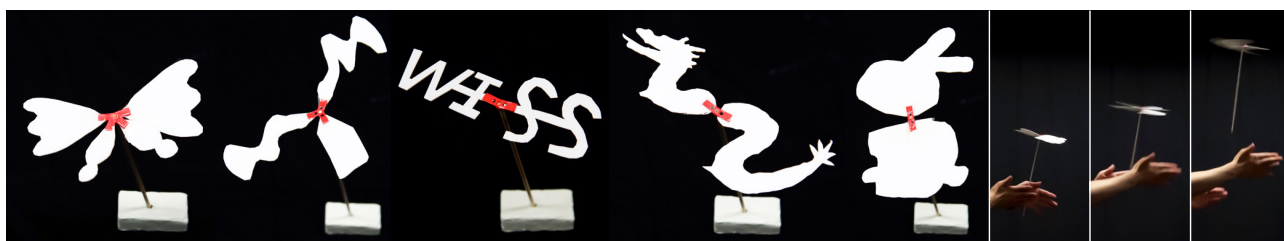


図 1. 本システムを用いて製作した安定飛行可能な自由形状の竹とんぼ.

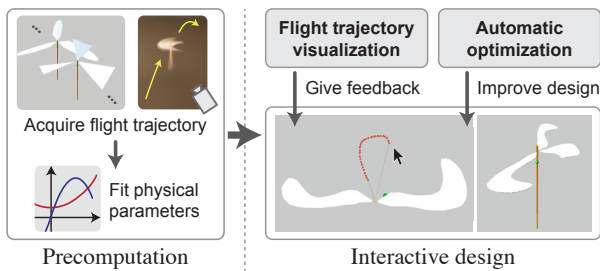


図 2. 本システムの概要図.

- 本研究は自由形状の竹とんぼをデザインするための新しいデザインシステムを提案する.
- 梅谷ら [14] のデータドリブンの飛行シミュレーション手法を竹とんぼに適用できるように, データ取得方法やデータフィッティング方法を拡張する.
- spin quality と flight quality の両方を考慮して, 竹とんぼのデザインを最適化する手法を提案する.

2 関連研究

空気力学. 空気力学の研究は長い歴史がある. これより, コンピュータグラフィックスの分野と空気力学の関わりについて中心に述べる. 空気力学に基づいて羽ばたく鳥の動きを生成する手法 [16] が研究された. 梅谷ら [14] や Martin ら [8] は, それぞれ紙飛行機と凧について, 観測データから得られた空気力学的特性に基づいてこれらのデザインを支援するシステムを提案した. 本研究では, これらの研究を基に自由形状の竹とんぼの飛行予測, デザイン最適化について提案する.

機能的で製作可能なデザイン. 計算機を用いて機能的で製作可能なもののデザインを支援する研究がなされてきた. 自立安定性 [12], 回転安定性 [3], 浮上安定性 [15] など, 様々な機能がこれまでに定式化されてきた. これらの研究はデザインされたものの機能性を最大化あるいは確保する最適化フレームワークを扱っている. 本研究では, 竹とんぼの機能性 (spin quality や flight quality) を高める最適化フレームワークを提案する. また, エンドユーザが創造的で機能的なものをデザインすることを支援するために, 物理学に基づいたフィードバックをもつインタラクティブなデザインシステムが研究されている. 例えば, 家具 [13] や紙飛行機 [14], 凧 [8] などがある. 本研究では物理学に基づいて, どのように竹とんぼが飛ぶかを予測し, インタラクティブなフィードバックを与える.

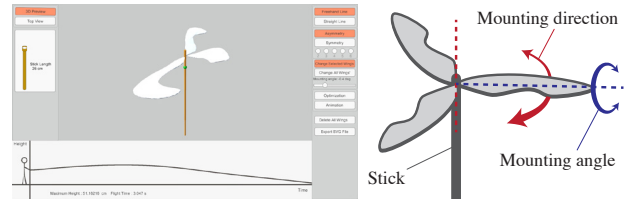


図 3. (左) 本システムのスクリーンショット. (右) Mounting angle と mounting direction.

測定量を用いたパラメタフィッティング. Pai ら [10] は測定量からパラメタをフィッティングすることによって物理的にリアルなふるまいをシミュレートする方法を提案した. この研究に続いて, 様々なデータドリブなモデル化が研究されている [4, 8, 14]. 本研究では竹とんぼの飛行シミュレーションに必要なパラメタを実際の飛行データから計算した.

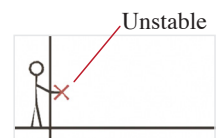
3 システム概要

図 3 (左) は本システムのスクリーンショットである. 初めに, このシステムでは翼も何もない棒だけの状態から始める. ユーザは翼の形を描くことで平板翼を生成できる. 各翼についてユーザは *mounting angle* と *mounting direction* (図 3 (右)) の 2 つの回転性の配置を調整できる. また, ユーザは棒の長さや翼を取り付ける位置を変えることができる.

本システムでは竹とんぼの重心を緑の点で表している. さらに, スクリーンの左下では飛行シミュレーションの結果を表示する (図 3 (左)). この飛行シミュレーションは翼や棒の状態を変えるたびに更新される. “Animation” ボタンを押すとシミュレーション結果をアニメーションとして見ることができる. さらに本システムでは竹とんぼをより安定して, より高く飛ばせるように最適化することができる. 最後に本システムは翼をレーザー加工機で切り出せるように SVG ファイルとして, コネクタを 3D プリンタを用いて製作できるように出力する.

翼生成. 図 4 はどのように翼を生成するかを表している. まず作りたい翼の外形を描く. A から B まで曲線を描くとする. システムはこの曲線と, A, B それぞれを棒の中心とで結んだ直線で囲まれた領域を翼として生成する. *Mounting point M* は翼の外形と棒の交線の中点である. 本システムでは全ての翼は高さ h の位置に取り付けられ, 製作と空力解析の単純化のために翼は平板翼のみを扱う.

飛行軌跡の表示. 本システムは横軸を時間, 縦軸を高さとするグラフとして飛行軌跡を表示する. 160 rad/s, 棒を 5 度傾かせ, 1.5 メートルの高さを初期条件とす



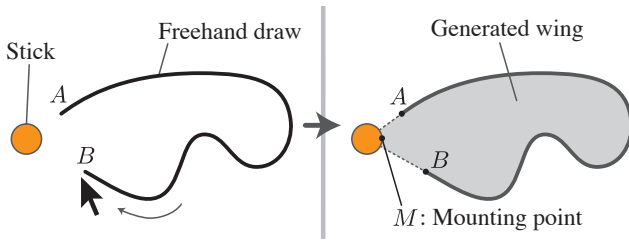


図 4. ユーザの入力と翼の生成.



図 5. 竹とんぼを組み立てるためのコネクタ. 各翼に正確な mounting angle と mounting direction を設定できる. 写真にある穴は発射台を使う上で加えたもの.

る飛行をシミュレーションする. 飛行中に竹とんぼが 30 度傾いたときにシステムは竹とんぼが不安定な状態にあるとみなし, 赤い X マークをインセットの図のように表示する.

現在のデザインの最適化. “Optimization” ボタンを押すことによって, システムは spin quality と flight quality を最大化するように竹とんぼのデザインの最適化を始める. この最適化は 1, 2 分ほどかかる.

竹とんぼ製作. 竹とんぼは棒とコネクタと軽いスチレンボードによって製作できる. 棒は直径 4mm の木, スチレンボードの厚さは 1mm のものを用いる. コネクタは FDM 方式の 3D プリンターで ABS を用いて製作され, 翼と棒をセロハンテープを用いてつなぎながら mounting angle と mounting direction を正確に表すために使われる (図 5). コネクタは約 0.5g であり, 竹とんぼ (約 5g) に比べて十分軽く回転軸上に位置するため, シミュレーションではコネクタやセロハンテープの質量を無視している.

4 竹とんぼ飛行のシミュレーション

空気力に関しては翼理論 [1] を基に竹とんぼの飛行軌跡をシミュレーションする. 本研究でのシミュレーションは梅谷らの研究 [14] を基にしているが, 翼分割の方法などいくつかの拡張を導入する.

4.1 空気力に関する基礎知識

静止大気の中を一定速度 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ で平板翼が運動する際に発生する空気力について考える. この空気力は揚力 (速度に垂直な方向) と抗力 (平行な

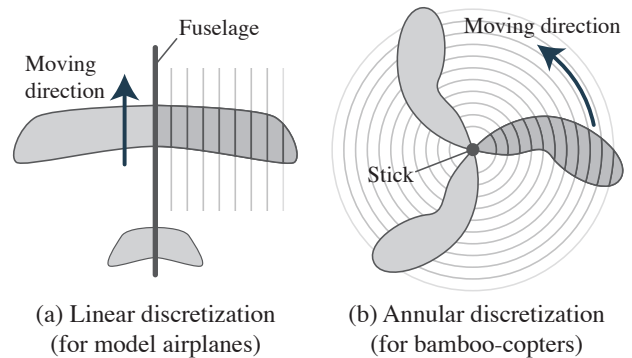
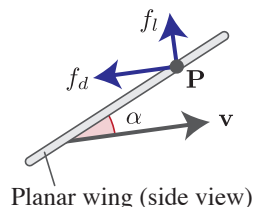


図 6. (a) 紙飛行機の翼要素分割 [14]. (b) 竹とんぼの翼要素分割. 竹とんぼでは回転方向の運動が支配的であるので同心円状に翼を分割する.

方向) に分けられる. 翼理論を

基に, 揚力と抗力は揚力係数 C_l と抗力係数 C_d を用いて計算することができる. 圧力中心 $\mathbf{P}$ は平板翼において翼弦の先端から 1/4 の位置にあり [2], 揚力や抗力はこの $\mathbf{P}$ に働いていると考えられる. 揚力係数や抗力係数は無次元量であり, 翼の形, 迎角 α , レイノルズ数 Re などによって変化し, 典型的な翼型では風洞実験などで実験的に得られている.

4.2 Annular Wing Discretization

梅谷らは従来の翼理論を拡張し, 翼を翼要素に離散化する手法を提案した (図 6 (a)). 空気力は各翼要素で計算され, それらの総和をとることで翼全体の力とする. 竹とんぼを扱う上でこれと類似した手法をとる. 本研究では翼を図 6 (b) のように同心円状に分割した. これらの同心円の中心は棒にあり, 等間隔に並ぶ. 竹とんぼの場合は紙飛行機と違い回転方向の速度が支配的であり, 翼要素が切断方向に動くという梅谷らの仮定に反するので, 紙飛行機の離散化方法は竹とんぼに適さない. 本研究で用いる離散化手法は blade element momentum 理論 [6] によるもので, 風車やプロペラのモデル化に使われている.

4.3 剛体シミュレーション

各翼要素での揚力と抗力を翼理論を基に計算し, それらの力が各翼要素の圧力中心に働いているとみなすことでトルクの計算を行った. 本研究では竹とんぼを剛体と考え, 4 次の Runge-Kutta 法を用いることで剛体シミュレーションを行った.

5 空力係数を得るためのフィッティング

梅谷らの手法 [14] を竹とんぼに適するように拡張することで揚力係数や抗力係数などの空力係数を測定量より求める. まず, 訓練用の竹とんぼを作成し, 飛行軌跡を録画する. 実際の飛行軌跡とシミュレーションによって得られた軌跡の差が小さくなる

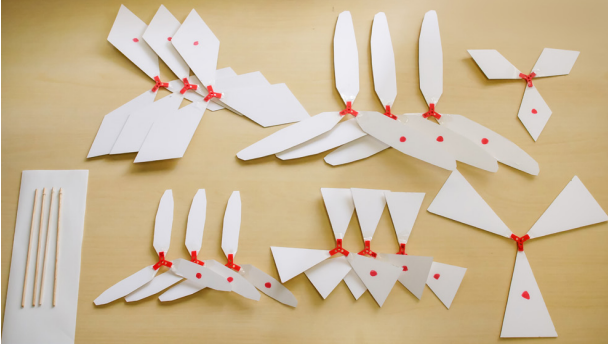


図 7. 訓練データを得るために用いた 14 種類の竹とんぼ.

ように最適化問題を解くことによって空力係数を得る. 位置推移だけでなく角速度推移が得られるように梅谷らの手法を拡張する.

5.1 空力係数の表現

空力係数 $\mathbf{c} = (c_d, c_l)$ を $\varepsilon = (\alpha, \text{Re})$ の関数として表すとする. つまり, $\mathbf{c}(\varepsilon)$, または $\mathbf{c}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2: (\alpha, \text{Re}) \mapsto (c_d, c_l)$ のように表せる. この関数の表現として, 梅谷らと同様に放射基底関数を用いた散布データ補間を用いる. 放射基底関数として $\phi(r) = \exp(-r^2)$ を用いた.

5.2 データを得るためのセッティング

訓練用の竹とんぼ. 訓練用の飛行データを得るために図 7 にあるように全部で 14 個の竹とんぼを用意した. その内訳は 3 種類の竹とんぼはそれぞれ 3 種類の mounting angle (i.e., 15, 20, 25 度), 2 種類の竹とんぼには 0 度の mounting angle を付けた. またそれらの竹とんぼはそれぞれ同じ長さの棒を用いた.

飛行軌跡の撮影. 高価なモーションキャプチャシステムを用いる代わりに, 2 つのカメラを用いた簡単な飛行撮影環境を構成した (図 8). 竹とんぼの角速度を得るために, 発射台の上のカメラには 240 FPS (frames per second) で撮影が可能な GoPro HERO4 を用いた. 高さや速度を得るために, 横のカメラには 30 FPS で撮影できるビデオカメラを用いた.

5.3 パラメタ推定アルゴリズム

28 個の録画した飛行データとシミュレーションとの差を最小化する最適化問題を COBYLA [11] を用いて解くことによって, 空力係数を表す関数 $\mathbf{c}(\varepsilon)$ を求める. 録画したデータの代表点として 3 時点での高さ, 速度, 角速度を計測する. 最初の時点で計測した値をシミュレーションの初期条件として用い, 残りの 2 時点での値をシミュレーションとの差を計算するのに用いる. 関数 $\mathbf{c}$ を放射基底関数の和として表し, この関数を用いてシミュレーションを行う. 放射基底関数の中心点を貪欲法 [4] によって少しずつ増

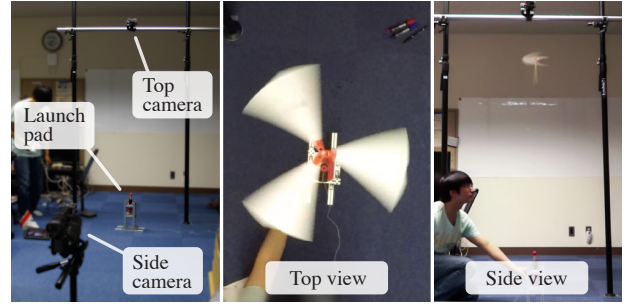


図 8. 竹とんぼの飛行データ追跡のためのカメラセッティング. 角速度を得るために発射台の上にハイスピードカメラを設置した. 横に設置したカメラは高さを得るために用いた.

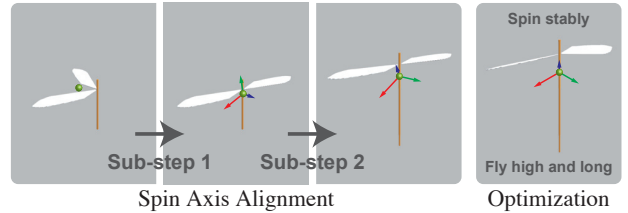


図 9. 最適化の構成図. Spin axis alignment を行い安定に回転するための最低要件を満たした後に, spin quality と flight quality を最大化する最適化問題を解く.

やすことでシミュレーションとの誤差を減らしていく. まず一つ目の中心点として実験によって得られた迎角とレイノルズ数の平均を用いる. それ以降の中心点として最小化が収束した後, 最もシミュレーションとの差が大きかった時点での任意の翼要素を次の中心点として選ぶ. 8 個の中心点を計算するのに 3 日を要した.

6 竹とんぼのデザインの最適化

最適化の目的は竹とんぼがよく飛ぶように竹とんぼの形状を調整することである. 飛行高度と飛行時間を直接最大化することは難しいので, これらの問題を spin quality と flight quality に分けそれらを同時に最大化することによって竹とんぼのデザイン最適化を行う. Spin quality は竹とんぼが棒を中心に安定して回転するために必要である. Flight quality は竹とんぼが高く長く飛ぶために寄与する.

本研究で提案する spin quality の指標は, 竹とんぼが適切な慣性主軸を回転軸としていることを前提として定式化しているため, この前提条件を満たすための調整 (6.1 節) を行った後に spin quality と flight quality の最適化 (6.2 節) を行う. 図 9 はこの節での過程を描写している.

6.1 Spin Axis Alignment

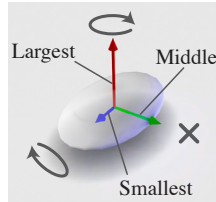
本システムは次の小節で説明する最適化を行う前にこの小節で説明する2つのステップを順番に一度行う。

6.1.1 Translational Alignment

このステップでは各翼の mounting direction とスケールを変えることによって竹とんぼの重心が棒に沿うようにする。ユーザの意図したデザインから外れないようにスケールの変更についてコスト関数を設定し COBYLA [11] を用いて重心が棒に沿うように最小化を行う。

6.1.2 Angular Alignment

物体には3つの慣性主軸があり、それぞれに対応する主慣性モーメントがある。主慣性モーメントが3つの中で最大のものと最小のものが対応する慣性主軸を回転軸として回転させたときに限り、安定して回転することが知られている [3,5]。このステップでは棒に最も近い慣性主軸が回転に適さない場合に、適するものとなるように、棒の長さ l と翼の取り付け位置 h を幅優先探索を用いて探索する。



6.2 Spin Quality と Flight Quality の最適化

このステップでは棒の長さや各翼の mounting direction や mounting angle を変えることで spin quality と flight quality を同時に最適化する。翼の取り付け位置は棒の長さと同じ比率を保ちながら変化する。本研究ではこの最適化計算に最急降下法を用いた。

6.2.1 Spin Quality

前のステップでの調整は安定に回転するために不十分である。主慣性モーメントの差が大きいことは安定な回転に重要である。

本研究での spin quality の定義は Bächer ら [3] の提案したものの拡張である。Bächer らの提案した spin quality では主慣性モーメントが最大のものに対応する慣性主軸周りで回転することを前提としていたため、これを f_{large} として表す。しかしながら、竹とんぼの場合では、典型的な二枚の翼で構成された竹とんぼがそうであるように、主慣性モーメントが最小のものを回転軸として回転する場合がよく見られる。従って、本研究では主慣性モーメントが最小のものを回転軸として回転したときの spin quality として f_{small} として新たに定義する。Spin quality を重心の棒からの距離、棒と棒に最も近い慣性主軸との角度、 f_{large} または f_{small} を用いて定式化した。

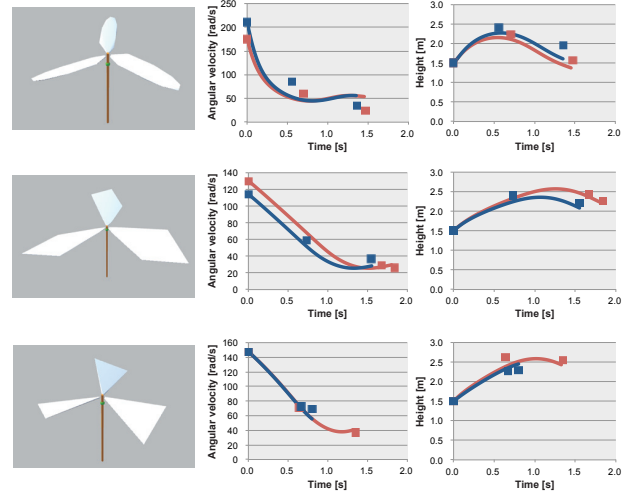


図 10. フィッティングされた飛行軌跡。曲線はシミュレーションの軌跡を表し、四角い点は録画したビデオから得た情報を表している。真ん中の列は角速度推移を表し、右の列は高さ推移を表している。

6.2.2 Flight Quality

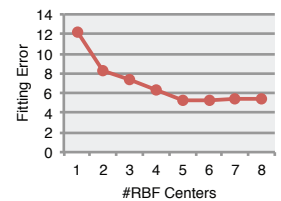
竹とんぼを高く、長く飛ばすためには spin quality だけでは不十分である。28 個の訓練データの全時点のデータの速度と角速度を用いて、高く長く飛ばすために、上方向の力が大きく、回転を妨げるトルクが小さくなるように flight quality を定式化した。

7 結果

本システムを用いて機能的で創造的な竹とんぼを製作した。図 1 はその例である。以下、パラメタフィッティングの評価について述べる。

フィッティングの収束。翼要素の空力係数を 14 種類の

竹とんぼを用いて、28 個の実験データから学習させた (5.3 節)。インセットの図は放射基底関数の中心のデータの数と fitting error の収束の様子を表している。本システムは中心が 8 個のものを空力係数を構築するために用いている。



シミュレーションの正確性。 学習結果の妥当性を示すために、竹とんぼを実際に飛ばした軌跡とシミュレーションで得られた軌跡を比較した。図 10 は訓練用のデータに含まれている竹とんぼを、図 11 では訓練データには含まれていない竹とんぼを用いて比較を行った結果を示す。訓練用の竹とんぼには非対称なものや 2 枚の翼をもつ竹とんぼは含まれていないが、シミュレーションはある程度妥当な精度を示している。

8 考察

Aerodynamics Model. 飛行シミュレーションにおいて、翼同士の干渉による影響は考慮していない。したがって、複数の翼を近くに配置するなどシミュレーション精度の低下をもたらす。

Fitting Accuracy. 本研究では訓練用のデータを集めるために14種類の竹とんぼをデザインした。用いた竹とんぼは全てのデザインを網羅しないとしても、飛んでいる最中、迎角とレイノルズ数はそれぞれの飛行において劇的に変わるので学習に十分な範囲の迎角とレイノルズ数を得ることができる。しかしながら、さらに多くの飛行データを集めることや、専門的なモーションキャプチャシステムを構築し高さや角速度を正確に計測することはシミュレーション精度の向上につながる。

Beyond Planar Wing. 本システムでは平板翼のみを扱っているが、3次元形状の翼を扱えるようにすることは今後の課題である。3次元形状の翼を用いることでより高く長く飛ぶ竹とんぼを作ることが可能となるだけでなく、例えば翼を捻ることによって、さらに創造的な竹とんぼのデザインが可能となる。

9 まとめ

本研究では自由形状の竹とんぼをインタラクティブにデザインするためのシステムを提案した。本システムはユーザが編集集中の竹とんぼの飛行予測を行いそれを可視化し、またデザイン最適化機能を提供した。これらの機能を可能にするために梅谷らの手法[14]を拡張したデータドリブンの飛行シミュレーション手法と、竹とんぼがより安定して回転し高く長く飛ぶようにする最適化の定式化について提案した。

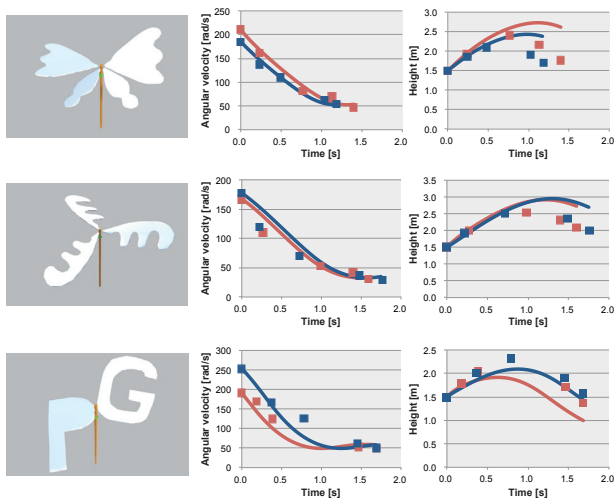


図 11. 訓練用の竹とんぼに含まれていない竹とんぼのシミュレーションの正確性。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26240027, 26-8574 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] I. H. A. Abbott and A. E. v. Doenhoff. *Theory of wing sections: including a summary of airfoil data*. Dover Publications, corr. edition, 1959.
- [2] J. D. Anderson Jr. *Fundamentals of aerodynamics*. McGraw-Hill Education, 5th edition, 2010.
- [3] M. Bäcker, E. Whiting, B. Bickel, and O. Sorkine-Hornung. Spin-it: Optimizing Moment of Inertia for Spinnable Objects. *ACM Trans. Graph.*, 33(4):96:1–96:10, July 2014.
- [4] B. Bickel, M. Bäcker, M. A. Otaduy, W. Matusik, H. Pfister, and M. Gross. Capture and Modeling of Non-linear Heterogeneous Soft Tissue. *ACM Trans. Graph.*, 28(3):89:1–89:9, July 2009.
- [5] J. S. Herbert Goldstein, Charles Poole. *Classical mechanics*. Addison Wesley, 3rd edition, 2001.
- [6] G. Ingram. Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method (Version 1.1), 2011.
- [7] J. G. Leishman. *Principles of Helicopter Aerodynamics with CD Extra*. Cambridge university press, 2nd edition, 2006.
- [8] T. Martin, N. Umetani, and B. Bickel. OmniAD: Data-driven Omni-directional Aerodynamics. *ACM Trans. Graph.*, 34(4):113:1–113:12, July 2015.
- [9] M. Nakamura, Y. Koyama, D. Sakamoto, and T. Igarashi. An Interactive Design System of Free-Formed Bamboo-Copters. *Computer Graphics Forum*, 35(7), 2016. (Pacific Graphics 2016 Conference Proceedings). (to appear).
- [10] D. K. Pai, K. v. d. Doel, D. L. James, J. Lang, J. E. Lloyd, J. L. Richmond, and S. H. Yau. Scanning Physical Interaction Behavior of 3D Objects. In *Proc. SIGGRAPH '01*, pp. 87–96, 2001.
- [11] M. J. D. Powell. Direct search algorithms for optimization calculations. *Acta Numerica*, 7:287–336, 1998.
- [12] R. Prévost, E. Whiting, S. Lefebvre, and O. Sorkine-Hornung. Make It Stand: Balancing Shapes for 3D Fabrication. *ACM Trans. Graph.*, 32(4):81:1–81:10, July 2013.
- [13] G. Saul, M. Lau, J. Mitani, and T. Igarashi. SketchChair: An All-in-one Chair Design System for End Users. In *Proc. TEI '11*, pp. 73–80, 2011.
- [14] N. Umetani, Y. Koyama, R. Schmidt, and T. Igarashi. Pteromys: Interactive Design and Optimization of Free-formed Free-flight Model Airplanes. *ACM Trans. Graph.*, 33(4):65:1–65:10, July 2014.
- [15] L. Wang and E. Whiting. Buoyancy Optimization for Computational Fabrication. *Comput. Graph. Forum*, 35(2):49–58, 2016.
- [16] J.-c. Wu and Z. Popović. Realistic Modeling of Bird Flight Animations. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):888–895, July 2003.

WISS2016 採録判定時のコメント

採録区分：ロング採録

判断理由：

筆者らが行ってきた一連の「自由形状デザイン」研究の一環ではあるものの、自由形状の竹とんぼをデザインするというテーマ設定自体が斬新です。回転飛翔体である竹とんぼのデザインに特化した機能を提案・実装し、手法の有効性を示しています。「訓練用竹とんぼ」によるデータ収集と空力パラメタの推定、3D プリンタを利用して羽根の正確な方向と仰角を得るアイデアも秀逸であり、ロング採録となりました。

レビューサマリ：

全体の構成：

本論文は国際学会で発表予定の内容を間欠にまとめたものと思われませんが、「自由形状竹とんぼの設計支援」という斬新な問題設定はもちろん、実現の為のアイデアと実装の全てが明確に述べられています。

改良のためのコメント等：

- ・デザイン上の制限は無いのでしょうか？ もしあるのならば、それを明確にすべきと思われます。例えば（極端なケースですが）2枚の羽の大きさが極端に違う場合には、どのようなことになるのかといった点です。

- ・筆者らの主張点についてはドメイン（＝竹とんぼ）固有の新規性がありますが、筆者らの既存研究である「自由形状紙飛行機の設計」と類似した技術であるとも考えられます。仮に今回述べられた手法が、竹とんぼのデザイン以外にも適用可能なものであれば、それを示して頂けると応用範囲が広がると思われます。

- ・既にほぼ完結した研究と思われますが、将来展望を補強していただければより有用と思われます。

本論文に対する各査読者の詳しいコメントは以下のページを参照のこと：

<http://www.wiss.org/WISS2016Proceedings/oral/24.html>

***本ページは論文本体ではありません**

【自由形状の竹とんぼのインタラクティブデザインシステム】