

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	3D プリント生物規範型羽ばたき翼の柔軟性最適化
Title(English)	
著者(和文)	藤井智矢, 近藤寛隆, 田中博人
Authors(English)	Tomoya Fujii, Hirotaka Kondo, Hiroto Tanaka
出典(和文)	第41回日本ロボット学会学術講演会, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2023, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

3D プリント生物規範型羽ばたき翼の柔軟性最適化

○藤井 智矢 近藤 寛隆 田中 博人 (東京工業大学)

We engineered a 3D-printed, bio-inspired artificial wing with adjustable stiffness. We assessed how changes in feather shaft bending stiffness, torsional spring stiffness, and membrane extensibility influence lift generation and efficiency. Our results indicate that by keeping the exponent parameter of the hummingbird model's bending stiffness function constant while increasing the bending stiffness of the feather shaft, reducing the torsional stiffness of the torsional spring, and enhancing the extensibility of the membrane, both lift and lift efficiency can be improved.

1. 緒言

ハチドリは、持続的にホバリングできる唯一の鳥類で、急加速や急旋回など、優れた飛行能力を有している。そのため、ハチドリを規範とした小型羽ばたき飛行ロボットが研究されている [1-4]。典型的な人工翼では、1 枚のプラスチックフィルムが、少数の比較的高剛性な炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などの棒で支持される [1-4]。この構造は軽量で、一定の柔軟性を持つ。しかし、設計が単純なものに限られ、翼面内の剛性分布の調整が難しい。また、フィルムが伸長しないため、翼面の変形も制限される。一方、翼面のねじり変形は揚力生成効率を向上させることが分かっている [5, 6]。

最近、著者らは、翼の剛性分布の設計自由度の拡大と翼面の大変形を実現するために、伸縮性エラストマーフィルムが複数の 3D プリント棒で支持されるハチドリサイズの生物規範人工翼を考案した [5]。特に、前縁基部のねじり板ばね構造によって、翼幅方向のねじれ柔軟性を備える。3D プリント棒 (以下、羽軸と呼ぶ) はハチドリの風切羽の羽軸に、ねじり板ばねはハチドリの手首関節を規範とした。さらに、伸縮翼膜は、コウモリの翼膜を規範とした。電動羽ばたき機構を用いた実験から、伸縮翼膜と前縁ねじれ構造により、揚力はやや小さくなったものの、効率 (揚力/電力) が向上することを示した。

本研究では、各羽軸と前縁ねじり板ばねの柔軟性の設計指針の確立を目指して、5 種類の異なる設計の人工翼を製作して、揚力と効率を電動羽ばたき機構を用いて比較した。その結果、高揚力かつ高効率な翼の設計指針を確立し、従来翼 [5] よりも高揚力かつ高効率な翼を実現した。

2. 翼の設計と製作

2.1 翼の構成と製作方法

本研究の翼は、翼膜、羽軸、ねじり板ばねを含む基部、及び羽ばたき機構への取り付け部で構成される (図 1(a))。基部からは 5 本の羽軸が伸び、翼膜を支持する。翼平面形は、モデルとしたチャムネエメラルドハチドリ [7] の翼平面形を 1.1 倍して作図した。翼長は 80 mm で、翼の前縁形状はモデルハチドリ同一であり、後縁は長半径 85 mm、短半径 28 mm の四分楕円の一部である。

翼基部は、ねじり板ばねと 2 つのストッパーを

含む (図 1(b))。ねじり板ばねのねじり剛性 K_R は、材料の横弾性係数を G [Pa]、ねじり板ばねの板厚を a [m]、板幅を b [m] とする (図 1) と次式で表される [8]。

$$K_R = G \times \frac{a^3 b}{3} \left[1 - \frac{192}{\pi^5} \left(\frac{a}{b} \right) \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi b}{2a} \right] \quad (1)$$

ゆえに、 K_R を小さくするには、 a と a/b を小さくすればよい。ただし、この板ばねの翼弦方向曲げ剛性 K_B は

$$K_B = E \times \frac{a^3 b}{12} \quad (2)$$

であり、特に a が小さい場合に、 K_B が小さくなってしまう。そこで、ねじり板ばねの翼弦方向の曲げ変形を止めるために、基部両端にストッパーを設けた。ストッパーの位置を保つため、翼裏面側から 12.5 μm 厚のカプトンフィルム (カプトン 50H, 東レ・デュポン株式会社, 日本) で抑える構造とした (図 1)。

翼膜以外の部位 (以下、翼フレームと呼ぶ) の設計には、3D CAD ソフトウェア Rhinoceros 7 (Robert McNeel & Associates, アメリカ) のプラグイン Grasshopper を用いたパラメトリック設計を採用した。

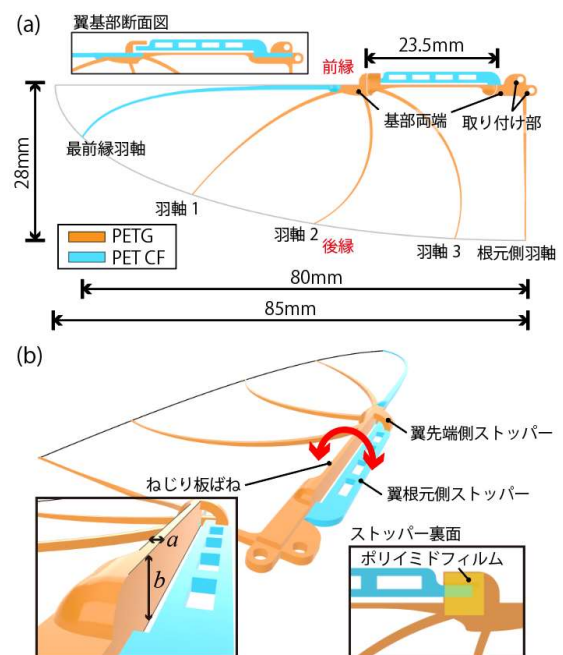


Figure 1 Design and structure of our wing. (a) Top and (b) oblique viewpoints.

Table 1 Young's modulus and 3-D printing setting of each material

材料	PETG	PET CF
ヤング率 E [GPa]	2	8
横弾性係数 G [GPa]	0.6	1
プリントコア	AA0.25	CC0.4
レイヤー高さ [mm]	0.05	0.05
印刷ライン幅 [mm]	0.2	0.34
印刷温度 [°C]	235	267
印刷速度 [mm/sec]	40	30

Table 3 Design parameters and materials of wing shafts

	最前縁羽軸	羽軸 1~3	根元側羽軸
曲げ剛性係数 k	18	表 3	4.5
曲げ剛性指数 p	2.5	表 3	2.5
材料	PET CF	PETG	PETG
最小幅 [μm]	450	220	220
最小厚 [μm]	250	150	150
最大幅 [μm]	800	800	800
最大厚 [μm]	800	800	800

Table 2 Properties of wings

翼	Standard	Hard-flexion	Exponent-1	Hard-torsion	Non-stretch
羽軸 1~3 の曲げ剛性係数 k	3.6	7.2	128.3 / 99.2 / 127.2	3.6	3.6
羽軸 1~3 の曲げ剛性指数 p	2.5	2.5	1	2.5	2.5
ねじり板ばね断面形状 a [μm] $\times$ b [μm]	400 $\times$ 2260	400 $\times$ 2260	400 $\times$ 2260	600 $\times$ 2260	400 $\times$ 2260
翼膜	伸縮	伸縮	伸縮	伸縮	非伸縮
重量 [mg]	191	203	197	204	222

これにより、後述する羽軸の曲げ剛性関数やねじり板ばねの剛性値から、形状を自動生成した。

翼フレームは、熱溶解積層方式の 3D プリント (Ultimaker S3, Ultimaker B.V., オランダ) を用いて、2 種類の材料で一体成形した。印刷設定と使用材料を表 1 に示す。翼膜は、8- μm 厚の熱可塑性ポリウレタンエラストマーフィルム (シルクロン NES85, 大倉工業株式会社, 日本) を紫外線レーザースキャン加工機で切り出して製作した。翼フレームと翼膜は、弾性接着剤 (SUPER X HYPER ワイド, セメダイン株式会社, 日本) により手作業で接着した。

2.2 翼フレームの材料

3D プリントで製作する翼フレームには PETG (polyethylene terephthalate glycol-modified) (Extruder, ドイツ) と PET CF (carbon fiber reinforced polyethylene terephthalate) (3F PET CF 9780 BK, Lehmann & Voss & Co. KG., ドイツ) の 2 つの材料を用いた。PETG はより細かいプリントコアを利用できるため (表 1) 精密な印刷が可能である。一方 PET CF はヤング率が高く (表 1), 曲げ変形を好まない部位に効果的である。

精密な翼製作のため基本的には PETG を用いるが、最前縁羽軸と基部両端内部、翼根元側ストッパーには PET CF を用いた (図 1)。最前縁羽軸と基部両端内部に関しては、翼の羽ばたき方向への曲げ変形を抑制するためである。翼根元側ストッパーに関しては長く曲がりやすい形状にもかかわらず、ストッパーとしてねじり板ばねの翼弦方向の曲げ変形を制限する必要があるためである。

2.3 翼膜の材料

実際のハチドリが羽ばたく際には複数の風切羽がスライドすることで羽軸同士が引っ張られ合うことはない。しかし人工翼では製作の単純化のために 1 枚の翼膜を使用するため羽軸同士が互いに引っ張られ合ってしまう。そのため翼面全体の変形も制限されてしまう。そこでコウモリのように伸縮性

の高い膜を翼膜として使用することでこの問題を解決した[5]。

2.4 羽軸の形状と曲げ剛性

羽軸は、基部から先端にかけて、断面が正方形の先細り形状とした。曲げ剛性 EI を、先端からの距離 x [mm] の関数として次式で与えた。

$$EI = k \times 10^{-9} x^p \quad (3)$$

ここで E はヤング率 [Pa], I は断面二次モーメント [m^4], k , p は任意定数 (以下, それぞれ曲げ剛性係数, 曲げ剛性指数とする) である。この曲げ剛性関数は、チャムネエメラルドハチドリの標本の羽軸の静的曲げ試験の結果 [9] に基づく。15 本の羽軸を持つ標本のハチドリの曲げ剛性係数 k は 0.7-3 程度, p は約 2.5 であったが, 人工翼は 5 本の羽軸で 1 枚の翼膜を支持する構造であるため, これらの数値は羽ばたき実験を通して最適化した (表 2)。ただし, 実用的な強度の確保のため, 羽軸先端の最小幅と最小厚さ, および羽軸根元の最大幅と最大厚さは, 表 2 に示すように定めた。

羽軸配置としては, 板ばねのねじれ変形を積極的に誘起することを意図して, 5 本の羽軸のうち 4 本の羽軸を板ばねの先端に集中させた。

2.5 比較実験用の翼設計

羽ばたき実験で比較する 5 種類の翼の設計パラメータを表 3 に示す。全ての翼の基準となる翼を Standard 翼として, 羽軸 1~3 の曲げ剛性係数 k が 2 倍の Hard-flexion 翼, 羽軸 1~3 の曲げ剛性指数 p を 1 とした Exponent-1 翼, ねじり板ばねの板厚 a が 50% 厚くて高剛性 (K_R は 337%) のねじれにくい Hard-torsion 翼, 翼膜を膜厚 12.5 μm のカプトンフィルムとした Non-stretch 翼を比較して導出した。Exponent-1 翼は, 曲げ剛性関数の積分値が Standard 翼と同じになるように k を調整した。つまり Exponent-1 翼は Standard 翼と比較して羽軸の根元側の剛性が小さく, 先端側の剛性が大きい。

Standard 翼は本研究での最適設計の翼の羽軸 1 ~

3 の曲げ剛性係数を半分にした翼である。すなわち、Hard-flexion 翼が本研究での最適設計翼である。しかし、Hard-flexion 翼以外では、 k を 7.2 と大きくすると羽ばたき中に翼フレームが頻繁に壊れた。従って、Hard-flexion 翼を基準にするのではなく、 $k = 3.6$ の Standard 翼を基準に他の比較翼を設計した。

3. 羽ばたき実験

3.1 羽ばたき機

実験に用いる機体は文献 [5] と同じである。羽ばたき振幅は $158^\circ (\pm 79^\circ)$ 、羽ばたき周波数は 20 Hz および 25 Hz とした。これはモデルハチドリよりも、羽ばたき振幅は大きく（ハチドリ 108° ）、羽ばたき周波数は小さい（ハチドリ 29 Hz）[7]。翼長軸回りのフェザリングは、図 2(a) に示すように、ストッパーによって $\pm 20^\circ$ に制限した。この制限角は、モデルハチドリの打ち上げ時の最大羽ばたき角 (18°) とほぼ同じである。羽ばたき周波数は、羽ばたき機上部のエンコーダによりリアルタイムで確認しながら、モータに電流を供給する安定化電源（直流安定化電源 PA-B シリーズ、株式会社テクシオ・テクノロジー、日本）の一定電圧値を手動調整して設定した。

3.2 実験方法

羽ばたき機に片翼のみを取り付け、ロードセル（Nano17Ti-SI-8-0.05, ATI Industrial Automation, Inc., アメリカ）上に設置した（図 2）。ロードセルは、内部の半導体歪ゲージの光応答を防ぐため、遮光テープで覆った。機体高度が地面効果の影響を受けない翼長 2.5 倍以上 [10] になるように、ロードセルを支柱上に取り付けた。

ロードセルとエンコーダの出力は、データロガー（DL850E, 横河計測株式会社、日本）で同期記録した。モータへの入力電流も、電流プローブ（701933, 横河計測株式会社）で同期計測した。

各翼は、2 つずつ製作した。羽ばたき実験は全種類 1 つ目の翼の羽ばたき実験が全て終了した後に、2 つ目の翼の実験を行った。計測周波数は 20 Hz と 25 Hz で、各翼に対して「20 Hz, 25 Hz」のセットを 3 回行った。各種の翼に対して 2 枚 $\times$ 3 回の計 6 個のデータをそれぞれ時間平均した後に平均して、1 秒間の平均揚力値 F [N] と電流値 I [A]、周波数 f [Hz] を算出した。電圧値 V [V] は、安定化電源の設定電圧値であり、平均消費電力 P [W] は

$$P = VI \quad (4)$$

で求めた。また、今回の実験では、平均消費電力 P [W] あたりの平均揚力 F [mN] を揚力効率 η [mN/W] と定義し、次式で求めた。

$$\eta = \frac{F}{P} \quad (5)$$

今回、Standard 翼の値を 100% とし、その他の翼の値の比率を求めた。また、標本標準偏差を用いてエラーバーを求めた。

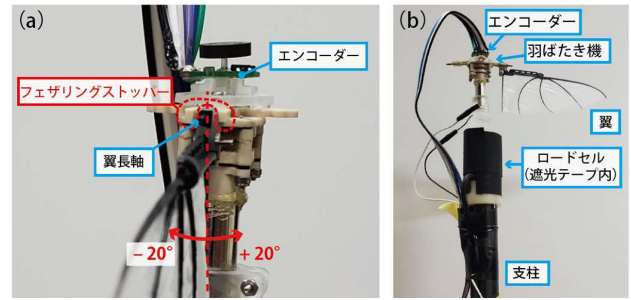


Figure 2 (a) Feathering limiter and (b) experimental setup

4. 実験結果

20 Hz および 25 Hz で羽ばたかせた際の揚力計測結果を図 3 に示す。まず 20 Hz では Hard-flexion 翼, Hard-torsion 翼, Non-stretch 翼が基準の Standard 翼よりも 10% 程度揚力が大きくなった一方 Exponent-1 翼との間には大きな差は見られなかった。次に 25 Hz では Hard-flexion 翼と Hard-torsion 翼が 11%, Non-stretch 翼が 22%, 基準の Standard 翼よりも大きくなった一方 Exponent-1 翼との間には大きな差は見られなかった。

20 Hz および 25 Hz で羽ばたかせた際の揚力効率を図 3 に示す。まず 20 Hz では Hard-torsion 翼と Non-stretch 翼の 2 つがそれぞれ 6%, 13%, 基準の Standard 翼よりも小さくなり、その他はほとんど差が見られなかった。次に 25 Hz では Exponent-1 翼, Hard-torsion 翼, Non-stretch 翼がそれぞれ 5%, 8%, 6%, 基準の Standard 翼よりも小さくなり、Hard-flexion 翼との差はほとんど見られなかった。

5. 考察

5.1 羽軸の影響

揚力に関しては羽軸の曲げ剛性、特に羽軸全体の

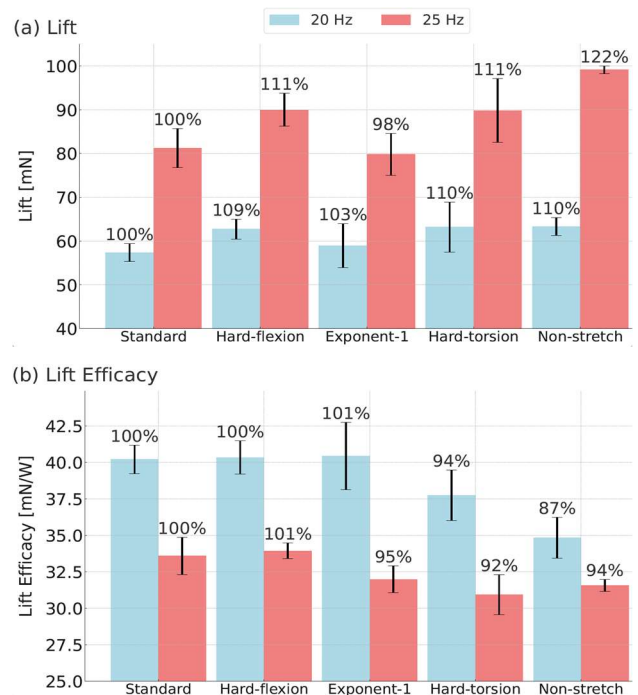


Figure 3 Comparison of (a) lift and (b) lift efficacy of each wing

曲げ剛性関数の積分値が大きい方が揚力の値も大きくなるということが分かった (図 3(a), Hard-flexion 翼). これは羽軸の曲げ変形が小さいと迎え角が大きくなったからではないかと考えられる.

揚力効率に関しては 20 Hz では今回の比較では違いが見られなかったが, 25 Hz では曲げ剛性指数による違いがあり, 羽軸の曲げ剛性分布指数が 1 の場合よりもモデルハチドリと同様に 2.5 である方が, 揚力効率が高くなるということが分かった (図 3(b), Exponent-1 翼). よって羽軸の曲げ剛性指数が適切な翼変形を形成する上で重要であると考えられる. 一方, 羽軸の曲げ剛性の大小による揚力効率の差がほとんど見られなかった (図 3(b), Hard-flexion 翼) のは, 羽軸の曲げ剛性が大きいとねじり板ばねにかかるトルクが大きく翼面がねじれ, 羽軸の曲げ剛性が小さいとねじり板ばねにかかるトルクは少し小さくなるものの, 羽軸の曲げ変形により翼面のねじり変形を補ったことにより, どちらも同程度のねじり変形を形成したからではないかと推察される.

5.2 ねじり板ばねの影響

揚力に関してはねじり板ばねのねじり剛性が大きい方が揚力の値も大きくなるということが分かった. (図 3, Hard-torsion 翼). これはねじり変形が小さく, 翼全体の迎え角が大きくなったからではないかと考えられる.

揚力効率に関してはねじり板ばねのねじり剛性が小さい方が揚力効率の値も大きくなった (図 3, Hard-torsion 翼). これはねじり板ばねのねじり剛性が小さい方が, 翼全体が根元からねじれたことによるものだと考えられる.

5.3 伸縮翼膜の影響

揚力に関しては非伸縮翼膜を使うことで最も大きな揚力を生成できるということが分かった (図 3, Non-stretch 翼). これは翼膜が羽軸を引っ張ったことでねじれ変形やキャンバーが小さくなったことによるものだと考えられる.

揚力効率に関しては伸縮翼膜を使うことで揚力効率を高めることができるということが分かった (図 3, Non-stretch 翼). これは翼膜が羽軸同士を引っ張らないために羽軸がより大きく変形し, 翼面がより大きくねじり変形したからではないかと推察される.

5.4 人工翼の設計指針

揚力, 揚力効率を向上させる設計指針は次の通りとなった. まず羽軸の曲げ剛性は特に根元を中心に全体的に高め, ねじり板ばねのねじり剛性を高く, 翼膜の伸縮性を小さくすると揚力を大きくできる. ただし, 耐久性の観点から羽軸の曲げ剛性やねじり板ばねのねじり剛性を大きくすることは難しい. これは揚力効率が低い, つまり抗力が大きくなってしまいうからだと考えられる.

次に羽軸の曲げ剛性を高め, ねじり板ばねのねじり剛性を低くし, 翼膜の伸縮性を高めると揚力効率

が向上する. この条件は翼のねじりを高めていると考えられる. また翼のねじりは抗力を小さくするため [6], 耐久性が向上すると考えられる.

よって, 本研究の比較した翼の中では, Hard-flexion 翼の設計が揚力の大きさ, 揚力効率, 耐久性いずれにおいても最適といえる.

6. 結言

本研究では, 人工翼の設計指針の確立のため, 羽軸の曲げ剛性分布やねじり板ばねのねじり剛性, 翼膜伸縮性を変化させることで揚力や揚力効率がどう変化するかを確認した. その結果, 羽軸曲げ剛性分布関数はその係数以外の部分をモデルハチドリに従い, 羽軸曲げ剛性は大きく, ねじり板ばねのねじり剛性は小さく, 翼膜の伸縮性は高い方が揚力と揚力効率の両方を向上させることができるということが分かった.

参考文献

- [1] Y. Nan, M. Karásek, M. E. Lalami, A. Preumont: "Experimental optimization of wing shape for a hummingbird-like flapping wing Micro Air Vehicle," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 12, no. 2, 026010, 2017.
- [2] M. Keennon, K. Klingebiel, H. Won: "Development of the nano hummingbird: A tailless flapping wing Micro Air Vehicle," 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012.
- [3] D. Coleman, M. Benedict, V. Hirishikeshaven, I. Chopra: "Development of a robotic hummingbird capable of controlled hover," *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 62, no. 3, pp. 1-9, 2017.
- [4] T. Nakata, H. Liu, Y. Tanaka, N. Nishihashi, X. Wang, A. Sato: "Aerodynamics of a bio-inspired flexible flapping-wing Micro Air Vehicle," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 6, no. 4, 045002, 2011.
- [5] T. Fujii, J. Dang, H. Tanaka: "Hummingbird-bat hybrid wing by 3-D printing", *IEEE The International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3404-3410, 2023.
- [6] T. Nakata, R. Noda, H. Liu: "Effect of twist, camber and spanwise bending on the aerodynamic performance of flapping wings," *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, 17-00618, 2018.
- [7] M. Maeda, T. Nakata, I. Kitamura, H. Tanaka, H. Liu: "Quantifying the dynamic wing morphing of hovering hummingbird," *Royal Society Open Science*, vol. 4, no. 9, 170307, 2017.
- [8] A. P. Boresi, K. P. Chong, J. D. Lee: *Elasticity in engineering mechanics*, pp. 570-574, Wiley, 1987.
- [9] A. Kawahara, M. Aizawa, T. Yamasaki, and H. Tanaka: "Fabrication of a Hummingbird-mimetic Flexible Flapping Wings," in 30th 2019 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 138-140, 2019.
- [10] 東昭: 生物の動きの辞典, p.110, 朝倉書店, 1997.