

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04850

研究課題名（和文）光ファイバセンシングと深層強化学習を統合した揚力観測に基づく可変翼の構造制御

研究課題名（英文）Morphing-wing-structure control based on lift load monitoring by integrating optical fiber sensing and deep reinforcement learning

研究代表者

和田 大地（Wada, Daichi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：10770480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では無人機の翼を対象として、光ファイバセンサにより飛行中のひずみ分布を測定し、その情報を用いて揚力分布を同定する技術を構築した。さらに、同定された揚力分布や風の向きをもとに、構造負荷をリアルタイムで低減する制御技術を構築した。同定や制御には、それぞれ機械学習、深層強化学習により生成したニューラルネットワークを適用した。また鳥のように変形する可変翼を設計・製作し、変形による空力特性の変化を検証した。これら技術は風洞試験によりその成立性・効果を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造負荷低減という、より高次な構造運用目的に対して深層強化学習を適用する好例を示せた。とりわけ「構造状態をセンシングし、飛行環境を認識し、それに合わせて制御する」という体系的なシステムとして技術統合しており、知能的な構造運用の技術体系を提案できた。可変翼によるより豊かな空力表現・活用も含めて、風洞試験により実証できたことで、実用性のある工学的知見となった。

研究成果の概要（英文）：Focusing on the wings of unmanned aerial vehicles, this study has developed a technique to identify lift loads based on strain distributions measured by optical fiber sensors. In addition, based on the identified lift loads and wind directions, a control technique has been developed to reduce structural loads in real time. For the identification and control, neural networks were deployed, which were generated by machine learning and deep reinforcement learning, respectively. Furthermore, a morphing wing, which changed its bird-inspired wing shape, has been designed and prototyped. The aerodynamic characteristics that varied in accordance with morphing modes were examined. These techniques have been tested in a wind tunnel and demonstrated their feasibility and effectiveness.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：深層強化学習 可変翼 揚力同定 機械学習 光ファイバセンシング 構造強度

## 1. 研究開始当初の背景

鳥のように翼の形状や面積を変形させる構造を持った翼を、可変翼という。可変翼を無人機に応用することで、革新的な飛行性能を実現できる期待がある。ピンポイントで着陸することや、空を長い時間帆翔し続けること、強風・悪天候でも安全に飛行することなどである。搜索や観測、擬似衛星など、新たな航空機能・将来産業へのインパクトが期待されている。

一般的にも強度設計・保証はモノの実現において不可欠だが、可変翼ではことさら重要な技術課題となる。駆動部・リンク部・大変形部などで構造負荷がクリティカルになるからだ。加えて複雑な構造・形状から、負荷の予測も難しい。一方、事前に余裕を持たせる設計のみに依存した対処では、重量増を招き、可変翼採用の効果・意義を消滅させてしまう。“模型サイズ”飛行機の実験規模ならばその「軽量さ」と「構造破壊も想定した試行錯誤的背景」から、強度の観点は棚上げ出来る。しかしフルスパン数 $m$ 以上の可変翼無人機・航空機実装を現実的に見据えた際には、『構造的成立性(強度 > 負荷)を確保する可変構造制御手法の構築』が必須である。

このような構造強度的側面を視野に入れた可変翼技術研究は、現行の研究において稀である。そこには「飛行中に構造負荷を実測する技術が確立されていない」そして「(実測したとしても)それを制御する技術が研究されていない」という背景がある。

この現状に対し、本研究は、先行研究を活かした技術ボトムアップで課題を解決する。

当該研究者らは先行研究で、“主翼にかかる揚力分布を同定する技術”を提案・実証(風洞試験)することに成功した。先進的な光ファイバセンサにより翼表面のひずみ分布を効率的にセンシングし、観測ひずみをニューラルネットワーク(NN)にフィードすることで、高精度・ロバストに揚力分布を同定できる。すなわち運用中の翼構造に「どのような荷重がかかっている」、「どれほどの荷重がかかっている」かを“実測”できるようになった。

得られた情報をどう使うかが重要な次のステップである。つまり、同定・実測された構造負荷(荷重)に基づき可変機構を駆動・制御する信号処理技術を提案・構築出来れば、「強度 > 負荷」となる構造強度領域内で、可変翼による飛行性能を発揮するクローズドループ構造制御が実現する。「可変構造設計 揚力同定(光センシング・機械学習) 構造制御(同定情報処理)」と技術をボトムアップ的に統合することで、可変翼の成立性および有効性を検証・評価出来る。ひいては可変翼技術の実現に貢献出来る。

## 2. 研究の目的

本研究では、先行研究成果の“主翼揚力分布同定技術”を応用して構造負荷実測を行い、同定情報に基づいて負荷低減する、“構造負荷同定・制御技術”を開発する。

可変翼の揚力同定には先進的な光ファイバセンシングと機械学習技術を適用する。可変構造の制御には深層強化学習技術を適用する。

本研究により、可変翼制御のために一本化された技術・機能体系を構築する。

## 3. 研究の方法

風洞試験により「揚力分布の同定技術」と「構造負荷低減制御技術」の統合実証を行う。

光ファイバセンシングにより翼表面のひずみ分布を計測し、教師あり機械学習により生成された NN で揚力分布を同定する。同定された揚力分布をコントローラにインプットし、翼駆動系(舵面)を操作する。構造制御の課題を、「目標の総揚力を一定に維持しながら、翼根モーメントを最小化する」という制約条件付き構造負荷低減最適化問題に具体化し、制御に取り組む。

コントローラの生成では、深層強化学習を適用する。飛行状態(高度 総揚力)を保持しながら、構造強度(翼根モーメント)領域において自律的に最適状態を探索・移動するエージェントを学習により生成する。

また、同定・制御技術実証に加え、可変翼そのものの設計・製作・評価にも取り組む。鳥の筋骨格に倣った翼変形機構を設計し、シンプルなサーボ駆動に対してしなやかに・大きく形状を変える翼を製作する。可変翼も風洞試験に供し、その空力的な表現力を検証する。

## 4. 研究成果

揚力分布同定・構造負荷低減制御の統合実証で使用した多舵面翼模型を図1に示した。高アスペクト比を有した翼で、後縁に沿って8舵面を有する。各舵面で区切られたセクションごとに圧力孔が配され、操舵によって変化する揚力のスパン方向分布をセクションごとに計測できる。主桁・後桁に沿って2ラインの光ファイバセンサが接着され、計60点のひずみ分布を計測できる。

ひずみ分布から揚力分布および迎角を同定するフローを図2に示した。予め収集されたひずみ分布・揚力分布・迎角の計測データに基づき、教師あり学習により同定用の NN を生成した。NN は荷重同定に相当する部分と迎角同定に相当する部分の2つに分かれている。これらを用いることで、制御実験においては、ひずみ分布の計測だけで揚力分布・迎角の情報を同定できることとなる。図3に揚力分布同定の結果例を示した。舵面(Flap)の角度分布に相関して揚力が分布していることがわかり(黒点線:圧力孔から算出した真値)かつ光ファイバセンサと NN によ

る同定が精度よくそれを同定していることがわかる（黒実線）。

通常の無人機において、揚力分布と迎角は空力現象としても制御のための観測値としても肝要なパラメータでありながら、実測するのは難しいことが多い。揚力分布を実測するには多くの圧力孔・チューブの艤装が必要であり、システムの複雑化や重量増をもたらす。迎角は、特に高アスペクト比翼や変形翼などの場合、翼の位置（スパン方向）によって局所的な迎角が変化・分布することが想定され、それを細かに実測するセンサ搭載は簡易でない。

光ファイバセンサによる構造への負荷の少ない・効果的なモニタリングを活用して揚力分布や迎角を観測できるのは、飛行システムの高度化に対して大きな貢献となると言える。

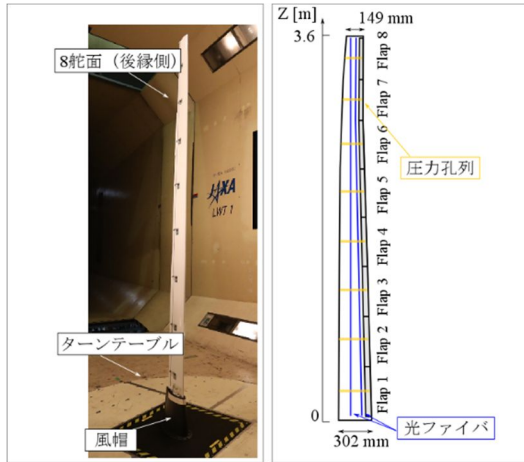


図 1 . 多舵面翼模型



図 2 . 荷重・迎角同定フロー

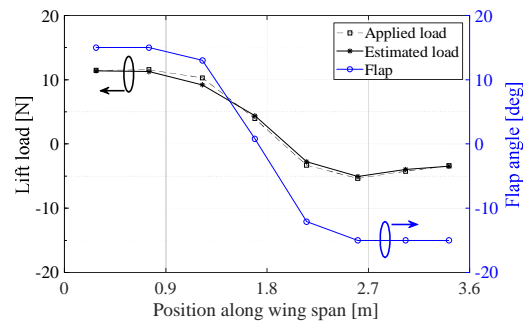


図 3 . 荷重分布同定結果例

上の同定技術により揚力分布と迎角を観測値として取得できる。そこで、揚力分布 ( $F$ ) と舵角分布 ( $\delta$ )、迎角 ( $\alpha$ ) と指令値としての保持すべき総揚力 (と現総揚力の差:  $\Delta F$ ) を入力として、舵面を駆動する NN ベースのコントローラを生成した。DQN による深層強化学習を応用し、報酬関数には構造負荷低減と総揚力一定を反映させた。学習中のシミュレーションのフローを図 4 に示した。NN コントローラの操舵により空力 (揚力分布  $F$ ) が変わるが、その演算には別途、教師あり学習で生成したシミュレータ用 NN を用いた。なお迎角変化は外乱として定義している。DQN による学習が収束する様子は図 5 に示した。

生成された NN コントローラを用いて、揚力分布・迎角同定 NN と統合し、風洞にて制御実験を行った。結果を図 6 に示す。上段のグラフのように風洞ターンテーブルを回転させ、迎角変動を加えたところ、変化する迎角を正確に同定できている。試験開始後 30 秒ほどから制御を開始しているが、2 段目のグラフにあるように、総揚力は迎角変動下においてもほぼ一定に保たれており、かつ 3 段目のグラフにあるように、構造負荷 (翼根曲げモーメント) はおよそ 6 割にまで低減されている。駆動された 8 舵面の変化は下段グラフに示されており、翼端にある舵面 (Flap 1-3) は常にネガティブな揚力を出す方に切られ、翼根にある舵面 (Flap 6-8) は常に揚力を生成する方に切られている。それら中間にある舵面を駆動することで迎角変化に対応し、翼根モーメントを抑えながら総揚力を保持しており、これは力学的に合理的な操舵である。

本実証により、直接観測が難しいパラメータを同定技術により効果的に取得できること、それらを制御にフィードできること、そして制約のある中で構造負荷を低減するという制御を実現できることが実験的に示された。センシング・同定・制御という、環境を認識して反応する“知的”な構造のプロセスを例証できたと考える。深層強化学習により、(単純な姿勢制御等に比べ) より高次の運用目的を反映した制御・構造運用が可能であることが示されており、この知見は航空分野に限らず、船舶や大規模建造物の運用にも応用可能だと思われる。

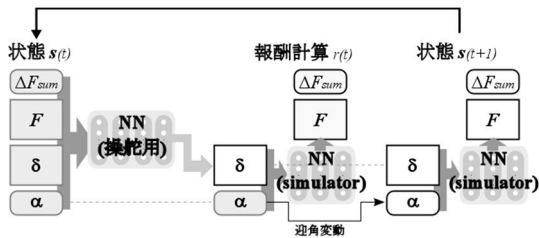


図4. シミュレーションフロー

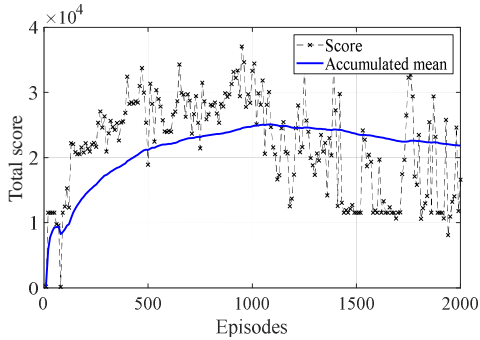


図5. 学習結果

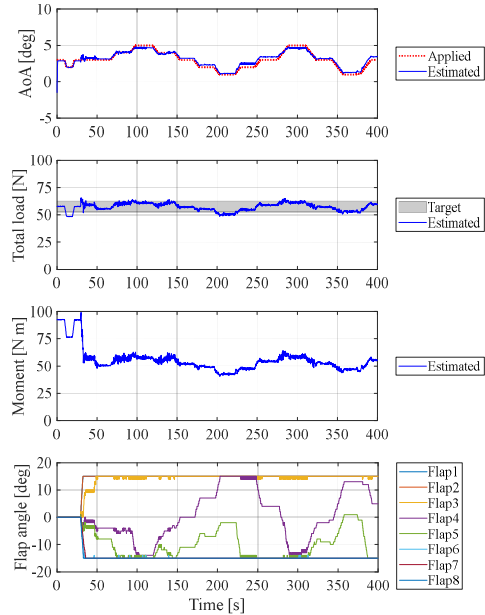


図6. 負荷低減風洞試験結果 (時刻歴)

鳥の筋骨格に倣った可変翼を設計・製作した成果も報告する。翼の変形は図7のように、翼をねじることによってローリングモーメントを生むツイスト、翼を前後に動かしピッチングモーメントを生むスイープ、そして翼を展開・格納し空力変化を生む展開の3つの変形モードを統合した。

とりわけ翼を展開させることによる空力変化は固定翼の単なる延長としての解釈では及ばず、現象として興味深い。翼面積の変化による揚力等の変化だけでなく、翼に接続された羽根の間の隙間の形・大きさが変わることによって、失速特性も変化すると考えられる。

本可変翼を製作し、風洞試験を行った結果を図8、その時の様子を図9に示す。図8に示されるように、迎角を  $0^\circ$  から  $45^\circ$  まで変化させたときの揚力変化を計測した。4つの曲線は図9に示されるように、最も翼を閉じた状態から最も開いた状態までの4形態を示している。迎角が小さい ( $\sim 20^\circ$ ) ときは翼を開いていると揚力が大きく、これは翼面積の効果と考えられる。失速する迎角は翼を閉じているときが大きく、開いているときに比べ、最大で保持できる揚力は大きかった。一方、失速後の挙動では、翼を開いているときの方が揚力を保持できていることが観測された。

翼を変形することで、失速特性を含めた空力挙動の変化を生み出せることが確認された。鳥はこのような空力の変化を最大限に活用している。例えばパーチングの際に翼を開くのは、大きな迎角において失速し、それでも姿勢制御のための空気力を保持しようとしているからと考えられる。

本研究で構築した深層強化学習による知能的な制御と、豊かな表現力を持つ可変翼を組み合わせることで、よりしなやかな飛行を実現できる期待が持てた。今後の研究方針としたい。

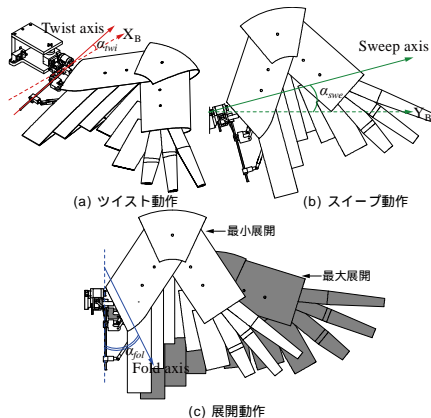


図7. 翼の変形モード

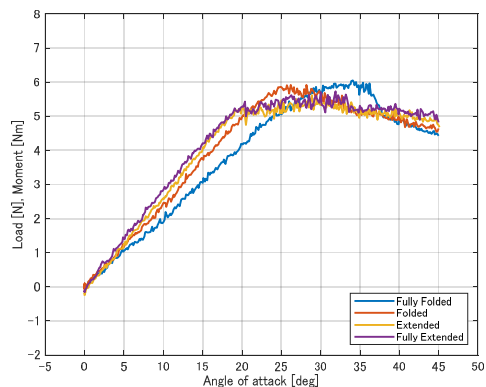


図8. 翼展開による揚力 vs 迎角曲線の違い

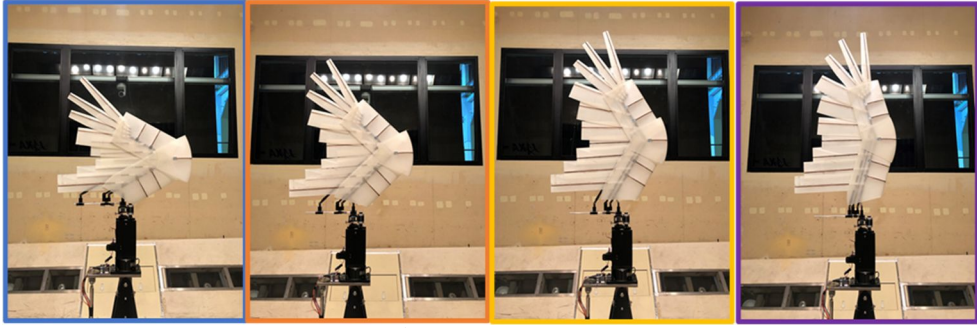


図9．可変翼が風洞試験中に翼展開する様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Wada Daichi, Tamayama Masato, Murayama Hideaki	4. 巻 2
2. 論文標題 Smart wing load alleviation through optical fiber sensing, load identification, and deep reinforcement learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Research Express	6. 最初と最後の頁 045004 ~ 045004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2631-8695/abbb59	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wada Daichi, Araujo-Estrada Sergio A., Windsor Shane	4. 巻 8
2. 論文標題 Unmanned Aerial Vehicle Pitch Control Using Deep Reinforcement Learning with Discrete Actions in Wind Tunnel Test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aerospace	6. 最初と最後の頁 18 ~ 18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/aerospace8010018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Wada Daichi, Tamayama Masato	4. 巻 9
2. 論文標題 Wing Load and Angle of Attack Identification by Integrating Optical Fiber Sensing and Neural Network Approach in Wind Tunnel Test	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1461 ~ 1461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app9071461	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐野 洋一, 有蘭仁, 井川寛隆, 和田大地
2. 発表標題 飛行試験におけるひずみ分布計測結果と有限要素解析との比較(その2)
3. 学会等名 第62回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田大地、井川寛隆、玉山雅人、葛西時雄、有蘭仁、村山英晶
2. 発表標題 Real-time Stress Concentration Monitoring of Aircraft Structure during Flights using Optical Fiber Distributed Sensor with High Spatial Resolution
3. 学会等名 36th Conference & 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田大地、玉山雅人
2. 発表標題 光ファイバひずみ分布計測と深層強化学習による翼の構造負荷低減技術
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田大地、大瀬戸篤司
2. 発表標題 鳥の生体模倣によるモーフィング翼の設計と開発
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 展開・ツイスト・スリーブ機構を有するモーフィング翼	発明者 和田大地	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-154809	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光ファイバセンシングと機械学習・深層強化学習を統合した荷重同定・制御技術	発明者 和田大地、木村圭佑、村山英晶	権利者 和田大地
産業財産権の種類、番号 特許、2019-173265	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------