

## 令和3年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

ふりがな 氏名	ふじもり たかひと 藤森 嵩人	学部 学科	理学部生物科学 科	学年	3年
ふりがな 共同 研究者氏名		学部 学科		学年	年
					年
					年
アドバイザー教員 氏名	藤本仰一 准教授	所属	理学研究科理論生物学研究室		
研究課題名	昆虫の飛行原理の解明とその飛行原理を応用した小型飛行ロボットの開発				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				
<p><b>研究背景と目的：</b></p> <p>昆虫のなかでもハチやカブトムシなど比較的新しいタイプの昆虫は、トンボなどの古い昆虫に比べて一秒間の羽ばたき数が多く、エネルギー効率の良い飛翔をすることが知られている。羽ばたき数の多い昆虫は大きく二つの工夫によって、この高い羽ばたき数を実現させている。一つ目の工夫は彼らのからだの機構である。羽ばたきのための筋肉が翅ではなく弾性を備えた外骨格に結合している。この外骨格はバネのように伸び縮みして、入力を加えなくともその振動で翅が動かされる仕組みになっている。次に筋肉が重要な役割を持っている。この外骨格に結合している筋肉は”筋肉の伸長”を刺激として収縮する伸長活性化 <b>Stretch Activation (SA)</b> という特性を備えている。筋肉は通常、神経からの入力によって収縮を行なうが、SA を備えた筋肉は神経入力ではなく”筋肉の伸長”を刺激として自律的に収縮する。この特性を持つ筋肉二つが先ほどの弾性を持つ外骨格に直交して張られると、外骨格の歪みを介して二つの筋肉が刺激しあうことになる。以上二つの理由によって、神経からの入力刺激がなくとも機構と筋肉の相互作用によって外骨格が高周波数で歪み、それに伴って外骨格に結合した翅が振動し高羽ばたき数を実現すると考えられている。本研究の最終目標はその相互作用によるエネルギー効率の良い飛翔メカニズムを解明、その原理を用いたロボット開発である。また、本研究では、大阪大学工学研究科機械工学専攻、増田容一 助教に工学的な観点からの助言を仰ぎながら、数理モデルをもとに飛翔ロボットを目指し、多くの実機実験や研究者との意見交流を経て、外骨格と筋肉の相互作用で共振角周波数を励起し共振を利用してエネルギー効率よく飛翔する小型ロボットを開発している。</p> <p><b>研究計画と経過、およびそれぞれの区間における成果：</b></p> <p>この研究はオーナーセミナー春夏学期、自主研究に跨って行われ、現在でもオーナーセミナー秋冬学期として進行中のものであるため、現在(12/17)までの振り返りと今後について連ねて記述する。</p> <p>オーナーセミナー春夏学期での大きな目標は、先人たちの積み上げてきた知見、データを活用し数</p>					

理モデルを構築し,その相互作用の安定性や羽ばたき数の条件などに迫ることであった。

### — (オーナーセミナー春夏学期 4~6 月) —

昆虫の飛翔原理の最新の知見や系譜を知るために数多くの論文を読んだ.上記したように昆虫は羽ばたき数を上げるために特殊な筋肉と外骨格の機構を備えている.そのために,論文リサーチは「筋肉の特性」,「外骨格の特性」,「それらの相互作用の仕方」の三つのパートに分かれた。

#### 1-1,筋肉の特性

Pringle(1948)らの研究によると,昆虫の飛翔筋肉は伸展を刺激として収縮が始まる.さらにN. T. George(2012)や Robert. K. Josephson(2000)らのグラフよりこの筋肉は伸展に対して力を一次遅れとして出力する. よって,筋肉の伸展活性化の特性 (SA) は一次遅れ系の微分方程式で表現できると考えた。

#### 1-2,クチクラの特性

A. C. Hollenbeck & A. N. Palazotto(2013)や Jeff Gaul, Nick Gravish, and Simon Sponberg(2019)らの研究にも見られるようにクチクラは弾性をもっていてマスバネダンパ 系で記述できる. よってクチクラはマスバネダンパ 系で記述できると考えた。

#### 1-3,筋肉とクチクラの相互作用

古くは 1950 年ほどから DVM, DLM が弾性を持ったクチクラの外骨格の歪みを介して相互作用していることは唱えられてきた。しかしながら,どのように相互作用するのかという機構については未だに明確な答えがない. 例えば,Boettiger & Furshpan (1952)の唱えた二つの安定な形を持ったクチクラそのもの歪みが筋肉の相互作用を介し翅を上下させる“click” mechanism 仮説や,それを否定した Ewing, Miyan(1985)らは p. m. n. p と呼ばれるクチクラの一部がレバー状の構造になっていて,それがテコの原理のように動き,筋肉の相互作用を介するとした. しかしこれもまた Ennon(1986)らによって否定されている. このため,本研究ではこの論争には立ち入らず,彼らの共通認識である“DLM が縮むと DVM が伸びる”,逆も然り,“DVM が縮むと DLM が伸びる”というエッセンスのみを汲んでモデリングした. 以上のように完成した微分方程式を古典制御理論を用いて安定性解析を行った。

#### 1-4,結果

結果としては,系に保存される角周波数(持続振動角周波数)が,系そのものの固有振動角周波数を励起していることが示唆された. これは筋肉胸郭によって創発される振動数が,筋肉胸郭の揺れやすい振動数に近いことを示している. この現象は自励振動と呼ばれ,そのエネルギー効率を利用した昆虫ロボットは工学的にも興味深い. これらを論文にまとめて日本ロボット学会にて発表した。

仔細は添付の実際に発表した論文(RSJ2021 昆虫を模した羽ばたきロボット開発のための数理モデル構築)にて。

論文 : <https://drive.google.com/file/d/17zIq9gcWoljsWmcMtumGDekdxBPGXlDr/view?usp=sharing>

## — (自主研究 7~12月) —

これらの結果のもと、理論のさらなる修正、実機開発に向けての準備のため7月より実機開発を行った。実機開発にあたって重要なのは筋肉（アクチュエータ）と外骨格（ボディ）の再現、およびその相互作用の再現である。アクチュエータとして空気圧で駆動する人工筋肉、引っ張りバネ、直動モータ、ソレノイドバルブ...などを試しながら、石川・南研究室の設備を利用させていただき数多く実機モデルを作成した

## 2-1,空気圧で駆動する人工筋肉を使った実機実験

続いて、春夏学期に構築した数理モデルwp 実機開発により検証した。実機開発にあたって重要なのは筋肉（アクチュエータ）と外骨格（ボディ）の再現、およびその相互作用の再現である。数理モデル1はアクチュエータとして空気圧で駆動する人工筋肉を使った。これを初期モデルと呼ぶ。

その初期モデルの実機開発は以下である。

- ・人工筋肉 Mckibben(市販)を任意の長さに切断する。
- ・(筋肉の収縮は物理的にバルブが引き抜かれることで起こるため) 筋肉のサイズにあったバルブを作る。
- ・バルブで筋肉と空気が流入してくるチューブを固定する。
- ・これを2セットつくる。

[人工筋肉は入力空気圧に対して力が一次遅れで出力される。これは実際の SA 特性を持つ筋肉と遅れ系という点で類似している。]

- ・3Dプリンタで短冊状の樹脂、留め具をプリントする。
- ・留め具を使い、その短冊を丸めて輪状にする。

[これは二次元的な輪状であり、実際のクチクラの三次元で楕円の構造と樹脂のボディは異なるが、「一方の筋肉が縮むと、もう一方の筋肉が伸ばされる」という本質は再現できている。]

- ・作成した輪状の樹脂に1で用意した筋肉二つを直交するように張る。この時、自作の固定具を使う。
- ・人工筋肉に圧縮空気を流し、その筋肉付きの輪状樹脂を外力を加えて変形させて動きを観察する。

[ボディはその樹脂や形状による固有振動数を持っており、よってマスバネダンパ系の微分方程式で書き表される。以上二つの要素、アクチュエータ、ボディを直交させて張ることで、共振した筋肉がボディの固有振動数を励起して自励振動を起こすと思われる。これが高い羽ばたき数を実現する基本的なメカニズムと思われ、初期モデルに期待される現象である。]

## [結果]

自励的な現象は確認されなかった。これは空気の流入速度がとても早いいため直交する筋肉がほぼ同

時に収縮するためである。このため駆動すると外骨格は上下左右から歪められることで四角形のように変形し相互作用が止まる。この問題は空気流入のスイッチングバルブをさらに精度よく構築すれば解決できると思われたが、そのバルブの設計論が今回の研究の主目的ではないため断念した。その代わりに、測距センサーとソレノイドバルブを用いてマイコンで筋肉の弛緩の調整を試みた。しかし、これも問題があった。ソレノイドバルブの駆動可能スイッチング周波数が 5Hz であった。この物理的な制約があるため、系の固有周波数が 5Hz を超えると自励振動現象を確認できないことが予想された。また、ソレノイドバルブは大電圧で駆動するため、バッテリー、回路、マイコンを積むと自重が増えて、とても飛翔は期待できないためこの案も棄却された（振動現象は 2Hz 程度で確認された）

## 2-2,モーターで直動駆動する筋肉を使った実機実験

2-1 で得た知見とは、本質的に筋肉がバネではないと振動を阻害してしまうということである。空気圧筋肉は収縮の時は筋肉のような特性であるが、伸展方向には剛性を示す。2 の実機を通し、筋肉は基本的にバネではないといけなと感じたため、バネを主軸としたアクチュエータを作ることにした。そこでかつて読んだ論文を参考に、筋肉の出力特性を再現するようなアクチュエータを念頭に見直し、全ての不要なパーツを除き、バネ、DC モーターのみで構成することに成功した。

### [結果]

外骨格に取り付けると振動現象がみられた。モーションキャプチャで振幅と時間をはかり、そのデータをフーリエ変換すると、以前の理論から予想される周波数帯域で振動していた。これは自励振動現象による固有周波数の励起と解釈できる。以上からこの現象に大切なのはバネ特性、適当な遅れ時間だという考えが一層強まった。

以上の内容は日本生物物理学会、学生発表賞の場で発表された。その時に使われた発表動画を添付する。（BSJ2021, The development of insect-like robots using self-excited vibration）

発表動画

: <https://drive.google.com/file/d/19R5DIZgc19VuNsTq0eMjxIS3CD-OllOR/view?usp=sharing>

## — (研究の今後, オナーセミナー秋冬学期) —

現在は最終目標である小型ロボットの開発に向けて実機開発に力を入れて行っている。自主研究の研究より理論通り、弾性を持つ外骨格に遅れ系を持つアクチュエータを取り付けると自励振動現象が見られた。しかしながらまだ翅を動かすほどの振幅、出力が得られているわけではない。これは外骨格への弾性エネルギーへの蓄積と変換を効率よく行えていないためだと思われる。これを解決するにはアクチュエーターが振動を阻害する構造になってしまっていないか(スライド機構による摩擦や粘性のせい)、あるいは外骨格の素材がそもそも適しているのか(塑性変形してはいないか)、外骨格の構造は適しているのか(平面的なリングで良いのか)などを数多くの実験を繰り返し探究しなかなければならない。そのため、現在では実際の昆虫が翅を駆動するほど十分な力を如何に生成しているのかを実機作製を通して究明している。機体の材料、十分な出力

のアクチュエータ, 弾性エネルギーの解放を翅の動きに変換する機構が構築できれば飛翔ロボットの開発が実現すると予想される. 現在最も注目しているのは UC Berkeley が開発した小型ジャンプロボット **Salto** の脚機構である. 100g, 15cm ほどに満たない体長でその 3 倍を超える高さのジャンプを最小限のモーターの駆動で行う. これは研究チームが **galago** という小型の哺乳類の腱 **tendon** を模倣したことによる (また脚のリンク機構を最適に設計している) (Duncan W. Haldane, M. M. Plecnik, J. K. Yim, R. S. Fearing, 2016)

このためモーターがエネルギー損失分だけを瞬時にその部位に弾性エネルギーとして与えるればジャンプが維持される. ここで注目すべきはこの機構が我々の研究が目指しているものとても近いということである. 最小の駆動で最大の振動の維持... 一口に類似しているとは言えないが調べる価値は大いにあるだろう. 現在はさらに, 工学研究科制御専攻・大須賀教授や地球総合工学専攻・鎌田教授, 服部特任研究員, 寺澤助教らの厚意にあやかり, 測定器具を使った理論へのアプローチもさらに強化している.