

2017年度飛行ロボットコンテスト活動記録

The Report of an Activity for the Indoor Flying Robot Contest in 2017

服部 祥英

HATTORI, Shoei

京都大学工学部物理工学科機械システム学コース3回生



1. はじめに

私たちは学部生3人で、毎年夏に開催される全日本学生室内飛行ロボットコンテストの準備に、去年に引き続きDesign Creative Base（以下、DCB）を利用させていただきました。このコンテストは、自作の飛行ロボットの製作技術や操縦技術などを競うもので、全国の大学や高専が参加しています。2016年度から、私がリーダーとして、ユニークデザイン部門という機体の独創性を競う部門に出場することを目標とし、活動を続けてきましたⁱ。去年は軽さを重視しすぎるあまり、歯車などの機構が弱くなり、コウモリのような膜の翼を羽ばたかせるのがやっとでした。それを踏まえ今年は、翼を力強く羽ばたかせるため、一回り大きな、頑丈な機体を設計することにしました。本稿では、今年の活動の計画とその結果、反省を述べます。最後には、2人のメンバーからそれぞれ、この一年の活動を通して考えたことや感じたことを述べてもらいます。

2. 計画

2.1 何をつくるか

2016年度に始めたこの活動の原点は、鳥（特にカラス）そっくりの飛び方をするロボットを作りたいという私の思いです。何をもって鳥そっくりとするのか。それは、第一に翼の動かし方です。私たちの羽ばたき飛行機は、ギアボックスと羽ばたき機構、主翼、そして尾翼とその付け根部分、ギアボックスと尾翼の付け根をつなぐ胴体部分からな

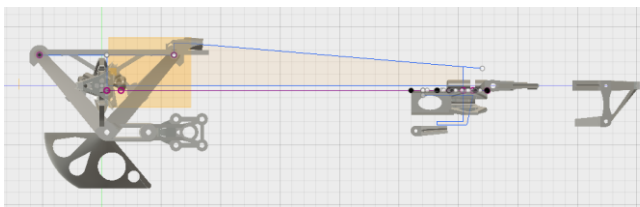


fig. 1 胴体部分の基本構成
(左側:ギアボックスと羽ばたき機構、右側:尾翼、これらの部品はカーボンロッドで接続される。歯車、カーボンロッド等は省略)

ⁱ 去年の活動の詳細は、デザイン学論考vol.8をご覧ください。

ります (fig.1)。去年はギアボックスの開発に苦戦し、羽ばたき機構は機械的に肩の関節だけを上下に振るものを作るのが精一杯でした。今年は、機構部分に力を入れて、肘や手首にあたる関節まで利用した曲線的な軌道を描くような機構を作りたいと思っていました。そこで、いかに翼上の複数の関節を同時に動かすことのできる軽量の機構を設計するか、ということに重点を当てました。

どうすれば複数の関節を同時に動かすことが出来るのか。手段としては、複数のサーボで制御する方法と、メカニズムを駆使する方法が考えられます。私はメカニズムを選びました。理由は2つあります。1つ目は、周期的に同じ運動をする機構を作れば良かったためです。2つ目は、サーボとモータを同期させる制御を実現することは難しいと考えたためです。では、メカニズムで実現するには何が課題となるか。一番の問題は、機構の複雑さと軽さの両立です。複数の関節をタイミングよく動かす複雑な機構を可能な限りの軽量化し、翼面に納めなければなりません。さらに、いくつかの関節をまたいで、変位を伝える必要もあります。考えるうちに、この関節をまたぐ、という部分が、自転車のワイヤーブレーキと同じ状況であることに気が付きました。ハンドルがどのような角度であっても、ブレーキの利きには影響がありません。そこでたどり着いたのが、重いワイヤーの代わりに、頑丈な糸を使うというアイデアでした。糸は、軽やかさばりません。鋼並みの引っ張り強度を持ち、かつほとんど全く伸びないというPEラインという糸が、釣りで使われていることを知り、機構の部品として使えるのではないかと思います。

では具体的にどのような構造なのか、fig.2の概略図をご覧ください。左の黒丸で示されている部品が往復直線運動をすると、そこにつながれた釣り糸が引っ張られて動き、最終的に右側の黒い棒で示された翼が、左端にある支点を中心に上下に羽ばたきます。左の黒い部品は、この図にはありませんがピストンクランク機構によって動かします。また、糸はその道のりを一定に保つためにチューブの中を通します。このチューブの出口の位置さえ変更すれば、任意の位置にある関節を、複雑なリンク機構を介することなく動かすことが出来ます。この機構を思いついたときは本当に嬉しく、何が何でも実現してやろうと思いました。また、羽ばたき機構の設計をしたときに書いたスケッチもfig.2に示します。

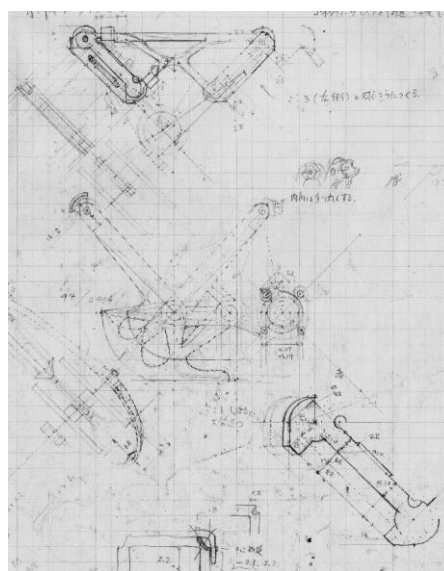
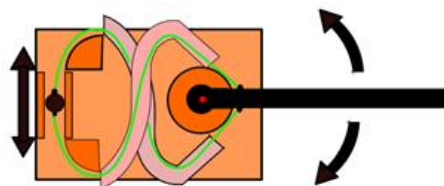


fig.2 羽ばたき駆動機構
上:概略図 下:アイデアスケッチ

2.2 チームワーク

羽ばたき飛行機の開発に成功する上での難点の一つが、性能の良い翼を作ることです。羽ばたき飛行機の翼は固定翼と違い、どんな翼が揚力を効率よく発生させるのかが解明されていないからです。私は鳥の翼の構造を模倣した翼を作る予定でしたが、材質や構造を完全に再現することはできません。そのため、仮に鳥のような動きを再現できたとしても、必ずうまくいくという保証はありません。むしろ、私の思いもよらない構造の翼を羽ばたかせることで、大きな揚力を得られる可能性もあります。つまり、飛行を成功させる確率を上げるには、翼に様々なバリエーションが必要です。そこで、メンバーの松本と佐野にも、独自に羽ばたき飛行機の翼を設計、製作してもらうことにしました。さらに、羽ばたき機構の構造上、翼だけを機体から取り外しできないつくりとなったため、羽ばたき機構の一部も作ってもらう必要性がありました。結果として2人には、共通部品である羽ばたき機構の一部分と独自の翼、この2つを作ってもらう計画としました。

2.3 製作スケジュール

コンテストは、2017年9月1日から3日間開催される日程でした。また、エントリーのための書類審査の締め切りが8月10日、飛行動画の提出が8月18日でした。そこで、2018年8月半ばまでに飛行をさせることを目標に、日程を逆算しておおまかに以下のような計画を立てました。

- ・ 6月末までに飛行試験を始める。
- ・ 5月末までに3人それぞれが翼を作り、動作試験を行う。
- ・ 4月末までに松本と佐野に羽ばたき機構を完成させてもらう。
- ・ 3月末までに私がギアボックスと羽ばたき機構を製作する。

3. 実際の活動

3.1 計画通りにできたこと

・ 共通の羽ばたき機構製作

5月の初めまでかかったものの、羽ばたき機構の一部の製作は無事に終わることが出来ました。fig.3に写真を示します。一方で、自分が

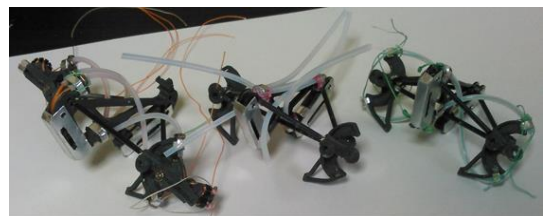


fig.3 一人一人が製作した羽ばたき駆動機構の一部分

考えた機構を他の人に理解してもらうことと、それを実際に作ってもらうということは、非常に難しいことであると感じました。まず、他人から機構の仕組み

の理解を得るためには、言葉に加え、動く実物を見てもらうだけでは、不十分でした。特にこのリンクの代わりに糸を張り巡らせた機構は、肝心の糸がチューブの中を通っているため、外から見ると、一見して翼だけが動いているように見えます。どの糸がどこを通してどこにつながっているのかということや、その糸がどんなタイミングで引っ張られているのかということはなかなかうまく伝えることが出来ず、時間がかかりました。分かりやすい丁寧なイラストや、大きなサイズの模型などをあらかじめ用意しておくことが出来たら、製作作業によりスムーズには入れたのではないかと思います。

続いての、2人に機構を作ってもらうことも難しいことでした。特にこの機構は軽さと頑丈さを何よりも最優先したために、組み立てやすさが犠牲になっていました。例えば、接合にはねじやナットは極力使用せず、代わりに釣り糸での縫合をするなどし、重量を可能な限り抑える構造としました。糸で結ぶという作業は設計した自分でも集中力が相当必要だったので、2人にとっては相当大変だったのではないかと思います。機体の軽さは重要な要素ですが、あまりに極端な設計をしてしまったと、反省しています。

・三者三様の翼製作

全員の機構の一部が揃った後は、3人がそれぞれ独自の翼を作るというステップに入ります。この部分は、計画の全体を通して見て、比較的良かったところだったのではないかと思います。理由は、翼の構造に様々なバリエーションが生まれたことと、その作業の時間が、楽しいものとなったからです。

まず、三人の翼は各々異なる構造になりました。私の翼はカーボンの骨組みに竹のリブを取り付けた立体的な構造。松本の翼は、EPP（発砲ポリプロピレン）を手作業で丁寧に削り上げた軽くて非常に壊れにくい構造。佐野は唯一後退翼という斬新な形状で、アクリル棒を曲げて作った柔らかい骨組みに薄いビニールをはり、左右の翼を一枚の膜のようにした構造。写真をfig.4に示します。それぞれの翼が、後に良くも悪くも様々な働きをしました。

このメンバーそれぞれが自分の翼を作っている間は、心地よい時間でした。私はほかの2人に何をしてほしいのかを説明することなく、自分の作りたいものを作る作業に集中することが出来ました。2人とも、最初は何を作ろうか悩んでいたようで



fig.4 翼(上から服部、松本、佐野製作)

したが、作業を始めると楽しそうでした。松本はまるで何かの職人になったかのように、EPPのやすり掛けを夢中でやっていました (fig.5)。佐野は私とアクリル棒の接着法についてあれこれ話し合いました。また、一人ではできない作業を互いに手伝い、翼づくりという狭い範囲の中だけではあるものの、互いが相手のモノづくりを助け合うような、対等な協力関係が出来ていたように感じました。この関係こそ、私がこのDCBで出来たらよいと思っていたことでした。



fig.5 作業風景 EPPを加工する松本



fig.6 動作試験直前の機体(6月初め)

3.2 計画通りにいかなかったこと

翼の骨組みの取り付けが完了し (fig.6)、いざ動作試験を始めると、羽ばたき機構の強度不足があちこちで見つかり、計画が大きく遅れました。6月中に始める予定であった飛行試験が8月に入ってもできる見通しが立たず、糸で力を伝達する仕組みそのものを断念する結果になってしまいました。以下、時系列順に出来事を示します。

まず、6月の前半に、まだ骨組みの一部だけの状態だった私の製作した翼で羽ばたき動作試験を行ったところ、駆動機構の一部が破断しました (fig.7)。この破断した部分を強化して作り直すために、ギアボックスを分解して作り直すことになりました。部分的にカーボンで補強をすることにしましたが、形状が複雑であったため設計が難しく、修理に1か月かかりました。ここで、完成後さらなる重量増が予想されるため、私が製作した翼の使用は断念しました。幸いこのときすでに、松本が翼を完成させていました。彼の翼は関節こそありませんが、軽さと壊れにくさの点で優れており、これからはこれを使うことに決めました。

しかし修理後、今度は羽ばたきの振幅が設計通りに出ません。どこかで糸による力の伝達ロスが起きてしまっているようでした。調べると、3つの原因を発見しました。1つ目は、糸の端部の固定に不具合があること。2つ目は、糸の軌道の長さを保っている部品が変形している



fig.7 動作試験で破損した部品

こと。3つ目は、翼の根元の構造が、翼の振幅を打ち消すようにぐらついてしまうことです。2つ目の原因までを解決した時点で8月5日であり、3つ目の原因が発覚したときには、それを解決する時間が残されていませんでした。コンテストに出ることを最優先であるため、最低限の肩部を上下に動かす機構で飛行を実現することに目標を切り替えました。糸駆動機構をうまくいけば、複数の関節を同時に動かすことが出来る軽量の機構を得られるはずでしたが、諦めざるを得ませんでした。

3.3 計画の変更

審査用紙や飛行動画の提出が迫った8月上旬、急遽シンプルで頑丈な機構の羽ばたき飛行機を作り直すことになりました(fig.8)。ギアボックスの部分はそれまで使っていたものを利用し、てこクラック機構を使った新しい羽ばたき機構をそれに合わせる形で設計し直しました。機体審査用紙通過後、EPPの大きな翼をつけて動作実験では、無事に大きく羽ばたかせることが出来ました。このとき飛行動画の締め切りも一週間後に迫っていたため、近くの公共の体育館を借り、早速本番と同じ手投げでの飛行実験を始めました。

しかし、翼が動いたからと言って必ず飛ぶわけではありません。手を離れるとたちまち減速し、墜落してしまいました。推力が小さく、したがって揚力が不十分だったようです。さらに、ギアフレームが割れるトラブルも起きました。動画の締め切りである8月18日まで、翼のサイズや形を変更するなどして実験を続けました。ここで、松本の翼に、佐野が考えた2枚の翼を薄膜でつなげる構造を使うと滑空性能が良くなることが分かりました。しかし飛び続けるようにはなりませんでした。コンテストの規定では1分間の持続飛行が必要でしたが、なんとか7秒程度飛行した動画を選びコンテストに提出しました。

3.4 5日の猶予

提出後、締め切りを5日延長する旨の通知が届きました。このときすでにギアが消耗し飛行不能の状態でした。技術職員の平塚さんに相談し、再発防止のために一部のギアをプラスチック



fig.8 ギアボックスの変遷
(上から6月、8月上旬、同中旬、同下旬)

から金属に変えた方がよいとのご指摘をいただきました。急遽、松本と新しい素材のギアを探し、それに合わせた新しいギアフレームの設計に取り掛かりました。これまで8月以前に作ったギアフレームを改造し使用していましたが、構造に無駄がありました。シンプルな羽ばたきに特化した軽量で頑丈なフレームを目指して設計し、3Dプリントしました。5g程度の軽量化ができました。ギアが届いたのは締め切り当日の昼であり、その後大急ぎで組み立て、飛行試験を行いました。改善はしたもののやはり10秒ほどが限界で、最初に投げた勢いで飛んでいるようでした。仕方なくその飛行を動画として、コンテストに送りました。

3.5 最後の一工夫

提出の翌朝に大会から、ユニークデザイン部門のみ、飛行動画が1分に満たない機体の出場が認められる旨の通知が届きました。しかし、飛行試験、再びフレームの破損が見つかったため、形状を改めフレームを3Dプリントし直すことにしました。また、依然として推力が出ないということは、EPPの翼が頑丈すぎるために、羽ばたきの空気抵抗によって起こるべきはずの迎角の変化が生じていないのではないかと考え、鳥の羽を真似て、薄いEPPを重ねたねじれやすい構造をもつ新しい翼を製作しました (fig.9)。しかし飛行試験を行う時間的余裕はなく、そのまま大会当日を迎えました。

3.6 大会本番

翼の改良が功を奏し、会場での試験飛行では、直進時に限り水平飛行に成功しました。旋回が可能なほどではありませんでしたが、推力が増加したことが分かりました。一方で、フレームは落下の衝撃で再び割れてしまい、修理して本番を迎えました。しかし、5秒程度水平飛行したあたりで、今度はこれまで問題の無かった翼の骨であるカーボンパイプが、疲労破壊を起こし根元で折れてしまい、途中棄権するという結果になりました。動画は、YouTubeでご覧いただけますⁱⁱ (fig.10)。



fig.9 コンテスト出場機



fig.10 大会本番(この間約5秒)

ⁱⁱ <https://www.youtube.com/watch?v=V955-9sE128> 0:14:30から

4. 反省

4.1 失敗の原因

2年目の挑戦は、結果としては去年と同じように、十分に飛行するロボットを作ることが出来ませんでした。失敗の原因は何か、活動全体を振り返り考えてみます。すべての駆動機構を、初めから飛ぶものとして軽量化まで意識して設計を始めたことが、様々な失敗につながったのではないかと思います。どういうことか詳しく述べます。

ロボット製作に充てられる時間は、8月までの短い期間です。そこで時間を少しでも節約するために、私は部品の設計回数をできるだけ減らそうとしました。同じ部品が動作試験でも、後に見据えた飛行試験でも使えるように、最初から軽量化を意識した設計をしました。しかし実際には、6月に始めた動作試験の段階で不具合が数多く見つかりました。時間をかけて行った軽量化の効果が発揮されることはありませんでした。時間を節約するどころか、かなりの時間が無駄使いとなりました。軽量化のために、あえて難しい糸による接合法を考えたり、部品の3Dモデルの肉抜きなどに時間をかけたりしていたからです。最初の動作試験が6月の半ばまでずれ込んでしまったことで、時間的に余裕がなくなったことが後々の失敗につながったのだと思います。

この経験から、多くのことを学びました。まず、動作試験の装置では、成功することを前提としてあまり先を見据えた設計をしてはいけないということです。特に、飛ぶか飛ばないかを決める軽さを限界まで突き詰めるのは、最後の段階で十分ではないかと思いました。軽量化を考える場合と考えない場合とでは設計時の労力が全く異なるからです。次に、どのように時間を節約すべきか、ということです。設計回数を減らすことよりも、一回一回の動作試験までにこぎつける時間をできる限り短縮することこそ、重要ではないかと今は思います。動作試験を通して、今まで気づかなかった欠陥に気づくことが多々あったからです。動作試験を行った回数が、結果に結びつくように思います。もう少し設計を入念に考える必要もありそうですが、デジタル機材の利点を生かして、所要所で素早く実物で確認しながら設計を進めることが出来れば、うまくいくのではないかと思います。

4.2 今年の活動における工学的意義

しかし、ものづくりにおいて、失敗だけでなく、うまくいったこともありました。それは、自分で仕組みを考え、機構の試作、設計、製作を一貫して行い、仕

組みの上では実現できた、という経験をしたことです。糸という一見機械にはなじみの薄い素材を使った糸駆動機構は、糸の張り具合の調節や糸の通り道となるPTFEチューブの固定が難しく、様々な工夫を施しました。残念ながら構造全体の剛性不足が原因で、翼を羽ばたかせるまでの機能は出せませんでしたが、骨組みだけならば問題なく作動するものを作ることができました (fig.6)。PEラインというものを、動力伝達要素として使うには何に注意しなければならないのかを身をもって学んだ経験は、将来のモノづくりに生かせるのではないかと思います。

4.3 3Dプリンタの注意点

3Dプリンタは、3Dデータをそのまま出力してくれる非常に便利なツールですが、その利便性の高さが裏目に出たために起こしてしまった失敗が、数多くあったことに気づきました。主な原因として、以下の2つを上げます。

① 必要以上に細部にこだわってしまった

3Dプリントによる出力を前提とした3Dモデルの設計では、些細な形状の違いに必要以上にこだわり、時間を浪費してしまったように思います。3Dプリントで出力する場合、加工の手間がないため、複雑な形状でも簡単に作成できてしまいます。CAD上ではスケール感覚が希薄になることも手伝って、必要以上の細かい修正に時間を使ってしまうました。

② 問題を、形のせいにしがちになった

ギアフレームの設計についての反省です。落下の衝撃で破損するたびに、形を修正しましたが、破損は最後まで起こりました。今思うと、積層方向のある素材で立体的で華奢な形状を形作ったこと自体に問題があったことは明らかです。しかし当時は、厚みを変えたり、角を丸くしたりといったことばかり考えていました。形だけはCAD上で簡単に変更できるために、その範囲内で解決できる問題であってほしいという、論理とは逆の考え方をしてしまいました。

以上を踏まえて、これから3Dプリンタで出力する部品を設計するときは、以下の2点を問うことが重要だと思いました。1つ目は、そもそも3Dプリンタで作

	3Dプリント部品	レーザカット部品
3月10日	スライダ	ギアサポート
		治具
		ポリスチレン体1
		アクリル胴体1
3月23日	コネクティングロッド1-1	ポリスチレン体2
	コネクティングロッド1-2	アクリル胴体2
	ギアフレーム1	アルミ胴体枠
3月24日		WingAC
4月3日	コネクティングロッド2-1	張力調節板1
	コネクティングロッド2-2	
	肩関節(近位)0	
	肩関節(遠位)0	
4月20日	スライダ	
4月24日		ポリスチレン体3
		アクリル胴体3
		アルミ胴体枠
5月1日	肩関節(近位)1	張力調節板2
	肩関節(遠位)1	
5月8日	肩関節(遠位)2	肘の板
5月15日	手首関節	
5月29日		張力調節板3
		バルサ製補助リブ
		竹製リブ1'5
6月1日	肩関節(遠位)3	
6月12日		張力調節板(手首)
		補助リブ(腿)
6月15日	コネクティングロッド3	
6月22日	スライダ	張力調節板3
6月26日	ギアフレーム2	ギア穴あけ治具1
	クランク部品1	ギア穴あけ治具2
	クランク部品2	
6月29日	コネクティングロッド4-1	
	コネクティングロッド4-2	
	糸受け溝1	
7月10日	コネクティングロッド5-1	
	コネクティングロッド5-2	
	糸受け溝2-1	
	糸受け溝2-2	
	胴体ロッド接続部品	
7月14日	糸受け溝3	
8月1日	肩関節(近位)1	
8月2日	ABS胴体	
8月7日	翼支持構造	
	肩関節(遠位)4	
	中央リンク1	
8月9日	尾翼基部1	
8月10日	尾翼基部2	角度調節板
	尾翼構成部品(いっぱい)	
8月17日	中央リンク2	
	中央リンク3	結合板
8月18日	ビニオンギア連結部品	
8月22日	ギアフレーム3	角度調節板
	中央リンク4	
	ビニオンギア連結部品	
8月25日	ギアフレーム4	
	中央リンク5	
	ビニオンギア連結部品	
8月28日	尾翼基部3	
	肩関節(遠位)4	
	中央リンク6	

fig.11 出力データ一覧

るべき部品かどうかということです。特に積層方向にせん断力（横方向の力）がかかることが避けられない場合は、違う製作方法を検討しなければなりません。2つ目は、どうやったら単純なプロセスで3Dモデルを作成できるかということです。あらかじめ作成の計画を立てなければ、作成中に複雑な修正を何度も繰り返すことになります。これでは時間がかかり、できた部品も容易に寸法の変更ができないような構造になってしまいます。

5. おわりに

以上が、私が2017年度の飛行ロボットコンテストへの参加を通して経験したことと、学んだことです。このプロジェクトでは、川上先生、中小路先生をはじめとするデザイン学の先生方に変にお世話になりました。特に平塚さんや白石さんには、日ごろから私たちの活動を見守って下さり、時には助けていただきました。感謝しております。

最後に、飛行機づくりを手伝ってくれた松本と佐野には、本当に感謝しています。松本は、様々なトラブルに見舞われた際、私の鳥の姿形へのこだわりを理解してくれた上で、一緒に解決策を考えてくれました。一方佐野には、計画を前に進めるような現実的な彼の意見に、度々助けられました。このプロジェクトに来てくれた二人が、松本と佐野で、本当に良かったと思っています。

「デザイン学」への問い

+ 飛べない鳥は、ただの、何だ？