

脈動とトルク変動キャンセラーの話

京都大学鳥人間チームShootingStars

駆動系担当 小畠拓也

今日お話しすること その1

1. 脈動について

1-1. 脈動とは何か？

1-2. 脈動の問題点

1-3. どうして脈動は起きるのか？

1-4. どうすれば脈動は減らせるのか？

今日お話しすること その2

2. トルク変動キャンセラーについて

2-1. トルク変動キャンセラーの仕組み

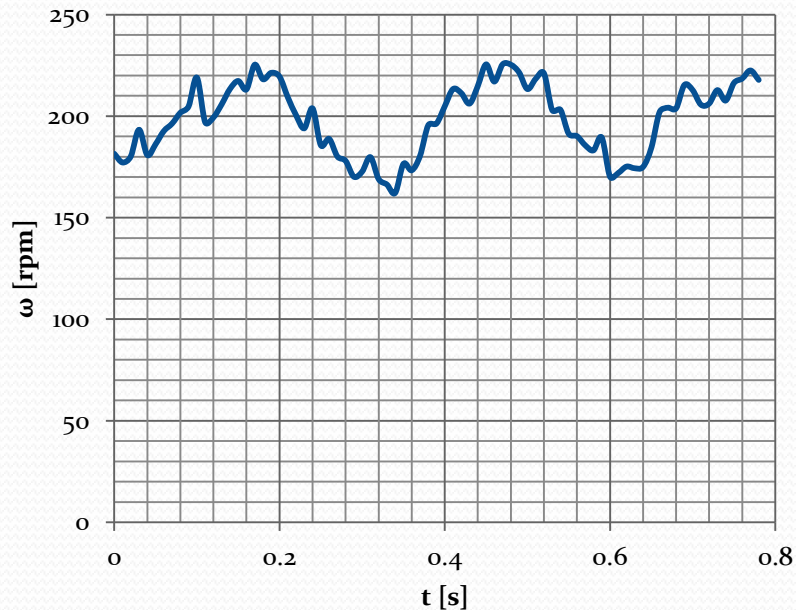
2-2. トルク変動キャンセラーの効果

2-3. トルク変動キャンセラーの課題

2-4. トルク変動キャンセラーの今後の応用

1. 脈動について

1-1. 脈動とは何か？



プロペラ、クランク等の人力飛行機の駆動系の回転数は一定ではなく、大きく時間変動している！

変動の周期はパイロットのペダリングの周期の半分

回転試験時に測定した、プロペラの回転数の時間変動のグラフ
横軸に時間[秒]、縦軸に回転数[rpm]を示す

1-2. 脈動が引き起す問題

1. パイロットの体力的な問題(クランク回転数の変動による問題)

自転車と異なり、ペダルがスムーズに回転しない

⇒非常に漕ぎ難い！すぐに疲れる！

2. プロペラ効率の低下(?) (プロペラ回転数の変動による問題)

人力飛行機のプロペラは全て回転数一定(定常状態)を前提として設計されているが、実際は非定常状態で運用されている

⇒設計通りのプロペラ効率が出ていない？

(非定常におけるプロペラ性能を評価する理論も、実験も存在しないので、不明)

1-2. 脈動が引き起す問題

3. 駆動系の変形(トルク変動による問題)

駆動系に加わるトルクの最大値は、平均値の倍近くになる

⇒低剛性の駆動系、プロペラは変形する

(人力ヘリコプターで顕著)

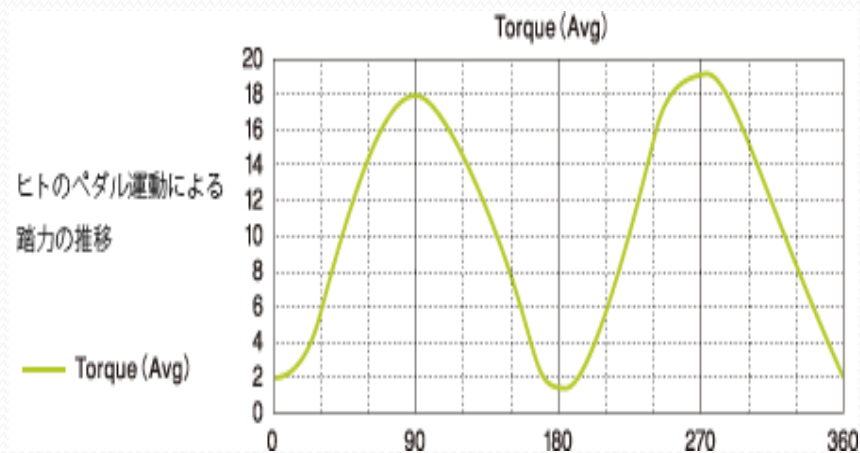
4. 駆動効率の低下(?) (駆動系の振動による問題)

チェーン駆動式だと、脈動と同じ周期でチェーンが振動する

⇒エネルギーロスにつながり、駆動効率が低下する?

Active Galsの論文「人力飛行機のチェーン・ドライブ方式による動力伝達装置の伝達効率の測定」によると、駆動効率の測定結果はペダル回転数90rpm時、0.786

1-3. どうして脈動は起きるのか？



1. ペダル運動には上死点と下死点が存在することにより、人間の踏力による入力トルクは、クランク角に応じ左のグラフのように大きく変動する
2. 人力飛行機の駆動系の慣性モーメントは、自転車のそれより格段に小さい

⇒運動方程式 $I\theta'' = N$ にしたがって、回転数(角速度) θ' は時間変動する(脈動)

グラフ引用:ブリヂストンホームページ

<http://www.bicycle.co.jp/root/catalog/prestino/labo.html#top>

1-4. どうすれば脈動は減らせるのか？

解決策その1. 慣性モーメントを大きくする

フライホイールをつける、あるいはプロペラ端に錘をつける
⇒機体重量が増加する

解決策その2. トルク変動を減らす

入力トルクの変動に対し、バネにより生成した逆位相トルクを付加し、2つの波を打ち消す

入力トルクの波は正弦曲線風であるので、同じく正弦曲線風のトルクの波を作り出す機構を作ればよい

⇒トルク変動キャンセラー！！

1-4. どうすれば脈動は減らせるのか？

その他の解決策

- Eハブ

クランク角速度とプロペラ角速度の差を利用し、バネにエネルギーを蓄積する

⇒クランクとプロペラ両方の角速度を一定にすることはできない、効果は弱い

- 楕円スプロケット

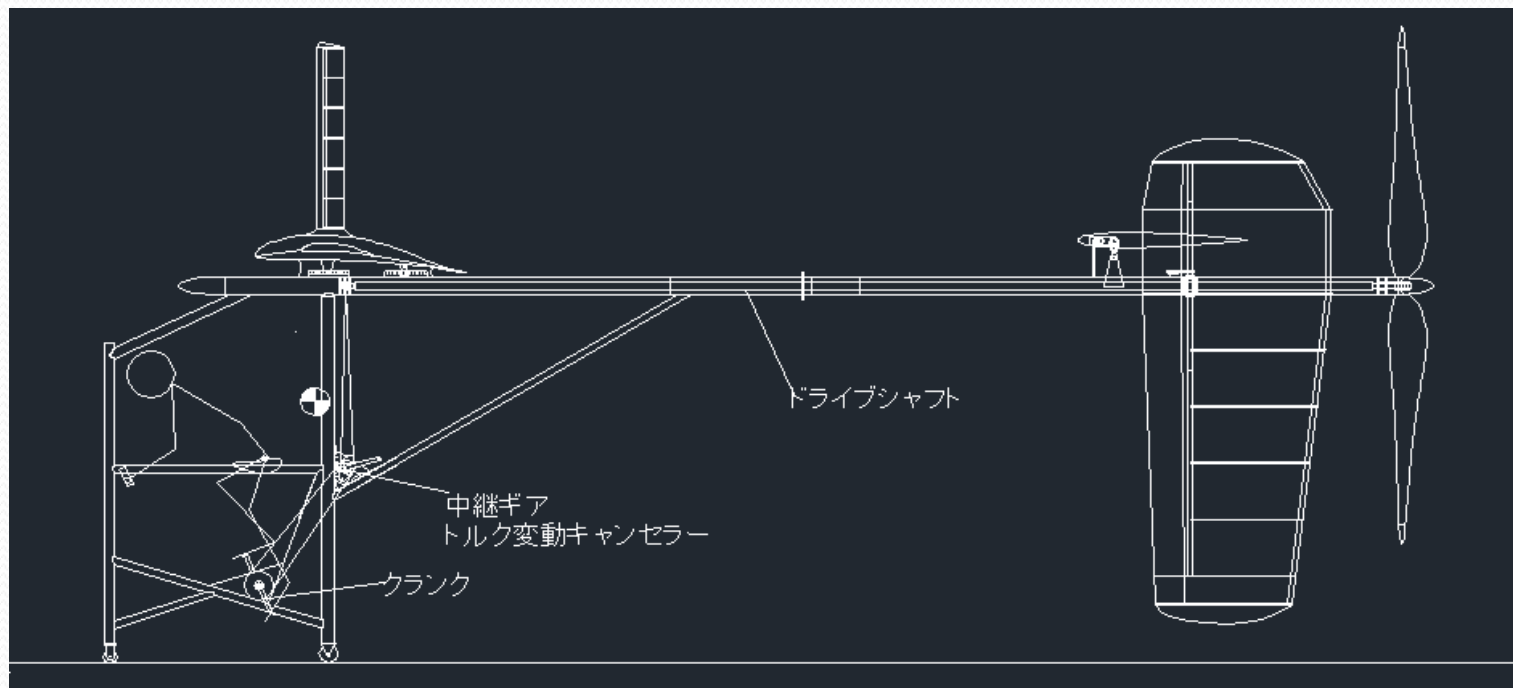
死点を速く通過するようにし、入力トルクの変動を低減する

⇒プロペラ角速度を一定にしようとする、クランク角速度の変動が大きくなる、漕ぎ難い

2. トルク変動キャンセラーについて

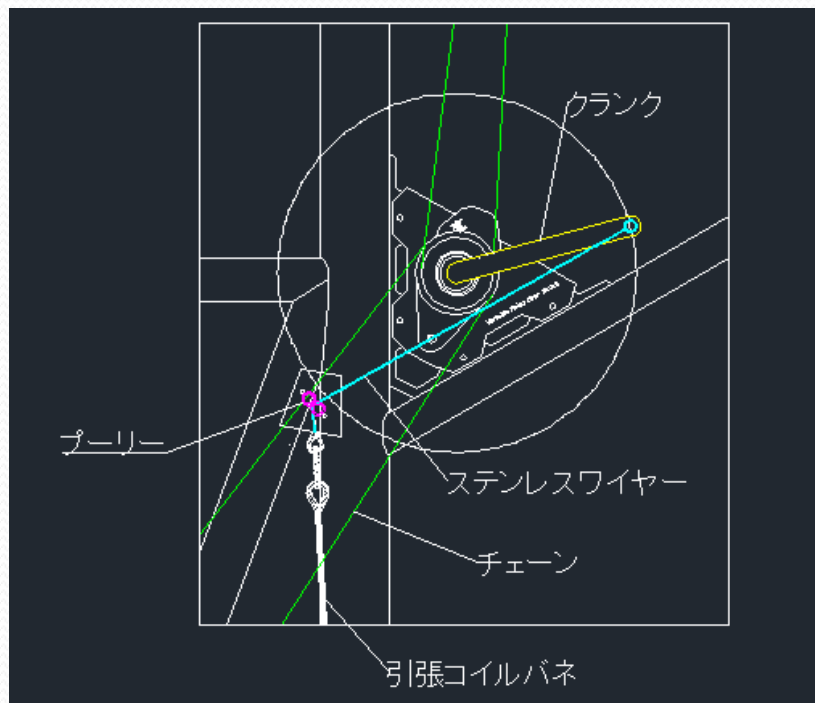
2-1. トルク変動キャンセラーの仕組み

当チームの2011年度の機体「深空」の側面図を、下に示す



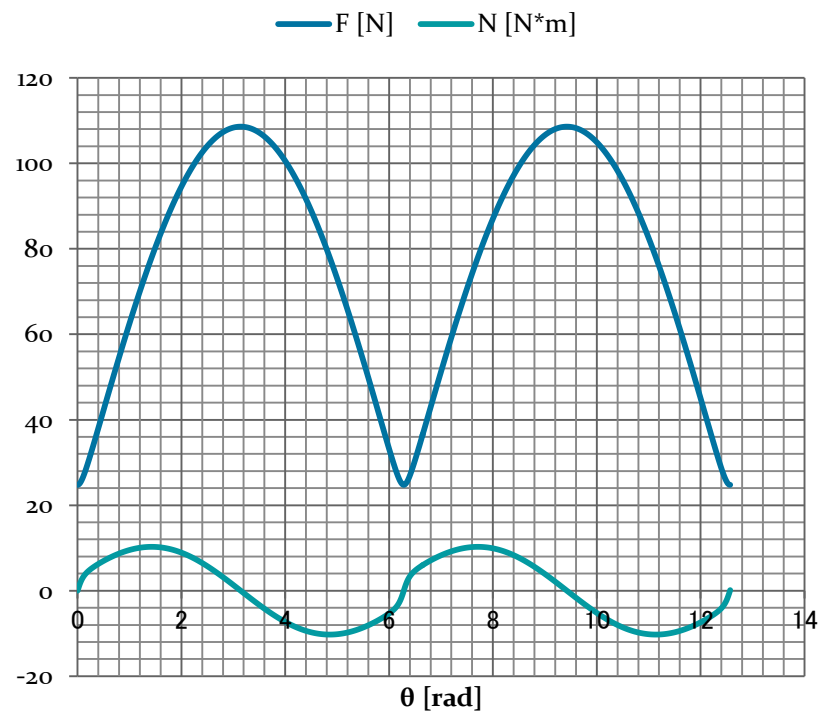
2-1. トルク変動キャンセラーの仕組み

下図は中継ギア付近を拡大した、トルク変動キャンセラーの心臓部の図である



このような機構が作り出すトルクは、下図のようになる(バネ2つを用いたトルク変動キャンセラーのトルク、横軸はトルク変動キャンセラーのクランク角)

⇒三角関数風のトルクができる！！



2-1. トルク変動キャンセラーの仕組み

あとはトルク変動キャンセラーの逆位相トルクの

・周期 ・振幅 ・位相

を決定すればよい

・周期

グラフより、トルク変動キャンセラーのクランクはペダルクランクの2倍の角速度で回転すればよい⇒ギア比を1:2に決定

・振幅

逆位相トルクの振幅は、入力トルクの変動の振幅の半分

⇒機体の必要パワー、入力トルクの変動のグラフ等を用いて、バネを決定(実験することが望ましい)

・位相

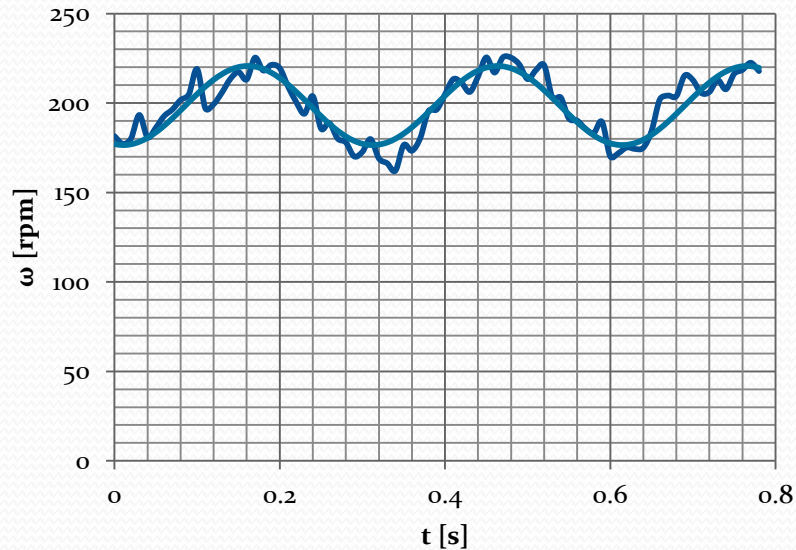
ペダルクランク角度が 0° 、 180° が死点と考え、チェーンのこまのかける位置で決定⇒パイロットの官能評価により、1こま分ずつ調整可能

2-2. トルク変動キャンセラーの効果

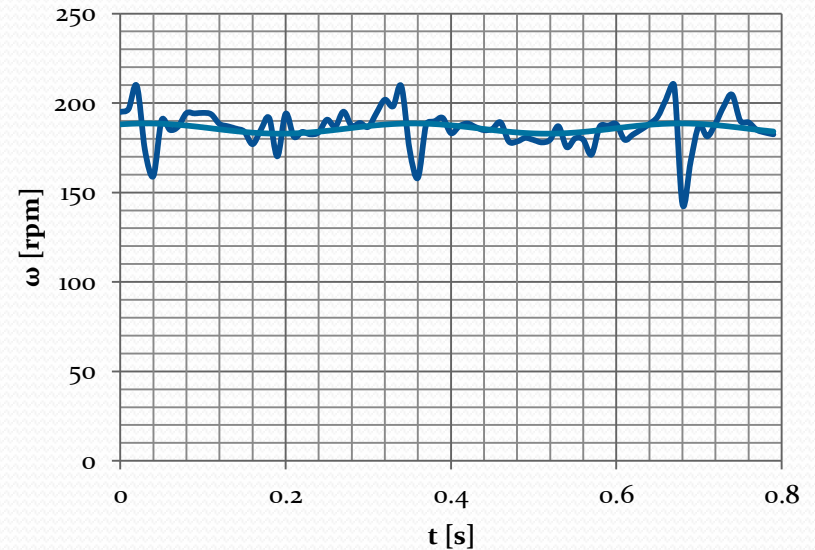
1. 回転試験における角速度の変動の測定

トルク変動キャンセラーがないときとあるときにおける、プロペラの回転数の時間変動の測定結果
グラフ横軸に時間 [s]、縦軸に回転数 [rpm] を示す
正弦曲線は近似曲線

トルク変動キャンセラーなしのとき

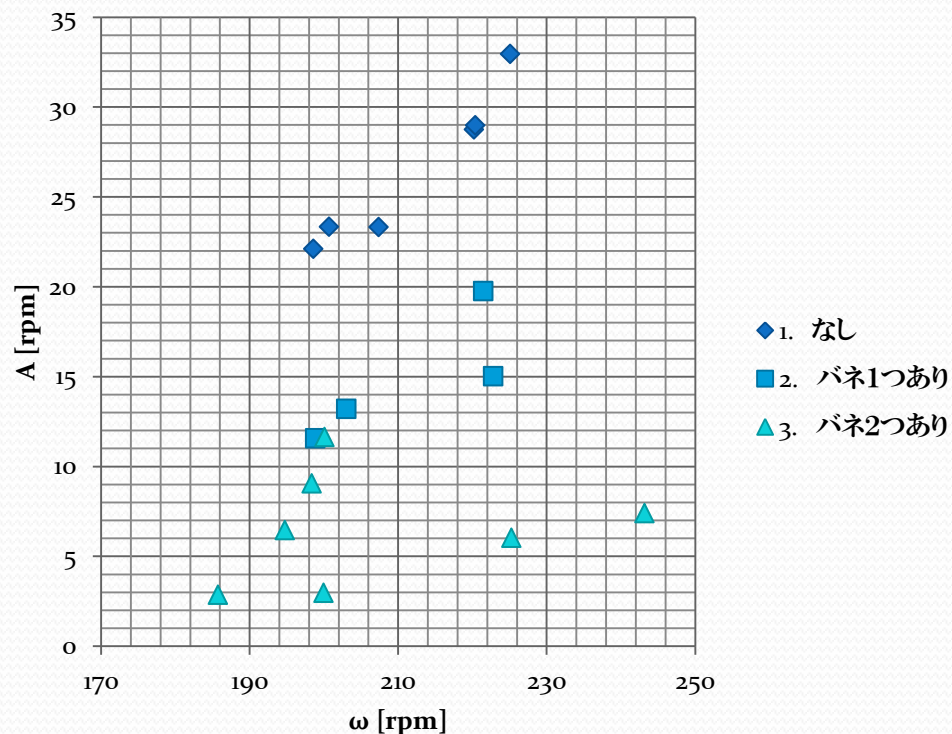


バネを2つ用いたトルク変動キャンセラーを用いたとき



2-2. トルク変動キャンセラーの効果

トルク変動キャンセラーなしのとき、バネを1つ用いたトルク変動キャンセラーを用いたとき、バネを2つ用いたトルク変動キャンセラーを用いたときの、回転数の時間変動の測定結果から、回転数の平均値 [rpm] を横軸、近似関数の振幅 [rpm] を縦軸にとったグラフを下に示す



グラフから、トルク変動
キャンセラーを用いると、
回転数の変動の振幅が
低減されていることがわか
る

⇒トルク変動キャンセ
ラーの効果を実証され
た！！

2-2.トルク変動キャンセラーの効果

2.パイロットの官能評価

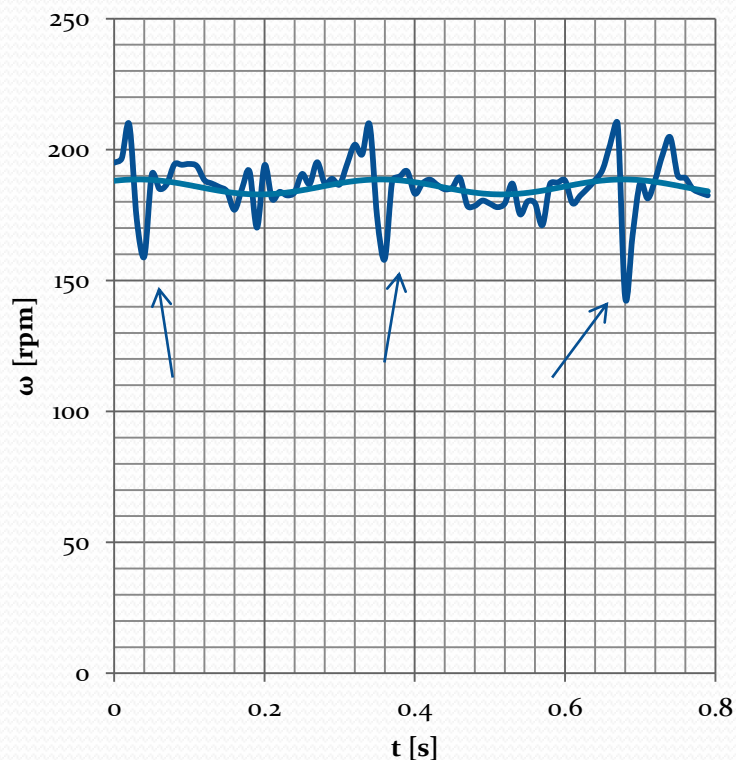
2011年度、複数回の回転試験、試験飛行、そして鳥人間コンテスト本番のフライトで、当チームではトルク変動キャンセラーを運用したが、ベストな状態に調整されたすべての時点で、パイロットは脈動の低減を確認でき、ペダリングが楽になったと回答した

3.チェーンの振動

トルク変動キャンセラーを運用したとき、ねじりチェーンの振動が、運用しないときよりも低減されていることを視認した

2-3. トルク変動キャンセラーの課題

1. 回転数のジャンプ



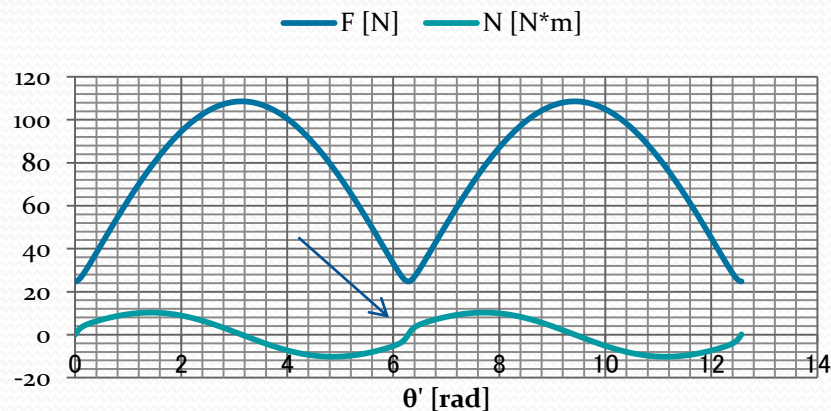
左は先ほどのバネを2つ用いたトルク変動キャンセラーを用いたときのプロペラ回転数の時間変動の測定結果

矢印の箇所で回転数がジャンプしているのがわかる(バネの伸びが0になる箇所)

ここでパイロットはガツンとした衝撃を感じる

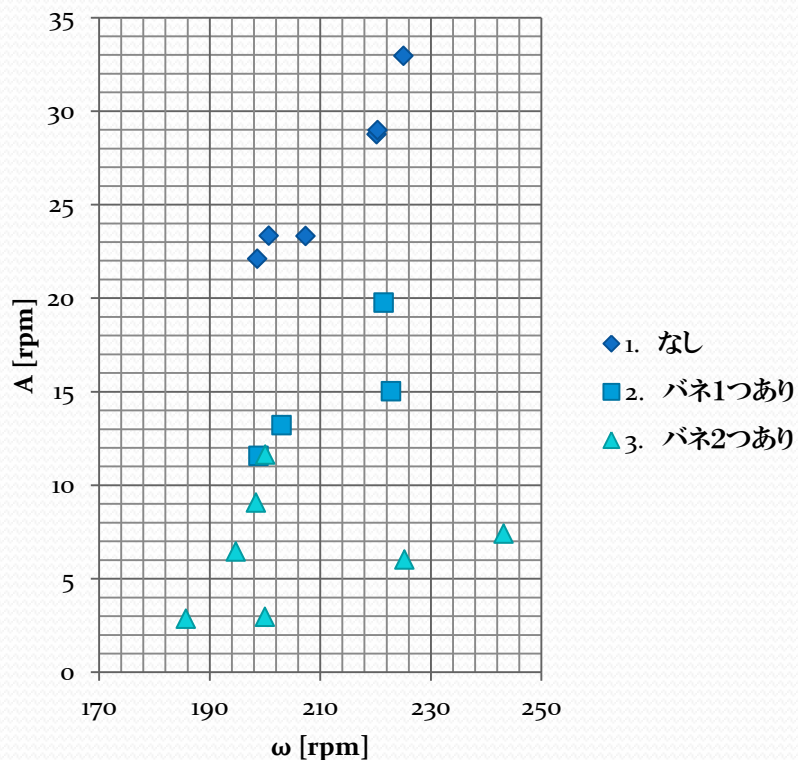
原因は、バネに初張力があることにより、得られる逆位相トルクが厳密な三角関数でないため(下のグラフ矢印)

⇒構造的な改良で解決できそう



2-3. トルク変動キャンセラーの課題

2. 回転数が増加すると、効果は弱まる



トルク変動キャンセラーにより生成される逆位相トルクの振幅は、あらかじめ決まっている

⇒回転数が増加し、入力トルクの変動が大きくなると、振幅の差が大きくなり、脈動を抑えきれない

とはいっても、トルク変動キャンセラーがない場合よりも脈動は減っている

振幅を変化できる機構があればなお良い

2-3. トルク変動キャンセラーの課題

3. 信頼性の問題？

当チームでは、2011年度鳥人間コンテストに、トルク変動キャンセラーを搭載した機体で出場した。結果、トルク変動キャンセラーのトラブルにより駆動系が停止し、墜落した。記録は1629.79m。

⇒トルク変動キャンセラーは信頼性が低い？

駆動トラブルの原因は、バネ端を締結するナイロンナットの締め付け不足により、バネが外れて駆動系に絡まったもの

(バネは切れておらず、構造的な問題ではない)

注意深く組み立てをし、メンテナンスを怠らなければ、事故は防げる

2-4. トルク変動キャンセラーの今後の応用

1. 人力飛行機タイムトライアル部門への応用

脈動現象は、低出力機が多いディスタンス部門の機体よりも、大出力が要求されるタイムトライアル部門の機体のほうがより顕著であると考えられる

⇒トルク変動キャンセラーは、タイムトライアル部門の機体でより効果を発揮する！

2. 人力ヘリコプターへの応用

ローターが人力飛行機よりも低剛性である人力ヘリコプターでは、脈動問題が深刻

⇒トルク変動キャンセラーを搭載すれば、ローターをより軽量にでき、かつペダリングも楽になる！？

・・・etc.

トルク変動キャンセラーには、その他たくさんの応用法があると考えられる
今後の研究と発展を期待する



長時間ご清聴ありがとうございました