

# プロペラを利用したワイヤ懸垂システムの振動制御

Swing motion Control of Wire Suspension System using four propellers

精密工学専攻 42号 平田航

Hirata Wataru

## 1. 序論

我が国の社会インフラは高度経済成長期に集中的に整備され、これまで国民の暮らしを支えてきた。しかし高度経済成長期から50年近く経つ今、多くの施設でも老朽化が進行し、安全管理のための点検作業が急がれている。

国土交通省は平成25年の6月に道路法を改正し、国が定める統一的な基準により5年に1度、近接目視による全数監視を実施することでメンテナンスサイクルの確率を目指した<sup>(1)</sup>。しかし予算や人材不足の問題から全国の点検作業の達成率は国が定める目標値を下回っている。中でも人材不足の問題は少子高齢化が進む日本にとって、今後さらに深刻化していくであろう問題である。

近年ではロボットによる人間の作業の代替化が進んでおり、工場などはロボットが単体で作業するものから人間と共同で作業するものまで様々なロボットが作業効率の向上のために活躍している。このことに着目し上記の問題についても点検作業をロボットに代替させることで問題の解決を図ることができると思う。

そこで本研究では Fig.1 のようにワークスペース上部の四隅にワイヤ巻き取り機を設置し、4本のワイヤ長を制御することでベースを空間内で位置決めすることのできるシステムを開発する。このシステムは橋梁検査の自動化等に活用ことができ、一度設置すればいつでもすぐに検査を行うことができるため、従来の点検作業のような手間をかけずに検査を行うことができる。

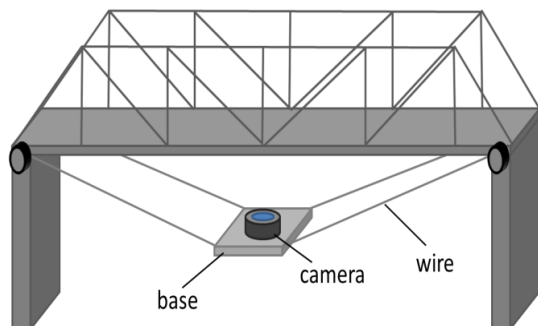


Fig.1 Bridge inspection robot

制振の対象となる懸垂物は位置と姿勢を合わせて6つの自由度を持っており、ワイヤの本数を6本にするとそれらの自由度は拘束できる。しかしワイヤの本数を6本にしてのワイヤ懸垂システム<sup>(2)(3)</sup>の構築は非常に複雑であり、ワイヤの引き出し点が6つになることで一般的に多く見られる長方形のワークスペースに広く対応するフレキシブルなシステムにすることが困難になってしまう。そこでワイヤの本数を4本にして長方形のワークスペースに対応しやすいメリットはそのままに、拘束されない残り2自由度を別の機構を用いて拘束することを考える。

2自由度が拘束されないことによって2つの問題が発生する。懸垂物に外力が加わった際の振動と、懸垂物を水平移動させた際に姿勢が傾くという問題である。これらの課題プロペラの風力を用いて解決する手法をシミュレーションや実験を通して検討することを本研究の目的とする。

## 2. ワイヤ懸垂システムの構造

本研究で用いるワイヤ懸垂システムの概略図を Fig.2 に示す。このシステムはワイヤ・ワイヤの巻き取り機構・懸垂物により構成される。

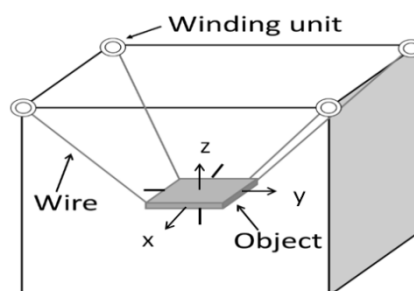


Fig.2 Wire suspension system

本研究で用いる装置のワークスペースは高さが2.38m、縦横の幅は1.54mである。本研究では Fig.2 の懸垂物の x, y 軸回りの揺れが特に発生しやすいと考え、まず x 軸回りの振動に着目して制振を行う。したがって、z 軸回りの振動は無視するものとする。また本研究では開発した装置が姿勢制御に適用可能であるかをまず確認するため、懸垂物の位置は一定(地面から0.9mの位置)として実験を行う。

## 3. プロペラを用いた振動制御

### 3.1 プロペラの風力について

本研究ではモータにブラシレスモータを使用している。このブラシレスモータはPWM(Pulse Width Modulation)によって制御を行う。PWM制御とはパルス幅変調制御のことでパルスの幅を変えることで信号を伝達する方法である。信号を高速でオンオフし、そのオンとオフの時間の比率(デューティー比)で速度を制御する手法である。

本研究で使用するプロペラのKV値は2300KV(RPM/V)である。プロペラのダイヤ・有効ピッチ・回転数より、その印加電圧におけるプロペラの揚力を計算することができるが、実際には電圧降下により計算通りの揚力は出力できない。そこでパルス幅と実際の揚力との関係式をあらかじめ求めておく。

### 3.2 制御則と制振の流れ

今回は制御理論にレギュレータ<sup>(4)</sup>を用いた。レギュレータとは平衡状態からずれた状態変数をフィードバックによって漸近的に平衡状態に戻し、安定化させるシステムのことである。このレギュレータを設計するためには Fig.3 に示した

レギュレータの閉ループ系におけるゲインA, B, Fを決定する必要がある. ゲイン A, B は懸垂物のモデルから状態方程式を導くことで得られ, フィードバックゲイン F は極配置法によって任意の収束解から得た値を用いる.

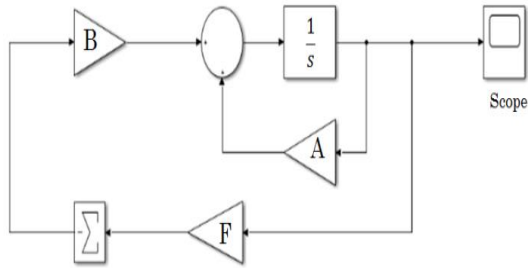


Fig.3 Block diagram of regulator

本研究におけるフローチャートを Fig.4 に示した. まず風等の外乱によって懸垂物に振動が発生する. その振動によって 0 からずれた状態変数を IMU から取得する. 次にその状態変数の値を用いてその瞬間に出力すべき力を Arduino によって算出する. そしてその力を出力させるようなパルス幅を指令値としてプロペラを送り, 力を出力して制振を行う. そしてまた次の瞬間の状態変数を IMU によって取得するが, この値が 0 に戻ると制振完了とし制御を終える.

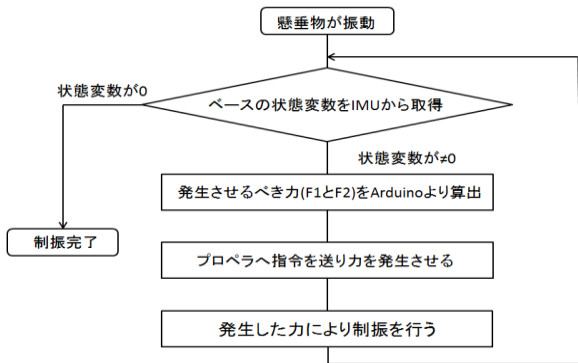


Fig.4 Flowchart of Swing Motion Control

### 3.3 振動制御のシミュレーション

レギュレータを用いた振動制御のシミュレーションを MATLAB で行う.

まず実験機のモデル化を行い, 運動方程式から状態方程式を得る. 実験機のモデルを Fig.5 に示す. ワイヤを用いたモデルでは懸垂物が回転した際にワイヤと懸垂物の成す角と聴力が時々刻々と変化するため, モデルが複雑になってしまう. そこで懸垂物の実際の動きに近いシーソーのようなモデルを考える. 懸垂物が質量のない剛体棒に支えられ, 剛体棒の付け根に回転ばねを取り付けたモデルとする. 今回は 1 方向の揺れを考えるため xz 平面の 1 平面のみを考える. また剛体棒と z 軸が成す角と懸垂物が水平線と成す角度は同じである.

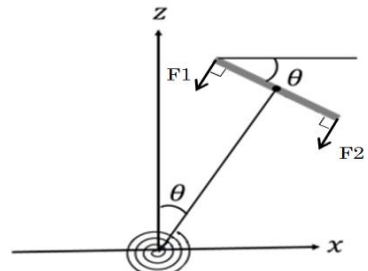


Fig.5 Seesaw model

懸垂物の角運動方程式より

$$I\ddot{\theta} + k\theta = rF_1 - rF_2 \quad (1)$$

(1)を変形して

$$\ddot{\theta} = -\frac{k}{I}\theta + \frac{r}{I}F_1 - \frac{r}{I}F_2 \quad (2)$$

(2)を状態変数に変形して

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{I} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{r}{I} & -\frac{r}{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

を得る. このとき行列 A, B をそれぞれ  $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{I} & 0 \end{pmatrix}$ ,  $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{r}{I} & -\frac{r}{I} \end{pmatrix}$  とする. これに Table.1 に示した本実験装置のパラメータを代入すると, これらの値はそれぞれ

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -22.105 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 26.316 & -26.316 \end{pmatrix} \text{ となる.}$$

Table.1 Parameter of the experimental device

Mass of suspended object	M=1.14 kg
Moment of inertia of suspended object	I=0.0038 kg · m <sup>2</sup>
Spring constant	k=0.084 N · m/rad
Half width of suspended object	r=0.2 m

次に極配置法によって任意の極に対応するフィードバックを得る. 極配置法とは希望する応答から極を特定し, 制御した結果の閉ループ系がそこに解をもつように状態フィードバックゲインを決定する手法である. 今回は任意の極 p を  $p = -1.0 + 2i, -1.0 - 2i$  とした. この極 p に対応するフィードバックゲイン F は  $F = \begin{pmatrix} -0.0950 & 0.0240 \\ 0.0950 & -0.0240 \end{pmatrix}$  となった.

以上の A, B, F を用いて行ったシミュレーション結果を Fig.6 に示した. また初期条件は懸垂物の角速度を  $-2.1$  [rad/s], 角度  $0$  [rad] としている. 横軸が時間 [s], 縦軸が無次元で青線と黄線がそれぞれ懸垂物の角速度・角度を示す.

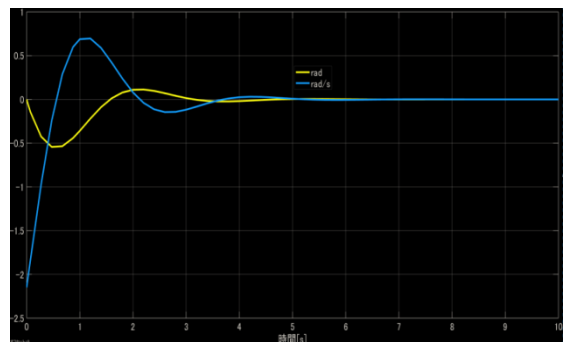


Fig.6 Result of simulation

## 4. 振動制御の実験

### 4.1 実験方法

ワイヤ懸垂システムにおいて懸垂物を懸垂する高さによって振動特性が変わることが知られている。懸垂高さが低くなればなるほど、すなわちワイヤと水平面との成す角が大きくなればなるほど、懸垂物が水平方向の横揺れ優位な振動を示す。同様に懸垂物を懸垂する高くなればなるほど、すなわちワイヤと水平面との成す角が小さくなればなるほど、懸垂物は鉛直方向の縦揺れ優位な振動を示す。

そこで本実験では Fig.7 のようにプロペラの向きを 2 方向 90 度変えて実験を行う。それらの結果を比較し、レギュレータによる振動制御の効果と有効なプロペラの向きを検討する。実験環境は以下の通りである。

懸垂物・・・質量 1.14[kg], 厚さ 3[mm], 縦横の長さ 20[mm]  
ワークスペース・・・高さ 2.38[m], 縦横の幅 1.54[m], 懸垂物の懸垂高さ 0.9[m]

IMU・・・サンプリング周期 50[ms]

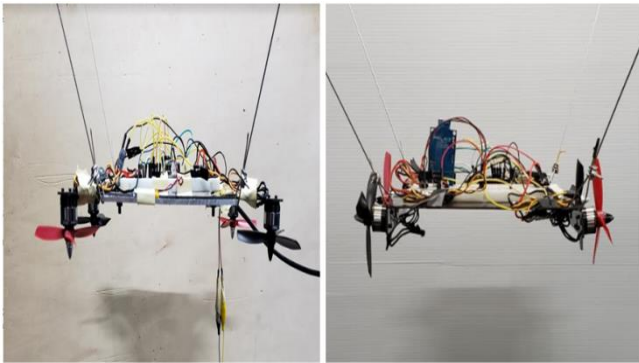


Fig.7 Direction of propellers

懸垂物に外力を加えて振動させてその振動が減衰していく様子を以下の A, B, C の 3 パターンに分けてグラフ化し比較した。Fig.2 に示した実験装置のワークスペースにおいて、懸垂物を y 軸の正から負の方向へ水平に手で押してから手を離すと懸垂物が原点を通る瞬間に角速度が最大値をとるが、その値が  $-2.1$  [rad/s] となる瞬間を初期条件としている。

A・・・自由振動させた場合

B・・・一定回転(パルス幅 1300ms)で回し続けた場合

C・・・設計したレギュレータに沿って回転させた場合

制御入力 F1, F2 を具体的に計算すると必ずどちらかが正の値、どちらかが負の値をとる。しかしプロペラの出力向きは正方向で固定されており、負の方向に出力することはできない。そこであらかじめ一定回転でプロペラを回転させておいて、その回転より回転数を上げることで正方向の出力を、その逆に回転数を下げることで負の方向の出力をしたものとしている。よって C の効果を確認するため、C で用いる一定回転を継続した条件を B と置き、何も制御を行わない条件を A として比較を行った。

### 4.2 実験結果

#### 4.2.1 実験 1

鉛直方向のプロペラ向き (Fig.7 左) での制振実験を実験 1

として上記 A, B, C の 3 パターンを比較した。実験 1 の結果を Fig.8 に示す。グラフは横軸を時間[s], 縦軸を角速度[rad/s] とした。A に比べ B, B に比べ C の方が振動の収束時間が短いことが確認できる。しかしパターン C と Fig.6 のシミュレーションの青線を比較すると、シミュレーションに比べ実験結果は収束時間が長く、残留振動が残っていることがわかる。

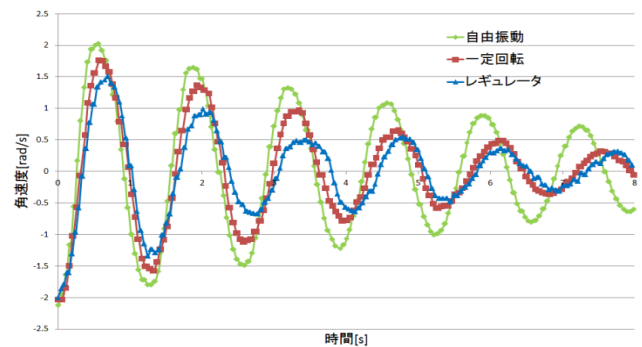


Fig.8 Result of experiment 1

#### 4.2.2 実験 2

水平方向のプロペラ向き (Fig.7 右) での制振実験を実験 2 としてグラフをとり、実験 1 のレギュレータのグラフと重ねて比較した。その結果を Fig.9 に示す。グラフは横軸を時間[s], 縦軸を角速度[rad/s] とした。水平方向のプロペラ向きにおけるレギュレータの制振では約 5.5 秒で揺れがほとんど収束していることがわかる。また残留振動もほとんど残っていない。

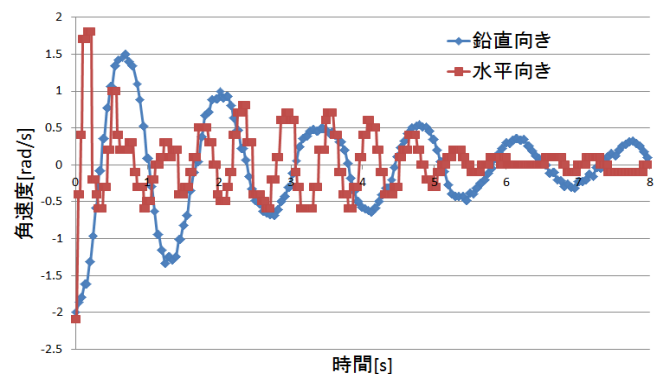


Fig.9 Result of experiment 2

### 4.3 考察

#### 4.3.1 実験 1

実機実験ではシミュレーションに比べ収束時間が長く、残留振動が残ってしまった原因として以下のことが考えられる。

- ・ IMU のサンプリング周期が長い
- ・ IMU に誤差が乗っている
- ・ プロペラの出力範囲に指令値が収まっていない

1 つ目はシミュレーションのサンプリングタイムと実験で使用した IMU のサンプリングが異なるということだが、シミュレーションのサンプリングタイムを IMU のサンプリングタイムに合わせてもシミュレーション結果に大きな差はなく、IMU のサンプリングタイムは十分に短いことを確認した。

2 つ目は IMU のドリフトによって、得られる状態変数に誤差が乗り、制御入力の誤差に繋がっていることが考えられる。

しかし実験 2 でも同じ IMU を使用しているため、直接的な原因とは考えづらい。

3 つ目はプロペラが出力し得る範囲を制御入力を超えているということだが、制御入力のみを抽出してグラフ化したところプロペラの出力範囲を超えている瞬間はないことを確認した。

### 4.3.2 実験 2

実験 2 のプロペラの出力向きをでは収束性が改善したことが確認できた。よってワイヤ懸垂システムの振動制御において、懸垂高さによる振動特性に応じてプロペラの出力向きを変化させることが重要であることがわかる。

## 5. 懸垂物の水平移動

### 5.1 制御方法

本研究では最適サーボシステムを用いて姿勢の制御を行う。サーボシステムとは目標入力に出力を追随させるシステムである。Fig.10 にサーボシステムのブロック線図を示す。今回は目標  $u_r$  を懸垂物の傾き 0 度とし、常に水平を保つように制御する。また制御入力  $u$  はプロペラの風力とし、フィードバック行列  $F$ 、 $G$  と状態変数によって決定される。フィードバック行列  $F$ 、 $G$  は状態方程式を用いてシミュレーションから決定し以下の値とした。

$$F = \begin{pmatrix} 4.69797 & 48.37124 \\ -4.69797 & -48.37124 \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 40.63648 \\ -40.63648 \end{pmatrix}$$

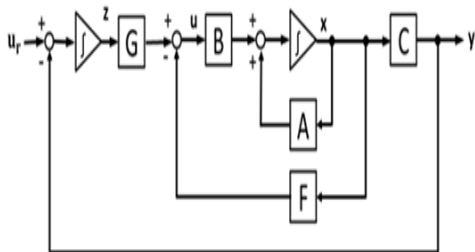


Fig.10 Block diagram of servo system

### 5.2 実験方法

Fig.2 において懸垂物が原点にある状態から  $y$  軸正方向に 0.15m 懸垂物を移動させ、再び原点に移動させる。実験開始時間を 0 秒として 3 秒後にワイヤが巻き取られ 4.5 秒後に 0.15m の移動を終える。そして 18 秒後にワイヤが引き出され 19.5 秒後に再び原点に戻り、28 秒後に実験を終える。

原点以外の瞬間は 4 本のワイヤ長が等しくなくなるため、張力の大きさが異なることとなり、力学的なつり合いから懸垂物の姿勢が傾くが、その姿勢がサーボシステムによってどのように推移するのか、以下の 2 パターンをグラフ化し Fig.11 に示した。グラフは横軸を時間[s]、縦軸を懸垂物の角度[rad]とした。

A・・・制御なしで移動させた

B・・・サーボシステムによる制御で移動させた

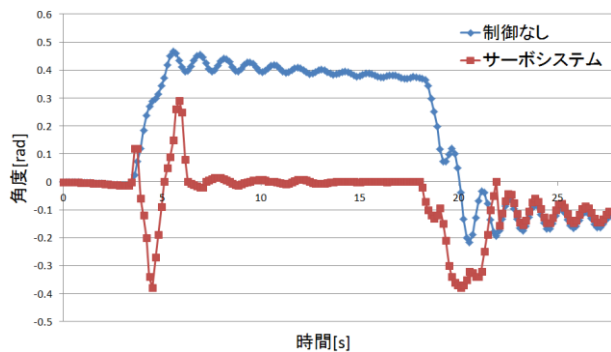


Fig.11 Result of experiment 3

### 5.3 考察

6.5 秒から 18 秒の間において制御なしに比べ、サーボシステムによって角度の目標値を 0 として制御入力を追従させると懸垂物の角度が 0 付近に収まっていることがわかる。

サーボシステムによる制御において制御入力が大きくなりすぎて懸垂物がプロペラの風力によって逆に傾く瞬間を確認した。これは状態変数を 10 回サンプリングし、その平均をとって制御入力を作るなどの平均化を行えば滑らかに目標値に漸近するのではないかと考える。

22 秒から 28 秒において懸垂物が原点に戻ったにも関わらず角度が  $-0.1$  [rad] 付近で静止している。これは懸垂物の移動によるワイヤの巻き取りと引き出しの課程で実験前のワイヤ長さと実験後のワイヤ長さが数ミリ単位で異なったことによって力学的な釣り合いから懸垂物が  $-0.1$  [rad] 傾いたと考える。

## 6. 結論

4 本のワイヤを用いたワイヤ懸垂システムにおける問題点を解決するため、プロペラの風力を用いて懸垂物の振動制御と水平移動を行う手法を検討した。

振動制御ではワークスペースとワイヤ長から決まる懸垂高さにおける振動特性を考慮したモデル化が重要である。

水平移動では過剰な制御入力が入り懸垂物の水平姿勢を保てない瞬間があるため、制御入力のサンプリングを IMU のサンプリング周期ごとに算出するのではなく、いくつかのサンプルを平均して制御入力を決めるなど平均化するような手法が必要である。

### 参考文献

- (1) 国土交通省 道路局 国道・防災課, 橋梁定期点検要領, 2014
- (2) 藤澤隆介, 梅本和希, 田中基康, 佐藤徳孝, 永谷直久, 勝山真規, ワイヤ移動式橋梁点検ロボットシステム ARANEUS の開発と運用, 土木学会論文集, 73-1(2017) pp.26-37
- (3) Andreas Pott, Christian Meyer, Alexander Verl, Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots, ISR/ROBOTIK 2010, pp.999-1004
- (4) 坪内孝司, 大隅久, 米田完『これならできるロボット創造設計』講談社, 2007 年, pp.207-209