

プロペラとカウンタウェイトを用いたワイヤ懸垂システムの位置制御

Position control of wire suspension system using eight propellers and counter weight

精密工学専攻 36号 鈴木 瑠

Ryu Suzuki

1. 緒言

インフラ点検や大型機械の組み立て作業を想定し、屋外を含む大規模空間での移動ロボットとして、四本のワイヤを用いた懸垂システムを提案する。ワークスペース上部の四隅に取り付けられたワイヤの巻取り機構によってワイヤ長を変化させることで、懸垂されたベースの位置・姿勢を制御することができる。

ワイヤを用いた懸垂ロボットの関連研究の多くは六本以上のワイヤを用いている⁽¹⁾⁽²⁾。六本以上のワイヤを用いることで懸垂物の位置、姿勢を完全に拘束できるが、六ヶ所以上のワイヤ引き出し点が必要となり、一般的に多くみられる長方形のワークスペースに対応し難くなる。本研究の四本ワイヤの懸垂システムは可動範囲が広くとれる反面、非完全拘束に起因した外力による振動や、ワークスペース中央以外の場所では傾きが発生してしまう。そこで本研究の目的としてベースの振動、姿勢制御を行う装置を開発する。先行研究ではカウンタウェイトを用いた重心変位機構とプロペラによる風力を用いたベースの姿勢制御を試みた⁽³⁾⁽⁴⁾。カウンタウェイトを用いた手法はベースの重心を動かすことができるのでベースが傾いた際の姿勢制御に有効であり、プロペラを用いた機構は外力に対しての有効性が示された。そこで二つの機構を合体させることでより効率よく振動、姿勢制御を行うことが出来ると考えた。まず、(4)ではシミュレーションの結果と実験結果に大きな誤差があるため、モデルと実験機の見直しを行う。次に(3)ではリニアモータを用いた一軸方向の姿勢制御しか出来ないため、新たにカウンタウェイト二次元移動機構を制作する。最後に二つの機構を合体させた実験機を制作し、姿勢制御実験を行うことで効果を確認する。

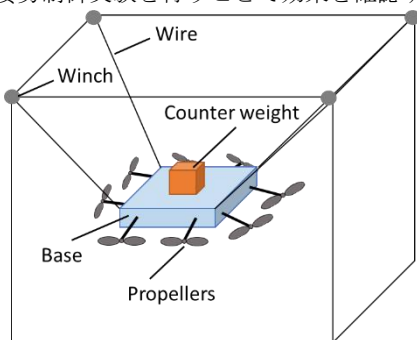


Fig.1 Wire suspension system

2. プロペラを用いた振動制御

2.1 プロペラについて

本研究ではドローン用のモータとプロペラを用いて風力を発生させる。モータの速度制御には PWM 制御を用いる。懸垂物のサイドに二つずつ合計八つのモータの出力を調節

することで、x 軸,y 軸回りの振動制御が可能である。本実験で用いるプロペラは、2450 kv、プロペラ径 5.1 in、ピッチ 5.2 in である。

2.2 制御方法

本研究では状態フィードバックによるレギュレータを用いて振動の制御を行う。ベースの傾き 0 度を平衡点とし、八つのプロペラ風力の x, y 軸方向の合力を制御入力とする。各方向の合力は、それぞれ逆を向いたプロペラ風力の差分により生成するが、プロペラは逆向きに力を出すことが出来ないため、つり合い状態であらかじめ一定の推力を出力しておく必要がある。フィードバックゲイン行列は極配置法を用いて求める。今回は状態変数を懸垂物の角度、角速度とし、懸垂物の運動方程式から状態方程式を導出する。

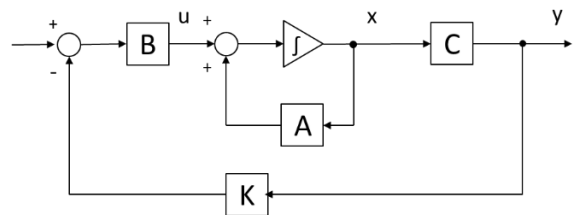


Fig.2 Block diagram of regulator

2.3 動力学モデル

ワイヤを用いたモデルはベースが回転した際にワイヤとベースのなす角が時々刻々と変化し、張力も同様に変化するため変数が増えるなどが非常に複雑になる。そこで、ベースは一度外力が加わると左右に振り子運動することが分かっているため、Fig.3 のような剛体棒の付け根に回転ばねを取り付けたモデルを考える。

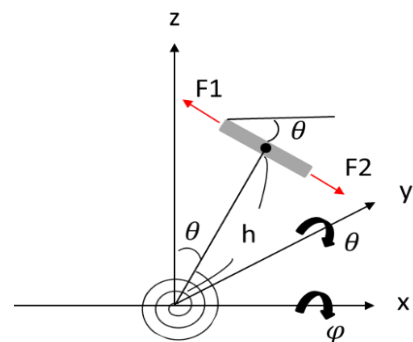


Fig.3 Wire suspension system with propellers

y 軸回りの回転角を θ とする。運動エネルギーと位置エネルギーからラグランジュの方程式を用いて運動方程式を導出する。

また、ワイヤ懸垂システムは減衰振動を表すことが分かっているので散逸項を含めている。

$$I\ddot{\theta} - Mgh\sin\theta\cos\theta + k\theta + c\dot{\theta} = Tx \quad (1)$$

式(1)より θ は十分に小さいとすると

$$\ddot{\theta} = \frac{(Mgh - k)}{I}\theta - \frac{c}{I}\dot{\theta} + \frac{Tx}{I} \quad (2)$$

I, K は θ 周りの慣性モーメントである。また T は外乱トルクとし以下のようになる。

$$Tx = hF_1 - hF_2 \quad (3)$$

(1)~(3)より状態方程式 $\dot{x} = Ax + Bu$ で表すことができる。

今回状態変数は懸垂物の角度、角速度である。

2.4 シミュレーション

外乱に対するシミュレーションを行う。実験機パラメータを Table 1 に示す。ばね定数と粘性係数については、ベースを自由振動させ、IMU より取得した実測データより求めている。

Table 1 Parameter of the experimental device

Mass of object	$M = 1.36 \text{ kg}$
Gravitational acceleration	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Distance to object	$h = 1.2 \text{ m}$
Moment of inertia	$I = 1.97 \text{ kgm}^2$
Spring constant	$k = 29.0 \text{ Nm/rad}$
Viscous damping coefficient	$c = 5.06 \text{ Nms/rad}$

このシステムは可制御であるので極配置法によってフィードバックゲインを求めることができる。シミュレーションで応答を確認し

$$\text{pole} = [-3 + 2i, -3 - 2i]^T$$

に対して K を導出した。

$$K = \begin{bmatrix} -5.36 & -2.87 \\ 5.3583 & 2.865 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)のフィードバックゲインを用いたレギュレータのシミュレーション結果を Fig.4 に示す。

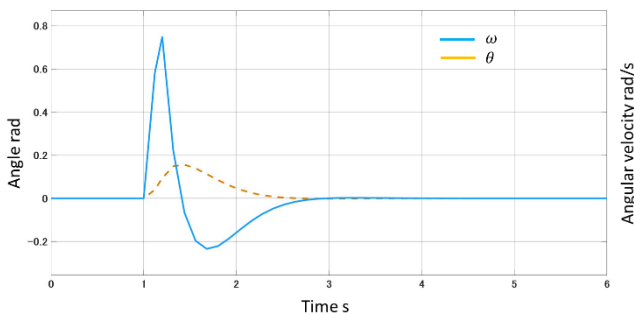


Fig.4 Simulation of impulse response

青線が角速度、オレンジ線(点線)が角度を表している。横軸は時間を表しており、外乱が加わってから約 2 秒で揺れが収まっている。

2.5 振動制御実験

制御入力 u は

$$u = -Kx \quad (5)$$

で表すことができ、 K と実測で得られた角度、角速度を掛け合わせることで出力すべきプロペラ風力が算出できる。角度データは実験機の上に乗せた IMU から得る。モータ制御には Arduino Mega 2560 を用いる。Fig.5 に実験機概要を示す。印加電圧は 11.1V である。

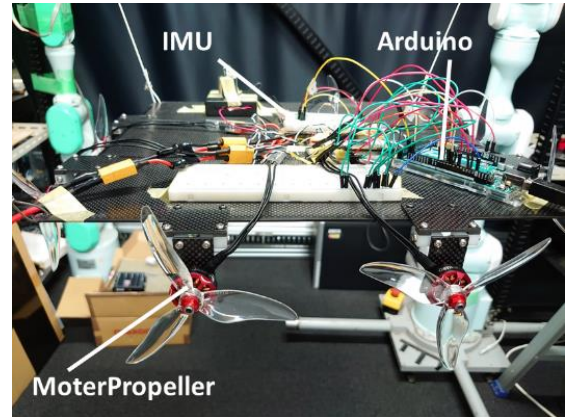


Fig.5 Propellers mounted on the base

実験結果を Fig.6 に示す。外乱として懸垂物の端を手で押している。

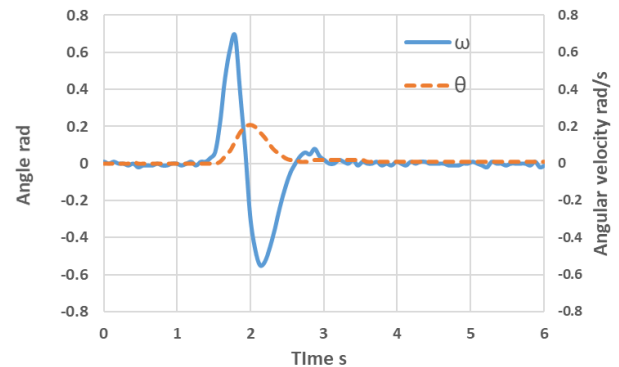


Fig.6 Angle and angular velocity (y axis disturbance)

青線が角速度、オレンジ線(点線)が角度を表している。Fig.6 より約 2 秒で揺れが収まっていることが分かる。

2.6 考察

今回実験ではシミュレーションと非常に近い角度、角速度データを得ることが出来た。よって 2.3 節にて考えた動力学モデルはある程度正しいと言える。しかし、シミュレーション結果に比べて実験結果の角度データが大きい値が出ている。角度データは IMU から得られた角速度データを積分し、ドリフトを補正するため加速度によって補正を行い算出している。この変換により多少誤差が乗っている事が考えられる。

3. カウンタウェイト二次元移動機構の製作

3.1 カウンタウェイト二次元移動機構について

カウンタウェイトとは釣り合いを保つ重りのことで、カウンタウェイトを動かすことで懸垂物の重心を変位させ、ワークスペース中央以外で懸垂物が傾いた際に水平を保つことが出来る。以下、カウンタウェイトを CW と称す。ワイヤ四本での懸垂は二軸回りに傾きが発生してしまうので、二次元平面座標で x,y 軸方向に自由に動かすことが出来る機構が必要である。Fig.7 に考案した機構を示す。

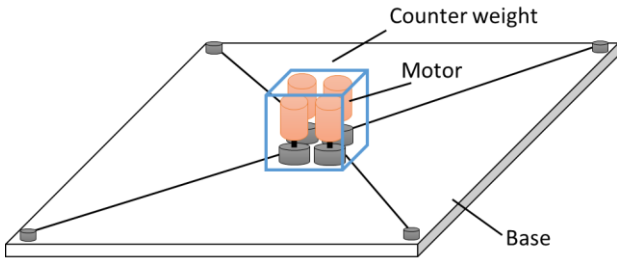


Fig.7 Design of counter weight

CW 部として中心にモータを四つ配置する。ベース上部にワイヤが固定されており、モータでワイヤを巻き取ることで CW を二次元平面内の任意の位置に動かすことが出来る。従来の二次元平面移動機構はボールねじを用いた機構などが挙げられるが、装置が大型化し、ベースの質量が重くなることで CW としての効果が薄くなるといった問題点がある。提案した機構は移動に必要な巻き取り機構が CW 部の質量に組み込まれることで、ベースに対して CW の質量が重くなり、より高い姿勢制御の効果が期待できる。

3.2 実験機概要

完成したカウンタウェイト二次元平面移動機構を懸垂物に取り付けた様子を Fig.8 に示す。

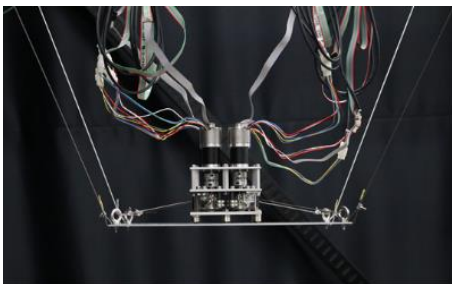


Fig.8 Counter weight mounted on the base

懸垂物である平板は一辺が 400mm であり、CW は懸垂物中心を中心とした 260mm 四方を自由に動くことができ、こちらが可動範囲となる。CW 質量は 4.9kg、懸垂物全体の質量は 6.1kg となっている。ワイヤ巻き取り用ドラムの径は 35mm となっており、制御には Arduino Mega 2560 を用いている。モータドライバ等制御機器は実験スペース上部に配置してある。

3.3 制御方法

CW の制御は懸垂物がワークスペース中央以外にいる時に水平を保つのに使用する。ワークスペースと懸垂物の各パラメータが既知なので、ワークスペースの任意の座標から逆運動学計算を行うことで CW の移動量を計算する。

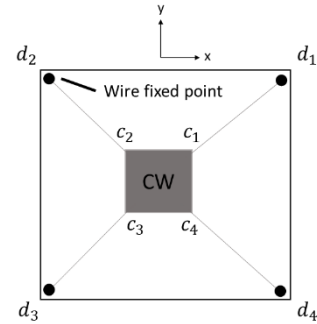


Fig.9 Base viewed from the top

CW 質量を M 、ベース質量を m とし、懸垂物の任意の座標を $(x,y,z)^T$ とすると、懸垂物を水平に保つための CW の座標は式(6)、式(7)で表せる。

$$X_c = \frac{ax(m+M)}{M(a-w)} - \frac{m}{M}x - x \quad (6)$$

$$Y_c = \frac{ay(m+M)}{M(a-w)} - \frac{m}{M}y - y \quad (7)$$

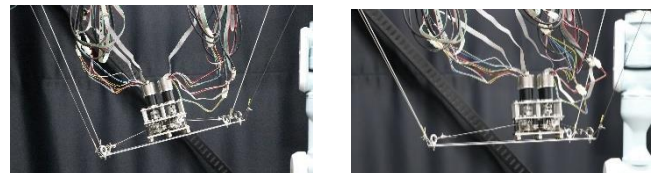
式(6)、(7)から、CW の各モータが巻き取るワイヤの長さを導くと、式(7)となる。

$$l_i = \sqrt{\{c_{xi} - (d_{xi} + X_c)\}^2 + \{c_{yi} - (d_{yi} + Y_c)\}^2 + (c_{zi} - d_{zi})^2} \quad (8)$$

今回は四本すべてのワイヤを位置制御で制御し、ワイヤの巻き取り速度は PID 制御によって制御する。

3.4 姿勢制御実験

懸垂物がワークスペース中央以外に移動することを想定した実験を行う。今回はワークスペース上部中心を原点とした座標系を取った際に、 $(0,2,0,-1.28)^T$ の位置に移動した際、つまり地面から 1.1m、x 軸方向に 0.2m 水平移動した際に懸垂物の傾きを水平に保つ位置に CW を移動させる。Fig.10 に実験の様子を示す。



(a) CW not controlled (b) CW controlled

Fig.10 Result of experiment

Fig.10(a)は CW の位置を制御しない状態で懸垂物を水平移動した図、(b)は水平移動時に CW を釣り合い位置に移動させた際の図である。CW を制御することで、懸垂物を水平に保つことが出来る事を確認した。また懸垂物の傾きは 1度以内に収まっている。

3.5 考察

Fig.10(b)より懸垂物は水平になっているように見えるが、角度データを見ると1度程度の傾きが生じている。CWの位置誤差が生じていると考えられるが、CWの質量が大きいいため1mmずれただけでも1度程度の傾きが残ってしまう。誤差が生じる原因としてまず、取り付け点の座標の位置誤差とワイヤ巻き取り量の誤差が考えられる。CW各パーツは外注、手加工して作っているが、数mm程度の誤差があることは十分考えられる。またワイヤ巻き取りの際、巻き取り用ドラムの径を計算の値として使っているが実際には機構の関係上斜めに巻き取られることがあり、数mm程度の誤差が出てしまう。しかし、これらが原因で発生してしまう誤差をなくするのは難しい。

次に制御方法の検討を行う。今回は全てのワイヤをエンコーダの値を用いて位置制御している。しかし張力を考慮していないので四本の内一つのワイヤに過剰な張力がかかるとワイヤが伸び、長さに誤差が生じてしまう。CWの位置はワイヤ三本により拘束できるので、一本は張力制御にするなど制御方法を改めることで誤差を改善できるのではないかと考えられる。

4. 二つの提案機構の合成

4.1 実験機概要

3章と4章で提案した機構を組み合わせた実験機をFig.11に示す。

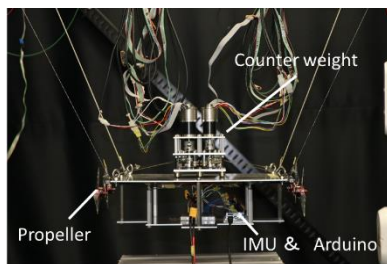


Fig.11 CW & propellers mounted on the base

懸垂物下部にIMU、プロペラを制御するためのArduino等を搭載するための土台を取り付けている。CW質量は4.9kg、懸垂物全体の質量は7.1kgとなっている。CWとプロペラはそれぞれ別のArduinoによって制御している。

4.2 位置制御実験

作成した実験機を用いて実験を行う。今回は二つの機構を組み合わせているので両方の効果を確認すべく、懸垂物を水平移動させながらプロペラの振動制御を取り入れる。水平移動時の実験条件は3.4節と同じである。また懸垂物がワークスペース中央にある時と、水平移動させてCWを制御して姿勢を水平に保った際の、自由振動させた際の振動特性にほとんど違いが見られなかったため、振動制御時の運動モデルは2.3節と同様の物を用いる事とする。

実験結果をFig.12に示す。

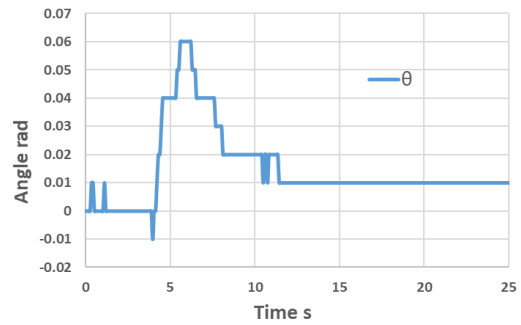


Fig.12 Angle of base

Fig.12より、懸垂物が水平移動した際に揺れが生じ、最後に0.01 rad、つまり0.6度程度の傾きが残っているのが確認できる。

4.3 考察

Fig.12の実験結果より、0.6度程度の傾きの誤差が残っている。こちらは4.4節の実験結果と同様に、CWの位置誤差が1mm程度残っていることで生じている。水平移動時に揺れが発生しているが、CWの動きと懸垂物の動きをリンクさせていないため、今後はCWが常に懸垂物重心にあるように制御することで、水平移動時の揺れは抑えられると考えられる。プロペラの振動制御は、移動時の揺れの制御にはあまり効力はなく、移動後の外乱の抑制に有効であると言える。

5. 結論

四本のワイヤを用いた懸垂システムにおける問題点を解決するためにプロペラを用いた振動制御機構、カウンタウェイトを用いた姿勢制御機構を提案した。また二つの実験機を組み合わせることで振動と姿勢制御の両方を効率的に行えることを確認した。

カウンタウェイトの制御方法に関して、若干の位置誤差をなくすために、一つのワイヤを張力制御に変えるなど制御方法を検討する必要がある。

6. 参考文献

- (1) 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
- (2) Andreas Pott, Christian Meyer, Alexander Verl, Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots, ISR/ROBOTIK 2010, pp.999-1004
- (3) 高見澤ゆり子, 大隅久, "カウンタウェイトを利用したワイヤ懸垂システムの姿勢制御", ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集, 1A1-S09, 2019
- (4) 平田航, 大隅久, "プロペラを利用したワイヤ懸垂システムの姿勢制御", ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集, 1A1-S10, 2019