

カウンタウェイトを用いたワイヤ懸垂システムの姿勢制御 Tilt Angle Control of Wire Suspension System Using Counter Weight

精密工学専攻 29号 高見澤ゆり子
Yuriko Takamizawa

1. 緒言

近年、トンネルや道路橋など高度経済成長期に建造された国内のインフラ設備の老朽化が社会的課題である。国土交通省では、橋梁の定期点検は併用開始後2年以内に初回を行い、2回目以降は、5年に1回の頻度で行うことを基本とする⁽¹⁾としている。しかし、少子高齢化や地方の過疎化に伴い、人手不足のために必要な点検を行うことができなくなってしまうという懸念がある。

近年ではロボット技術の向上に伴い、作業をロボットに代替させることによって効率化や人件費の削減などが期待されている。インフラ点検に関しても飛行型や、吸着型、アーム懸架型の点検ロボットが開発されているのが、ロボットの設置作業に時間がかかってしまうなど未だ課題は多い。そこで、本研究ではワイヤ懸垂システムによる橋梁点検の実施を提案している。ワイヤ懸垂システムの特長としては、可搬重量が大きい・可動範囲が広い・機構が簡易であるなどが挙げられる。またワイヤを取り付けることができれば様々なワークスペースへの利用が可能である。橋梁点検への応用については Fig.1 のような方法を想定している。点検用カメラはワイヤによって固定されるため、落下等のリスクも防ぐことができる。

ワイヤを用いた懸垂ロボットに関しては6本以上のワイヤを用いている研究が多い⁽³⁾⁽⁴⁾。6本以上のワイヤを用いる場合、懸垂物の位置・姿勢を完全拘束することができるが、ワイヤ取り付け点が増えることで構造が複雑になってしまう。本研究では構造の簡易化のため4本のワイヤだけで物体を懸垂するシステムを採用した。ワイヤ取り付け点が4か所のみとなり、様々なワークスペースに適用しやすくなるが、4本のワイヤでは非完全拘束となり、懸垂物に外乱が加わると揺れが発生してしまう。また、ワークスペースの端部では懸垂物が傾いてしまう。そこで、本研究ではカウンタウェイトを用いて懸垂物の姿勢を制御する装置を開発した。

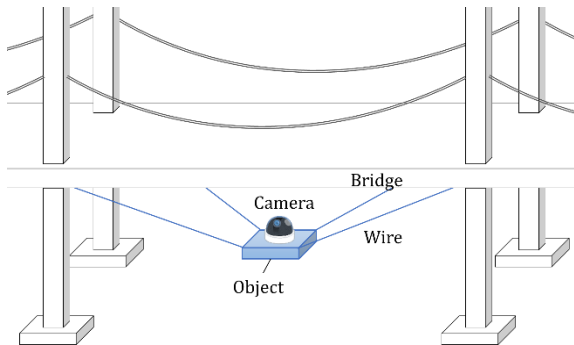


Fig.1 Robot bridge inspection

2. ワイヤ懸垂システムの構成

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。各ワイヤ取り付け点にはウィンチ機構を設置し、物体を懸垂する4本のワイヤを巻き取ることでワイヤ長を変化させることができる。また以下の Table.1 に本研究で使用する装置の各パラメータを示す。尚、ワークスペース上部に基準座標系を設けており、懸垂物の重心にも座標軸を置く。ワークスペース・懸垂物それぞれの水平方向に直行する x , y 軸を置き、鉛直上方向を z 軸としている。

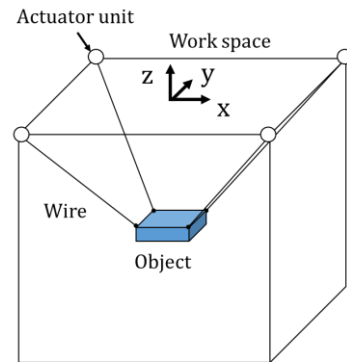


Fig.2 Wire suspension system

Table.1 Specifications of experimental system

Size of Upper part of workspace	1.53[m]×1.53[m]
Linear density of the wire	0.008[kg/m]

懸垂物に外乱が加わると揺れが発生するが、この揺れの特に顕著な振動モードを Fig.3 に示す。 x 軸、 y 軸方向に水平に振動するモード（水平振動）と z 軸回りにねじれるような振動モード（ねじり振動）の二つである。懸垂物の傾きに対しては水平振動がより大きく影響すると考えられるため、本研究では水平振動に着目して制振を行う。したがって、今回はねじり振動の影響は無視する。

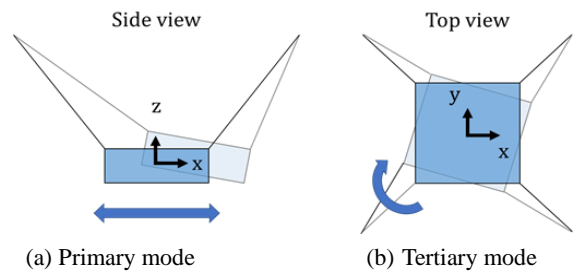


Fig.3 Vibration mode

3. カウンタウェイトを用いた姿勢制御

3.1 カウンタウェイトについて

カウンタウェイトは Fig.4 のようにレール上の可動子を動かすことで物体の重心を変位させることができる装置である。可動子の重力を利用しているため、水平方向に対する傾き角度の制御に有効であると考えられる。

可動子が移動するレールが1つのとき、レールに直行する1軸回りの回転による姿勢の変化を制御することができる。今回はまず1軸回りの回転を制御し、カウンタウェイトの有効性を確認する。

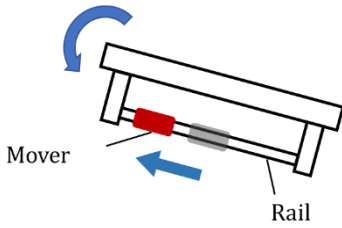


Fig.4 Counter weight

3.2 動力学モデル

カウンタウェイトと懸垂物を Fig.5 に示すようにモデル化する。今回は1軸回りの回転を対象とするため二次元平面で表している。ここで懸垂物は剛体棒によって振り子のように振動するものとし、剛体棒には回転ばねが取り付けられている。

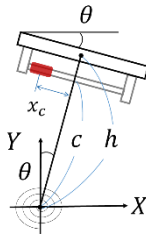


Fig.5 Kinetic model for counter weight

Fig.5 の基準座標系において懸垂物の傾きを θ 、可動子の変位を x_c とすると、運動方程式は以下のように表される。

$$m\ddot{x}_c - mc\ddot{\theta} + mg\theta = F$$

$$-mc\ddot{x}_c + (mc^2 + I)\ddot{\theta} + mgx_c + \{k - (Mh + mc)g\}\theta = T$$

これより状態変数は懸垂物の角度、角速度、可動子の変位、速度とすると状態方程式は以下である。

$$\dot{x} = Ax + BF$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{Mhg-k}{l} & 0 & -\frac{mg}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{Mchg-ck-gl}{l} & 0 & -\frac{mcg}{l} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ c \\ l \\ 0 \\ mc^2+l \\ ml \end{bmatrix}$$

3.3 制御手法

本研究では最適サーボシステムを用いて姿勢制御を行った。サーボシステムは目標入力に追従するように出力を制御することができる。サーボシステムのブロック線図を Fig.6 に示す。今回の実験では懸垂物を常に水平に保つために目標 u_r を懸垂物の傾き 0° としている。制御入力 u は可動子の推力とし、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。この F 、 G は3.2節で求めた状態方程式を用いて後述するシミュレーションから決定する。

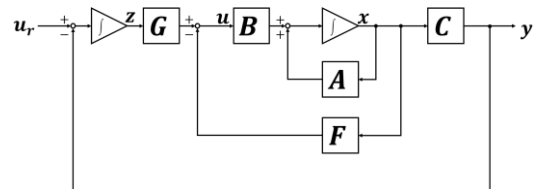


Fig.6 Servo system

4. 検証実験

4.1 実験機の概要

本研究で用いた実験機を Fig.7 に示し、各パラメータを Table.2 に示す。

懸垂物の上面にはIMU（慣性航法装置）を取り付け、懸垂物が傾くときの角速度を計測する。またレールに沿うようにリニアエンコーダを取り付けることで可動子の変位を取得している。さらに角速度、変位を用いて傾き角度、可動子の速度を算出している。尚、IMUは非常に軽量であるためその質量は無視する。

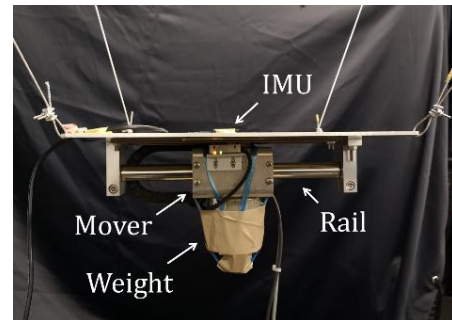


Fig.7 Counter weight mounted on the object

Table.2 Specifications of experimental device

Total mass	4.44 [kg]
Object mass	1.82 [kg]
Object size	30[cm]×30[cm]×0.5[cm]
Counter weight	2.62 [kg]
Moving range for a mover	0.17 [m]
Resolution of encoder	5 [μm]

4.2 システムの剛性

ここで、3.2節で述べた回転ばねの剛性を求める。今回は理論的に剛性を導出する方法を示す。

懸垂物のワイヤ取り付け点の位置 $\mathbf{X}(x,y,z)$ とワイヤ先端に加わる張力 $\mathbf{F}(F_x, F_y, F_z)$ の関係はカタナリー曲線によって表される。カタナリー曲線とはワイヤの弛みを考慮した上でワイヤ形状を二次元の関数で表したものであり、以下では4本のワイヤの位置関係より三次元に展開している。

$$x = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\rho g} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{F_z - \rho g L}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \right\} \cos \alpha$$

$$y = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\rho g} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{F_z - \rho g L}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \right\} \sin \alpha$$

$$z = \frac{1}{\rho g} \left\{ \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} - \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + (F_z - \rho g L)^2} \right\}$$

したがって、あるワイヤ取り付け点 i において、ワイヤ先端位置に加わる張力の変化とワイヤ先端位置（ワイヤ取り付け点）の関係を下のように求めた。

$$\mathbf{K}_{ti} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} & \frac{\partial F_x}{\partial z} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} & \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_z}{\partial x} & \frac{\partial F_z}{\partial y} & \frac{\partial F_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$

ここで、懸垂物に外力 \mathbf{F} が加わったとき、三次元空間での懸垂物の剛性行列 \mathbf{K} と変位 $\Delta \mathbf{X}$ の関係は、

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \Delta \mathbf{X}$$

のように成り立つとする。ここで \mathbf{X} は以下である。

$$\mathbf{X} = [x \ y \ z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$$

尚、各ワイヤ取り付け点に加わる張力と懸垂物に加わる張力の関係は以下である。

$$\Delta \mathbf{F}_i = \mathbf{K}_i \Delta \mathbf{X}$$

よって各ワイヤ取り付け点での剛性行列 \mathbf{K}_i は以下となる。

ここで \mathbf{r}'_i とは懸垂物の重心からワイヤ取り付け点までの距離ベクトルの外積行列を表している。

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ti} & \mathbf{K}_{ti} \mathbf{r}'_i{}^T \\ \mathbf{r}'_i \mathbf{K}_{ti} & \mathbf{r}'_i \mathbf{K}_{ti} \mathbf{r}'_i{}^T \end{bmatrix}$$

また、ワイヤ懸垂システム全体の剛性行列 \mathbf{K} は各ワイヤ取り付け点での剛性行列を足し合わせたものになることがわかる。これによりシステムの剛性行列を用いて以下の式より固有値解析が可能となり、水平振動の固有振動数から回転ばね定数を求めることができる。実際に求めた固有振動数と剛性は以下である。

Table.3 Specific frequency and stiffness

固有振動数	4.703[rad/s]
回転ばね定数	30.96[Nm/rad]

尚、先行研究では水平振動の振動数を実測し、剛性を算出しており、その振動数は4.80[rad/s]、剛性32.3[Nm/rad]である。今回求めた値との誤差は4.15%と非常に小さく、

概ね正しく算出されていると考えられる。

4.3 MATLABによるシミュレーション

状態方程式から、MATLABによって以下のフィードバック行列を導いた。

$$\mathbf{F} = [18.97 \ 1.133 \ 25.39 \ 9.190]$$

$$G = 31.62$$

今回はこの値を用いて実験を行なう。これらはリカッチの方程式から求めることができるが、このとき用いる評価関数に含まれる重み係数は任意で決定しなければならない。何度かシミュレーションを試みることにより、適当な重み係数を求めた。

4.4 姿勢制御実験

本実験は懸垂物に重りを載せ、傾きを与えた際にカウンタウエイトによって懸垂物を水平に保つことができるか確かめる。懸垂物に傾きを与えた様子を Fig.8、カウンタウエイトによって懸垂物が水平に保たれる様子を Fig.9 に示す。

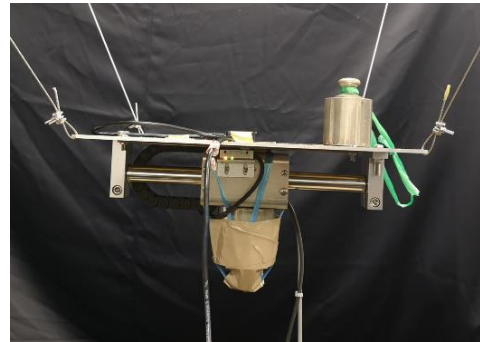


Fig.8 The object tilting

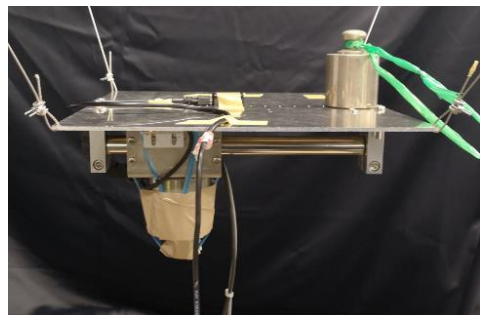


Fig.9 Tilt angle control by counter weight

このように傾きに対して可動子が移動し、懸垂物を水平に制御することができた。尚、懸垂物が外乱によって振動を起こす場合、ワイヤ懸垂システムの特性的によって懸垂物には傾きが生じる。本研究により傾きを水平に制御するという手法によって懸垂物の小さな振動に対しても有効な制御が可能だと考えられる。課題として、一定時間が経過すると可動子の行き過ぎによって Fig.8 とは逆向きに懸垂物が傾いてしまった。さらにその傾きを補正するように可動子が逆向きへ移動し、傾きが水平に釣り合う箇所の付近で可動子がゆっくりと振動してしまう場合があった。

4.5 実験結果に対する考察

姿勢制御実験に関しては懸垂物を水平に保つように可動子に指令を与えることができた。しかし一定時間経過後に可動子が徐々に動き出してしまい、懸垂物に傾きが発生している。

今回の実験においてはフィードバック制御に加え、目標値までの偏差を入力させるため、センサおよび実験機のノイズ対策を特に慎重に行う必要がある。実験に用いているセンサはリニアエンコーダと IMU の二つである。リニアエンコーダについては光学式インクリメンタルエンコーダを使用している。エンコーダでアップカウント・ダウンカウントを取得している場合、可動子の変化速度が遅いとミスカウントが発生する。別のカウント方法として A 相・B 相カウントをするとミスカウントを防ぎ、カウント入力のノイズを低減させることができる。尚、エンコーダスケールとリードヘッドの距離の調節やキャリブレーションをきちんと行なうことも重要である。また、今回の実験で使用した IMU はカルマンフィルタによって取得した値を補正しているため、角速度については比較的精度良く測定できていると考えられる。しかしシャフトモータ自体の振動も発生しており、IMU になるべく純粋に懸垂物の傾き角度に関する測定ができるよう角速度に対してしきい値を設けるなどの注意をすべきである。さらに、本研究で対象としているワイヤ懸垂システムについては Fig.3 に示すようなねじり振動も生じてしまう。今回は 1 軸回りの角速度のみを取得しているが、もしも、これに直行する軸回りの回転およびねじり振動が発生していると、1 軸回りの角速度のみでは正しい傾きを取得できない場合がある。より正確な傾きを求めるには IMU にて 3 軸の角速度および懸垂物の姿勢の変化を表す回転行列を取得し、ある 1 軸回りの回転を求める必要がある。さらに、可動子を駆動させているリニアシャフトモータには僅かなノイズが載ってしまう。ノイズ源となるものは電源装置や電磁波など様々であるが、モータに接続するケーブル同士が互いに影響しないよう配置するなどノイズ対策を十分に行わなければならない。

また、今回使用したフィードバック行列では可動子が釣り合いの位置付近で振動をする場合があった。この場合、リカッチの方程式を解く際の重み係数を大きくすると懸垂物が水平になるまでの収束時間が短くなり、可動子の振動を減少させることができる。しかし本研究で作成した実験機では可動子の可動範囲が 17 cm と比較的小さい範囲になるため、可動子がこれを超えて移動するような指令を与えないように重み係数を調整する必要がある。今回の実験では 4.3 節で述べたように MATLAB によるシミュレーションを行ない、可動子が適切な範囲内で変位していることを確認し、重み係数を決定した。本研究で用いた実験機において、重み係数は比較的小さな値にしなければならず、それによって収束時間も長くなってしまふ。より早く傾きを水平に収束させるためには実験機の寸法をより適切なものに設計することが求められる。

5 結言

今回のカウンタウェイトを用いた姿勢制御実験では懸垂物を水平に保つことができた。しかし、実験機の寸法上、制御が可能な傾き角度には限度がある。

カウンタウェイトでの姿勢制御の範囲を拡大するためには可動子のレールを長くする、ウェイトを重くする、などが挙げられる。レールを長くする場合には姿勢制御装置自体を大きくする必要があるが、点検用カメラを搭載した利用を考慮すると懸垂物が移動できる範囲が狭くなってしまふ、取り付けの際の作業コストも高くなってしまふ等のデメリットもある。また、ウェイトを重くする場合、可動子の変位に対して発生するモーメントが大きくなるため、小さな傾き角度に対する制御には不向きである。アプリケーションの目的や作業空間に応じて適切な姿勢制御の範囲を決定するなど設計の工夫が必要である。

今回は懸垂物が一方向に傾く場合の姿勢制御に対する検証を行なったが、外乱によって懸垂物に振動が発生した場合についても、懸垂物の姿勢を常に水平に保つように制御することで振動をより早く収束させることができると予想できる。その際には、ウェイトを小さくすることで小さな振動の傾きにも応用が可能と考えられる。

5.2 まとめと今後の展望

本研究ではカウンタウェイトを用いた姿勢制御の有効性を確かめることができた。今後は振動制御についての効果も詳しく検証していく。課題としてはセンサでの精確な観測と適切な実験機の設計が挙げられる。

尚、今回は 1 軸回りの回のみ制御を行なったが、今後は水平方向に直行する 2 軸回りの回転について制御を行なう必要がある。その場合は今回のように IMU での角速度の取得だけではなく回転行列を取得し、懸垂物の姿勢変化をモデル化することが重要である。

参考文献

- (1) 国土交通省 道路局 国道・技術課, 橋梁定期点検要項, 2019
- (2) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, インフラ維持管理用ロボット技術, 2018
- (3) 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
- (4) James S. Albus, Roger V. Bostelman, Nicholas G. Dagalakis, The NIST ROBOCRANE, Journal of Robotics System, vol.10(1992), No. 5
- (5) 井上崇志, “ワイヤ懸垂システムにおける姿勢制御装置の開発”, 2018 年度年度中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻修士論文, 2019.
- (6) 原田健太, “4 本のワイヤを用いたワイヤ懸垂システムの動力学解析”, 2016 年度中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻修士論文, 2017.