

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04383

研究課題名（和文）大空間移動のための4本のワイヤを利用したパラレルワイヤ懸垂機構

研究課題名（英文）Parallel wire suspension system using four wires for large space movement

研究代表者

大隅 久 (Osumi, Hisashi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00203779

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：3次元空間に広い可動領域を持つ位置決め機構を実現するために、4本のワイヤを利用した位置決めシステムを提案した。4本のワイヤを利用して剛体を懸垂すると、懸垂部に振り子振動が発生すると共に、位置決め点において懸垂部の姿勢角を制御するための別機構が必要となる。そこで、懸垂部にドローン用のプロペラと、懸垂部上で移動可能なカウンタウェイト駆動機構を搭載し、懸垂部の移動に伴って発生する振動をプロペラにより抑制しながら、釣り合い位置の変位により発生する懸垂部の傾きを、カウンタウェイトの移動により補正することで水平を保つ制御手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤにより3次元空間で剛体を位置決めするには、懸垂部に6本以上のワイヤを取り付ける必要がある。しかし、可動空間が広がると、ワイヤの伸びや弛みの影響が排除できず完全な拘束は難しく、実用化されたシステムは少ない。これに対して4本のワイヤによる懸垂系は、部屋の天井の四隅からワイヤを送り出すことで部屋全体を可動領域とでき、実用的である。ただし、懸垂部の位置・姿勢をワイヤ長さだけで拘束することができないため、水平を保つための機構と、振動抑制の搭載が必要となる。この目的での機構、制御系を提案し、理論解析を行った本課題の学術的意義は大きく、実用的観点から社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：A positioning system in 3D space using four wires to suspend an end-effector is proposed. When a rigid body is suspended using four wires, the suspended part swings due to inertial force or disturbance and tilts due to insufficient constraints by wires. Therefore, additional mechanisms are required to reduce the swing motion and to control the attitude angle of the suspended part at the positioning point. Therefore, eight propellers for drones and a counterweight drive mechanism that can move on the suspension part are mounted on the suspension part. A control system to keep the suspended part horizontal by moving the counterweight and also to reduce the swinging motions is developed.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ワイヤ懸垂系 パラレルワイヤ 位置決め機構 逆運動学 振動制御 カウンタウェイト

1. 研究開始当初の背景

3次元空間に広い可動領域を持つ機構を実現するには、ワイヤを用いた懸垂系の利用が有効である。ただし、空間で姿勢まで含めた制御を行うには、複数のワイヤを利用したパラレル構造が必要となる。これまでの既存研究は、懸垂するワイヤを6本以上利用する完全幾何拘束タイプのもが多く、このタイプは可動領域が広がると、ワイヤの剛性の低下や弛みにより、完全な拘束が難しい。また、6本以上のワイヤを、できるだけ空間に均等に配置しなくてはならず、実用上不都合が多い。これに対して、可動領域の上部4隅から4本のワイヤを利用して懸垂を行うと、可動領域を広くしながら、懸垂部の姿勢制御も可能となる。ただし、完全幾何拘束タイプとはならないため、振り子振動が発生すると共に、位置決め点において懸垂部の姿勢角を制御するための別機構が必要となる。4本のワイヤを利用した構造は、橋梁点検、室内での空間移動ハンド等で利用されているが、懸垂部の位置、姿勢を制御するシステムとはなっていない。

2. 研究の目的

本申請課題では、4本のワイヤによる懸垂構造を利用しつつ、懸垂部に発生する振動の抑制、及び姿勢制御機能を懸垂部に搭載した位置決めシステムの開発を目的とする。提案システムの概要をFig.1に示す。懸垂部にドローン用のプロペラと、懸垂部上で移動可能なカウンタウェイトを搭載する。懸垂部の移動に伴って発生する振動をプロペラにより抑制しながら、釣り合い位置の変位により発生する懸垂部の傾きを、カウンタウェイトの移動により補正することで水平を保つ制御手法を開発する。また、本システムは4本のワイヤ長と、カウンタウェイトの懸垂部上での2自由度、合わせて6自由度を有する一方、ワイヤが重力により力学的拘束を受ける。そこで、位置決めのための逆運動学解の存在領域を運動学解析により明らかにする。

3. 研究の方法

研究は以下の手順で行う。

(1) 実験システムの開発

Fig.1のように、天井の四隅から張られたワイヤで懸垂された正方形の懸垂ベースに、8枚のプロペラと、2自由度を持つカウンタウェイトが搭載された機構を開発する。移動中の懸垂ベースを常に水平に保つことを目標とし、Fig.2のように軌道途中の位置に対するカウンタウェイトの目標位置を計算し、天井からの4本のワイヤ長制御に合わせてベースの移動を行う。その際、カウンタウェイトの質量が懸垂系の質量に占める比率が高くなるよう、モータの質量をそのままカウンタウェイトとして利用する。

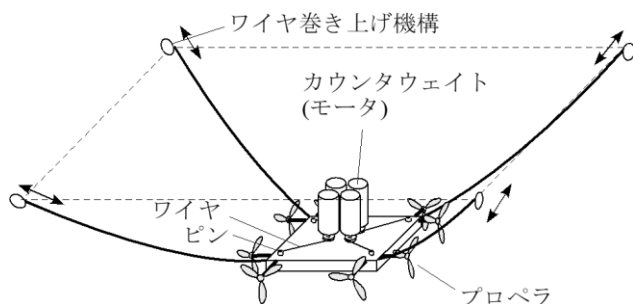


Fig.1 提案システムの全体図

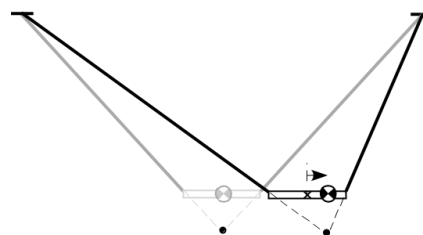


Fig.2 重心移動による姿勢制御

(2) 逆運動学解析の方法

懸垂部の可動領域は、カウンタウェイトの移動による懸垂部重心の移動可能範囲が懸垂ベース面上全てをカバーしていれば、部屋のどこにおいても水平を保った位置決めが可能である。一方、旋回方向に関しては、天井の形状が正方形で懸垂ベースも正方形となる場合、目標姿勢として鉛直軸回りの回転を行わせることが力学的に不可能となる。また、どちらか一方でも長方形の場合には、その形状と位置決め地点に応じて、若干の回転が可能となる。逆運動学解の存在範囲を明らかにするため、この旋回可能範囲を、ワイヤ張力をベースとした考察により導出する。

(3) 振動抑制制御

懸垂部の振り子振動は、釣り合い地点毎に異なったものとなるが、ワイヤに弛みが発生しない場合には、単振動としてのモデル化が可能となる。ただし、ベースが可動領域の端に近づくと、振幅が方向毎に異なった非対称のものとなるため、線形化された単純なモデルでの振動抑制が可能かの検証が必要となる。本課題では、剛体とバネによる単振動モデルを設定し、これを搭載したプロペラ推力によりに制振する。制御には線形モデルをベースとしたレギュレータを用い、その制御効果の確認を行う。

4. 研究成果

(1) 実験システムの概要

開発したシステムは、ワークスペースの天井側ワイヤ送り出し点間距離が 1.7m の正方形で、その中央に基準座標系を設定している。懸垂部は Fig. 3 のように一辺が 0.4m の正方形で、カウンタウエイトは 4 本のワイヤによりベース上で駆動される。4 つの駆動モータは、駆動される側のカウンタウエイトとして利用されている。カウンタウエイトの質量は 4.93kg、懸垂部の残り部分の質量は 1.27kg である。懸垂部ベース板中央の懸垂物座標系 Σ_0 における懸垂部重心の高さはおよそ 8.7cm である。カウンタウエイトのベース上での可動範囲を考慮したベースの可動範囲は、水平方向が 0.77m の正方形となっている。また、懸垂部には IMU が取り付けられており、懸垂部の 3 つの姿勢角を、分解能 0.01rad で計測することができる。

(2) 逆運動学解の存在領域の導出

旋回角度を 0° とした場合、すなわちベースと天井の各辺が平行の場合の逆運動学計算は、ワイヤを xz, yz 平面に直交射影した時、左右からのワイヤの交点の真上に重心が来るようカウンタウエイトの位置を決定すれば良く単純である。この状態から、更に鉛直軸回りの回転が可能かどうかを検討することで、力学的に回転が可能かどうかを調べる。この旋回方向の回転は、4 本のワイヤの長さ変化と共に張力変化を伴うので、長さ変化をさせた際の張力が正となっていればその回転は可能であり、いずれかが負となると不可能となる。この時の張力変化は、 x, y, z 方向の並進力成分を変化させず、旋回方向のモーメントのみを生み出す必要がある。

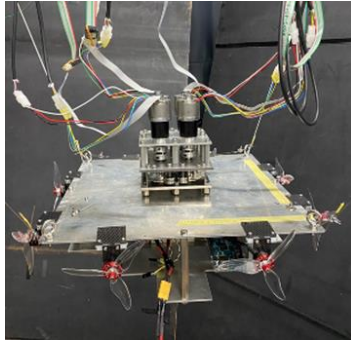


Fig.3 懸垂部の機構

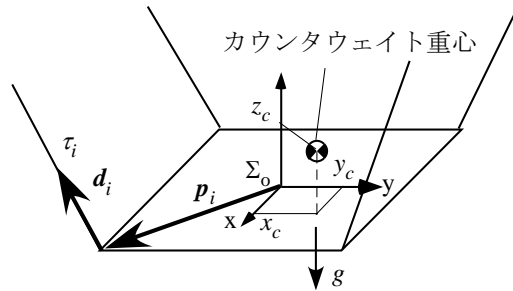


Fig. 4 懸垂部の座標系とパラメータ

Fig. 4 のように、 i 番目のワイヤの単位方向ベクトルを \mathbf{d}_i 、張力を τ_i 、ベース原点からワイヤ取り付け点へのベクトルを \mathbf{p}_i とすると、4 本のワイヤ張力によりベース座標系重心に発生する力、モーメントベクトルは式(1)と表すことができる。

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 & \mathbf{d}_2 & \mathbf{d}_3 & \mathbf{d}_4 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_1 \times \mathbf{d}_1 & \mathbf{p}_2 \times \mathbf{d}_2 & \mathbf{p}_3 \times \mathbf{d}_3 & \mathbf{p}_4 \times \mathbf{d}_4 & m_c g & 0 \\ 0 & 0 & m_c g & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで m_c はカウンタウエイトの質量、 g は重力加速度である。張力にはこの他に、ベースとカウンタウエイトを懸垂するための張力が発生している。個々のワイヤの伸びを無視すれば、この成分 $\boldsymbol{\tau}_g$ は式(2)のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\tau}_g = \begin{bmatrix} \tau_{1g} \\ \tau_{2g} \\ \tau_{3g} \\ \tau_{4g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 & \mathbf{d}_2 & \mathbf{d}_3 & \mathbf{d}_4 \\ \mathbf{p}_1 \times \mathbf{d}_1 & \mathbf{p}_2 \times \mathbf{d}_2 & \mathbf{p}_3 \times \mathbf{d}_3 & \mathbf{p}_4 \times \mathbf{d}_4 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (M + m_c)g \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 M はベースの質量である。ベース重心座標系に対して x, y, z 方向の並進力を発生させずに、 z 軸回りのみにトルクを発生するための張力には、

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad d_4] \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = D\boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

が必要となり、式(3)の条件を満たす張力ベクトルは

$$\boldsymbol{\tau}_{mz} = (\mathbf{I} - D^+D)\mathbf{z} = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{t} \quad (4)$$

と表すことができる。 $\mathbf{I} - D^+D$ の空間は高々1次なので、 $\boldsymbol{\alpha}$ はその空間の基底ベクトル \mathbf{t} と任意係数 α で表すことができる。よって、重力場において、ベースにz軸回りのトルクを発生させることのできる $\boldsymbol{\tau}$ は

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{mz} + \boldsymbol{\tau}_g = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{t} + \boldsymbol{\tau}_g \quad (5)$$

となる。現在の位置において、z軸回りの正負両方の回転が可能となるには、式(3)左辺の $\boldsymbol{\tau}$ の全ての成分が0以上の状態で、 α が正負両方の値をとることができれば良い。このことは、どちらかの方向にそれ以上回転ができない姿勢旋回角の境界点では、どれか1本の張力が0となっている状態、すなわち3本のワイヤのみで懸垂された状態であることを意味している。

天井と平行な状態における旋回前の状態から旋回をさせて行くと、 $\boldsymbol{\tau}_g$ に $\boldsymbol{\alpha}\mathbf{t}$ が徐々に加えられ、いずれか1本のワイヤ張力が0となる地点が、旋回角の限界に対応する。つまり、3本のワイヤのみで釣り合いの達成される姿勢を求めることで、旋回可動領域が決定されることが明らかとなった。これは4本のワイヤをxy平面に投影した時の幾何的な関係から簡単に計算できる。なお、この $\boldsymbol{\tau}$ により、x,y軸回りにも新たにトルクが発生するが、この成分については

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \times \mathbf{d}_1 & \mathbf{p}_2 \times \mathbf{d}_2 & \mathbf{p}_3 \times \mathbf{d}_3 & \mathbf{p}_4 \times \mathbf{d}_4 & m_c g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_c g \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ x_c \\ y_c \end{bmatrix}$$

より、

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = -\frac{1}{m_c g} [\mathbf{p}_1 \times \mathbf{d}_1 \quad \mathbf{p}_2 \times \mathbf{d}_2 \quad \mathbf{p}_3 \times \mathbf{d}_3 \quad \mathbf{p}_4 \times \mathbf{d}_4] \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

とカウンタウエイトの位置を制御することで、これらトルクの影響を打ち消し水平を保つことができる。Fig.5は図中左下のワイヤ張力が0となる場合の回転限界を示している。ただし、3本のワイヤが1点で交わる点が懸垂部の外側に飛び出しており、この交点の直上に重心が存在する必要がある。実際には式(6)で計算されるカウンタウエイトの位置も旋回角の限界を決定するための拘束条件となる。

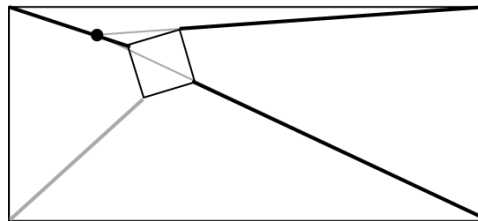


Fig. 5 回転可動領域の限界(Top view)

以上より、本提案システムにおける運動学特性として、可動領域の理論的な導出法の確立を行うことができた。

(2) 懸垂部の位置決め制御

対象とする懸垂部は、釣り合い点近傍において、ワイヤ交点を回転中心とした振動を発生する。その振動は、Fig.6(a)のように、つり合い点が可動領域の中央にある場合は左右対称となるが、それ以外では非対称な振動となる。また、重心の高さが変わると、その周期が変化する。Fig.6(b)は重心が板の下側と上側の場合について、左右方向にベースが傾いた場合に重心がどれだけ上に持ち上がるかを示したものである。重心の位置エネルギーの変化がバネモデルに蓄えられるポテンシャルエネルギーと等価となるので、左右の傾きに対して重心高さが非対称になることは、自

由振動において左右の振幅と周期が異なったものとなることを意味する。また、左右の傾きによる重心の高さ方向変位は、ベース板より下側に重心がある場合には、ベース板の上下変位に傾きによる変位が足されるのに対して、上側にある場合には傾きによる変位が差し引かれる。このため、重心が高い場合には、みかけのバネ定数が小さくなり、振幅が大きく周期の長い揺れになり、下側では振幅の小さな速い揺れとなる。この変化を考慮した上で、見かけのバネ定数が変化しても安定性を保つことのできる極を設定することで、線形レギュレータの効果を検証する。

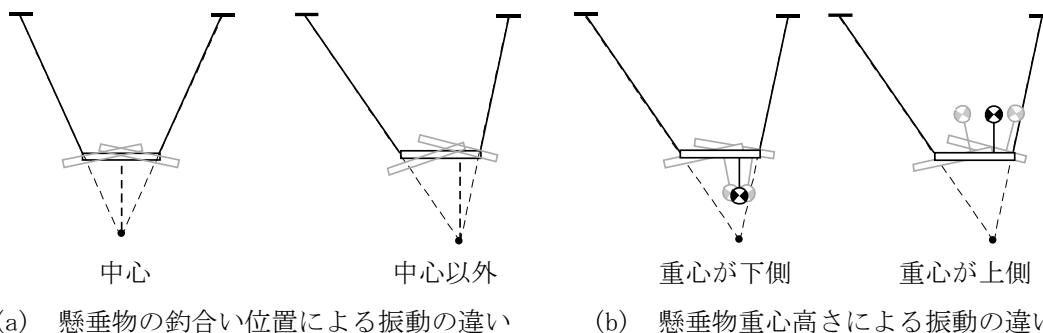


Fig. 6 2本のワイヤモデルによる振動の様子

制振実験では、8枚のプロペラと、懸垂部に搭載したIMUを利用する。プロペラには予め一定の回転を与え、x, y 正負の方向の力が釣り合うようにしておき、IMUにより計測されたx, y, z軸回りの旋回角と角速度を状態フィードバックすることで、各軸回りのプロペラへの指令を生成する。モデルは各軸回りにそれぞれ線形化しているため、どの方向も2次系となる。Fig. 7のように(0.13, 0.13, -1.4)の地点にベースを位置決めし、長い棒の先で図中の矢印の箇所を適当な力で押し、懸垂部が釣り合い点からずれた場所で静止状態となった時点で棒を放すことで外乱を与えている。Fig. 8は制御を行わない場合の自由振動の様子を表している。およそ4秒の時点で棒を放しており、4秒以降が自由振動である。主に励起されるy軸回りの回転運動が大きく現れており、減衰は小さい。また、装置サイズの関係から、振動の非対称性はわずかではあるが、Fig. 5(a)に示したようにx軸負側の振幅が大きい。次に制振実験の結果を示す。Fig. 9(a)がシミュレーション結果である。いずれの方向もレギュレータの極は $-2 \pm 2i$ を設定しているため、結果はy軸回りのもののみ示している。外乱は1秒の時点でインパルス状の力を与えている。およそ2秒で振動が抑制できている。Fig. 9(b)は実験結果であり、およそ3.5秒で棒を放している。誘起されるのは主にy軸回りの振動で、こちらもおよそ2秒で振動が抑制され、レギュレータの有効性が確認できた。なお、若干の違いは外乱の与え方に起因している。

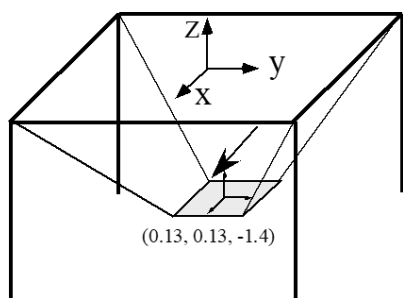


Fig. 7 実験条件

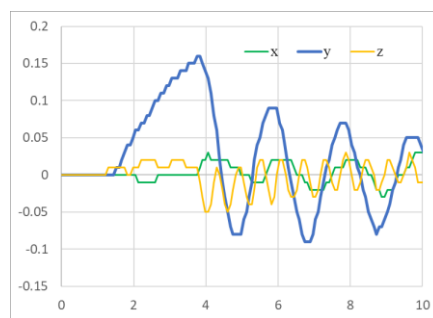
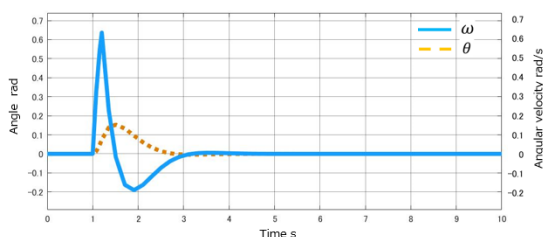
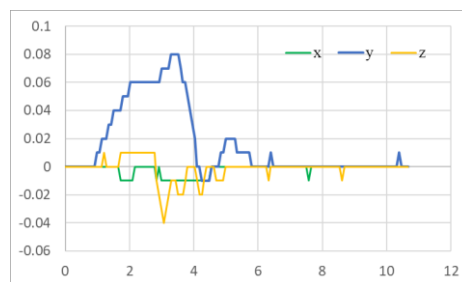


Fig. 8 懸垂部の自由振動



(a) 制振シミュレーション



(b) 制振実験結果

Fig. 9 制振実験

以上より、可動領域の明確化と合わせ、提案システムの位置決め手法を確立することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 粕谷樹生, 鈴木瑠, 大隅久
2. 発表標題 4本のワイヤで懸垂された移動テーブルにおける順運動学及び逆運動学の解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木瑠, 大隅久
2. 発表標題 プロペラを用いた4本のワイヤで懸垂された移動テーブルにおける振動制御
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大隅 久
2. 発表標題 ワイヤ懸垂系のロボットへの応用
3. 学会等名 日本機械学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大隅久, 粕谷樹生, 鈴木瑠
2. 発表標題 4本のワイヤで懸垂された移動テーブルにおける運動学特性の解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------