

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560257
 研究課題名 (和文) 2 段サーボを利用したワイヤ懸垂系のテレオペレーション
 研究課題名 (英文) Tele-Operation System for Wire Suspension Mechanisms Using Two Step Servo Control Systems

研究代表者

大隅 久 (OHSUMI HISASHI)
 中央大学・理工学部・教授
 研究者番号：00203779

研究成果の概要：水平面内を自由に移動できるクレーンのテレオペレーションシステムを開発した。水平面内の 2 次元方向にそれぞれ粗動系と微動系を導入し、物体を懸垂するワイヤの 2 次元方向の振れ角を 2 台の CCD カメラにより計測し微動系にフィードバックすることで、クレーン懸垂物の振り子振動を抑制した。更にフィードフォワード項を導入し、オペレータが違和感なく操作できるインタフェースを開発することで、目標点での行き過ぎの生じない位置決めを可能とした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	360,000	3,360,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：テレオペレーション, 人間機械システム, クレーン, 位置決め, 2 段サーボ

1. 研究開始当初の背景

テレオペレーションの対象システムとして、剛体としてモデル化された機構ではなく、ワイヤ懸垂系という容易に揺動を発生してしまう機構を対象とした場合、オペレータが単に機構を目標の場所に動かすだけでは懸垂物が揺動してしまい、うまく目標地点に位置決めすることができない。更に、位置決め点でクレーンを静止させても、懸垂物に必ずオーバーシュートが生じてしまう。このため、壁際への位置決めには不都合である。同じような特性を持つ例としては、スペースシャトルで利用されているカナダアームのような弾性ア

ームがある。先端に重量の大きな構造物が付加されるとアーム全体がたわみ振動を発生する。このため、物体の移動は非常にゆっくりと行われる。

このように剛体としてはモデル化できない機構をテレオペレーションにより素早く動かすには、機構の振動を抑制する機能をシステムに追加すると共に、オペレータの位置決め点の指定が、物体が目標点に到達する以前に出されていなくてはならない。しかし、このように振動を発生する機構のテレオペレーションシステムで、オペレータの操作性を考慮したものはこれまでない。

本提案システムと制御手法が実現されれば、土木、建設業にとどまらず、災害現場での人命救助活動、介護施設での要介護者の風呂場やトイレへの簡便で素早い移送、宇宙での構造物の建設作業など、ワイヤ駆動系の特徴を活かした様々な応用が期待される。また、弾性アームのテレオペレーションにも利用が期待できる。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、以下の2つの特徴を有するワイヤ懸垂機構の遠隔操縦システムを開発する。

(1) 操作中のオペレータが懸垂物と目標点の位置を視認しながら、指定した位置決め点に懸垂物を行き過ぎることなく静止させることができる

(2) 外乱により懸垂物に不可避免的に発生する揺動を制御により抑制できる

これらを実現するための技術として、位置決め点でのオーバーシュートを発生させないためのフィードフォワード項の導入と、オペレータに違和感を与えないインタフェースの開発、及び CCD カメラを利用した振れ角測定システムと2段サーボシステムを用いたレギュレータシステムの開発を行う。

3. 研究の方法

研究遂行は以下の方法に従った。

(1) 外乱揺動除去のための微動系・粗動系2段サーボの設計

懸垂物の揺動をクレーンフィードバックにより抑制するための制御系を開発した。通常クレーン時定数は極めて大きく、フィードバック制御への利用は困難を伴う。このため、本システムではフィードバック制御が可能な微動系をクレーン可動部の下面に取り付け、クレーンの加減速時にも懸垂物の振動を抑制することのできる平衡点移動型のレギュレータを設計し、微動系に導入した。

懸垂振動を微小と仮定すると、 x, y それぞれの方向の運動は独立に考えることができるので、 x 方向のモデルのみを示すと、図1となる。

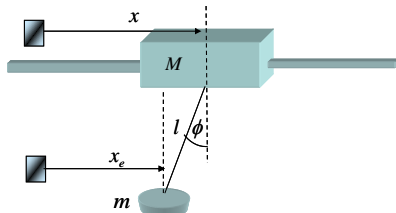


図1 クレーンモデル

この図において、ワイヤ上端位置 x が、実際には微動系の変位 x_f と粗動系の変位 x_c の合計として、 $x = x_c + x_f$ と表される。

これより、クレーンと懸垂物の状態方程式を求めると式(1)となる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -g/l \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1/l \end{bmatrix} u_a \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{x} = [x_f \quad \dot{x}_f \quad \phi \quad \dot{\phi}]^T, u_a = f$$

ここで、懸垂物の目標加速度を \ddot{x}_d とすると、この加速度を発生させるために必要なワイヤの傾き角 ϕ_d は

$$\phi_d = -\frac{\ddot{x}_d}{g}$$

となる。よって x_c に目標軌道 x_d をオープンループで与えておき、微動系の入力 u_a を、式(2)のように平衡点を移動させた状態変数ベクトルのフィードバックとして

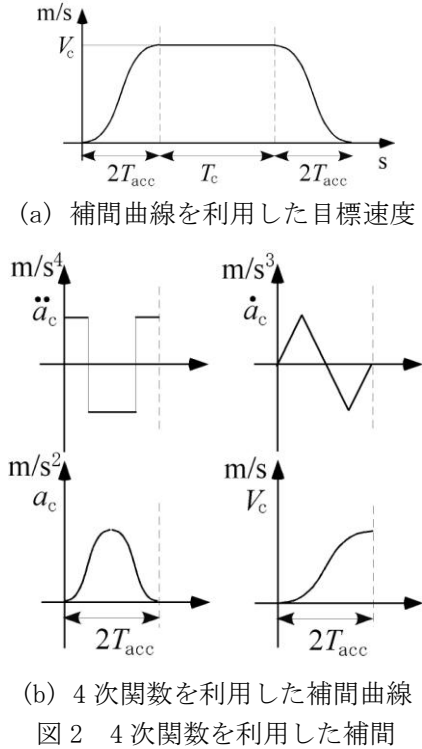
$$u_a = F[x_f \quad \dot{x}_f \quad \phi - \phi_d \quad \dot{\phi} - \dot{\phi}_d]^T \quad (2)$$

とすると、懸垂物に目標加速度を発生させながら、振り子の振動成分のみを抑制できる。

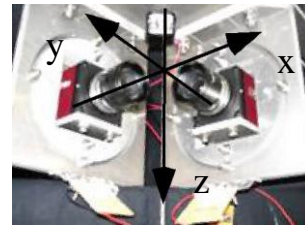
(2) 位置決め点での行き過ぎを防止するための制御指令の設計

オペレータが指示した位置決め点で懸垂物を行き過ぎなく静止させるには、オペレータの位置決め点の指示が、ある程度事前に知らされなくてはならない。この間の時間をできるだけ短くするための方法として、最短時間制御による指令の生成を行った。また、より簡単な方法として、図2に示すように、加減速に時間の4次関数を利用し、途中は当速度軌道とした補間曲線を生成した。図2(a)は静止した懸垂物がある距離だけ搬送して静止させる場合の目標速度軌道である。懸垂物に与えることのできる力は、ワイヤが傾いて初めて発生する。このワイヤの傾きを発生させるにはワイヤ上端のクレーンが移動しなくてはならない。すなわち、懸垂物を物理的に搬送するための目標軌道は、懸垂物に与える力、すなわち懸垂物の加速度の微分が連続となる関数である必要がある。そこで、そのための最低次数である4次関数を補間曲線として利用している(図2(b))。なお、 $2T_{acc}$ は加減速のための時間、 V_c は等速度区間の速

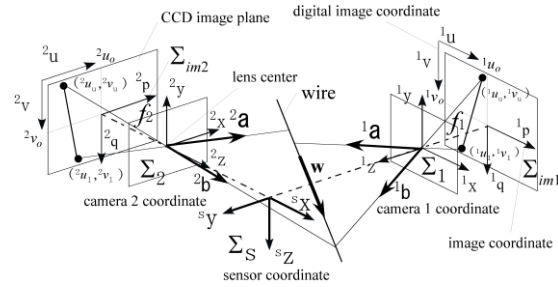
度, T_c は時間をそれぞれ表す。 T_{acc} を予め決めておき, クリックされた経由点間距離に応じて V_c を決めることにすれば, 経由点がクリックされる度に, この補間曲線がリアルタイムで生成される。また, オペレータが等速移動中の懸垂物を静止させる際にも, 静止目標点までの目標速度を, 図 2(a) の減速区間に適用した 4 次関数で生成すれば, 行き過ぎのない位置決めが実現できる。



(3) ワイヤ振れ角計測システムの設計・開発
 本研究で用いたワイヤ振れ角計測システムの構造と原理を図 3 に示す。図 3(a) に示すように, 2 つの CCD カメラを水平面内の x, y 方向から原点に向けて設置し, 懸垂物が静止した状態のワイヤを z 軸と重ねておく。ワイヤが振れるとワイヤ画像がそれぞれの CCD カメラでは傾いた線と映る。図 3(b) に示すように, それらの線の画像上の上端, 下端とレンズ中心を結ぶ線からなる三角形を含む面はワイヤの存在する平面となるので, 2 つのカメラからそれぞれ平面を求めることで, これら 2 面の交線としてワイヤ角度が算出できる。このワイヤ振れ角計測システムの誤差解析を行った結果, カメラ取り付けパラメータの光軸回りの回転誤差の影響が特に大きいことが明らかとなったことから, 図 4 に示すカメラマウントを製作し, 取り付け誤差の調整を行った。この他, カメラシステムのパラメータ誤差をソフトウェアで補正するため, カメラ取り付け板にマークを付け, これを外部カメラで取得し, 誤差を検出している。



(a) 計測システムの概観



(b) 振れ角計測の原理

図 3 ワイヤ振れ角計測システム

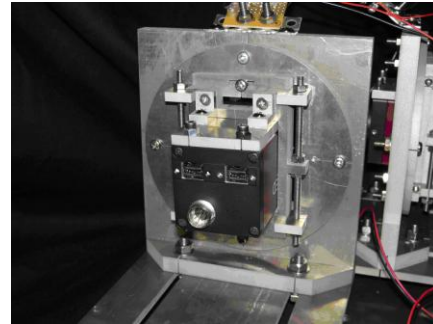


図 4 カメラマウント (裏から見た写真)

(4) クレーンシステムの試作

(1)~(3) の成果を検証するため, 水平面内の x, y 2 次元方向にそれぞれ微動系と粗動系を持つ 4 自由度クレーン機構を試作した (図 5)。駆動系は全てボールねじを利用した移動テーブルとなっており, それぞれ DC サーボモータで制御される。全てのモータにエンコーダが取り付けられており, テーブルの位置をリアルタイムで計測することができる。

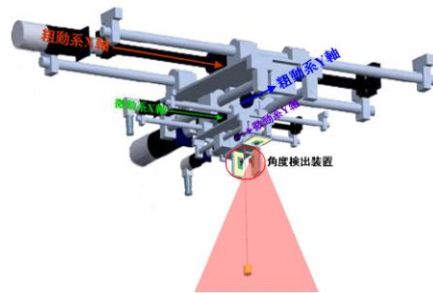


図 5 x, y 軸方向それぞれに微動系と粗動系を有する平面内クレーン機構

(5) ワイヤ懸垂系テレオペレーションのための制御システム開発

(1)~(4)の成果を統合し、オペレータのジョイスティックによる指令を速度指令と解釈し、その指令速度で移動しながら移動中の懸垂物の揺動を抑制し、ジョイスティックを0に戻した時点で補間関数への目標切り替えを行うシステムを構築した。システム構成を図6に示す。画像処理ボードにはFWBPCI02を、ジャストウェア社製インタフェースボード Justech JIF171-1 を利用している。

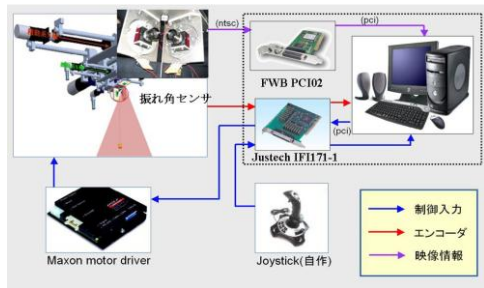


図6 システム構成

(6) ワイヤ懸垂系テレオペレーションシステムのインタフェース部の開発

(5)のジョイスティックによる動作指令は、目標位置決め点の指定がどうしても難しくなってしまうことから、クレーン下方を見下ろすカメラを取り付け、その映像中で懸垂物を通過させたい経路点を画面上でクリックしていくタイプのインタフェースを開発した。オペレータは映像中の床を見ながらクリックするため、クリックされた床の真上にクレーンの目標位置を設定する必要がある。このためには、クレーンの現在位置 (カメラの現在位置)、画像中のクリック点座標のカメラ座標系での値を求める必要がある (図7)。これらの変換には、クレーン駆動系のたわみなどの機構誤差、レンズのゆがみ補正が必要となり、このキャリブレーションが位置決め精度に大きく影響することがわかった。

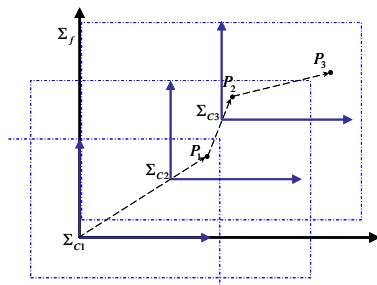


図7 画面上クリック点の基準座標への変換

(7) 指定経路点の軌跡補間方法の検討

(6)までで開発されたシステムを用いて、オペレータにより指定された経路点を懸垂

物で通過させるための目標軌跡の補間方法として、連続して指定される経路点を1点ずつ通過する方法と、常に最後に指定された経路点を目標に切り替えて目標軌跡を生成する方法を検討した。これらはそれぞれ、障害物の間を縫って搬送する場合、障害物が少ない環境で離れた目標点に懸垂物を搬送する場合に、それぞれ適した方法といえる。本研究課題では、懸垂物が障害物の間をオペレータの指示に従って通過することを想定し、目標経路点の近傍を停止することなく通過する軌道を4次関数の補間により生成した。

まず、次の目標経路点 (第 i 経路点) に向けて懸垂物が等速運動を行っている間に、更に次の目標点 (第 $i+1$ 経路点) が与えられた場合には、現在設計されている第 $i-1$ 経路点と第 i 経路点間の目標軌跡はそのままとし、第 i 経路点と第 $i+1$ 経路点の間の軌道を新たに設計する。そして、図8に示すように、現在の軌道が第 i 経路点に向けて減速を始める時間に合わせて、第 $i+1$ 経路点に向けて加速を始める軌道を求め、これらの指令を加算して目標速度とする。これにより、懸垂物に目標経路点の近傍を停止することなく、滑らかに通過させることができるとともに、最終位置決め点の位置を最後にクリックした点として誤差なく位置決めできる。

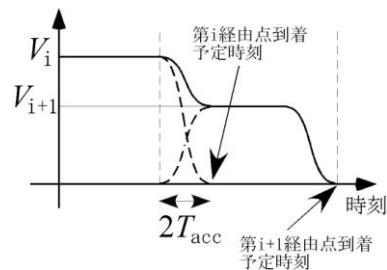


図8 目標経路点間の軌道の補間

4. 研究成果

(1) 実験システムの概要

開発した実験システムのパラメータを表1に示す。制御サンプリングは10msで、懸垂物の振り子振動周期はおよそ2秒である。

表1 実験システムのパラメータ

	粗動系		微動系	
	x	y	x	y
位置分解能 μm	12.5	8.0	1.5	1.5
速度分解能 mm/s	0.42	0.27	0.05	0.05
最大速度 m/s	1.66	2.18	0.27	0.27
ワイヤ角度分解能 0.002rad	懸垂物位置分解能 2mm			
ワイヤ長 0.99m	懸垂物質量 1.0kg			
制御サンプリングタイム 10ms				

(2) レギュレータの有効性の検証

本稿で提案した制御則の検証を行なう。まず微動系レギュレータの効果を検証するため、釣り合い点において、 x 、 y それぞれの方向に約 6cm の初期変位を与え、これを制御により抑制した。レギュレータの極は試行錯誤で決定しており、 x 方向には $-19.0, -5.4, -1.4 \pm 21.7i$ 、また y 方向には $-47.0, -2.0, -1.3 \pm 2.8i$ としている。実験結果を図 8 に示す。

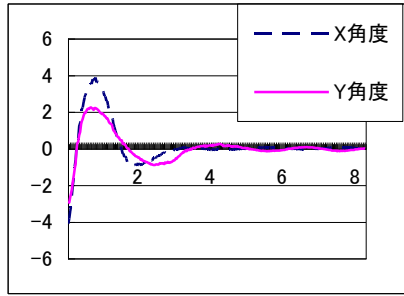


図 9 振動抑制実験結果

それぞれの方向の振動とも、制御開始から約 3 秒後には収束していることがわかる。その後、振幅が約 3mm の残留振動が残っているが、これはカメラの角度分解能の影響と考えられる。これより、レギュレータは十分に効果を発揮していることが確認できる。

(3) 設計軌道と 2 段サーボ系の有効性の検証

次に、クレーンが停止している状態から停止位置を指定し懸垂物を搬送した。ただし微動系レギュレータの検証として懸垂物には初期振動を与えている。微動系レギュレータの極は x, y 方向共にそれぞれ $-2.6 \pm 1.9i, -1.0 \pm 2.6i$ とし、なお実験結果としては X 軸の実験データのみを示している。実験結果を図 10 に示す。図中点線が目標位置入力を表し、実線が実験結果の懸垂物位置を表している。図 10 より、初期振動は約 3[s] で収束し、以降は目標軌道に追従している。また停止位置において行き過ぎ量を発生することなく停止している。しかしながら、停止位置において、約 5[mm] の定常偏差を残している。これは、移動テーブルのガイドのたわみにより、位置決め点においては重力方向が初期姿勢とは変わってしまったことによる影響と考えられる。その他、 xy テーブルの直交性なども厳密には計測誤差として観測されるため、キャリブレーションには十分な注意が必要となることも先行して行われた基礎実験結果から明らかとなった。

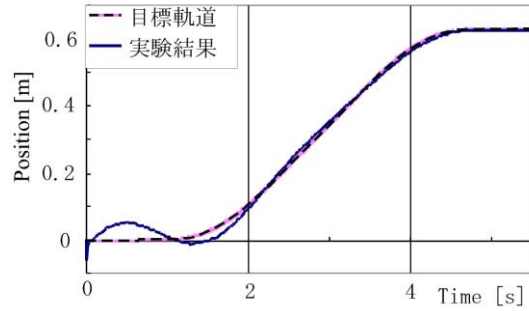


図 10 初期外乱のある搬送実験

(4) テレオペレーションシステムの有用性の検証

図 11 に、障害物を含む搬送コースを示す。このコースを、懸垂物が障害物に接触しないように **Start** から **Goal** までクレーンを操縦する。なお被験者として、一度も実験機を扱ったことのない人を選び、簡単な操縦方法の説明を受けていただいた後に実験した。本実験においては、懸垂物を障害物に接触させることなく **Goal** まで搬送することに成功している。本実験における被験者の指示点と懸垂物の搬送軌道(X - Y 軌道)を図 12 に示す。図 12 では、懸垂物は指示点の近傍を通過しながら、目標位置まで搬送されている。クレーンが停止する以前に、次の指示点をクリックした場合は入力の重ね合わせが起こるために、指示点近傍を通過していることがみてとれる。このように重ね合わせを行うことによって懸垂物が停止することなく搬送できることから、搬送時間を短縮することは可能であるが、ショートカットによって懸垂物に接触してしまう可能性が出てくる。このような障害物に接触する可能性がある場合は懸垂物の停止後に、次の指示点をクリックする必要があり、操縦には多少のスキルが必要である。また正確な位置決めを行うために、一度停止した後に目標位置決め点をクリックしている。

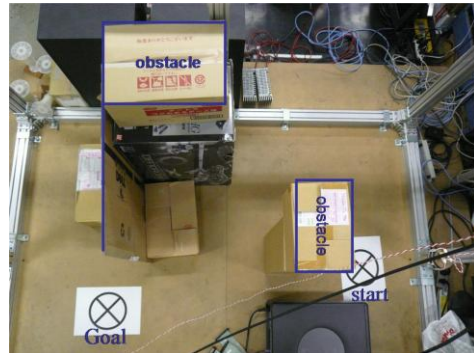


図 11 搬送実験の環境 (真上から見たところ)

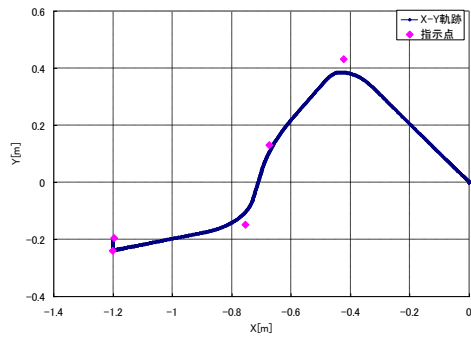


図 12 実験結果 (懸垂物の軌道)

以上の結果より、位置決め点での行き過ぎの発生しない、手軽に操縦が可能なワイヤ懸垂系のテレオペレーションシステムが構築できたと結論できる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

①久保雅裕, KIM MIN SUNG, 大隅久, 天井走行型クレーンの遠隔操縦システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2008), 2008 年 6 月 7 日, 長野.

②KIM MIN SUNG, 久保雅裕, 永楽俊吾, 大隅久, ワイヤ懸垂機構の遠隔操作システムの開発 (第 1 報) システム構成と制御システムの構築, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007 年 9 月 13 日, 千葉.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大隅 久 (OHSUMI HISASHI)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 00203779