天井走行型クレーンの遠隔操縦システムの開発 —搬送軌道とフィードバック制御系の設計—

Development of Crane Tele-operation System -Design of Desired Trajectory and Feedback Control System-

○ 久保 雅裕 (中央大) 金 ミンソン (中央大) 大隅 久 (中央大)

Masahiro Kubo, Chuo University kubo@arc2.mech.chuo-u.ac.jp
Hisashi Osumi, Chuo University
Minsung Kim, Chuo University

A teleoperation system for crane control has been developed. By feedback control using the developed sensor, a mass suspended by a two dimensional crane on a horizontal plane is positioned without residual vibration at a target point. Feed-forward control makes a mass to be positioned on target area where the operator wants to put on without overrun. The force of inertial can be reduce by using the acceleration, velocity and location trajectory that has continuous jerk.

Key Words: wire, measurement, crane, control, positioning

1. 緒言

天井走行型クレーンは3次元での搬送を可能とするため、工場などで頻繁に使用されている。しかしクレーンの特性上、搬送には振り子振動が伴うことから、操縦には高度なスキルが必要となっている。そこで本研究では、搬送中の振り子振動の抑制、及び位置決め点での行き過ぎを生じることのない、誰でも簡単に操縦することのできるクレーンテレオペレーションシステムの開発を行っている。

これまでに、カメラを用いたワイヤ振れ角センサの開発を行い、開発されたセンサを用いてクレーンのフィードバック制御系を構築し、振動抑制が可能であることを確認してきた[1]。しかしレギュレータにより振動を抑制するだけでは、テレオペレーションで懸垂物を目標位置決め点で止めようとした際、不可避的に行き過ぎが生じる。このため、壁際での位置決めの際など、振動を抑制する以前に懸垂物が壁に激突してしまう。

美多らは、最短時間制御をクレーンの搬送に応用し、目標位置決め点で振動なく懸垂物を静止させる指令を生成している[2]。しかしながら、オープンループ指令であるために、風などの外乱に対応することが出来ない。また、最短時間を実現するために搬送中の振れ角自体は大きくなってしまう問題がある。武田らは最適レギュレータ理論を応用した、最適追従系の一般設計法を提案している[3]。しかしフィードバック指令のみでは、前述したように、目標位置決め点での行き過ぎを回避することができない。そこで、オペレータが簡単に目標位置決め点で行き過ぎなく懸垂物を静止させることのできる操作インタフェースを実現することを目的とし、そのための基礎技術としてフィードバック制御とフィードフォワード制御を併用した制御系を考案する。

2. 遠隔操縦システムの概要

本研究で開発するシステムの概観を図1に示す。クレーンは x, y 2次元平面内を移動することができ、それぞれの方向にボールネジを利用した微動系・粗動系2つの駆動系が直列に

導入されている。天井走行クレーンのような大型の機器をフィードバック制御することは、その周波数応答から考えても困難であることが想定される。そこで粗動系を懸垂物の搬送に利用し、微動系により振動の抑制を行うことで、周波数成分の高い外乱にまで対応することを狙っている。これら4つのアクチュエータにはDCサーボモータが利用され、それぞれ速度制御される。いずれのモータにもエンコーダが内蔵されており、クレーンの位置を高精度に検出できる。

クレーンには、懸垂物とその周辺の映像を真上から捉えることのできるカメラが取り付けられており、オペレータはその映像を見ながらジョイスティックによりクレーンを速度制御する。オペレータはまずクレーンを目標点に向けて操縦し、映像中に目標点が現れたら、目標点を画面上でクリックする。すると、クレーンが自動制御モードに切り替わり、行き過ぎを発生することなく目標点で停止する。この一連の操作をスムーズに実現するためには様々な技術要素を開発する必要がある。本報では、懸垂物の残留振動を抑制するためのフィードバック制御システムの概要、行き過ぎを発生させないためのオープンループ指令の生成法、そしてこれらを組み合わせた懸垂物の搬送制御システムについて報告する。

Fig.1 Schematic view of tele-operation system

3. クレーンの制御システム

ジョイスティックによる速度入力の変化を 4 次関数で補間することで、振動の生じない目標軌道を簡単に生成することができる。さらに、微動系を導入しフィードバック制御を行うことで懸垂物の振動を抑制することが出来る。また、懸垂物が行過ぎなく止まる領域を実時間でオペレータに提供することで操縦が容易になると考えられる。以下では、システムの運動モデル、オープンループ指令の生成法、及び振動抑制をするためのフィードバック制御系を示す。

3.1 天井走行型クレーンのモデル化

懸垂物の揺れが小さいと仮定すると、クレーンのモデルは x , y 方向それぞれ独立にモデル化することができるので、以下では 1 自由度方向のみのモデル化を示す。クレーンのモデルを図 2 に示す。制御対象を粗動系、微動系、懸垂物の 3 質点系と見なし、さらに振れ角が微小であると仮定してラグランジェの運動方程式を解くと、それぞれの運動方程式は、式(1)となる。

$$\begin{aligned} (M_c + M_f + m)\ddot{x}_c + (M_f + m)\ddot{x}_f + ml\ddot{\phi} &= F_c \\ (M_f + m)\ddot{x}_c + (M_f + m)\ddot{x}_f + ml\ddot{\phi} &= F_f \\ ml(\ddot{x}_c + \ddot{x}_f) + ml^2\ddot{\phi} + mgl\phi &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、懸垂物の位置を

$$x_e = x_c + x_f + l\phi \quad (2)$$

とおくと、式(1)は

$$\begin{aligned} M_c\ddot{x}_c &= F_c - F_f \\ M_f(\ddot{x}_c + \ddot{x}_f) &= F_f - m\ddot{x}_e \\ m\ddot{x}_e &= -mg\phi \end{aligned} \quad (3)$$

となる。式(3)の第 3 式で示される通り、懸垂物には振れ角に比例した力が加わる。よって、懸垂物に与えるべき目標力に応じたワイヤの振れ角を実現することにより、懸垂物の力制御が可能となる。ただし、式(1)のモデルでは粗動系と微動系の間の摩擦を考慮していないため、式(3)の第 2 式を見ると、粗動系に入力を入れても微動形は動かないといった、実現象と異なるモデルとなっている。したがって、粗動系、微動系間の摩擦力を考慮する必要がある。しかしながら、摩擦力を正確に測定することは困難であったため、微動系の入力があるとき、粗動系と微動系の相対変位は変化しないという仮定を導入し、摩擦力を求める。これは

$$F = \frac{1}{M_c + M_f} \{M_f F_c + M_c F_f\} \quad (4)$$

となる。これを利用したモデルは

$$\begin{aligned} M_c\ddot{x}_c &= \frac{M_c}{M_c + M_f} F_c - F_f - \frac{M_c}{M_c + M_f} F_e \\ M_f\ddot{x}_f &= \frac{M_f}{M_c + M_f} F_c + F_f - \frac{M_f}{M_c + M_f} F_e \\ m\ddot{x}_e &= -mg\phi = F_e \end{aligned} \quad (5)$$

となる。以下ではこのモデルに従い、制御系を設計していく。

Fig.2 Schematic view of the crane system

3.2 オープンループ指令の生成法

ジョイスティックの入力角度をそのまま速度指令として粗動系に入力してしまうと、懸垂物に急激な速度変化が生じてしまう。例えば、目標点においてジョイスティックの傾きを急に 0 としてしまうと、行き過ぎを抑制するための力を懸垂物に与えることができなくなるため不可避免に行き過ぎが発生する。よってこれを防止するためには、ジョイスティックの入力角度を速度指令に変換する際、行き過ぎが発生しないように修正する必要がある。

式(5)の第 3 式と式(2)より移動テーブルと懸垂物の速度の関係式は

$$\dot{x}_c + \dot{x}_f = \dot{x}_e - \frac{l}{g} \ddot{x}_e \quad (6)$$

となる。ここで、物理的に移動テーブルの速度を不連続に変化させることは不可能であるため、懸垂物のジャークが連続な関数である必要がある。ここでは最も簡単な 4 次関数を利用し、ジョイスティックの値を補間する。

まず、ジャークの一階微分を以下のように与える。

$$\begin{aligned} x_{ed}^{(4)}(t) &= -\alpha \quad \left(-T \leq t < -\frac{T}{2}, \frac{T}{2} \leq t \leq T\right) \\ x_{ed}^{(4)}(t) &= \alpha \quad \left(-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}\right) \\ \therefore \alpha &= \frac{4(V_1 - V_2)}{T^3} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 V_1 を初期速度、 V_2 を終端速度、即ちジョイスティックの傾きによって決定される目標速度とする。停止時には終端速度は 0 となる。式(7)を 4 階積分することにより、式(8)の懸垂物の目標軌道を得る。

$$\begin{aligned} x_{ed}(t) &= -\frac{\alpha(t+T)^4}{24} + \frac{\alpha T^3}{4}(t+T) + V_1(t+T) \quad \left(-T \leq t < -\frac{T}{2}\right) \\ x_{ed}(t) &= \frac{\alpha t^4}{24} - \frac{\alpha T^2}{8}\left(t - \frac{T}{2}\right)^2 + V_2(t+T) + \frac{47\alpha T^4}{192} \quad \left(-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}\right) \\ x_{ed}(t) &= -\frac{\alpha(t-T)^4}{24} + V_2(t+T) + \frac{\alpha T^4}{4} \quad \left(\frac{T}{2} \leq t \leq T\right) \end{aligned} \quad (8)$$

次に導出した懸垂物の目標軌道を実現するように移動テーブルに与える入力を考える。式(5)の第 1 式と第 2 式の差をとり整理すると

$$F_{cd} = M_c\ddot{x}_{cd} + M_f\ddot{x}_{gd} + m\ddot{x}_{ed} \quad (9)$$

さらに式(6)を代入すると、

$$F_{cd} = (M_c + M_f + m)\ddot{x}_{ed} + (M_c + M_f)\frac{l}{g}x_{ed}^{(4)} - M_c\ddot{x}_{fd} \quad (10)$$

ここで、 $\ddot{x}_{fd}$ は微動系の目標加速度である。式(10)の入力を粗動系に入力することによって、導出した懸垂物の目標軌道を実現できる。またここで求めたオープンループ指令は、加速度が滑らかに変化する。よって外乱が存在しなければ、懸垂物は目標軌道通りに運動を行うので、振動や行き過ぎを発生することがない。

3.3 フィードバック制御を用いた振動抑制

前節で説明したフィードフォワード項に、レギュレータを併用することで、外乱に起因した振動の抑制を行う。このレギュレータを微動系により実現する。ただし、懸垂物に目標力を与えるにはワイヤを傾ける必要があることから、ワイヤを垂直下方に静止させるという機能だけを持つレギュレータは適用することができない。よって、フィードフォワード項として4次関数が用いられる区間では、搬送に伴いワイヤに要求される傾き角をレギュレータの平衡点とする必要がある。この目標傾き角は、懸垂物に与えられる目標加速度により式(11)となる。

$$\phi_d = -\frac{\ddot{x}_{ed}}{g} \quad (11)$$

以下では本制御系を平衡点移動型レギュレータと呼ぶこととする。粗動系を無視し、微動系と懸垂物のみのモデルを考えると、状態方程式は式(12)となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \ddot{x}_f \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{mg}{M_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{(M_f+m)g}{M_f l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ \dot{x}_f \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -\frac{1}{M_f l} \end{bmatrix} F_f \quad (12)$$

状態変数は、微動系の位置と速度、ワイヤの振れ角と角速度である。ここで平衡点が移動する状態フィードバックを考えると入力力は式(13)となる。

$$F_f = -F \begin{bmatrix} x_f & \dot{x}_f & \phi - \phi_d & \dot{\phi} - \dot{\phi}_d \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

式(12)に示した状態方程式はゲイン決定のために用いたものである。実際の粗動系を含めたシステム全体の状態方程式を式(14)に、設計されたシステムのブロック線図を図3に示す。

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{mg}{M_c + M_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{g}{l} \frac{M_c + M_f + m}{M_c + M_f} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{l(M_c + M_f)} \end{bmatrix} F_c + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_f} \\ 0 \\ \frac{M_c + M_f}{M_c M_f} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{l M_f} \end{bmatrix} F_f \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \\ x_f \\ \dot{x}_f \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Fig.3 Block diagram of system

4. 実験

第3節で考案したシステムの有効性を確認するために、シミュレーションと実機実験の両面から検証を行った。

4.1 理論の検証シミュレーション

理論の検証と、ゲイン決定の目的からMATLABを用いたシミュレーションを行った。なお、微動系のフィードバックゲインの決定には最適レギュレータ理論を適用している。

以下の図4、図5にシミュレーション結果を示す。なお、振動抑制性能の検証も兼ね、適当な初期振動を与えている。目標とする速度は0.1[m/s]であり、 T は1[s]となっている。移動テーブルは、時刻0[s]で移動し始め、時刻8[s]で停止する。また、図4の赤線は式(11)で表されるワイヤ振れ角の目標値を、青線は出力されたワイヤ振れ角を表している。さらに図5の赤線は式(8)で表される懸垂物の目標軌道を、青線は出力された懸垂物の位置を表している。図4を見ると、初期振動は4秒ほどで収束し、その後は目標角度に沿って振れ角が変化していることがわかる。さらに図5でも懸垂物の位置が目標軌道に沿って出力されていることが分かる。

Fig.4 Simulation result of angle of wire

Fig.5 Simulation result of target location

4.2 実験機の概要

試作した実験機の概観を図6に、システム各パラメータを表1に示す。

Fig.6 Photo of the crane mechanism

Table 1 Parameters of control system

区分	粗動系		微動系	
	X軸	Y軸	X軸	Y軸
位置決め分解能[μm]	12.5	8	1.5	1.5
速度分解能[mm/s]	0.416	0.266	0.05	0.05
最大速度[m/s]	2.18	1.66	0.27	0.27
レギュレータの極			0, 0, -18.543, -5.419 -1.419 $\pm$ 1.716i	0, 0, -46.962, -1.994, -1.307 $\pm$ 2.775i
振れ角センサの分解能[deg]	0.12			
ワイヤの長さ[m]	1			
懸垂物質量[kg]	0.99			

4.3 実機実験

本システムの有効性を確認するために、試作機を用いた実験を行った。なお各パラメータはシミュレーションと同様の値を用いている。時刻約1[s]でジョイスティックを傾け、時刻12[s]程ジョイスティックを手放している。以下の図7、図8に実験結果を示す。また、シミュレーション同様、図7の赤線は式(11)で表されるワイヤ振れ角の目標値を、青線はワイヤ振れ角の測定値を表している。さらに図8の赤線は式(8)で表される懸垂物の目標軌道を、青線は実際の懸垂物の位置を表している。

図7を見ると、シミュレーション同様に約4秒で初期振動が収束し、その後は目標角度の沿って振れ角が変化している。また、外乱によって発生する振れ角以外はワイヤの振れ角が、1度以下のシステムとなっている。さらに図8を見ると、入力と出力に偏差が残っているものの、行き過ぎ量自体は発生しておらず、本システムが、壁際での停止の際でも有効であることが確認された。シミュレーションと異なり、入出力に偏差が残ってしまった原因として、粗動系にオープンループ指令を入力していることが考えられる。シミュレーションの場合は、理想的なシステムとなっているが、実験機の作成にあたり、どうしても、粗動系や微動系質量などのパラメータ誤差が残り、結果として偏差が生まれたものと考えられる。

Fig.7 The result of angle of wire

Fig.8 The result of target location

5. 結言

本研究は搬送中の振子振動を抑制し、誰でも簡単に行き過ぎのない位置決めを実現することのできるシステムの開発を行っている。本報では、2段サーボクレーンのモデル化を行い、粗動系に与えるオープンループ指令の生成法、微動系のフィードバック制御系の設計法について説明し、シミュレーションと実機実験を通して本システムの有効性を確認した。

本研究では、オペレータが懸垂物の目標速度をジョイスティックで与えながら位置決め点の近くまで懸垂物を搬送した後、位置決め点を映像上で指定すると、その点に向けて自動制御モードに切り替わるシステムを想定している。今後の展望として、オペレータに停止領域を提供するインタフェースの開発を行っていくことがあげられる。

なお、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(c)「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」の助成により行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] Osumi,H.,Miura,A.,Eiraku,S., Positioning of wire suspension system using CCD cameras, ProcIROS2005, 2-6 AUG, pp 1665 - 1670, 2005. Shinjuku, D., Shibuya, J. and Tokyo, M., "Swing Motion Control of Casting Manipulation," *IEEE Control Systems*, vol.19-4, pp.56-64, 1999.
- [2] 美多, 金井, 須藤, クレーンの最短時間制御, システムと制御 Vol.26,No.6,pp31-34,1982
- [3] 武田, 北森, 線形多入出力最適追従系の一般設計法, 計測自動制御学会論文集, Vol.14,No.4,pp13-18,1978