

2自由度制御による天井クレーンの制振搬送

Sway Control of Overhead Crane using 2-DOF Control

佐藤 馨 (長岡高専 専攻科) 正 佐藤 拓史 (長岡高専)

Kaoru SATO, Nagaoka National College of Technology, ac25808e@st.nagaoka-ct.ac.jp
Hiroshi SATOH Nagaoka National College of Technology

This paper deals with the sway control of the overhead crane using 2-DOF control. High operation skill is necessary in the transport with reduced vibration of the payload. However, a skilled operator has been reduced. For this reason, the operation support system that can be easily operated even a beginner is required. Many researchers report that are to be achieved the transport with reduced vibration using a feedforward control or a feedback control. Only a feedforward control can't be achieved the transport with reduced vibration in any operation, and only a feedback control can't be achieved an improvement in operability. Therefore, we use 2-DOF control to design the controller to achieve the transport with reduce vibration and improve operability. The experimental results show the transport with reduced vibration even if the beginner operator is operated.

Key Words: Overhead Crane, Vibration Control, Operational Support, 2-DOF Control

1 緒言

天井クレーンは、作業領域が広く、障害物の多い機械工場での重量物や部品の運搬等に使用されている搬送機械であり、そのシェアは高い [1]。荷物の搬送は吊り荷の巻き上げ、トロリの横行、ガータの走行の3動作を組み合わせることで行うが、その操作に求められる正確性、作業効率、安全性の観点から吊り荷の残留振動は可能な限り小さくすることが望ましいとされている [2]。吊り荷の揺れを残さずに作業を行うには作業員の熟練した感覚を必要とするが、こうした熟練度の高い作業員は減少の一途を辿っている [3]。そのため、熟練度の低い作業員であっても吊り荷の揺れを残さずに作業が行える操作支援系への期待は大きい。

天井クレーンに制振制御を行う場合、入力整形やモデルの逆システムにより理想的な入力を与えるフィードフォワード制御 [4], [5] と、残留振動の抑制に優れたフィードバック制御 [6], [7] が提案されている。フィードフォワード制御を用いた場合、速応性、吊り荷の揺れの抑制に優れているものの、事前の目標軌道の設定などが必要となり、不定型作業には不向きである。また、フィードバック制御を用いた場合、吊り荷の揺れの抑制に優れているものの、速応性の向上が難しいといった問題点が残る。

そこで、本研究では天井クレーンの制振搬送支援制御系を構築することを目的に2自由度制御系を適用し、制振性と操作性を確保する。制振性を確保するために状態フィードバック制御理論によりフィードバック制御器を設計し、操作性を向上するために制御対象の位相特性と同程度となる目標モデルを設定し、フィードフォワード制御器を設計する。設計した制御器による搬送実験を行い、初心者であっても熟練者と同程度の制振搬送が実現できることを示し、設計した制御器の有効性を示す。

2 制御対象

2.1 制御対象の構成

本研究で扱う天井クレーンモデルの構成を図1に示す。実験に使用する天井クレーンモデルは、走行機能無し、横行範囲2.0[m]、巻き上範囲0.8[m]であり、実際の大型天井クレーン [8] を10分の1に縮小したものとして製作した。横行部はリニアシャフトとリニアブッシュで構成し、シャフト2本によるダブルレール仕様となっている。巻き上、横行動作はワイヤとプーリを用いた

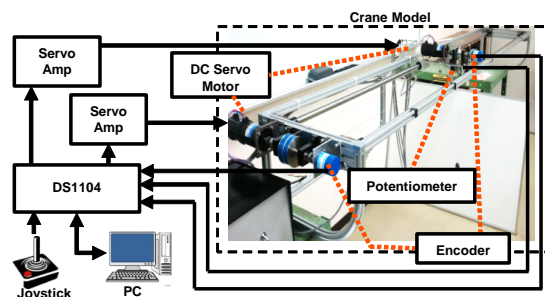


Fig. 1 Composition of Experimental system

回転 直動変換機構を用い、吊り荷の巻き上とトロリの横行にはDCサーボモータを用いる。DCモータは内部に速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動する。吊り荷の巻き上げ量とトロリの変位量の測定にはロータリエンコーダを用い、吊り荷の揺れ角の測定には非接触型ポテンシオメータを用いる。

制御器の実装にはdSPACE社のDS1104を用いる。トロリの変位量とロープ長測定用エンコーダの出力はDS1104のカウンタポート、吊り荷の揺れ角測定用ポテンシオメータの出力はA/Dポートにそれぞれ接続し、制御器はこれらの情報に基づく制御量を算出する。算出された制御量はD/Aポートを介して出力され、サーボアンプへ速度指令値として入力される。制御器の設計にはMATLAB, Simulinkを用いる。

2.2 モデリング

天井クレーンの数式モデルを導出するために、トロリと吊り荷のモデル図を図2に示す。

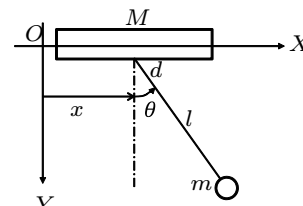


Fig. 2 Trolley-Pendulum model

モデルに対して、 XY 座標系をトロリの運動前における吊り荷の根元を座標原点 O とし、トロリの移動方向を X 軸、鉛直下

向きを Y 軸と設定する．ここで，トロリの移動量を x ，吊り荷の質量を m ，ロープ長を l ，吊り荷の揺れ角を θ ，吊り荷の根本に働く粘性摩擦係数を d ，重力加速度を g とする．モデリングに際し，以下の仮定を設ける．

1. ロープの質量と伸びは無視できる
2. ロープ長は変動しない(搬送中に巻上を行わない)
3. 吊り荷は質点であるとする
4. 吊り荷は XY 平面内での揺れとする

以上の仮定のもと，吊り荷に対する運動方程式が次式として得られる．

$$m \cos \theta \ddot{x} + ml \ddot{\theta} + mg \sin \theta + dl \dot{\theta} = 0 \quad (1)$$

式 (1) に対して吊り荷の揺れ角 θ は微小であると考え，線形化を行うと次式の線形微分方程式が得られる．

$$m \ddot{x} + ml \ddot{\theta} + mg \theta + dl \dot{\theta} = 0 \quad (2)$$

トロリの駆動用 DC モータは内部に速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動するので，トロリの運動方程式は次式として与えられる [10]．

$$\ddot{x} + \alpha_1 \dot{x} + \alpha_2 x = \beta v \quad (3)$$

ここで， α_1 ， α_2 ， β はモータの内部パラメータ， v はサーボアンプへの指令値電圧である．

式 (3) よりトロリの運動方程式は吊り荷の揺れの影響を受けず，独立な要素として考えることができる．また，揺れ角測定用ポテンシオメータの出力値はアナログ電圧であり，ノイズの影響が大きい．吊り荷の制振性能を高めると，このノイズの影響で制振性能を上げることが難しくなる．そこで，吊り荷の揺れ周期を考慮しつつ，ノイズの低減を図るため，吊り荷の揺れ角はカットオフ周波数 15 [rad/sec] の 1 次ローパスフィルタを介して測定する．図 1 の天井クレーンモデルを図 3 のようにトロリ部，振り子部，フィルタ部から構成されると考えることとする．

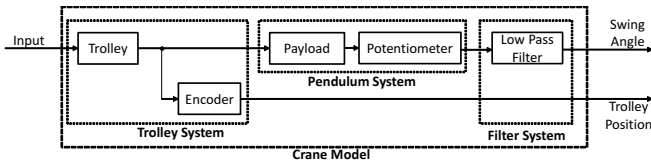


Fig. 3 Composition of overhead crane model

状態量を $z = [x_f \ x \ \dot{x} \ \ddot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ とすると状態空間モデルは次式となる．ここで， x_f はローパスフィルタの内部状態量である．

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} -15 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_2 & -\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{l} & -\frac{g}{l} & -\frac{d}{m} \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z$$

式 (4) 中の未知パラメータはパラメータ同定によって導出する．得られたクレーンモデルのパラメータを表 1 に示す．

Table 1 Parameters of crane model

Payload mass m	0.2 [kg]	
Rope length l	0.5 [m]	
Viscous coefficient d	1.22×10^{-3} [N·s / rad]	
Trolley parameter α_1	37.2	
	α_2	1.98×10^3
	β	180

3 制御器の設計

3.1 制御系の構成

クレーンの制振搬送をフィードバック制御器のみで達成しようとすると吊り荷の制振性は達成できるが，速応性に問題が生じ，操作感の悪化の原因となることが報告されている [6]．また，過渡特性の特性改善としてフィードバック制御系にフィードフォワード制御器を追加し，2 自由度制御系を構成することが有効だと知られている [9]．

そこで，本研究では天井クレーンで吊り荷の制振性を達成しつつ，トロリの操作性を達成するために，図 4 に示す 2 自由度制御系を構成する．フィードバック制御器は状態フィードバック制御理論により設計し，フィードフォワード制御器は，設定したシステム全体の特性が達成できるように設計する．

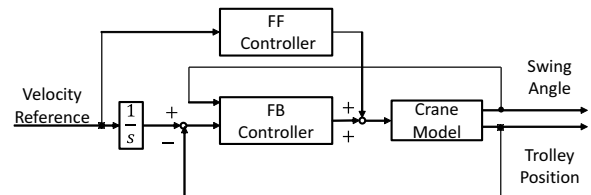


Fig. 4 Composition of controlled system

3.2 制御仕様の設定

天井クレーンの搬送作業では安全性の観点から吊り荷を 2 ~ 3 [m] 巻き上げてから搬送を行うので，本研究ではロープ長 0.5 [m] を搬送時のロープ長として設定する．また，吊り荷の揺れ角を適切に測定できるように吊り荷の質量は 0.2 [kg] とする．また，天井クレーンの作業では吊り荷の大きさの 1.5 倍以下の揺れは問題ないとされているため，本研究では吊り荷の変位が ± 0.025 [m] 以内の状態は十分に揺れが小さい場合とする．

制御仕様の設定にあたり，実際の天井クレーン免許を持ち，10 年程実務経験のある熟練者にクレーンモデルによる搬送実験を行い，その結果より設定する．実験は搬送距離 0.5 [m] を搬送した．熟練者による搬送実験結果の一例を図 5 に示す．実験結果は上段がトロリの横行位置，中段が吊り荷の変位，下段がトロリの速度である．吊り荷の変位グラフ中の破線は吊り荷の揺れの許容範囲 ± 0.025 [m] を示している．

図 5 より，熟練者はランプ状に入力を与えてトロリを駆動し，できるだけ吊り荷を揺らさないように搬送している．搬送目標位置近傍まで一気に搬送し，吊り荷の揺れを抑えることと位置の微調整のため，インパルス状ともいえる入力を与えて調整している．この微調整動作を除くと，2.5 [s] 程度で搬送していることがわかった．トロリの位置の微調整では入力タイミングによって

Table 2 Polar of plant and regulator, observer

	Plant poles	Regulator poles	Observer poles
Trolley part	0 -13.5000 ± 50.1772i	-4.0000 -63.5000 ± 60.2126i	-9.0000 -68.5000 ± 60.2126i
Payload vibration	-0.0061 ± 4.4272i	-4.0061 ± 4.4272i	-9.0061 ± 4.4272i
Low pass filter	-15.0000	-15.0000	-20.0000

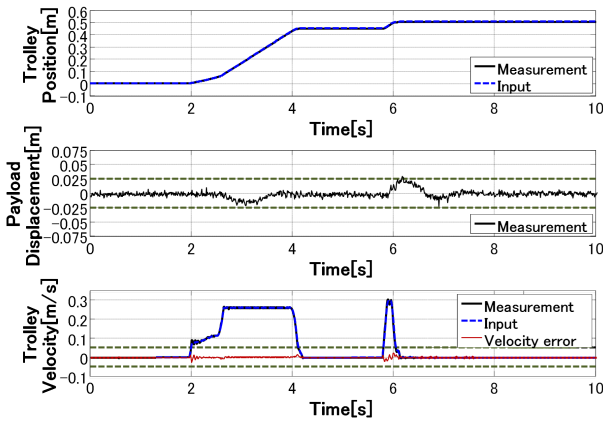


Fig. 5 Transportation experiment results by master operator

は吊り荷を揺らす要因となるので、このような入力に対して素早く収束させることが求められる。

そこで、制御仕様として、通常 1 自由度の振動要素を持つ対象の制振搬送では振動周期分の時間が必要となる [11], [12] ことをふまえ、以下のように設定した。

- 0.5 [m/s] のパルス状速度入力に対する整定時間を (吊り荷の周期)+0.1 [s] 以内

本研究の設定条件より、条件となる整定時間は 1.52 [s] となる。また、操作性は、入力値と応答の偏差が少なければ少ないほど良いといえるので、操作性の仕様は以下のように設定した。

- 搬送中のトロリの速度偏差を ±0.05 [m/s] 以内

3.3 フィードバック制御器の設計

フィードバック制御器の設計には状態フィードバック制御理論を用いる。フィードバックゲインの設計には極配置法を用いて、3.2 節で設定した制振性能の仕様を満たすように設計する。トロリの運動に対する極の実部をより安定側に配置することで速度性が向上し、吊り荷の揺れに関する極の実部をより安定側に配置することで制振性能が向上するので、これらをふまえて設計する。また、本研究の天井クレーンはトロリの横行変位と吊り荷の揺れ角しか得ることができないため、オブザーバを構成して全状態量を推定する。オブザーバの設計には極配置法を用いて、レギュレータ極よりも極の実部を安定側に配置することで設計する。実際に設定した極を表 2 に示す。

3.4 フィードフォワード制御器の設計

操作性の確保のためにフィードフォワード制御器の設計する。操作性の悪化の原因はフィードバック制御器による位相遅れである。フィードバック制御器のない制御対象の応答特性は、図 5 の下段より、速度偏差は 0.01 [m/s] しか発生しておらず、入力

に対してトロリが適確に動作していることになる。したがって、制御系全体の位相特性が本来の制御対象と同程度ならば操作性は損なわれまいと考えられる。

本研究ではフィードバック制御器を含んだフィードバック制御系に適切な伝達要素を接続することで目標モデルを設定する。図 6 に本来の制御対象 $P(s)$ 、フィードバック制御系 $G_{SFB}(s)$ 、目標モデル $G_{Model}(s)$ のボード線図を示す。

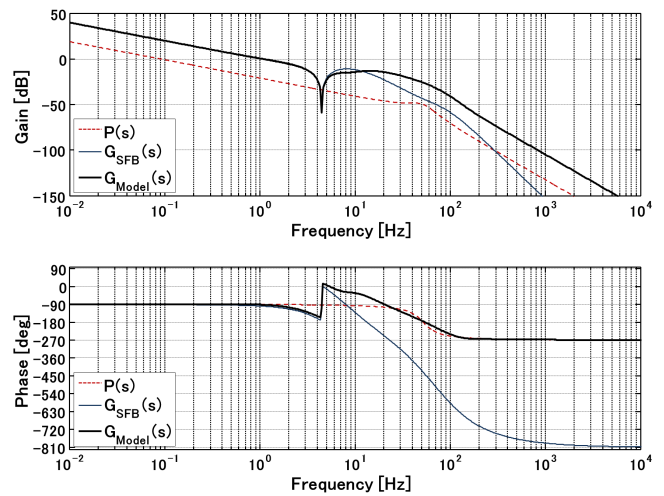


Fig. 6 Bode diagram of trolley system

図中の点線が $P(s)$ 、実線が $G_{SFB}(s)$ 、太線が $G_{Model}(s)$ であり、各図の上段がゲイン線図、下段が位相線図となっている。図中実線のフィードバック制御系 $G_{SFB}(s)$ のゲイン線図、位相線図を見ると、4.1 [rad/sec] 付近にノッチ成分があり、位相が遅れていることがわかる。この周波数は吊り荷の共振周波数と一致しており、フィードバック制御器による制振のための特性である。したがって、この周波数周辺の位相特性を本来の制御対象に近づけようとしては制振動作に悪影響を及ぼす。よって本研究ではさらに高周波数帯域で位相が遅れている部分を本来の制御系に近づけることを考える。高周波数帯域の位相遅れは本来の制御系と比較して 630 [deg] 遅れているので、目標モデルはフィードバック制御系に 7 次の位相進み要素を接続し、それを調整することで求める。

7 次の位相進み要素を接続して得られたモデルが図 6 中で太線の目標モデル $G_{Model}(s)$ である。 $G_{Model}(s)$ のゲイン線図、位相線図を見ると、ノッチ成分を阻害することなく高周波数帯域での位相特性が本来の制御対象 $P(s)$ と同等であることが確認できる。

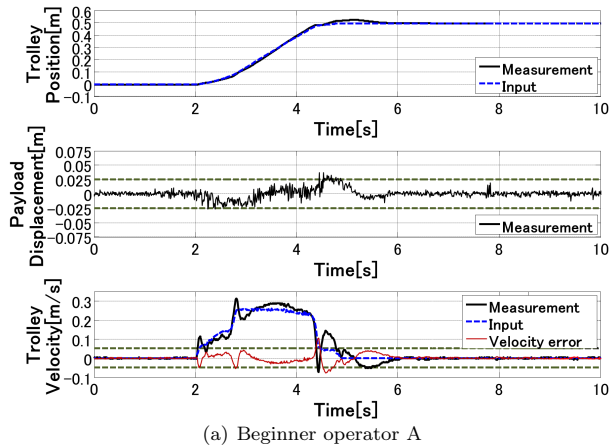
目標モデル $G_{Model}(s)$ からフィードフォワード制御器 $K_2(s)$

を求めると、次式のようになる。

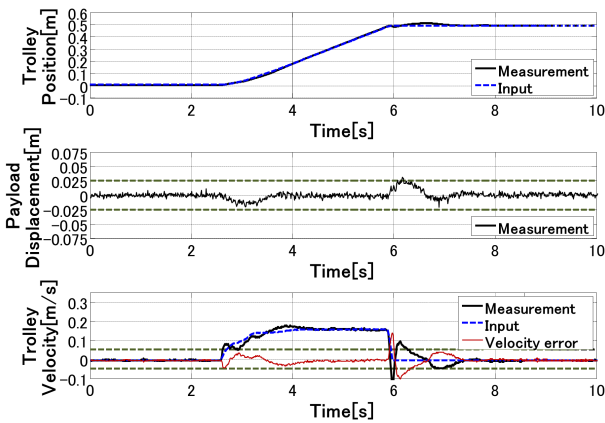
$$K_2(s) = \frac{24s + 225}{s + 15} \quad (5)$$

4 搬送実験

構成した2自由度制御系を用いて、初心者による搬送が非制御時における熟練者と同等の搬送が行えているかを確認するため、搬送実験を行った。搬送条件は3.2節と同様にロープ長0.5[m]、吊り荷質量0.2[kg]、搬送距離は0.5[m]である。実験結果の一例を図7に示す。



(a) Beginner operator A



(b) Beginner operator B

Fig. 7 Transportation experiment results

実験結果は上段がトロリの横行位置、中段が吊り荷の変位、下段がトロリの速度である。吊り荷の変位グラフ中の破線は吊り荷の揺れの許容範囲 ± 0.025 [m]を示しており、トロリの速度グラフ中の破線は設計仕様で設定した速度偏差の許容範囲 ± 0.05 [m/s]を示している。また、各実験の被験者は図7(a)は実験装置に慣れた人物、図7(b)は実験装置に初めて触る人物である。これらを図5に示した非制御時における熟練者の搬送結果と比較する。

図7(a)の結果を見ると、4.1[s]で制振搬送を行っており、搬送時間でみると熟練者の最短時間と同等の結果を得ることがわかる。また、制振性についても搬送中の吊り荷の揺れは非常に小さく、吊り荷の変位が ± 0.025 [m]を超える区間はない。した

がって、実験装置に慣れた人物であれば熟練者と同等以上の結果を得ることが確認できた。

図7(b)の結果を見ると、5.3[s]で制振搬送を行っており、搬送時間でみると熟練者の通常の搬送時間と同等の結果が得られている。制振性についても慣れた人物同様、吊り荷の変位が ± 0.025 [m]を超える区間はない、実験装置に初めて触る人物であっても熟練者と同等の結果を得ることが確認できた。

以上の結果から、初めて実験装置に触る人物でも非制御時の熟練者と同等の搬送を行えることができ、実験装置に慣れさえすれば同等以上の搬送を行うことができることが確認できた。また、搬送中の速度偏差は入力によって変化するものの、今回の実験では停止時を除くと最大値でも ± 0.05 [m/s]を超えることはなく、設定した制御仕様内で十分な性能の制御器が設計できることが確認できた。

5 結言

2自由度制御系を構成することで天井クレーンの制振搬送制御系が構成出来た。構成した制御系により、初心者が非制御時においての熟練者と同等の作業時間で吊り荷の揺れを抑えた作業を行うことができた。

今後は操作性についての評価実験や、適切なタスクを設定したさらに詳細な評価実験を行う。

謝辞

本研究の一部は、平成25年度長岡技術科学大学研究助成によるものであり、ここに記して謝辞を示す。

文献

- [1] 須藤敏男,石川七男:機械設計(5)(クレーンの設計製図),パワー社(1974)
- [2] 山本誠一:クレーン・デリック運転士ポイントレッスン,新星出版(2007)
- [3] 日本クレーン協会:JCA 日本クレーン協会 公式ウェブサイト, <http://www.cranenet.or.jp/>
- [4] 小島宏行,羽廣憲一:遺伝的アルゴリズムを用いた直進型クレーンの最適軌道計画と残留振動抑制制御の実験,日本機械学会論文集C編,vol.69, No.682, pp.1479-1485(2003)
- [5] 三好孝典,寺嶋一彦,森田正則:時変振動機構に対する制振フィードフォワード制御入力の導出とクレーンへの応用,日本機械学会論文集C編, vol.64, No.624, pp.2859-2866(1998)
- [6] 柳井法貴,山本元司,毛利彰:逆動力学計算に基づくクレーンのフィードバック制御,計測自動制御学会論文集,vol.37, No.11, pp.1048-1055(2001)
- [7] 吉田靖夫,平野正樹,富田隆之,手島博文:走行クレーンの視覚フィードバック制御,計測自動制御学会論文集,vol.41, No.6, pp.527-532(2005)
- [8] 株式会社大倉製作所:大倉製作所 ダブルレール式天井クレーン仕様および寸法表, <http://www.okura-web.com/seisaku/s-3.html>
- [9] 杉江俊治,藤田政之:フィードバック制御入門,コロナ社(2007)
- [10] 森政弘,小川鐘一:初めて学ぶ基礎制御工学,東京電機大学出版局(2008)
- [11] 浜口雅史,藤本浩,寺嶋一彦:2次元液体タンクの直線水平搬送システムにおける速度パターンとタンク形状のハイブリッド設計法,日本機械学会論文集C編,vol.67, No.654, pp.357-363(2001)
- [12] N.Singer, W.Seering: Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.112, pp.76-82(1990)