

2 自由度制御による天井クレーンの制振搬送制御系における一構成法 2-DOF Controller Design for Sway Control of Overhead Crane

○ 佐藤 馨 (長岡高専) 南雲 勇輝 (長岡高専) 正 佐藤 拓史 (長岡高専)

Kaoru SATO, Nagaoka National College of Technology, 888chi, Nishikatakaimachi, Nagaoka-shi, Niigata
Yuki NAGUMO, Nagaoka National College of Technology, 888chi, Nishikatakaimachi, Nagaoka-shi, Niigata
Hiroshi SATOH, Nagaoka National College of Technology, 888chi, Nishikatakaimachi, Nagaoka-shi, Niigata

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

1. はじめに

天井クレーンのような操作系システムに対して、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 (FF) 制御⁽¹⁾や残留振動の抑制に主眼を置いたフィードバック (FB) 制御⁽²⁾が行われている。FF 制御を用いた場合、速応性、吊り荷の揺れの抑制で優れているものの、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、FB 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。

本研究では制振性と速応性の両立をモデルマッチング問題⁽³⁾として扱い、天井クレーンの制振搬送支援制御系を構築する。しかし、操作系システムにおいて目標モデルの設計には明確な指針が示されておらず、試行錯誤的に目標モデルの設計が行われているようである。

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 自由度制御系へモデルマッチング問題を適応し、目標モデルの一設定法を示す。また、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

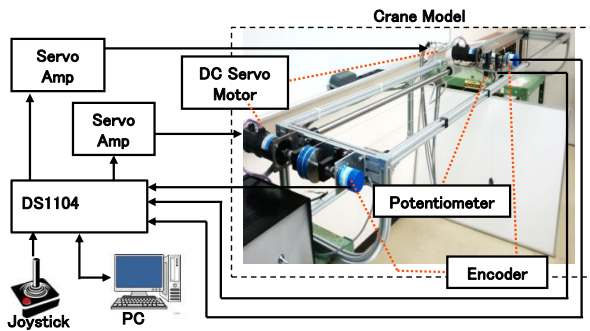


Fig. 1: Composition of experimental system

本研究で扱う天井クレーンモデルの構成を Fig. 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]、巻上範囲 0.8[m] であり、実際の大型天井クレーンを 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。巻上、横行動作はワイヤとプーリを用いた回転→直動変換機構を用い、吊り荷の巻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。また、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。

3. 制御器の設計

3.1 制御仕様の設定

制御仕様は実際の天井クレーン免許を持ち、10 年程度実務経験がある熟練者にクレーンモデルによる搬送実験を行い、その結果により設定した。この実験から、熟練者はランプ状の入力を与え、制振動作としてパルス状の入力を与えることがわかった。この制振動作は、入力を与えるタイミングに失敗すると励振の原因にもなる。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⁽⁴⁾ことをふまえ、制振性の制御仕様を次のように設定する。

- ・ 0.5[m/s] のパルス状入力に対する整定時間を (吊り荷の振動周期)+0.1[s] 以内

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、操作性の仕様は次のように設定する。

- ・ 搬送中のトロリの速度偏差を ±0.05[m/s] 以内

3.2 制御系の構成

本研究では不安定な制御対象にモデルマッチング問題を適応するため、2 自由度制御系を構成する必要がある⁽⁵⁾。本研究では Fig. 2 のような制御系を構成する。

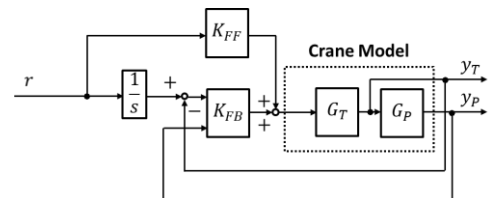


Fig. 2: 2-DOF control system for crane model

ここで、 G_T は制御対象のトロリ系、 G_P は吊り荷系、 K_{FB} は FB 制御器、 K_{FF} は FF 制御器であり、 r は目標入力、 y_T はトロリ系出力、 y_P は吊り荷系出力である。

3.3 FB 制御器の設計

FB 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、

3.1 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応性が向上し、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方向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も極配置法を用いて、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。

3.4 FF 制御器の設計

操作性の確保のためにFF制御器を設計するために、まず制御系全体の目標モデル設定を行う。FB制御器による位相遅れが操作性の悪化の原因である。制御対象Pの応答特性は、手動操作の搬送実験を行ったところ、 ± 0.01 [m/s] 以内の速度偏差しか発生しておらず、制御仕様を満たしている。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。Fig. 3に制御対象 G_T 、FB制御系 G_{SFB} 、設定した目標モデル G_{Model} を示す。

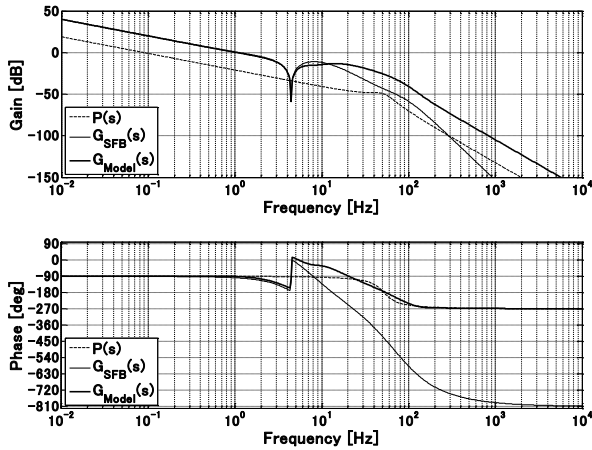


Fig. 3: Bode diagram of trolley system

図の上段がゲイン線図、下段が位相線図となっており、図中の点線が G_T 、実線が G_{SFB} 、太線が G_{Model} である。フィードバック制御系 G_{SFB} は4.1 [rad/sec] 付近にノッチ成分があり、高周波の位相が大きく遅れている。このノッチ成分の中心周波数は吊り荷の共振周波数と一致しており、FB制御器による制振のための要素である。したがって、この周波数周辺の特性を制御対象Pに近づけることは制振性に悪影響を与える。よって本研究では高周波の位相が遅れている周波数領域にて制御対象Pに近づけるような目標モデル G_{Model} を設定した。

Fig. 2 の閉ループ伝達関数 G_{yr} は、

$$G_{yr} = \frac{G_T(K_{FB2} + sK_{FF})}{1 + G_T K_{FB2} - G_T^2 G_P K_{FB1}} \cdot \frac{1}{s} \quad (1)$$

である。 $G_{yr} = G_{Model}$ と置いて、FF制御器 K_{FF} を求め、実際の制御系の伝達関数を代入すると、次のようになる。

$$K_{FF} = \frac{G_{Model}(1 + G_T K_{FB2} - G_T^2 G_P K_{FB1})s + K_{FB2}}{G_T s} \quad (2)$$

$$= \frac{24s + 225}{s + 15} \quad (3)$$

4 搬送実験

構成した制御系により、初心者による制振搬送が可能であることを確認するため、搬送実験を行った。搬送条件はロープ長0.5[m]、吊り荷質量0.2[kg]、搬送距離は0.5[m]である。また、吊り荷の変位の許容範囲は ± 0.025 [m]に設定した。実験結果の一例をFig. 4に示す。この被験者は実験装置に初めて触る人物である。

実験結果をみると、4.1[s]で制振搬送が行えていることがわかる。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。操作性についても搬送中、速度偏差が ± 0.05 [m/s]を超える区間はなく、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。

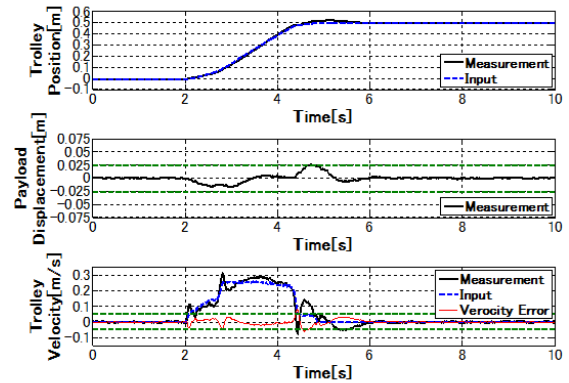


Fig. 4: Transportation experiment result by beginner

5 結言

天井クレーンの制振搬送支援制御系を、モデルマッチング問題を適応した2自由度制御系により構成した。モデルマッチング問題の目標モデルの設定において、制御対象の特性を考慮することで容易に設定できることを示した。構成した制御系により初心者であっても制振搬送を行うことができ、本研究の構成法が有効であることを確認した。

参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 杉江俊治, 藤田政之: フィードバック制御入門, コロナ社 (2007)
- (4) 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)
- (5) 原辰治, 杉江俊治: 2 自由度制御系 -II- 達成可能な伝達関数および諸特性のクラス, システムと制御, vol.30, No.8, pp.457-466 (1986)