天井クレーン液体容器搬送制御システムの設計

上木 諭^{*1}, 山内 悠^{*2}, 兼重 明宏^{*1}, 三好 孝典^{*3}, 寺嶋 一彦^{*4}

Design of liquid container transport control system with overhead traveling crane

Satoshi UEKI^{*1}, Yu YAMAUCHI^{*2}, Akihiro KANESHIGE^{*1},
Takanori MIYOSHI^{*3} and Kazuhiko TERASHIMA^{*4}^{*1,*2}National Institute of Technology, Toyota College
2-1 Eiseicho, Toyota-shi, Aichi 471-8525, Japan^{*3,*4}Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi 441-8580, Japan

Received: 26 May 2017; Revised: 7 September 2017; Accepted: 22 October 2017

Abstract

In the steel/casting industries, a liquid container transport is carried out by an overhead traveling crane or a trolley. The operation of the overhead traveling crane is carried out both operation by the experience operator and operation by automated transportation in order to prevent quality deterioration due to the overflow and involvement in a hostile environment. In particular, the overhead crane transportation by the operator, which is allowed to select freely pathway, is needed from the point of freedoms of the operation. This paper presents a design of a liquid container transport control system with an overhead traveling crane, which is allowed to operate by an inexperienced operator easily. The presented control system is designed as to suppress both the rod vibration and the sloshing (liquid vibration) without measuring the sloshing. The presented control system is two DOFs controller, the feed-forward controller is based on two notch filter, and the feedback controller is based on the H_2/H_∞ controller design method using LMI. The derived controller is performed a controller order reduction in consideration with practical use. Some experiments are presented to show the effectiveness of the proposed design of control system.

Keywords : Liquid container transfer, Overhead traveling crane, Sloshing suppression control

1. 緒 言

鉄鋼や鋳造業における高温で重量のある溶湯搬送は、台車または天井クレーンによる搬送が行われている。天井クレーンによる溶湯搬送では、高温、高湿度、粉塵等のある劣悪環境の中、熟練オペレータによる方法や固定された搬送経路を自動搬送する方法により、溢流やノロ巻き込みによる品質劣化を防止するために容器内液面の振動（スロッシング）を抑えた操業を行っている。とくに、オペレータによる搬送経路を自由に選択できる（非定常な）搬送が操業の自由度の観点から望まれている。しかし、天井クレーンによる液体容器搬送では、クレーン台車から容器を吊り下げるロッドの振動と容器内液面の振動が発生することから、その搬送を行うには熟練オペレータの経験が必要であり、熟練オペレータの不足や作業効率の観点から、非熟練のオペレータであってもロッドと液体の両方の振動を抑える搬送制御システムの開発が望まれている。

液体容器搬送を対象とした研究は数多くなされている。しかしながら、その多くは自動注湯機や搬送台車を対象とした研究（福田他，1990，寺嶋他，1996，矢野他，2001，勝部，永井，2001，2002，岡他，2011，渋谷他，2013，浜口，谷口，2015，Zang et al., 2015）であり、天井クレーンによる液体容器搬送を対象とした研究（Kaneshige

No.17-00237 [DOI: 10.1299/transjsme.17-00237], J-STAGE Advance Publication date : 31 October, 2017

^{*1} 正員，豊田工業高等専門学校（〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1）^{*2} 学生員，豊田工業高等専門学校^{*3} 正員，豊橋技術科学大学（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1）^{*4} 正員，フェロー，豊橋技術科学大学

E-mail of corresponding author: s_ueki@toyota-ct.ac.jp

et al., 2008, Aravind et al., 2012) は少ない. 他方で, 天井クレーンの自動搬送に関する研究は数多く行われているが, その搬送対象の多くは剛体を仮定してものが多い (Daniel et al., 2010, Carlos et al., 2011, Pawel, 2012). しかしながら, 天井クレーンによる液体容器搬送システムは, クレーン台車から容器を吊り下げるロッドの振動と容器内液面の振動から成る連成系の振動系となる. 高次の振動を対象とし, 二重振り子型天井クレーンによる制振制御に関する研究 (Mahdiah et al., 2011, Ahmad et al., 2010) も多数報告されているが, 第 2 軸の振れ角はセンサにより計測可能なシステムを対象としている. しかしながら, 鉄鋼や鋳造業における高温の溶湯搬送では, 液位をセンサにより計測することは困難である (矢野他, 2001). そのため, 液位を計測せずに液面の振動も抑える搬送制御系の設計手法が求められる. 液位を計測せずに液面の振動を抑えながら搬送を行う自律走行型液体容器搬送ロボットの研究報告として, 勝部らは搬送パターンをあらかじめ決めておき, タンクを傾斜させることにより液位振動を抑える予見制御 (勝部, 永井, 2001, 2002) を提案しているが, 搬送パターンをあらかじめ決めて行う予見制御は, 本研究で対象とする, 搬送経路を自由に選択できる非定常な操業を行う場合には適用できない. 岡部らや渋谷らは境界要素法を用いてモデル化を行い, モデル予測制御を用いて液位振動を抑える制御手法を提案している (岡部他, 2011, 渋谷他, 2013). こちらの手法でも, あらかじめ決められた搬送入力で発生する液面振動を予測し, 液面振動の大きさを最小とするような制振搬送入力を導出している手法である. また, どちらの自律走行型液体容器搬送ロボットの研究も, 液体タンクの傾斜を積極的に制御することで液面振動を抑えており, 液体タンクの傾斜を積極的に利用することが困難な天井クレーンにそのまま適用することは現実的ではない. 著者らの先行研究では, 天井クレーンによる液体搬送, すなわち, 液体の入った容器を吊り下げるロッド・タンクと充填されている液体からなる連成系を表現するモデルの導出ならびにフィードフォワード制御による搬送制御システムの研究を行っている (Kaneshige et al., 2008). しかしながら, 液体タンクを吊り下げるロッド・タンク, 液体の搬送がそれぞれ固有振動数を持ち, それらが相互に影響を及ぼすため, 理論的なフィードバック制御系の構築には至っていない. また, Aravind らの研究 (Aravind et al., 2012) においても入力整形による振動抑制であり, フィードバック制御系の構築には至っていない.

本研究では, 天井クレーンによる液体容器搬送システムに対して, その搬送経路は自由に選択できる非定常な操業, すなわちオペレータからクレーンへ非定常な入力を与えるものとし, 容器内に充填される液位やロッド長さの変化に対してロバストな制御系の設計について提案する. 提案する制御系は, ロッド及び容器内液面の振動を抑制する制御系として, ノッチフィルタによるフィードフォワードコントローラと混合 H_2/H_∞ 制御系設計を用いたフィードバックコントローラによる 2 自由度制御系を容器内液体の振動を計測せずに設計する. H_2 制御器では, 液体の慣性力を外力とみなし, クレーンの速度をその外力による速度に素早く収束させることにより容器内液面の振動の低減を目的として設計する. H_∞ 制御器では, ロッド長さ, 容器の大きさ, 容器内液体の量の変化を考慮した振動抑制制御器として設計を行う. 導出された混合 H_2/H_∞ 制御器に対して, 実用性を考慮して低次元化を行う. 低次元化された制御器を用いて実験を行い, その有効性を示す.

2. 天井クレーンによる液体搬送システム

2・1 実験装置

実験装置を図 1 に示す. 本装置は走行方向 (図 1 水平方向) をガーダが移動し, 横行方向 (図 1 奥行き方向) はガーダ上に搬送物を吊り下げた台車が移動することにより, 平面上を独立に搬送可能な自走式システムである. 台車の移動は AC サーボモータの駆動力がタイミングベルトを介して伝えられ, コンピュータからモータドライバへ指令電圧を与え, モータドライバにより速度制御される. 台車の位置はモータ内臓のエンコーダにより算出される. また, 液体を充填するタンクはロッドに固定され, ロッドは回転軸を介して台車に組み付けられており, ロッドの振れ角はレーザセンサ (キーエンス製, VG-035) を用いて AD ボードで測定している. また, 液面振動を評価するために, タンク内に超音波センサ (オムロン製, E4C-DS30) を固定し, 液面までの距離を測定できるようにしている. なお, 横行方向に関してロッドは台車に固定されているため, 単純な台車での液体容器搬送となる. 本研究では振動する走行方向のみを考察の対象とする.

Fig. 1 Experimental equipment

2・2 対象の数式モデル

実験装置の数式モデルとして、台車の数式モデルは1次遅れモデルで表されるものとする。

$$u = T\ddot{x} + \dot{x} \quad (1)$$

ここで、 u は指令速度、 $\dot{x}$ は台車速度、 T は時定数である。また、ロッドと搬送物の集中定数系で考慮し、図 2 に示すような振り子モデルによる搬送物の運動方程式は次式で表される。

$$ml^2\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + mgl\sin\theta + m\ddot{x}\cos\theta = lf \quad (2)$$

ここで、 m は搬送物質量、 l はロッド回転軸から搬送物質量重心位置までの長さ、 θ はロッドの振れ角、 D はロッド回転軸の減衰係数、 f は搬送物に掛る外力、及び g は重力加速度である。搬送物が剛体であるならば、 f は外部から加わる外力を表す。しかしながら、本研究では外部から力が加わることを考えているわけではない。液体を充填した液体タンクの加減速時には、充填された液体が一瞬遅れて内壁に到達し、液体タンクに慣性力を加えることが推測される。本研究では液体の慣性力を表すために f を式(2)に加えている。式(2)を $\theta \approx 0$ 近傍で一次近似を行い、式(1)と連立させることにより、次の状態方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{g}{l} & -\frac{D}{ml^2} & \frac{1}{lT} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{ml} \\ 0 \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{lT} \\ \frac{1}{T} \end{bmatrix} u \quad (3)$$

Fig. 2 Pendulum model

Fig. 3 Double pendulum with damper

他方で、直方体型タンクにおける直線搬送時での液面振動現象は、急激な加速度の変化などが起こらない限り、二次元一次モード容器内液面の振動として近似的に表現できることが知られている（福田他，1990）．天井クレーンを用いている本研究の実験装置では、ロッドタンクを振子モデル、液体を二次元一次モード容器内液面の振動として近似的したモデルを合成することで表される、ロッドタンク・液体連成系の近似モデルを液面振動モデルとして考える（Kaneshige et al., 2008）．この場合、図 3 に示すように減衰 2 重振子モデルとなり、速度二乗項の消去と $\theta \approx 0$ 近傍で一次近似を行った結果、次式で表すことができる．

$$(m_1 l_1 + m_2 l_1 + m_2 l_2) \ddot{x} + (\hat{I}_1 + \hat{I}_2 + 2m_2 l_1 l_2) \ddot{\theta}_1 + (m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2) \ddot{\theta}_2 + D_1 \dot{\theta}_1 + g(m_1 l_1 + m_2 l_1 + m_2 l_2) \theta_1 + m_2 g l_2 \theta_2 = 0 \quad (4)$$

$$m_2 l_2 \ddot{x} + \hat{I}_2 \ddot{\theta}_2 + (m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2) \ddot{\theta}_1 + D_2 \dot{\theta}_2 + m_2 g l_2 \theta_1 + m_2 g l_2 \theta_2 = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\hat{I}_1 = (m_1 + m_2) l_1^2 + I_1$ 、 $\hat{I}_2 = m_2 l_2^2 + I_2$ であり、 I_1 はロッド・タンク連成系の重心回りの慣性モーメント、 I_2 は液体の重心回りの慣性モーメントを表す．また、 l_1 はロッド・タンク連成系の重心までの距離、 l_2 は等価振子長さ、 m_1 はロッド・タンク連成系の質量、 m_2 は液体の質量、 D_2 は液体自身の粘性及び液体と容器壁面の摩擦を考慮した等価粘性係数、及び D_1 は式(2)でも用いている回転支点部の減衰係数である．なお、 $m = m_1 + m_2$ であり、 $l \neq l_1$ であることに注意が必要である．液体の慣性力として表される式(4)と(5)における外乱は θ_2 の運動によって発現するものとする．

3. 制御系の設計

3・1 設計方針

制御系の設計方針を決定するために、天井クレーンによる液体容器搬送時のロッドの振れ角と液面振動の挙動について考察する．後述の比較用実験結果である図 12(c)と(d)に青破線で線を引いて示す瞬間のように、ロッドの振れ角の固有周波数と液位振動の固有周波数の違いにより、図 4 の(a)と(b)のように振れ角が同じであっても液位振動は同じであるとは限らない．さらに、図 4(c)と(d)に示すように液体タンクの水速を考えると、図 12(c)と(d)に緑破線で線を引いてある瞬間のように、液体タンクの水速も同じであるとは限らない．(c)に示すように、液体タンクの水速が左向きであれば、液体はタンク内壁に強く打ちつけられることになる．他方、(d)の場合では、タンク内壁に作用する力は(c)と比較して弱くなる．従って、液体タンクの水速の向きと大きさを考慮した入力を台車に加えることで、液体を振動させる要因となる力を抑えることができると考えられる． H_2 制御器は、3.3 節で示すように、この考え方に基いて設計を行う．

Fig. 4 Idea of design concept for the H_2 controller

本稿で提案する制御系は、液面振動抑制を考慮した天井クレーン台車の速度制御を 2 自由度制御系により構成する．図 5 に 2 自由度制御系のブロック図を示す．フィードフォワードコントローラ $F(s)$ は指令速度を入力としてロッドタンクと液面の共振周波数をノッチフィルタで除去した速度指令とするように設計を行う．この $F(s)$ ではモデルの不確かさや不意な振動などには対応できないため、フィードバックコントローラ $K(s)$ をロッド長さ、タンクの大きさ、タンク内液体の量の変化に対してロバストとなるよう、ロッドタンク・液面連成系の

振動を抑制するようにLMIを用いた混合 H_2/H_∞ 制御器を設計する。 H_∞ 制御器は連成系の振動抑制のために設計し、 H_2 制御器は搬送物に加わる外乱により発生する搬送物速度（液体タンクの速度）と入力により発生する搬送物速度の差が速く収束するように設計する。この速度差を抑えることにより、液体の慣性力によるタンク内壁への力の作用を抑え、反作用として発生する液面振動を抑えることを目的とする。なお、本研究で考慮する制御対象の不確かさの範囲として、ロッド長さを0.4 or 0.6 or 0.8 m, 液位を $0.05 \leq h_s \leq 0.15$ m, 及びタンク寸法 L を0.1 or 0.2 mとして混合 H_2/H_∞ 制御器を設計する。なお、設計に用いる式(1)~(5)の各種パラメータは、 $T = 0.18$ [s], $m = 6.3$ [kg], $D(=D_1) = 0.8$ [Nms], $l = 0.75$ [m], $m_1 = 5.6$ [kg], $m_2 = 0.2 \times (2 \times L) \times h_s \times 1000$ [kg], $I_1 = 0.8$ [kgm²], $I_2 = 0.005$ [kgm²], $0.55 \leq l_1 \leq 0.95$ [m], $0.075 \leq l_2 \leq 0.125$ [m], 及び $D_2 = 0.02$ [Nms]とした。 m_1 , I_1 , 及び I_2 はロッド長さや液位の変化で変化すべきであるが、簡単化のために固定値を用いている。

Fig. 5 Block diagram of 2DOF controller

3・2 フィードフォワードコントローラ的设计

制振制御の中でも簡単に制御系が構築でき、且つ高い制振効果のあるノッチフィルタを用いたフィードフォワードコントローラを設計し、ロッドタンクの固有周波数と液位の固有周波数を落とすことにする。ロッドタンクの振れ角に対する固有周波数はロッドの長さに強く依存しはらつきはある。本稿ではロッド長が0.8[m]の値を使用し、単振子の固有周波数の式

$$\omega_{n1} = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (6)$$

より、固有周波数は $\omega_{n1} = 3.5$ [rad/s]となる。液位の固有周波数も条件によりはらつくが、ノッチフィルタの設計には、液体の固有周波数を推定する式（寺嶋他，1996）

$$\omega_{n2} = \sqrt{g\kappa \tanh(\kappa h_s)} \quad (7)$$

を、静止液位が0.15[m]、タンクの搬送方向長さを0.2[m]の場合を使用し、 $\omega_{n2} = 12.3$ [rad/s]とした。ここで、 $\kappa = (n\pi)/(2L)$, $n = 1, 2, \dots$ であり、 n はモード次数である。ロッドタンクの固有振動数と液体の固有振動数の両方を落とす必要があるため、2つのノッチフィルタを用いて以下のように設計を行う。

$$F(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2}{s^2 + \omega_{n1}s + \omega_{n1}^2} \cdot \frac{s^2 + 2\zeta_2\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}{s^2 + \omega_{n2}s + \omega_{n2}^2} \quad (8)$$

なお、実験では、 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.0001$ を用いた。式(8)によるボード線図は図6に示す。なお、 ω_{n1} と ω_{n2} でのゲインの値は理論値が $20 \log_{10} 2\zeta$ であり、 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.0001$ では約-74dBである。

Fig. 6 Bode plot of $F(s)$

3・3 フィードバックコントローラ的设计

フィードバックコントローラは、モデルの不確かさによる液面振動を抑制する H_∞ 制御器と容器内液面振動の低減を目的とした H_2 制御器による混合 H_2/H_∞ 制御系設計を用いて設計を行う。そこで、一般化プラントモデルとして、図 7 に示すブロック線図のモデルを用いる。

Fig. 7 Block diagram of generalized plant

ここで、 w_2 と w_∞ は外部入力、 z_2 と z_∞ は制御量、 W_2 と W_∞ は H_2/H_∞ 制御系設計のための重み関数である。プラントモデル $P(s)$ は状態方程式を式(3)、出力方程式を

$$\mathbf{y}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

と置いている。液体タンクの加減速時に液体が一瞬遅れて内壁に到達した際に生じる液体の慣性力による力を表現するために、 w_2 は式(3)における f と置いている。液体タンクを等速で搬送している時、常に一定の力 f が発生している。図 4 を用いて説明したアイディアを考慮して、この定常的な f によって生じる液体タンク速度に可能な限り早く台車速度を収束させるために、液体タンクの定常速度を定義する。搬送物速度は線形近似して表すと、

$$v_{obj} = \dot{x} + l\dot{\theta} \cos \theta \approx \dot{x} + l\dot{\theta} \quad (10)$$

と表現できる。液体タンクの定常速度を定義するために、導出するコントローラの定常状態のゲインを k_p とし (Miyoshi et al., 2006), k_p を比例ゲインとした $\dot{x} = k_p \theta$ とフィードバックした場合、式(2)を線形近似した式と式(10)から、次式が導出される。

$$v_{obj}(s) = \frac{ls + k_p}{mls^2 + (D/l)s + mk_p s + mg} f(s) \quad (11)$$

式(11)に $s=0$ を代入し、係数 k_p/mg を得る。制御量 z_2 は式(10)で表される v_{obj} と w_2 に係数 k_p/mg を掛けた速度との差に重み関数 W_2 を掛けたものとしている。ここで、式(11)は k_p の値により極を決定することができるため、 m が大きく D は無視できるものとし、極を考慮してその大きさを $k_p=5.0$ とした。これにより、定常状態において、液体の慣性力に対して比例した速度で台車が移動し、また、インパルス状の液体の慣性力によって生じる振れ角に対し、容器内液面の振動の低減を目指して可能な限り早く台車速度が定常状態に収束するように H_2 制御器を設計する。 W_2 の重み関数は、本研究では次式のローパスフィルタで定義する。

$$W_2(s) = \frac{1}{0.3s + 1} \quad (12)$$

時定数 0.3 は台車の時定数を考慮して、十分追従するように設計した。

他方、 H_∞ 制御器のための重み関数 W_∞ は、ロッド長、液位、タンク寸法の変動により、式(2, 4-5)の変動を乗法的変動として表し、制御器が保守的になりすぎることを避け、液位の振動を抑えることを第一に考え、重み関数は 2 次振動モードに対してロバスト安定となるように設計する。設計した重み関数 W_∞ を次式に示す。

$$W_{\infty}(s) = \frac{s^2 + 8s + 4}{s^2 + 4s + 275.6} \quad (13)$$

この重み関数 W_{∞} と乗法的誤差のゲイン線図を図 8 に示す。乗法的誤差はロッド長 L_v を 0.4~0.8 m, 液位を $0.05 \leq h_s \leq 0.15$ m, 及びタンク寸法を $0.1 \leq L \leq 0.2$ m の範囲で考慮している。図 8 から分かるように, 1 次振動はロッドの長さ依存し, 2 次振動は複数のパラメータに依存し, 幅がある。本研究では, 制御器が保守的になりすぎることを避け, 2 次振動を覆うように設計している。

以上の周波数重み関数を適用した図 7 の一般化プラントに対して,

$$\text{minimize } \left\| \frac{z_2}{w_2} \right\|_2, \text{ subject to } \left\| \frac{z_{\infty}}{w_{\infty}} \right\|_{\infty} < 1 \quad (14)$$

を満たすように LMI を用いて, $K(s)$ の導出を行った。その結果, 導出される制御器は 6 次の伝達関数で導出される。しかしながら, 次数が大きい制御器をそのまま実装すると, 離散化による影響やサンプリング周期に揺らぎが生じた場合などにおいて, 不安定になる場合がある。そこで, 平衡実現法を用いて制御器の低次元化を行う。低次元化は制御器の入出力に与える影響の小さいハンケル特異値を切り取ることで, 低次元化を行う。その結果得られた制御器は次式で表される。

$$K(s) = \frac{20.95s^2 + 138.4s + 3651}{s^2 + 60.41s + 697.9} \quad (15)$$

また, 導出された 6 次の制御器と式(15)の低次元化された制御器のボード線図を図 9 の実線に示す。得られた制御器の直流成分のゲインは約 5.23 の値となっており, これは一般化プラントの設計に用いた k_p の値に近い。このことから, 一般化プラントの w_2 への係数が k_p/mg で良いことが分かる。得られた制御器は低周波域の入出力には殆ど影響を与えておらず, 高周波域の特性に変化を与えている。 $K(s)$ の高周波域のゲインは高いが, $K(s)$ の入力にはロッドの振れ角であり, $P(s)$ の高周波域はゲインが低いので, その影響は小さい。設計した制御器は, 図 8 に示したように, 重み関数 W_{∞} が乗法的誤差を覆っていない。そのため, H_{∞} 制御系設計手法を用いるが, ロバスト安定性が保証されていない。そこで, 実部が-1 近傍のナイキスト線図を図 10 に示す。乗法的誤差は図 8 と同様の範囲で考慮している。図 10 から実部が-1 近傍での角周波数は 4.4~5.7 [rad/sec]であり, 覆っていない 1 次振動の角周波数 3.5[rad/sec]は(-1,0)から離れており, ロバスト安定性が実現されている。

Fig. 8 Magnitude plots of weight function and multiplicative error

Fig. 10 Nyquist diagram

(a) Magnitude plot

(b) Phase plot

Fig. 9 Bode plot of designed controller

3・4 H₂制御器の設計方針の効果の検証

設計した H₂ 制御器の効果を検証するために、設計した制御器 $K(s)$ 、低次元化前の 6 次の制御器、H₂ 制御器の評価関数をロッド振れ角が小さくするように設計した H₂/H_∞ 制御器、及び H_∞ 制御理論を用いて設計した制御器の比較数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションでは、台形速度を目標速度とし、フィードバックコントローラのみを用いて、振動抑制性能のみを比較した。目標台形速度は開始 1 秒から加速度 0.1667 [m/s²] で加速を始め、2.5 秒から一定速度 0.25 [m/s]、5 秒から -0.1667 [m/s²] で減速し、6.5 秒には目標速度が 0 となるように生成した。対象とするモデルとして、式(1)、(4)、及び(5)を用い、ロッドの振れ角として θ_1 、液位の振動として θ_2 を用いて評価する。シミュレーション結果を図 11 に示す。図 11 の $K(s)$ は設計した制御器、original は低次元化前の 6 次の制御器、another は H₂ 制御器の評価関数をロッド振れ角が小さくするように設計した H₂/H_∞ 制御器、H_∞ は H_∞ 制御理論を用いて設計した制御器での結果を示している。図 11 (a) はロッドの振れ角 θ_1 を示しており、(b) は液位の振動として θ_2 を示している。どの制御器を用いても残留振動は抑制されており、 $K(s)$ と低次元化前の 6 次の制御器では違いが少ない。しかしながら、液位の振動を表す θ_2 のピーク値は $K(s)$ を用いた場合は H_∞ 制御器の 70% 程度に抑えられている。特に、加速開始や減速開始時ではなく、加速終了時と減速終了時に効果を示している。また、二乗面積で評価した場合、設計した制御器 $K(s)$ と低次元化前の 6 次の制御器は他の 2 種類の制御器と比較して良い結果であった。

Fig. 11 Simulation result

4. 評価実験

設計した制御系の有効性を評価するために、3 種類の実験を行った。最初の実験では、設計した制御系のロバスト性を確認するために、ロッド長を 0.4m、0.6m、及び 0.8m の三種類、液位を 0.05m、0.10m、及び 0.15m の三種類、タンク寸法を 0.2m×0.2m×0.3m、総組み合わせ 9 パターンにおいて実験を行った。目標値は実験条件を統一するために、台形速度とした。実験結果を図 12、13 に示す。図 12 は比較のための制御を行わず、モータドライバに目標速度をそのまま入力した場合の実験結果、図 13 は設計した制御系による実験結果である。また、図 12、13 は、入力加速度の振動により最も振動し易いと考えられる（寺嶋他，1996）、ロッド長 0.4m、液位 0.05m の結果を代表例として示している。図 12、13 (a) はカート位置、(b) はカート速度、(c) はカットオフ周波数 15.9Hz のデジタルローパスフィルタを通したロッド振れ角度、(d) は液位変動を表している。液位変動は超音波センサの出力値を AD ボードにより取得している。超音波センサの分解能は約 0.2 mm であるが、電気的ノイズのため ±2.0 mm 程度のノイズが常に乗っている。下記の実験結果では、液位変動は AD ボードの値を距離に変換しただけの生値を示しており、大きく揺らいでいる所では目視で液面振動が確認できる箇所である。図 13 (b) から、制御器の影響により、実際の速度は緩やかな変化となり目標値には追従しておらず、目標位置にも誤差が生じている。しかしながら、ロッドの振れ角は、加減速時に変化こそ生じているが、残留振動もなく制振制御されている。また、図 12 (d) と図 13 (d) を比較すると、設計した制御系を用いた場合には液位変動の確認は難しく、容器内液面の振動が抑えられている。どの実験条件においても、同様の傾向が見られ、設計した制御系はパラメータが変動しても容器内液面の振動を抑える効果があることが確認された。

2 つ目の実験は残留振動が残っている場合における設計した制御系の性能を確認した。実験では設計した制御系を用いて、1 回目の台形速度の後、且つ残留振動が減衰される前に 2 回目の台形速度を与える実験を行った。

Fig. 12 Experimental result without controller

Fig. 13 Experimental result with designed 2DOF controller

Fig. 14 Experimental result with designed 2DOF controller

その実験結果を図 14 に示す。図 14 と図 13 を比較すると、図 13 (d) から 2 回目の加速時に液位変動がわずかに確認できる。しかしながら、残留振動が残っている場合であっても、設計した制御系は振動を抑制しており、非定常な入力に対しても有効であることが期待できる。

3 つ目の実験では、台車位置追従の定常偏差を低減することを目的として、図 15 に示すように、目標速度を

$$\dot{x}_r = \dot{x}_d + \lambda(x_d - x) \quad (16)$$

と位置誤差を補償して、設計した制御系で実験を行った。ここで、 λ は重み係数である。簡単化のために $\theta = 0$ として考えると、式(1)を用いると、

$$x = \frac{s + \lambda}{Ts^2 + s + \lambda} x_d \quad (17)$$

を得る。 $\dot{x}_d = 0$ となった以降は、2 次遅れ系の挙動となる。 λ は大きすぎると不足減衰となり、小さすぎると過減衰となる。また、 $\theta \neq 0$ を考慮した $\lambda=0.5, 1.0, 2.0$ の x/x_d のボード線図を図 16 に示す。 $\lambda=2.0$ の場合、式(17)では不足減衰、図 16 から位相余裕も小さい。また、 $\lambda=0.5$ と 1.0 は、式(17)ではどちらも過減衰となるが、 $\lambda=0.5$ の方が 0.1Hz 以下の低周波域においてゲインがわずかに大きい。そこで、実験では λ を 0.5 とした。

実験結果を図 17 に示す。図 13 と図 17 (a) の比較から位置誤差の定常偏差を減少させていることが確認できる。しかしながら、図 17 (d) に示すように、液位変動のピーク値は制御を行わない場合に次いで大きい。液位変動のピーク値は行き過ぎた台車位置を戻す際に発生しており、この時のロッドの振れ角は既に十分小さくなっている。そのため、 $K(s)$ による振動抑制効果が小さく、液位を計測しないロッド振れ角計測のみでの本制御系では、液位振動抑制に限界があることが分かる。

Fig. 15 Block diagram with the position compensation

Fig. 16 Bode plot of the controller with the position compensation

Fig. 17 Experimental result with designed 2DOF controller included position compensator

5. 結言

本稿では、オペレータによる搬送経路を自由に選択できる非定常な搬送を行う天井クレーンによる液体容器搬送システムに対して、充填される液位やロッド長さの変化に対してロバストな2自由度制御系の設計について提案した。提案した制御系は、ロッド及び容器内液面振動を抑制する制御系として、ノッチフィルタによるフィードフォワードコントローラと混合 H_2/H_∞ 制御系設計を用いたフィードバックコントローラによる2自由度制御系を設計した。 H_2 制御器では、液体の慣性力を外力とみなし、クレーンの速度をその外力による速度に素早く収束させることにより容器内液面振動の低減を目的として設計した。 H_∞ 制御器では、ロッド長さ、容器の大きさ、容器内液体の量の変化を考慮した振動抑制制御器として設計を行った。導出された混合 H_2/H_∞ 制御器に対して、実用性を考慮して低次元化を行い、低次元化された制御器を用いて実験により、液位振動の抑制性能、ロバスト性、残留振動時からの性能を示した。また、液位を計測しないロッド振れ角計測のみでの本制御系では、液位振動抑制に限界があることが分かった。しかしながら、天井クレーンによる液体容器搬送システムに対する提案した制御系設計は、ロッドの振れ角と液位振動の両方を抑制し、残留振動を低減し、制御器の次数も少ないため、実用的な手法であると考えられる。

文 献

- Ahmad, M. A., Raja Ismail, R.M.T., Ramli, M.S., Nasir, A.N.K., Abd Ghani, N.M. and Noordin, N.H., Techniques for sway control of a double-pendulum-type overhead crane, *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, Vol. 11, No. 2 (2010), pp. 1-8.
- Aravind, S. M., Arto, K. and William, S., Slosh suppression of liquid in a suspended container using robust input shaping, *The proceedings of 19th International Congress on Sound and Vibration* (2012), pp. 1163-1170.
- Carlos, V. and Joaquin, C., Control of a parametrically excited crane, *Proceedings of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control* (2011), pp. 6703-6708.
- Daniel, P., Dominik, S., Felix, A., Harald, A. and Claus, H., Control of an overhead crane with the controlled lagrangian method, *The proceedings of 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems* (2010), pp. 131-136.
- 福田敏男, 鈴木明人, 柴田碧, 液体容器の液位の振動抑制制御の研究: 第2報, 容器の回転モーメントを考慮した液体搬送時の液位振動制御, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 56, No. 532 (1990), pp. 3259-3266.
- 浜口雅史, 谷口隆雄, 6 自由度パラレルリンク型アクティブ吸振器付き搬送台車による液体タンクの制振制御 (水平な直線路走行の場合), *計測自動制御学会論文集*, Vol. 51, No. 2 (2015), pp. 101-109.
- Kaneshige, A., Kaneshige, N., Hasegawa, S., Miyoshi, T. and Terashima, K., Model and control system for 3D transfer of liquid tank with overhead crane considering suppression of liquid vibration, *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 21 (2008), pp. 293-298.
- 勝部展夫, 永井正夫, 傾動式自動注湯機の液面制御に関する研究: 第2報, 搬送中における容器傾動入力による予見制御の提案, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 67, No. 658 (2001), pp. 1792-1798.
- 勝部展生, 永井正夫, 傾動式自動注湯機の液面制御に関する研究: 第3報, 傾動制御系と液面制御系の協調制御, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 68, No. 670 (2002), pp. 1747-1752.
- Mahdieh, A., Hassan, Z. and Mahdi, A. S., Anti-swing control of a double-pendulum-type overhead crane using parallel distributed fuzzy LQR controller, *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 6 (2011), pp. 7850-7856.
- Miyoshi, T., Kojima, H. and Terashima, K., Development of vertical power-assisted crane system considering absolute stability, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems* (2006), pp. 4902-4908.
- 岡塚尚, 渋谷涼太, 野田善之, 松尾芳樹, 寺嶋一彦, 液体容器搬送システムにおけるモデル予測制御を用いたスロッシングの抑制, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 77, No. 783 (2011), pp. 4068-4080.
- Paweł, H., The crane control systems: a survey, *The proceedings 17th International Conference of Methods and Models in Automation and Robotics* (2012), pp. 505-509.
- 渋谷涼太, 岡塚尚, 野田善之, 寺嶋一彦, 液体容器搬送システムにおける振動予測手法を用いた傾動をとまなう制振搬送制御, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 49, No. 1 (2013), pp. 134-141.
- 寺嶋一彦, 浜口雅史, 兼重明宏, 3 次元液体タンクの最適搬送制御と液位, 粘性変化に対する制振ロバスト性, *システム制御情報学会論文集*, Vol.9, No.4 (1996), pp. 162-171.
- 矢野賢一, 小黒直樹, 寺嶋一彦, 時間, 周波数仕様を考慮したハイブリッド成形法による制振起動制御, *計測自*

動制御学会論文集, Vol. 37, No. 5 (2001), pp. 403-410.

Zang, Q., Huang, J. and Liang, Z., Slosh suppression for infinite modes in a moving liquid container, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 1 (2015), pp. 217-225.

References

- Ahmad, M. A., Raja Ismail, R.M.T., Ramli, M.S., Nasir, A.N.K., Abd Ghani, N.M. and Noordin, N.H., Techniques for sway control of a double-pendulum-type overhead crane, International Journal of Simulation Systems, Science & Technology, Vol. 11, No. 2 (2010), pp. 1-8.
- Aravind, S. M., Arto, K. and William, S., Slosh suppression of liquid in a suspended container using robust input shaping, The proceedings of 19th International Congress on Sound and Vibration (2012), pp. 1163-1170.
- Carlos, V. and Joaquin, C., Control of a parametrically excited crane, Proceedings of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (2011), pp. 6703-6708.
- Daniel, P., Dominik, S., Felix, A., Harald, A. and Claus, H., Control of an overhead crane with the controlled lagrangian method, The proceedings of 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (2010), pp. 131-136.
- Fukuda, T., Suzuki, A. and Sibata, H., Active suppression control method of fluid vibrations in a container (2nd report, vibration control of the liquid in transferring a container by considering the rotational motion), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 56, No. 532 (1990), pp. 3259-3266 (in Japanese).
- Hamaguchi, M. and Taniguchi, T., Damping control of sloshing in a liquid container on a cart with an active vibration reducer of 6-DOF parallel linkage (the case of a straight path on horizontal plane), Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 51, No. 2 (2015), pp. 101-109 (in Japanese).
- Kaneshige, A., Kaneshige, N., Hasegawa, S., Miyoshi, T. and Terashima, K., Model and control system for 3D transfer of liquid tank with overhead crane considering suppression of liquid vibration, International Journal of Cast Metals Research, Vol. 21 (2008), pp. 293-298.
- Katsube, H. and Nagai, M., Study of liquid surface wave control of an incline-type automatic pouring machine (2nd report, proposal of preview control by rotation on transfer), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 67, No. 658 (2001), pp. 1792-1798 (in Japanese).
- Katsube, H. and Nagai, M., Study of liquid surface wave control of an incline-type automatic pouring machine (3rd report, cooperative control of incline control and liquid surface control), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 68, No. 670 (2002), pp. 1747-1752 (in Japanese).
- Mahdieh, A., Hassan, Z. and Mahdi, A. S., Anti-swing control of a double-pendulum-type overhead crane using parallel distributed fuzzy LQR controller, International Journal of the Physical Sciences Vol. 6 (2011), pp. 7850-7856.
- Miyoshi, T., Kojima, H. and Terashima, K., Development of vertical power-assisted crane system considering absolute stability, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (2006), pp. 4902-4908.
- Okatsuka, H., Shibuya, R., Noda, Y., Matsuo, Y. and Terashima, K., Sloshing suppression control by using model predictive control in liquid container transfer system, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 77, No. 783 (2011), pp. 4068-4080 (in Japanese).
- Paweł, H., The crane control systems: a survey, The proceedings 17th International Conference of Methods and Models in Automation and Robotics (2012), pp. 505-509.
- Shibuya, R., Okatsuka, H., Noda, Y. and Terashima, K., Sloshing suppression control with designed transfer and tilt input by using generalized predictive method, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 49, No. 1 (2013), pp. 134-141 (in Japanese).
- Terashima, K., Hamaguchi, M. and Kaneshige, A., Optimal control of three dimensional liquid container transfer and robustness of sloshing suppression for the change of liquid level and velocity, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol.9, No.4 (1996), pp. 162-171 (in Japanese).
- Yano, K., Ogura, N. and Terashima, K., Starting control with vibration damping by hybrid shaped approach considering time and frequency specifications, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 37, No. 5 (2001), pp. 403-410 (in Japanese).
- Zang, Q., Huang, J. and Liang, Z., Slosh suppression for infinite modes in a moving liquid container, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 1 (2015), pp. 217-225.