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)

福田 敏男^{*1}, 鈴木 明人^{*2}, 柴田 碧^{*3}

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)

Toshio FUKUDA, Akito SUZUKI and Heki SIBATA

This paper describes an active control method to suppress liquid vibration while transferring a container. We propose a basic model of a mobile robot for the transportation of liquid using a container. This model considers the rotational motion of the liquid in a container in a case in which the liquid is accelerated horizontally. The model is a linearized lumped model with two degrees of freedom, such as one rotation and one directional transferring motion. Based on this basic model, we propose the application of the optimal control method. The efficiency of this control method for suppressing the liquid vibration in a container is shown by simulation and experiment in comparison with the other control methods in this paper.

Key Words: Automatic Control, Rotational Motion, Liquid Vibration, Multi-Degree-of-Freedom System, Optimal Control

1. はじめに

現在, 石油・化学プラントにおいて, 石油な薬品等の液体やガスは巨大な貯蔵タンクに貯えられ, 輸送する場合は敷地内にはりめぐらされた配管を通して行われている。しかしこのようなプラントでは, その貯蔵タンクや配管の個々の使用目的は限られていること, 設備が大きいために一部の構造の変更といった改良, 増設は困難であることなどから, 多目的な用途に対応することはできない。そこで, 多品種小量生産をめざした柔軟性の高いプラントとして, パイプレスプラントの研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。これは, 自走式リアクタおよび加熱機, 冷却機等の各機能を備えた作業ステーションから構成され, 現在はこのパイプレスプラントの運転, 管理についての研究が主に行われている⁽¹⁾。しかし, このプラントを実現するにあたってのさまざまな問題点の一つとして, 自走式リアクタによる液体搬送時の事故を考える必要がある。つまり, 液

体搬送の際の自走式リアクタ内部液体の振動によってタンクの破壊, 転倒等の事故から, プラントの火災といった大事故になる危険性があることから, 事故防止のために液体搬送における内部液体の振動抑制が必要になる。そこで本研究では, この様な液体搬送時の液体振動抑制をアクティブに行うことにする。前報の液体容器の液位の適応振動抑制制御の研究⁽³⁾において示したように, 1自由度の移動機構を持つ液体容器による内部液体の振動抑制の効果はある程度確認することができたので, 本報では液体搬送に用いる移動用ロボットとして容器の回転を伴う多自由度系の搬送システムを研究対象にする。構造としては, 移動機構のほか液体容器の持つ回転モーメントを考慮し, 容器が下端の中心を軸として移動方向の前後に回転できるようになっている。本研究では, まずこの移動用ロボットによる液体搬送のモデル化を行ったが, この時仮定として運動は $x-y$ 鉛直平面にのみ拘束されることにし, 液体振動としては Housner モデルを用いて, 線形化された鉛直面内の一次振動についてのみ考慮することにする。そして, このモデルに基づいて制御則を最適制御の理論を用いて考案し, この制御則を用いてシミュレーションおよび実験によって液体搬送時の液位振動の抑制ができることを示す。

* 原稿受付 平成2年3月30日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中千種区不老町1)。

^{*2} 学生員, 東京理科大学大学院 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)(現 日産自動車)。

^{*3} 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

2. 基本モデルと動特性方程式

まず、液体搬送の概念であるが、図1に示すような不整地を走行するサスペンションのついた移動用ロボットを考えてみた。図の上段に示すように、移動の際の加速度の変化により液体が振動し、容器に対し慣性力や液体振動による変動力等を及ぼす。さらに、容器中の液体による回転モーメントが生じ、容器が大形になるにつれて移動の際のロボットの転倒等の問題がでてくる。そこで本研究では、図の下段に示すように容器の回転に対して上手に制御を行うことによって、より有効な効果を期待できるのではないかと考えて、図2に示すような基本モデルを提案する。この基本モデルでは、運動は x - y 平面にのみ拘束され、移動方向は x 軸方向にとる。この時、地面に働く摩擦等はいっさい考慮しない。また、液体振動は本来非線形であるが、本研究では Housner モデル⁽⁴⁾を用いて一次振動モードのみ考慮した線形のばね-質点系で表すことにした。この Housner モデルでは次の仮定⁽⁵⁾を用いている。

- (1) 液体の運動は x - y 平面にのみ拘束され、液体容器は矩形の剛体壁からなっているとす。
- (2) 液体は非圧縮性とし、粘性は考慮しない。
- (3) 液体振動における液面変位は微小であるとす。

Housner モデルでは、水平加速度を受けた時に慣性力として容器壁面に作用する部分と液体振動による変動力として作用する部分とに分けて、各々の作用点および力の大きさが等しくなるように各質点の質量を決定してある。また、モデルの固有振動数は揺動の一次の固有振動数と等しくなるようにばね定数を決めてある。

この Housner モデルを用いる理由して、液体が容器に及ぼす力とその作用点を求める時に、容器下端からの回転（転倒）モーメントを考慮していることが挙

図1 容器の液体搬送概念

げられるが、本研究で用いる基本モデルでは、液体揺動や慣性力が容器に及ぼす回転モーメントの影響があえて出るように、容器下端の中心点を通る x - y 軸に垂直な軸回りに容器を回転できるようにする。しかし、この回転角 θ を与えた時の Housner モデルの液体振動に対する妥当性を確保するために、 θ は微小にとることにする。また、回転方向に対して k_1 のばね定数を持つ復元力を設ける。そして、この基本モデルに対する制御入力、移動用のアクチュエータと容器回転用のアクチュエータによって行うことにする。図2に示した基本モデルの動特性方程式は、次のように示すことができる。この方程式は、容器の回転を含むために非線形になる。

$$\begin{aligned}
 & (m_0 + m_1 + m_2)\ddot{x}_0 + m_2\ddot{x}_2 \cos \theta \\
 & + (m_2 h_2 \cos \theta - m_2 x_2 \sin \theta + m_1 h_1 \cos \theta)\ddot{\theta} \\
 & - (m_2 h_2 \sin \theta + m_1 h_1 \sin \theta + m_2 x_2 \cos \theta)\dot{\theta}^2 \\
 & - 2m_2 \dot{x}_2 \dot{\theta} \sin \theta = u_f \\
 & m_2 \ddot{x}_0 \cos \theta + m_2 \ddot{x}_2 + m_2 h_2 \ddot{\theta} - m_2 x_2 \dot{\theta}^2 \\
 & + k_2 x_2 - m_2 g \sin \theta = 0 \\
 & m_2 (h_2 \cos \theta - x_2 \sin \theta)\ddot{x}_0 + m_1 h_1 \ddot{x}_0 \cos \theta \\
 & + m_2 h_2 \ddot{x}_2 + m_2 (h_2^2 + x_2^2)\ddot{\theta} + m_1 h_1^2 \ddot{\theta} \\
 & + 2m_2 x_2 \dot{x}_2 \dot{\theta} - m_2 g (h_2 \sin \theta + x_2 \cos \theta) \\
 & - m_1 g h_1 \sin \theta + k_1 \theta = u_r
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ただし、

- m_0 : 容器および移動用装置の質量
- m_1 : 液体の固定水の質量
- m_2 : 液体の自由水の質量
- k_1 : 容器の回転方向の復元力（回転中心からばねの距離を a とすると、 $k_1 = k'_1 a^2$ ）
- k_2 : 自由水の復元力
- h_1 : m_1 の容器下端からの作用点の高さ
- h_2 : m_2 の容器下端からの作用点の高さ
- x_0 : 容器の x 方向の変位
- x_2 : 自由水の変位

図2 基本モデル

θ : 容器の回転角

u_f : x 方向に対する制御入力

u_T : 回転方向に対する制御入力

3. 制 御 方 法

3.1 固定フィードバックゲインによる制御

以上に示した動特性方程式を基に状態方程式を導くことにする。この時、動特性方程式は非線形であるから、Housner モデルにおける仮定および基本モデルにおける仮定を用いて線形近似する。そして、状態量を $x = (x_0, x_2, \theta, \dot{x}_0, \dot{x}_2, \dot{\theta})^T$ と定めると状態方程式を次式で表すことができる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} & & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{12} & a_{13} & & \\ 0 & a_{22} & a_{23} & & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & & \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}$$

$$a_{12} = (h_1 k_2 - m_2 g - h_2 k_2) / m_0 h_1$$

$$a_{13} = (k_1 - (m_1 + m_2) h_1 g) / m_0 h_1$$

$$a_{22} = (-m_0 m_1 h_1^2 k_2 + m_1 m_2^2 h_1 g + 2m_1 m_2 h_1 h_2 k_2 - m_1 m_2^2 h_2 g - m_1 m_2 h_2^2 k_2 - m_1 m_2 h_1^2 k_2 - m_0 m_2^2 h_2 g - m_0 m_2 h_2^2 k_2) / m_0 m_1 h_1^2$$

$$a_{23} = (-m_0 m_1 h_1 h_2 g + m_0 m_1 h_1^2 g - m_1 m_2 h_1 h_2 g - m_1 h_1 k_1 + m_1 h_2 k_1 + m_1 m_2 h_1^2 g + m_0 h_2 k_1 - m_1^2 h_1 h_2 g + m_1^2 h_1^2 g) / m_1 m_0 h_1^2$$

$$a_{32} = (-m_1 h_1 k_2 + m_1 m_2 g + m_1 h_2 k_2 + m_0 m_2 g + m_0 h_2 k_2) / m_1 m_0 h_1^2$$

$$a_{33} = (m_1 h_1 g (m_1 + m_2 + m_0) - k_1 (m_1 + m_0)) / m_0 m_1 h_1^2$$

$$b_{11} = 1 / m_0$$

$$b_{12} = -1 / m_0 h_1$$

$$b_{21} = (h_2 - h_1) / m_0 h_1$$

$$b_{22} = (m_1 h_1 - m_1 h_2 - m_0 h_2) / m_0 m_1 h_1^2$$

$$b_{31} = -1 / m_0 h_1$$

$$b_{32} = (m_1 + m_0) / m_1 m_0 h_1^2$$

$$u = (u_f, u_T)^T$$

さらに、観測量 y を実験装置を考慮して次のようにとる。

$$y = (x_0, x_2, \theta, \dot{x}_0, \dot{x}_2, \dot{\theta})^T \quad (3)$$

y は、観測マトリックスを C とおくことにより観測方程式として表すことができる。

$$y = Cx \quad (4)$$

ただし、

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

このシステムに対し完全状態フィードバック制御を行うためには、検出できない状態を推定する必要があるが、今仮にすべての状態を観測できるとして、次のように制御入力を行うことにより、フィードバック制御系を構成することができる。

$$u = \begin{bmatrix} u_f \\ u_T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_f \\ K_T \end{bmatrix}^T (x - x^*) \quad (5)$$

ただし、

x^* = 目標値ベクトル

$$K_f = (g_{f1}, g_{f2}, g_{f3}, g_{f4}, g_{f5}, g_{f6})^T$$

$$K_T = (g_{T1}, g_{T2}, g_{T3}, g_{T4}, g_{T5}, g_{T6})^T$$

この K_f, K_T は、フィードバックゲインである。このゲインを適当に調節することにより、システムの動特性を望ましく変えることができる。しかし、系の安定性に関してはこのフィードバックゲインの選び方に依存され、どのようにゲインの選択を行うかは経験による。図3に、フィードバック制御系のブロック線図を示す。

3.2 最小次元オブザーバ⁽⁶⁾の設計 さて、本研究に用いるシステムで観測量は式(3)で与えられており、完全状態フィードバック制御を行うためには、検出できない状態を推定する必要がある。

そこで、今回は最小次元オブザーバを用いることにした。最小次元オブザーバは次のように構成される。

今、 n 次元の状態方程式と、 $\text{rank } C = m$ を満たす観測方程式からなるシステムがある時、適当な $(n-m) \times n$ 行列 T を次式を満たすように選ぶ。

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix} = n \quad (6)$$

そこで、 $(n-m)$ 次のオブザーバを次のように構成する。

$$\dot{z} = Dz + Ey + Ju \quad (7)$$

図3 フィードバック制御系のブロック線図

ただし,

$$z \in R^{n-m}, D \in R^{(n-m) \times (n-m)}, E \in R^{(n-m) \times m}, \\ J \in R^{(n-m) \times r}, r: \text{入力ベクトル次数}$$

この時, 各係数行列は, 次の条件を満たすように選ぶ.

$$(1) \quad TA - EC = DT, J = TB \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$(2) \quad D \text{ は安定行列}$$

式(7), 式(8), およびシステム方程式より, 状態 x は次のように得られる.

$$x = \begin{bmatrix} T \\ C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} T \\ C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e^{Dt}(Tx_0 - z_0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし, x_0 および z_0 は各状態の初期値である. そして, D は安定行列に選んでいるので, 式(9)右辺第2項は時間とともに零に収束し, 状態 x が出力 y とオブザーバ出力 z より推定される.

本研究にて用いる最小次元オブザーバは, 構成されるシステムの可観測性は保証されているので, 式(2), (4)より次のように設計される.

$$\dot{z} = -\beta z + (a_{22} - \beta^2)x_2 + a_{23}\theta \\ + b_{21}u_f + b_{22}u_r \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} \beta \\ 1 \end{bmatrix} x_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

そして, この式(10), (11)中の $\beta(>0)$ を適当に選ぶことにより, $\hat{x}_2$ を推定することができる.

3.3 最適制御系の設計 先に示した固定フィードバックゲインを用いた制御のゲインの選択方法では, ゲインの選択と制御効果の関係において不明な点が多く, 有効な制御効果を期待するのが困難である. そこで本研究では, より有効な制御効果を得るために適当な評価関数を最小にするようにフィードバックゲインの決定を行う最適制御⁷⁾の理論を用いることにした. 今, 2次形式評価関数を次式で与える.

$$J = \int_0^\infty (\|x\|_Q^2 + \|u\|_R^2) dt \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし, Q は非負定対称行列, R は正定対称行列であり, 評価関数における重み行列になっている. この評価関数を最小にする最適制御入力 u は次のように得られる.

$$u = -R^{-1}B^TPx \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで行列 P は式(14)で示すリカッチ方程式の正定対称解であり, A, B が可制御の時に P は一意に決定される.

$$A^TP + PA + Q - PBR^{-1}B^TP = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

このリカッチ方程式の解が求められれば, 式(13)のように制御入力を決定することができ, また最適レギュレータを含む閉ループ系の安定性は保証されているので, ゲインの選択方法として非常に明解な方法と言える. しかし, この理論を用いる仮定として, A, B マトリックスのパラメータがすべて既知でなければならないことが挙げられる.

4. シミュレーションおよび結果

以上に示した制御方法を用いて, パーソナルコンピュータによるシミュレーションを行った. シミュレーションにおける制御対象としては, 図2に示した基本モデルの線形化を行ったものを用いることにする. 比較のために, 図4に容器の回転を考慮しないモデルに対するシミュレーションも行った. また, 式(10), (11)により最小次元オブザーバによる検出できない状態の推定を行った. モデルパラメータは次の3種類を用いた.

(1) 液位 10 cm の時,

$$m_0 = 3.0 \text{ kg} \\ m_1 = 0.325 \text{ kg} \\ m_2 = 0.290 \text{ kg} \\ H_1 = 0.037 \text{ m} \\ H_2 = 0.058 \text{ m} \\ k_1 = 20.0 \text{ N/m} \\ k_2 = 41.405 \text{ N/m}$$

(2) 液位 8 cm の時,

$$m_0 = 3.0 \text{ kg} \\ m_1 = 0.215 \text{ kg} \\ m_2 = 0.269 \text{ kg} \\ H_1 = 0.030 \text{ m} \\ H_2 = 0.044 \text{ m} \\ k_1 = 20.0 \text{ N/m} \\ k_2 = 35.64 \text{ N/m}$$

(3) 液位 12 cm の時,

$$m_0 = 3.0 \text{ kg}$$

図4 容器の回転を考慮しないモデル

$$m_1=0.446 \text{ kg}$$

$$m_2=0.302 \text{ kg}$$

$$H_1=0.045 \text{ m}$$

$$H_2=0.073 \text{ m}$$

$$k_1=20.0 \text{ N/m}$$

$$k_2=44.82 \text{ N/m}$$

そして、最適ゲインを決める重み行列 Q, R は、すべての場合に対して次のように決めておく。

$$Q=\text{diag}(500, 100, 10, 50, 60, 10)$$

$$R=I(2 \times 2), (I: \text{単位行列}) \dots\dots\dots (15)$$

以上の条件の基に、次に示すようなシミュレーションをそれぞれ行った。

(1) 容器の移動だけを考慮した制御。つまり液体、および容器の回転に対する状態フィードバックは行わない。この時の液位は 10 cm に設定。結果を図 5 に示す。

図 5 シミュレーション(1)の結果

図 6 シミュレーション(2)の結果

(2) 容器の回転を考慮しないモデル (図 4) に対して行った最適制御の結果。この時、 $Q=\text{diag}(500, 100, 50, 60)$, $R=1$ と置いて、式(15)と条件を合わせて行った。液位は 10 cm に設定。結果を図 6 に示す。

(3) 容器の回転を含めた基本モデルに対して固定フィードバック制御を行った結果。液位は 10 cm に設定。結果を図 7 に示す。この時選んだフィードバックゲインは、以下に示すとおりである。

$$g_{f1}=25.0, g_{f2}=-5.0, g_{f3}=-1.0$$

$$g_{f4}=15.0, g_{f5}=-2.0, g_{f6}=-0.2$$

$$g_{T1}=0.1, g_{T2}=-10.0, g_{T3}=5.0$$

$$g_{T4}=1.0, g_{T5}=1.0, g_{T6}=1.0$$

(4) 液位が 10 cm の系に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 10 cm の系を制御した結果。結果を図 8 に示す。

(5) 液位が 10 cm の液位に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 8 cm の系を制御した結果。

(6) 液位が 10 cm に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 12 cm の系を制御した結果。

(7) 液位が 8 cm の系に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 8 cm の系を制御した結果。

(8) 液位が 12 cm の系に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 12 cm の系を制御した結果。

そして、これらのシミュレーション結果を比較するために、数値評価を行う。まず、各々の液位の誤差の二乗の平均を取り、シミュレーション結果 1 (容器の移動のみを考慮した制御) の時を 1.0 と正規化したときの各々の制御効果を表 1 に示す。さらに、この表では式(12)に示した評価関数の値を実際に計算してみた。

図 7 シミュレーション(3)の結果

この表を見てまず言えることは、結果(2)と結果(4)の容器の回転を考慮した場合としない場合の比較であるが、表1の評価を見る限り回転を考慮した場合のほうが制御効果があることがわかる。また図6を見ると、制御入力 u_f の変動が大きく、一つのアクチュエータにかかる負担が大きくなっていることが確認できる。

また、結果(3)と結果(4)を比較すると固定フィードバック制御に比べて最適制御の有効性を確認できる。

表1に示した評価関数 J の値を見ると、結果(4)、(5)、(6)においていちばん J が小さいのは、液位10 cmの系に対して求めた最適ゲインを用いて液位12 cmの系に制御を行った場合であるが、結果(8)の液位12 cmの系に対する最適ゲインで液位12 cmに制御した場合の J はもっと小さくなっている。つまり、

表1 シミュレーション結果の数値評価

Simulations		$\bar{e}^2$	J
without Liquid Vibration Control (Water Level 10cm)		1.000	—
Optimal Control without Rotation (Water Level 10cm)		0.234	—
Linear Feedback Control (Water Level 10cm)		0.355	—
Optimal Control for Water Level 10cm	used in case 10cm	0.166	499.926
	used in case 8cm	0.211	499.947
	used in case 12cm	0.140	499.899
Optimal Control for Water Level 8cm (Water Level 8cm)		0.206	499.941
Optimal Control for Water Level 12cm (Water Level 12cm)		0.143	499.086

図8 シミュレーション(4)の結果

各液位によって Q, R を与えたときの評価関数の最小値は、決まっており、それはやはりそれぞれの系によって求めた最適ゲインを用いた制御によって達成される。よって液位の誤差のみを見ると必ずしも希望する最適な結果がでていないことがわかる。

5. 実験および結果

本研究では、図9に示すような実験装置により実験を行った。構造は次のようなものである。アクチュエータは、移動用と容器回転用の2個用いる。容器回転用のアクチュエータは容器取付台に固定され、直接容器回転軸に連結されている。移動機構は、容器取付台の下部に取付けられているスラストベアリングにより丸棒のレールを支持し、レール方向にスライドできるようになっている。レールを両端で固定するためのケーシングには各々プーリが取付けられ、片側のプーリには移動用アクチュエータが取付けられている。そしてプーリに歯付きベルトをかけて、この歯付きベルトに容器取付台を固定して容器が移るようになっている。制御に用いる状態としては、各アクチュエータに取付けられているエンコーダより、容器の移動変位と速度および容器の回転角と角速度を検出する。さらに液位に対しては、白金線を2本平行に並べて垂直に液体につけておくセンサを用いることにした。これは、液位の変動により2本の白金線の間の抵抗値の変化が起こることを利用して液位を測るセンサである。また、液位の速度は、サンプリング時間を短くするために液位の微分値を用いた。ノイズの影響はたいして問題にならなかった。実験装置のシステム構成を図10に示す。そして、実験もシミュレーションと同様に次のように行った。ただし、実験での評価関数 J の重み Q, R は次の値を用いた。

$$Q = \text{diag} (50, 30, 10, 15, 20, 5)$$

$$R = I(2 \times 2) \dots \dots \dots (16)$$

図9 実験装置の外観

図 10 実験システム構成

表 2 実験結果の数値評価

Experiments		$\bar{e}^2$
without Liquid Vibration Control (Water Level 10cm)		1.000
Optimal Control without Rotation (Water Level 10cm)		0.368
Linear Feedback Control (Water Level 10cm)		0.351
Optimal Control for Water Level 10cm	used in case 10cm	0.156
	used in case 7cm	0.180
	used in case 13cm	0.183
Optimal Control for Water Level 7cm (Water Level 7cm)		0.230
Optimal Control for Water Level 13cm (Water Level 13cm)		0.151

図 11 実験(1)の結果

図 13 実験(3)の結果

図 12 実験(2)の結果

図 14 実験(4)の結果

(1) 容器の移動だけを考慮した制御。つまり液体、および容器の回転に対する状態フィードバックはいっさい行わない。この時の液位は 10 cm に設定。結果を図 11 に示す。

(2) 容器の回転を考慮しない場合の最適制御の結果。この時、 $Q = \text{diag}(50, 30, 15, 20)$, $R = 1$ と置いて行った。液位は 10 cm に設定。結果を図 12 に示す。

(3) 容器の回転を含めた基本モデルに対して固定フィードバック制御を行った結果。液位は 10 cm に設定。結果を図 13 に示す。この時選んだフィードバックゲインは、以下に示すとおりである。

$$g_{f1} = 8.0, g_{f2} = -5.0, g_{f3} = -1.0$$

$$g_{f4} = 8.5, g_{f5} = -3.0, g_{f6} = -2.0$$

$$g_{r1} = 0.0, g_{r2} = -20.0, g_{r3} = 3.0$$

$$g_{r4} = 0.5, g_{r5} = 2.0, g_{r6} = 2.0$$

(4) 液位が 10 cm の系に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 10 cm の系を制御した結果。結果を図 14 に示す。

(5) 液位が 10 cm の液位に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 7 cm の系を制御した結果。

(6) 液位が 10 cm に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 13 cm の系を制御した結果。

(7) 液位が 7 cm の系に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 7 cm の系を制御した結果。

(8) 液位が 13 cm の系に対して求めた最適ゲインを用いて、液位が 13 cm の系を制御した結果。

さらに、表 2 に各々の液位の誤差の二乗平均を取り、結果(1)の場合を 1.0 と正規化したときの各々の制御効果を示す。

表 2 より、やはり固定フィードバックゲインによる制御の効果は認められるものの、同じ条件で行った最適ゲインによる制御の効果がより優れていることが実験でも確認できた。また、容器の回転を考慮した系に対する制御効果よりも、回転を考慮しない系に対する制御の効果が無いのと同時に、移動用アクチュエータに対する負担が大きいことが図 11 より確認できる。

結果(4)以降の最適ゲインを用いた制御の実験結果に示すように、液体の質量の変化にかかわらずどの結

果も非常に良好な制御効果を確認することができた。実験に用いた容器の範囲内で、液体の質量の変化に対するロバスト性はかなり高いと言えそうである。また、液位を低く設定した時に高次モードの振動が現れ、制御に対して悪影響を及ぼしてしまう事が若干あったが、そのような場合にはゲインの調節によってこの影響を消すことができるので、本研究にて提案した基本モデルの実験装置に対する妥当性については問題はないと言える。

6. ま と め

容器の液体搬送時の液位振動の抑制を行うために、容器の回転を考慮した多自由度系の移動用ロボットによる液体搬送のモデル化を行った。そして、状態フィードバック制御系の設計を行い、シミュレーションおよび実験の両面よりそのアクティブな制御の有効性を確認した。さらに、最適制御の理論を用いてフィードバックゲインの決定を行い、その有効性と容器内の液体質量の変化に対するロバスト性についてシミュレーションおよび実験によって確認することができた。また、容器の回転を考慮しない制御系についても同様にシミュレーションおよび実験を行い、本研究にて提案した構造を持つ移動用ロボットによる液体搬送の有効性を確認することができた。

文 献

- (1) 富田・黒田・石田、バイプレスバッチプラントの分散協調システムによる運転、管理、化学工学協会第 54 年会講演要旨集、(1989)、167.
- (2) 田中・平山・中村・高橋・信江、バイプレス化学工場 HiPS、第 7 回日本ロボット学会学術講演会要旨、(1989)、411.
- (3) 福田・柴田・鈴木、液体容器の液位の適応振動抑制制御の研究、機論、56-522, C (1990)、323.
- (4) Housner, G. W., Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, *Bull. Seism. Soc. Am.*, (1971), 15.
- (5) 伊藤・西脇・矢鍋、わかりやすい工学問題の解決方法、(1986)、154、森北出版.
- (6) 岩井・井上・川路、オブザーバ、(1988)、38、コロナ社.
- (7) 古田・川路・美多・原、メカニカルシステム制御、(1984)、56、オーム社.