

曲線軌道における円筒タンク内液体の 制振搬送制御

浜口 雅史

島根大学総合理工学部電子制御システム工学科

Transfer Control of Liquid in Cylindrical Container Considering the Damping of
Sloshing along a Curved Path

Masafumi HAMAGUCHI

*Department of Electronic and Control Systems Engineering, Interdisciplinary Faculty of Science and
Engineering, Shimane University*

Abstract

This paper presents the modeling and control of transfer of cylindrical liquid container along a curved path. Sloshing of (1,1)-mode in the container is represented by a mechanical model using a spherical pendulum. A two-degree-of-freedom control system is applied to control the sloshing and the container transfer. The feed-forward control input is derived from the preshaping method, and the feedback part is constructed from a LQ controller. The LQ controller's gains are determined through use of a Genetic Algorithm. The usefulness of the present work has been demonstrated through the control simulation and laboratory control experiments.

1. はじめに

鉄鋼・鋳造業における溶湯搬送や注湯後の鋳型の搬送、パイプレス化学プラントにおける自走式混合槽などに代表される液体タンク搬送の自動化は、高効率化・高品質化および安全性の観点から搬送時の液面振動（スロッシング）を抑制し、かつ高速に液体タンクを搬送することが望まれている^{(1)~(3)}。

本論文では、液体搬送に広く用いられている円筒タンクを対象とし、曲線軌道搬送時のスロッシング抑制を考慮した液体搬送制御システムの構築を目的とした。円筒タンク内液体の(1,1)モードスロッシングを球面振り子型モデルにより表現し、この線形近似モデルを搬送制御系設計に用いた。液体タンク搬送制御系を2自由制御系により構築し、フィードフォワード部はPreshaping理論⁽⁴⁾を適用し、フィードバック部はLQ制御により構築した。LQ制御ゲインは、スロッシング振幅と搬送時間を考慮した工学的評価関数を最小とする意味で最適となる制御ゲインを遺伝的アルゴリズム⁽⁵⁾により決定した。搬送制御系の有用性を制御シミュレーションならびに制御実験により明らかにした。

2. スロッシングモデル

Fig. 1 に示す球面振り子型スロッシングモデルにより(1,1)モードスロッシングを表現した。(1,1)モードとは液面がほぼ平面を保ったまま振動するモードである。急激な加減速のない搬送中では、このモードが支配的となる。Fig. 1 において、球面振り子を z-x 平面に写像した写像振り子と z 軸の成す角度を θ 、写像振り子と球面振り子の成す角度を ϕ としている。この2変数についてモデル式を導出し、式(1)を得た。

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{\theta} &= -\frac{g \sin \theta}{\ell \cos \phi} + 2\dot{\theta}\dot{\phi} \tan \phi + 2\dot{\phi} \frac{\dot{x}_L}{R_t} \cos \theta + \frac{\dot{x}_L^2}{R_t^2} \sin \theta \cos \theta - \frac{c_x}{m} \dot{\theta} \cos^2 \theta \\ &\quad + \frac{c_x}{m} \dot{\phi} \sin \theta \cos \theta \tan \phi + \dot{x}_L \cos \theta \left(\frac{\tan \phi}{R_t} - \frac{1}{\ell \cos \phi} \right) \\ \ddot{\phi} &= -\frac{g \sin \phi}{\ell \cos \theta} + 2\dot{\theta}\dot{\phi} \tan \theta \sin^2 \phi - 2\dot{\theta} \frac{\dot{x}_L}{R_t} \cos \theta \cos^2 \phi - \frac{\dot{x}_L^2}{\ell R_t} \cos \phi \\ &\quad + 2\dot{\phi} \frac{\dot{x}_L}{R_t} \sin \theta \sin \phi \cos \phi + \left(\frac{\dot{x}_L^2}{R_t^2} - \dot{\theta}^2 \right) \sin \phi \cos \phi \\ &\quad - \frac{c_y}{m} \dot{\phi} \cos^2 \phi - \frac{\dot{x}_L}{R_t} \sin \theta \cos^2 \phi - \ddot{\theta} \tan \theta \sin \phi \cos \phi \end{aligned} \right. \quad (1)$$

ここで、 m : タンク内液質量、 ℓ : 等価振り長、 R_t : 搬送軌道曲率半径、 c_x, c_y : x, y 方向のスロッシング等価粘性係数、 g : 重力加速度、 x_L : 搬送軌道に沿った台車位置である。進行方向前方壁上の液位変化量 h_x と左側壁上の液位変化量 h_y はそれぞれ以下の式で表される。ただし、円筒タンク内半径を R とした。

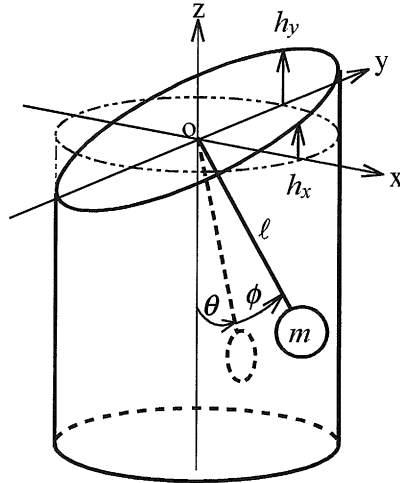


Fig. 1 Spherical pendulum model

$$h_x = R \tan \theta, h_y = R \tan \phi / \cos \theta \tag{2}$$

台車位置に関するモデル式は、台車の駆動モータ特性を1次遅れ系で近似し、式(3)が得られた。

$$\dot{L} = -\frac{\dot{L}}{T_m} + \frac{K_m}{T_m} u \tag{3}$$

ただし、 T_m ：モータ時定数、 K_m ：モータゲイン、 u ：制御入力電圧である。モデルパラメータは、円筒タンク内半径 $R=0.1$ [m]、静止液位 $h_s=0.2$ [m]の条件で実験ならびに解析的に同定した結果、 $\ell=0.0544$ [m]、 $c_x=c_y=1.4$ [Ns/m]、 $m=6.28$ [kg]、 $T_m=0.0149$ [s]、 $K_m=0.0992$ [m/(sV)]となった。ただし、対象液体を水とした。Fig. 2 に搬送軌道を示すが、直線区間1.0 m、半径1.2 mの1/4円弧の曲線区間、そして直線区間1.5 mから成る。

球面振子型スロッシングモデルの妥当性を検証した結果がFig. 3である。台形速度パターンにより液体タンクを目標位置まで搬送したときの液位変化を示している。実験結果とシミュレーション結果は良好に対応しており、本モデルの妥当性を確認することができる。

液位変化が微少、すなわち、 θ, ϕ が微少の時は、 x, y 方向それぞれの単振子の合成により球面振子を表現することができる。このことは、式(1)を線形近似することによっても容易に分かる。以下に線形近似したスロッシングモデル式を示す。ただし、分かりやすくするために、 θ を θ_x と表記した。この線形近似スロッシングモデルを搬送制御系設計に用いる。

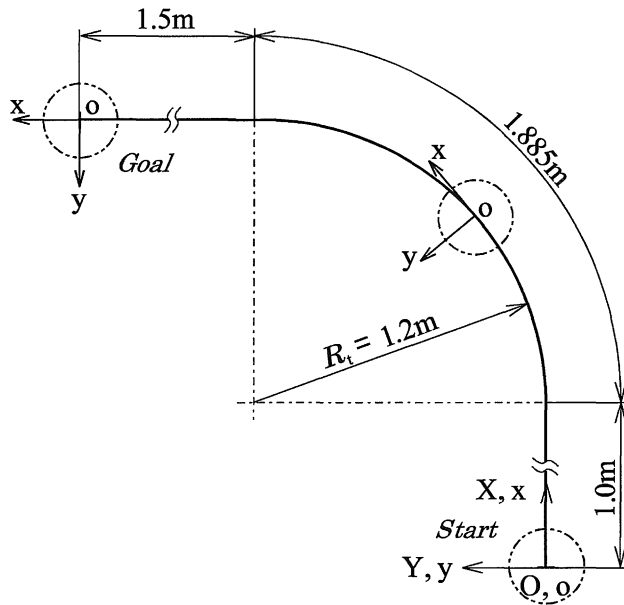


Fig. 2 Transfer path

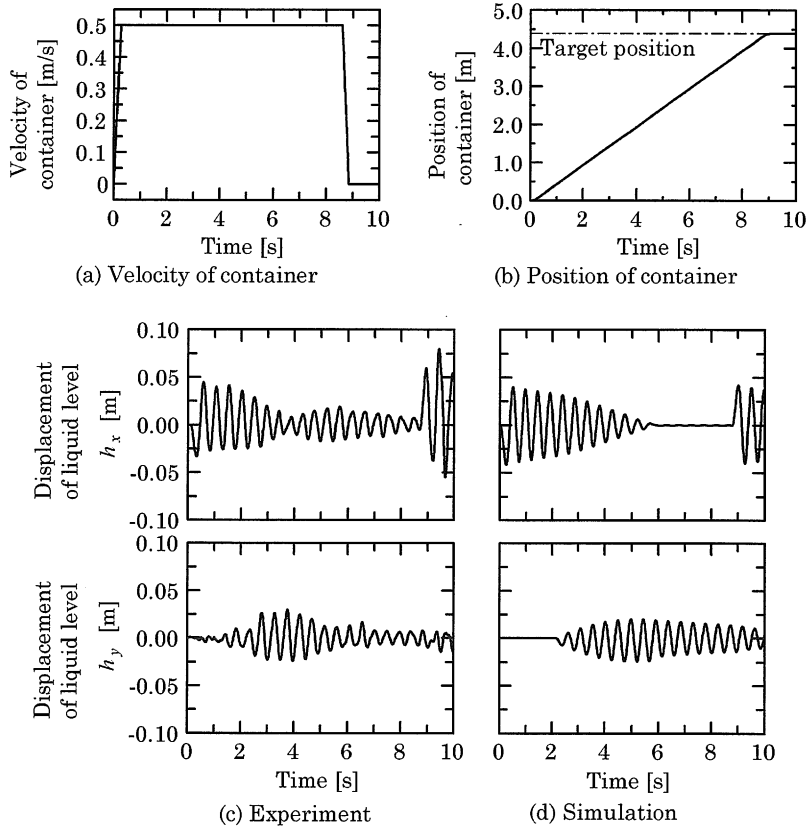


Fig. 3 Verification of model in transfer state

- x 方向のスロッシングモデル

$$\ddot{\theta}_x = -\frac{g}{\ell} \theta_x - \frac{c_x}{m} \dot{\theta}_x - \frac{1}{\ell} \ddot{x}_L, h_x = R\theta_x \quad (4)$$

- y 方向のスロッシングモデル

$$\ddot{\theta}_y = -\frac{g}{\ell} \theta_y - \frac{c_y}{m} \dot{\theta}_y, h_y = R\theta_y \quad (5)$$

ここで、 θ_x : z-x 平面での振り角度、 θ_y : y-z 平面での振り角度である。式(3)~(5)より、振り角度 θ_x は可制御であり、振り角度 θ_y は不可制御であることが容易に分かる。

3. 2 自由度制御系による搬送制御系設計

搬送制御系設計には式(3), (4)のモデル式を用い, 状態を $\mathbf{x}=[\theta_x, \dot{\theta}_x, L, \dot{L}]^T$ とした. 可観測・可制御の状態空間モデルによりフィードバック部の LQ 制御系を構築するので, 不可制御である状態量 θ_y に関する項は状態量に含めず, 直接フィードバック制御を行わないことにした.

3.1 フィードフォワード制御

スロッシングを抑制し, かつ, 台車を目標位置まで搬送するフィードフォワード入力生成に Preshaping 理論⁽⁴⁾を適用した. この理論の基本原理は, 単インパルス入力により励起された振動を ΔT 後の大きさ k のインパルス入力で相殺するというものである. 式(4)の伝達関数は式(6)となり, ΔT と k は式(7)で与えられる⁽⁴⁾.

$$\frac{h_x}{\ddot{x}_L} = \frac{-\frac{R}{\ell}}{s^2 + \frac{c_x}{m}s + \frac{g}{\ell}} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}, k = \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (7)$$

基本入力としての台形速度パターンに対して Preshaping 理論を適用した Preshaping 入力を式(1)の非線形モデルに適用した結果を Fig. 4 に示す. ただし, 最大加減速度 $a=2.0$ [m/s²], 最大搬送速度 $v=0.5$ [m/s], 搬送距離 $d_r=4.385$ [m] である. モデル式は時間刻み 1 ms とした 4 次ルンゲ・クッタ法により数値的に解いた. 最初の直線区間では良好に液面を制振しているが曲線区間に入るとスワーリング (旋回スロッシング) が発生して液位変化量 h_x, h_y が共に振動している. その後の直線区間においても振動は持続し, タンク停止後も振動が若干残っている. しかし, 無制御搬送である Fig. 3 と比較すれば, 搬送時間が ΔT だけ遅くなっているものの液面は十分に制振されている.

3.2 フィードバック制御

フィードバック部を LQ 制御により構築する. LQ 制御によりフィードバックゲイン K_f を決定すれば, フィードバック制御部の安定性は保証されるので, 重み行列 W_x, W_u を求めて LQ 制御ゲイン K_f を決定する. 工学的に意味を持つ式(8)の評価関数を最小とする最適重み行列を遺伝的アルゴリズム⁽⁵⁾により求める.

$$J = \alpha t_f + (1-\alpha) \int_0^{t_f} (|\dot{h}_x| + |\dot{h}_y|) dt \quad (8)$$

ここで, t_f はタンク位置と液位が最終目標値の 2% 以内に整定した時間とし, α は設計者が設定する重みである. ここでは液位変化を重視して $\alpha=0.1$ とした. 式(8)に h_y の情報を含

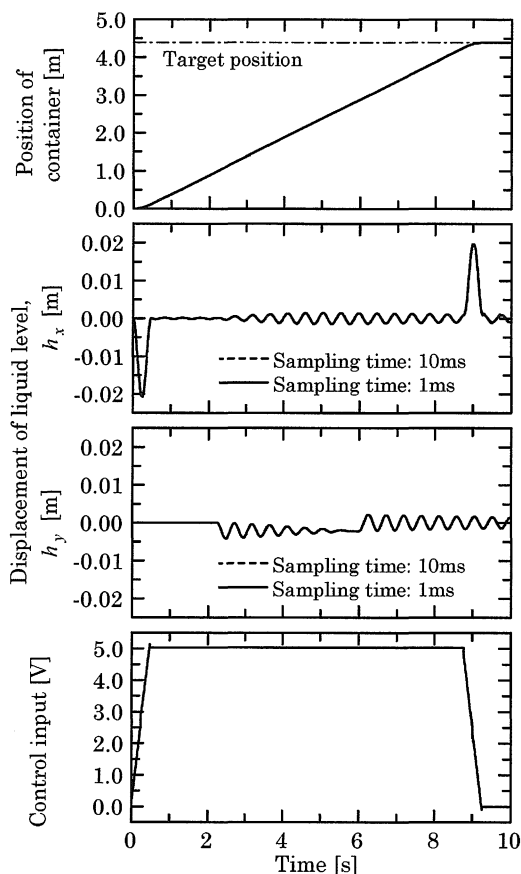


Fig. 4 Simulation results by the preshaping inputs applied in nonlinear model

むことにより、間接的ではあるが h_y を抑制するような搬送制御系を得ることができる。入力に関する重み行列を $W_u = 1.0$ と固定し、状態に関する重み行列を $W_x = \text{diag}[w_{x1}, w_{x2}, w_{x3}, w_{x4}]$ とした。各重み $w_{x1} \sim w_{x4}$ を17ビットの2進数で表現し、先頭から順に $w_{x1} \sim w_{x4}$ を直列結合した総遺伝子長 $17 \times 4 = 68$ ビットとなる遺伝子列を用いた。個体数を21個、上限世代を100世代とし、選択にはエリート保存則とトーナメント方式を用い、1点交叉と1ビット値を反転させる突然変異を用い、それぞれの発生確率を80%、20%とした。

3.3 2自由度制御系

Fig. 5に今回構築した2自由度制御系のブロック線図を示す。実験装置の液体タンクに取り付けたレベルセンサにより液位変化量 h_x, h_y を、台車駆動輪に取り付けたロータリーエンコーダにより台車位置 x_L を検出している。センサ出力には観測ノイズが混入しているので

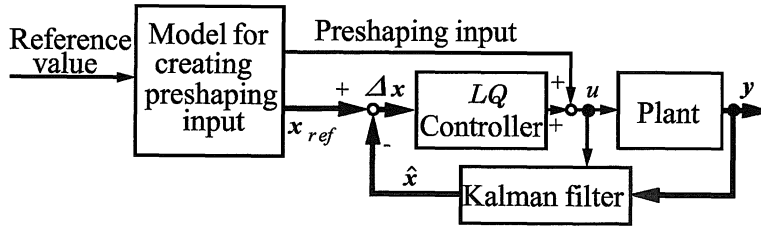


Fig. 5 Two-degree-of-freedom control system

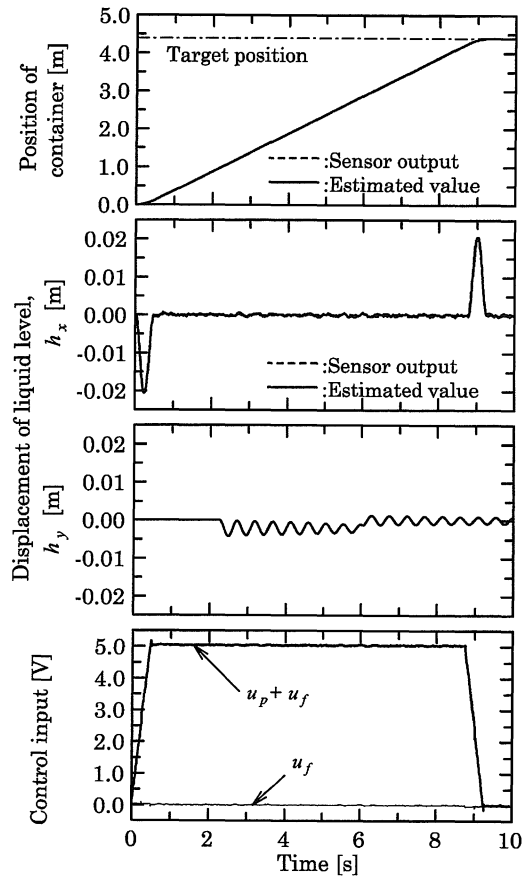


Fig. 6 Simulation results by two-degree-of-freedom control system applied in nonlinear model

カルマンフィルタにより状態推定量 $\hat{\mathbf{x}}$ を求めた。制御サンプリング時間 1 ms で行ったフィードフォワード制御のシミュレーション結果を 10 ms 毎に抽出し、その状態をフィードバック部の目標値 \mathbf{x}_{ref} とし、その Preshaping 入力を u_p とした。フィードバック制御入力は $u_f = K_f(\mathbf{x}_{ref} - \hat{\mathbf{x}}) = K_f \Delta \mathbf{x}$ となり、最終的な制御入力は $u = u_p + u_f$ となる。

4. 搬送制御結果

遺伝的アルゴリズムにより求めた最適 LQ 制御ゲインを持つ 2 自由度制御系による搬送制御シミュレーション結果を Fig. 6 に示す。制御サンプリング時間は 10 ms であり、式(1)～(3)のプラントモデルを時間刻み 1 ms の 4 次ルンゲ・クッタ法により解いた。タンク位置に関しては目標位置に到達しており良好な結果となっている。液位変化量 h_x に関してはフィードバック制御により良好に制振されているが、液位変化量 h_y については可制御ではないために一度発生した振動を制振させることができていない。遺伝的アルゴリズムによって決定した最適 LQ 制御ゲインを式(9)に示しておく。実験においてもシミュレーション同様に良好な結果となった。

$$K_f = [-9.51, -0.900, 1.05, -5.17] \quad (9)$$

5. ま と め

曲線軌道上を搬送する円筒タンク内液体のスロッシングを制振させる搬送制御系を構築した。以下に得られた主な結論を示す。

- (1) 球面振子型モデルにより円筒タンク内液体の(1,1)モードスロッシングを良好に表現できることを示した。
- (2) スロッシング振幅と搬送時間を考慮した工学的評価関数を最小とする最適 LQ 制御ゲインを遺伝的アルゴリズムにより効率的に決定できることを示した。
- (3) 2 自由度制御系によりスロッシングを制振させ、かつ、目標位置まで液体タンクを搬送できることを制御シミュレーションならびに制御実験により確認した。

参 考 文 献

- (1) 寺嶋一彦・浜口雅史・兼重明宏, 鋳物工場自動化のための制御設計技術と応用, 鋳造工学, **69-3** (1997), 257-265.
- (2) 寺嶋一彦, 鋳造業における自動注湯・溶湯搬送の現状, 素形材, **39-6** (1998), 1-8.
- (3) 山形浩実・金子成彦, 移動する円筒タンク内液体のスロッシング抑制制御, 機械学会論文集, **64-621, C** (1998), 1676-1684.
- (4) N. C. Singer and W. P. Seering, Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, Trans. of the ASME, **112**, (1990), 76-82.
- (5) 萩原将文, ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, (1994), 99, 産業図書.