視覚を用いた多項式空間上の受動性に基づく液面振動制御実験

佐藤 正和*・永井 和幸*・酒井 悟*

Pseudo-passivity Based Control on Polynomial Space and Visual Feedback for Liquid Sloshing

Masakazu SATO*, Kazuyuki NAGAI* and Satoru SAKAI*

In this paper, we propose a pseudo-passivity based control on polynomial space. First, we identify a model of a liquid sloshing system using a robotic vision and convert the model into a physical system on a polynomial space. Second, we design a passivity based control with a state-dependent gain to stabilize the horizontal surface asymptotically on polynomial space. Finally, we confirm the validity of the proposed method by visual feedback for the liquid sloshing system.

Key Words: visual systems and control, Hilbert space, sloshing, passivity

1. 緒 言

本論文では、視覚を用いた多項式空間上の受動性に基づく制御法を提案して、液面振動制御問題への応用を述べる。石油・天然ガス・融解させた金属などの液体が満たされた容器が運動されたり変形されたりすると、液面の振動¹⁾（スロッシング）が起こる。液面の振動を効率的に抑制する技術の実現は、資源の乏しいわが国にとって非常に重要である。多数の研究がなされてきた機械振動学分野において、スロッシングは現在も積極的に研究がなされている対象の1つである²⁾。

従来研究は数ベクトル空間上で制御器を設計するため、液面を直線近似した単純な物理モデルや数値モデルを考えたり^{3)~6)}、特殊な初期条件や境界条件を前提として厳密な物理モデルを考えたり⁷⁾することが多かった。

たとえば、矢野・浜口や杉江らは液面を直線近似して単振子モデルや線形時不変系モデルに対する制御法を提案している^{3)~6)}。しかし、1次モードのスロッシングを考慮しているものの、高次モードのスロッシング（空間方向に対する2次モード以上のスロッシング）を考慮して制御することができない。金子らは液面の厳密な物理モデルに対する制御法を提案している⁷⁾。しかし、3次モードのスロッシングを考慮しているものの、初期条件を水平液面、境界条件を円筒水槽とするため、一般の初期条件や境界条件を前提とすることができない。また近年では、ナビエ・ストークス方程式とベッセル関数を元に、液面の高次の振動を定量的に表わす方程式が

導かれている⁸⁾が制御器設計法が与えられていない。

著者らはロボットビジョンを用いて、液面を直線近似したり特殊な初期条件や境界条件を前提としたりすることなく、液面の数値モデルを数ベクトル空間上でなく多項式空間上に構築して制御する方法を提案した⁹⁾。直線近似できない複雑な形状の液面を一般の初期条件や境界条件を前提として考慮することができる。ただし、線形制御系として構築されたため、非線形要素である飽和要素や不感帯要素に対して改善の余地があった。

そこで本論文は多項式空間上の数値モデルを物理モデルへ変換して、受動性に基づく非線形制御系を数ベクトル空間上でなく多項式空間上に構築し、実験にて有効性を実証する。具体的には、まず、実時間計測された画像から特徴量抽出される液面を多項式空間上の1点と同一視する。つぎに、数ベクトル空間上ではなく多項式空間上において既存のシステム同定法を適用して、高次の振動を再現する数値モデルを構築する。さらに、数値モデルを物理モデルであるポートハミルトン系に変換して、平衡点である水平液面を飽和要素や不感帯要素のもとで漸近安定化する非線形制御器を設計する。最後に、視覚制御実験によって提案法の有効性を示す。

本論文では N を自然数全体の集合、 R を実数全体の集合、 R^n を n 次元実ベクトル空間、 $R^{m \times n}$ を m 行 n 列実行列空間とする。 I_n または I を $n \times n$ の単位行列とする。

2. 準 備

2.1 多項式空間^{10)~12)}

数ベクトル空間上を前提とする多くの制御問題とは異なつて、多項式空間上の制御問題を考える。多項式空間は数ベクトル空間と同型なヒルベルト空間であるが、視覚制御系の観点からは両者の違いは重要である。実数 $a, b \in R$ に対して、

* 信州大学大学院工学系研究科 長野市若里 4-17-1

* Faculty of Mechanical Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano

(Received April 7, 2013)

(Revised September 9, 2013)

閉区間 $[a, b]$ 上の実数値連続関数のうち、高々 n 次の多項式 $f(r)$ の全体を $n+1$ 次元多項式空間 $P_{n+1}[a, b]$ と記す。ただし本研究では次数 $n \in \mathbb{Z}_+ := \{0\} \cup \mathbb{N}$ だけでなく離散時刻 $k \in \mathbb{Z}_+$ に依存する時変多項式 $f(r, k)$ を扱う。

多項式空間 $P_{n+1}[a, b]$ はヒルベルト空間であるため、和とスカラー倍、極限操作について閉じており、かつ、任意の2つの多項式 $f_1(r, k), f_2(r, k) \in P_{n+1}[a, b]$ の内積の1つとして

$$\langle f_1(r, k), f_2(r, k) \rangle = \int_a^b f_1(r, k) f_2(r, k) dr \in \mathbb{R}$$

が定義される。 $n+1$ 次元多項式空間 $P_{n+1}[-1, 1]$ の正規直交基底の1つはルジャンドル多項式

$$L_m(r) = \frac{1}{2^{m-1} \cdot (m-1)!} \cdot \frac{d^{m-1}}{dr^{m-1}} (r^2 - 1)^{m-1} \quad (m = 1, \dots, n+1)$$

を用いて

$$e_m(r) := \sqrt{\frac{2m-1}{2}} L_m(r)$$

であるため、時変多項式

$$f(r, k) = \sum_{m=1}^{n+1} \langle f(r, k), e_m(r) \rangle e_m(r) =: \sum_{m=1}^{n+1} a_m(k) e_m(r)$$

の多項式空間上の成分表示 $f(r, k) = (a_1(k), a_2(k), \dots, a_{n+1}(k))^T \in P_{n+1}[-1, 1]$ が得られる。以下、 $a_m(k)$ を形状成分とよぶ。

2.2 数値モデルから物理モデルへの変換¹³⁾

本節では数値モデル（線形時不変系）から物理モデル（ポート・ハミルトン系）への変換方法の1つについて述べる。数ベクトル空間と多項式空間は同型であるため、多項式空間上の成分表示と数ベクトル空間上の成分表示を同一視する。したがって、本節の以下の記述によって、多項式空間上の変換方法、つまり、多項式空間上の数値モデルと物理モデルの関係が与えられる。

物理モデルと代表的な制御（受動性に基づく制御）の状態空間表現

$$\begin{cases} \dot{x} = (J - R) \frac{\partial H^T}{\partial x} + gu & (1) \\ y_s = g^T \frac{\partial H^T}{\partial x} & (2) \\ u = -wy_s \quad (w > 0) & (3) \end{cases}$$

を考える。構造行列 J は歪対称行列、行列 R は半正定対称行列である。ハミルトン関数 H は下に有界なエネルギーを表す。(1) 式に (2) 式、(3) 式を代入すると

$$\dot{x} = [J - R - gwg^T] \frac{\partial H^T}{\partial x} \quad (4)$$

となる。ここで、(4) 式を用いてハミルトン関数 H の時間微分を求めると

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \dot{x}$$

$$\begin{aligned} &\leq -y_s^T w y_s \\ &= -w y_s^2 \\ &\leq 0 \end{aligned}$$

となり、 w の値が正であるのでハミルトン関数 H は増加しない。

一方、数値モデルと代表的な制御（静的フィードバック制御）の状態空間表現

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \\ u = -Ky \end{cases} \quad (5)$$

を考える。ここで行列 A は、

$$\begin{aligned} A &= \frac{A + A^T}{2} + \frac{A - A^T}{2} \\ &= A_1 + A_2 \end{aligned}$$

と書け、 A_1 は対称行列、 A_2 は歪対称行列となる。エネルギーについて $H = \frac{1}{2} x^T x$ と書くと、行列 A が安定行列の場合、数値モデルの状態方程式を物理モデルの状態方程式へ（厳密には適当な座標変換を介して）変換できる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ &= (A_1 + A_2)x + Bu \\ &= (J - R) \frac{\partial H^T}{\partial x} + gu \\ y_s &= g^T \frac{\partial H^T}{\partial x} \\ u &= -wy_s \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、状態推定を用いずに物理モデルの出力 y_s と数値モデルの出力 y が一致する変換方法もあるが、状態推定を用いて (5) 式の制御器を擬似的に設計した従来法⁹⁾ と公正に比較するため、本論文では状態推定を用いて (6) 式の制御器を擬似的に設計する。

3. 多項式空間上のシステム同定とモデル検証

本章では多項式空間上の視覚制御のためのモデリングについて述べる。既存の制御理論は数ベクトル空間上に制御器を設計してきたが、本研究では多項式空間上に制御器を設計するため、視覚される液面の概形である制御対象の出力だけではなく、入力と状態も時変多項式である。

3.1 同定方法と検証方法

デジタルカメラの計測画像から制御対象（液面）を特徴量抽出する。画像面の1点に原点 O を有する直交座標系を与え、各画素の図心と格子点 $(r, s) \in \mathbb{Z}_+^2$ を同一視しておく。各時刻 k の計測画像に対して、 r 座標と s 座標を掃引して実時間で液面

$$\begin{aligned} \partial\Omega(r) &:= \max_{(r,s) \in \Omega} s \\ \Omega &= \{(r, s) \mid r_1 \leq R(r, s) \leq r_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_1 &\leq G(r, s) \leq g_2, \\ b_1 &\leq B(r, s) \leq b_2 \end{aligned}$$

を抽出する．ここで各時刻 k の $R(r, s), G(r, s), B(r, s)$ は各画素の RGB 値であり， r_i, g_i, b_i ($i = 1, 2$) は液体の特徴量の閾値である．そのうえで，液面 $s = \partial\Omega(r)$ から $n+1$ 次元多項式空間 $P_{n+1}[-1, 1]$ へ降ろした垂線の足の形状成分

$$a_m = \langle \Omega(r), e_m(r) \rangle$$

を実時間で計算して多項式空間上の観測出力 $y(r, k) = (a_1(k), a_2(k), \dots, a_{n+1}(k))^T$ を得る．ここで水平液面が多項式空間上の原点 $y(r, k) = (0, \dots, 0)^T$ と対応する．

本研究では多くのスロッシング制御系と同様に 1 入力系を考え，多項式空間上の制御対象を

$$\begin{cases} x(r, k+1) = \mathcal{A} \circ x(r, k) + \mathcal{B} \circ u(r, k) \\ y(r, k) = \mathcal{C} \circ x(r, k) + \mathcal{D} \circ u(r, k) \\ = (a_1(k), \dots, a_{n+1}(k))^T \end{cases}$$

とする．ここで記号 $\circ$ は演算子であり，多項式空間の間の写像 $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}$ が作用することを示す．状態 $x(r, k)$ は n_x 次多項式，操作量 $u(r, k)$ は 0 次多項式，観測出力 $y(r, k)$ は $n_y (= n+1)$ 次多項式である．

制御対象を離散時間線形時不変系とし，既存のシステム同定法を多項式空間上に適用して，出力と入力より多項式空間の間の写像 $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}$ の表現行列 A, B, C, D を同定する．ここで出力だけでなく，入力も多項式であって時変の切片を有する傾き 0 の直線と対応することに注意する．システム同定のための入力としてつぎの成分表示を有するチャープ信号¹⁴⁾

$$u(r, k) = A_I \cos\left(2\pi T_{\text{sam}} k \left(\omega_1 + \frac{\omega_2 - \omega_1}{M} T_{\text{sam}} k\right) + \theta_0\right) \times e_1(r) \quad (7)$$

を選定する．ここで A_I は振幅， ω_1 は初期周波数 [Hz]， ω_2 は終端周波数 [Hz]， M は入力印加時間 [s]， θ_0 は初期位相 [rad]， T_{sam} はサンプリング時間 [s] である．ARX 法を用いて入力 u から出力の形状成分 a_m までの伝達関数 $G_m(s)$ を同定する．打ち切り次数は可制御性・可観測性が成立する数とする．

(7) 式を検証入力としてモデル $G_m(s)$ の出力と実出力とを比較して，FIT 率を評価指標としてモデル検証する．ここで本論文では $A_I = 0.8 \text{ V}$ ， $\omega_1 = 7.5 \text{ Hz}$ ， $\omega_2 = 0.175 \text{ Hz}$ ， $M = 600 = 60 \times 10 \text{ s}$ ， $\theta = -1/2\pi \text{ rad}$ とする．

3.2 同定・検証装置

Fig. 1 に開発した実験装置の外観を示す．また Fig. 2 に実験装置の構成を示す．制御装置は制御周期 $1/T_{\text{sam}} = 15 \text{ Hz}$ で実時間化された制御 PC (OS: Linux, CPU: 2.66 GHz)，D/A 変換ボード (12 bit)，画像処理ボード (RGB $2^8 \times 2^8 \times 2^8 \text{ bit}$)，デジタルカメラ (640×480 pixel)，室内蛍光灯 (25 lx)，DC モータ (110 W, 0.183 Nm/A, 1.5 A/V, 減速比 31.155) で構成される．制御対象は流動パラフィン (0.868 g/mL (20°C), 12.15 L) と着色水 (青色, 0.998 g/mL (20°C), 8.10 L, 液深 120 mm)

Fig. 1 The appearance of the experimental setup

Fig. 2 The system configuration

Fig. 3 The identification input $u(k)$ (500–600 s)

の入った水槽 (ガラス板，横幅 450 mm × 奥行き 180 mm × 高さ 300 mm)，水槽とデジタルカメラを載せる台車，モータの出力トルクを台車に伝達するラックとピニオン (ピッチ円直径 100 mm) で構成される．水槽の正面全体が捉えられる箇所にデジタルカメラが配置されている¹⁵⁾．制御対象への指令入力電圧は $\pm 5 \text{ V}$ 以上で飽和し，また約 $\pm 0.2 \text{ V}$ 以内で不感帯に入る．

指令電圧 1 V あたりの DC モータのトルクは $0.183 \times 1.5 \times 31.155 = 8.5520 \text{ Nm/V}$ となり，ピッチ円直径 0.05 m より指令電圧 1 V あたりの DC モータの力は $8.5520/0.05 = 172.04 \text{ N/V}$ となる．Fig. 3 に同定入力 (7) の成分表示を示す．

3.3 同定検証

まず，Fig. 4 に計測画像の一例を示す．Fig. 5 に特徴量抽出された液面を黒点， $n_y = 9$ 次の観測出力 $y = (a_1(k), \dots,$

Fig. 4 An image of aquarium

Fig. 5 The output of feature extraction and shape component

Fig. 6 Time response of ℓ_2 -norm of the output (500–600 s)

$a_{10}(k)^T$ を実線, $n_y = 3$ 次の観測出力 $y = (a_1(k), \dots, a_4(k))^T$ を破線, $n_y = 1$ 次の観測出力 $y = (a_1(k), a_2(k))^T$ を一点鎖線で示す. 計測画像のほぼ中央に直線近似が困難な形状の液面が確認され, 次数の高い観測出力 y ほど液面の概形を反映していることが確認される. ここで特徴量抽出における閾値を試行錯誤的に $(r_1, r_2, g_1, g_2, b_1, b_2) = (12, 100, 12, 150, 150, 255)$ とした.

つぎに同定実験・検証実験の結果を示す. Fig. 6 に 9 次の観測出力の ℓ_2 ノルム

$$\|z(k)\|_{\ell_2} = \sqrt{a_1^2(k) + a_2^2(k) + \dots + a_{10}^2(k)} \quad (8)$$

Fig. 7 Time-response of a_1, a_2, a_3, a_4 (570–580 s) Fig. 8 Time-response of a_1, a_2, a_3, a_4 (590–600 s)

の時間応答を示す. 約 595 s 付近だけではなく, 約 575 s 付近において ℓ_2 ノルム (8) が極大であることが確認できる. 約 595 s 付近では 1 次のスロッシング (液面概形が 1 次多項式で近似されるスロッシング) が発生し, 約 575 s 付近では高次のスロッシング (液面概形が 3 次多項式で近似されるスロッシング) が発生した. 1 次のスロッシングの場合の ℓ_2 ノルムは約 68, 高次のスロッシングの場合の ℓ_2 ノルムは約 20, スロッシングが発生していない場合の ℓ_2 ノルムは約 5 であった. スロッシングが発生していない場合の ℓ_2 ノルムより, 1 次のスロッシングの場合の ℓ_2 ノルムは約 12 倍大きく, 高次のスロッシングの場合の ℓ_2 ノルムは約 4 倍大きかった.

Fig. 7, Fig. 8 に $a_1(k), a_2(k), a_3(k), a_4(k)$ の形状成分の時間変化を黒点と実線, 同定モデル $G_m(s)$ の出力を中空点と破線で示す. 595 s 付近では 1 次多項式の形状成分 $a_2(k)$ が支配的, 575 s 付近では 3 次多項式の形状成分 $a_4(k)$ が支配的であることが確認できる.

Fig. 9 に同定モデル $G_m(s)$ を実現する行列 A の固有値を示す. 固有値がすべて複素左半平面上にあることが確認できる. Fig. 10 に同定モデル $G_m(s)$ のボード線図を実線で示す. 奇数次多項式の形状成分 $a_2(k), a_4(k)$ と比較して, 偶数次多項式の形状成分 $a_1(k), a_3(k)$ に対するゲインが非常に小さいことが確認できる. さらに, 1 次多項式形状成分 $a_2(k)$ と 3

Fig. 9 Eigenvalue of A Fig. 10 Bode plot of $G_m(s)$

Table 1 Model order

j	Order of G_j
1	4
2	11
3	6
4	13

Table 2 FIT ratio

j	Output of G_j [%]
1	6.32
2	65.60
3	1.18
4	65.11

次多項式形状成分 $a_4(k)$ に関しては共振周波数が確認される。

Table 1 に同定モデル $G_m(s)$ の次元を示す。奇数次多項式の形状成分 $a_2(k), a_4(k)$ の次元と比較して、偶数次多項式の形状成分 $a_1(k), a_3(k)$ の次元は約 2 倍ほど大きいことが確認できる。

最後に、同定実験の妥当性について検証する。Table 2 に同定モデル $G_m(s)$ の出力と実出力の FIT 率を示す。すべての FIT 率は正の値を達成している。奇数次多項式の出力において 60% 以上の FIT 率が達成された。

3.4 考察

Fig. 4, Fig. 5 において、次数の高い観測出力 y ほど直線近似が困難な形状の液面の概形を反映していることより、形状成分計算の妥当性が検証される。

Fig. 6 において、スロッシングが発生していない場合の ℓ_2 ノルムより高次のスロッシングの場合の ℓ_2 ノルムが約 4 倍大きいことより、従来研究^{3)~6)}では無視していた高次のスロッシングは、無視できない大きさであることがわかる。

Fig. 7, Fig. 8 の 595 s 付近では 1 次多項式の形状成分 $a_2(k)$ が支配的、575 s 付近では 3 次多項式の形状成分 $a_4(k)$ が支配的であることが確認できるため、それぞれスロッシング現象が発生していると考えられる。

Fig. 9 において、行列 A の固有値がすべて複素左半平面上にあることより、同定モデル $G_m(s)$ の安定性が検証できる。よって、2.2 節に述べた数値モデルから物理モデルへの変換が可能である。

Fig. 10 において、奇数次多項式の形状成分 $a_2(k), a_4(k)$ と比較して、偶数次多項式の形状成分 $a_1(k), a_3(k)$ のゲインが非常に小さい理由は、水の質量保存 (体積保存) によるものと考えられる。また、1 次多項式の形状成分 $a_2(k)$ と 3 次多項式の形状成分 $a_4(k)$ の共振周波数の周波数は約 0.285 Hz (1.79 rad/s) 付近、約 0.563 Hz (3.54 rad/s) 付近であり、Fig. 6, Fig. 7 と Fig. 8 の結果に対応する。

Table 1, Table 2 についてすべての FIT 率は正の値を達成し、振幅の大きな奇数次多項式の出力において 60% 以上の FIT 率が達成されていることより、モデルの妥当性が検証される。

4. 多項式空間上の視覚制御実験

本章では 1 次のスロッシングだけでなく高次のスロッシングが発生している液面に対して、従来法と比較して受動性を考慮した提案法が、平衡状態である水平液面を飽和要素や不感帯要素のもとで高速に整定することを実証する。なお制御対象には入力端に ± 5 V 以上の飽和要素と ± 0.2 V 以内の不感帯要素が存在する。

4.1 制御実験方法

本研究では同定モデルを元にカルマンフィルタを構築し、状態推定を用いて受動性を考慮した制御を適用する。本論文では多項式空間上の SIMO 系 $G(s) := (G_1(s), G_2(s), G_3(s), G_4(s))^T$ を制御対象とする制御系を構築する。Fig. 11 に提案法のブロック線図を示す。比較のため、多項式空間上の SIMO 系 $G(s) := (G_1(s), G_2(s), G_3(s), G_4(s))^T$ を制御対象として LQG 制御とした従来法⁹⁾の場合、さらに、無制御の場合を議論する。

初期状態を生成するため、前章の結果に基づいて、水平液面に対してつぎの 2 つの成分表示を有する加振入力

条件 1: 1 次スロッシング (形状成分 $a_2(k)$ の共振)

$$u(r, k) = 0.55 \sin(2\pi 0.285 T_{\text{sam}} k) \times e_1(r)$$

条件 2: 高次スロッシング (形状成分 $a_4(k)$ の共振)

$$u(r, k) = 1.50 \sin(2\pi 0.567 T_{\text{sam}} k) \times e_1(r)$$

を一定時間 (15.00 s) それぞれ印加した直後に制御を開始した。カルマンフィルタの入力端外乱の重みを $Q_k = \text{ones}(34) \times 1$,

Fig. 11 The block diagram

出力端外乱の重みを $R_k = I_{34} \times 50000$ とした。

従来法は線形制御であるため、飽和要素と不感帯要素が制御対象の入力端に同時に存在する場合、高速に整定させるゲイン調整が困難である。たとえば不感帯要素の影響を回避するためにゲインを大きくすると、飽和要素の影響が大きくなってしまう。しかし提案法は受動性に基づく制御であるがゆえに、状態 x に任意に依存するゲイン $w(x) > 0$ を有する非線形制御系を簡便に構築できる。つまり、状態依存のゲイン $w(x)$ であっても正であればハミルトン関数 H は増加しないので平衡状態の安定性は保証される。具体的には、飽和要素は制御時間の前半において、不感帯要素は制御時間の後半において支配的であるという指針のもと、 ℓ_2 ノルム (8) を用いてゲインを

$$w = w(x) = \frac{c}{d + \|z(k)\|_{\ell_2}} > 0 \quad (c, d > 0)$$

と設計する。飽和要素と不感帯要素が存在しても（ゲイン w の一部と解釈すれば）ハミルトン関数 H と偏差 $\|z(k)\|_{\ell_2}$ は明らかに増加しない（減少する）ので、設計されたゲイン w は減少しない（増加する）。したがって、制御時間の前半では小さなゲインで飽和要素の影響のみを回避して、かつ、制御時間の後半では大きなゲインで不感帯要素の影響のみを回避することができる。

ここで c は $\|z(k)\|_{\ell_2}$ に対する感度、 d は飽和要素に対する感度、 d/c は不感帯要素に対する感度と解釈できる。条件 1 では $(c, d) = (10.0, 2.0)$ 、条件 2 では $(c, d) = (10.0, 5.3)$ と調整した。

従来法における LQ 制御器

$$\sum_0^{\infty} (x(k)^T Q_f x(k) + u(k)^T R_f u(k)) dk, \quad Q_f \geq 0, \quad R_f > 0$$

の重みを、 $R_f = 500, Q_f = I_{34} \times 0.00002$ として設計した。

4.2 制御実験結果

Fig. 12 に条件 1 の入力信号、Fig. 13 に条件 2 の入力信号を示す。ここで提案法を中空点および実線で、従来法を十字点および破線で、無制御を実線で示した。初期状態までの入力信号は 3 つの場合で同一である。提案法・従来法ともに制御開始直後の入力、制御開始直前の入力とは ± 逆符号の入力になっており、また加振時の入力よりも大きな値が入力された。条件 1 では従来法のほうが制御入力が大きく、条件 2 では提案法の制御入力が大きかった。また従来法の 15 s 付

Fig. 12 Time-response of input u (Condition 1) Fig. 13 Time-response of input u (Condition 2) Fig. 14 Time-response of ℓ_2 norm (Condition 1) Fig. 15 Time-response of ℓ_2 norm (Condition 2)

近の電圧は -4.54 V であり、条件 1 と条件 2 のいずれの場合でも入力飽和は確認されなかった。

Fig. 14 に条件 1 の出力の ℓ_2 ノルム、Fig. 15 に条件 2 の出力の ℓ_2 ノルムを示す。ここでも、提案法を中空点および実

線で、従来法を十字点および破線で、無制御を実線で示した。条件1の場合の l_2 ノルムの制御開始直前の値は約70.5、条件2の場合の l_2 ノルムの制御開始直前の値は約46.0だった。

4.3 考察

整定時間 t_s (加振開始0sにおける l_2 ノルム(8)の値をオフセット値とし、 l_2 ノルム(8)の値が制御開始15sにおける値の15%に最後に入る時間)を制御性能として評価する。

Fig. 14 から整定時間は提案法では $t_s = 18.08$ s, 従来法では $t_s = 20.25$ s, 無制御では $t_s = 30.02$ sである。無制御と比べて提案法では79.48%, 従来法では65.02%程度の整定時間が短縮しているため、1次のスロッシングに対する提案法と従来法の両者の有効性が確認される。

Fig. 15 から整定時間は提案法では $t_s = 18.26$ s, 従来法では $t_s = 22.23$ s, 無制御では $t_s = 26.06$ sである。無制御と比べて提案法では70.49%, 従来法では34.56%程度の整定時間が短縮しているため、高次のスロッシングに対する提案法と従来法の両者の有効性が確認される。複雑な液面の概形を直線に単純化してモデリングするのではなく、多項式空間上で単純化せずにモデリングしたことで、高次のスロッシングを重視できる制御系を構築することができたためと考えられる。

また、従来法に比べ提案法のほうが、条件1では14.45%の整定の改善が確認され、条件2では35.93%の整定の改善が確認された。従来法は線形制御器のみしか設計できないのに対して、提案法は受動性に基づく制御であるために非線形制御器を設計でき、飽和要素と不感帯要素を同時に考慮できたためと考えられる。

以上より、多項式空間上の受動性に基づく液面振動制御の有効性が実証された。

5. 結 言

本論文では多項式空間上の受動性に基づく制御を提案して、視覚を用いた液面振動制御実験にて有効性を示した。線形制御系であった従来法とは異なって、提案法では飽和要素や不感帯要素を同時に考慮した非線形制御系を簡便に構築して整定を改善することができる。また提案手法は液面だけではなく非一様な梁などほかの連続体の振動制御にも有用と考えられる。

今後の課題として、複雑な容器形状や複雑な液体との相互作用によって物理モデリングが困難な液体搬送問題への適用などが挙げられる。

謝辞 本研究を進めるにあたって、実験機の製作・保全などお手伝いいただいた、信州大学機械システム工学科酒井研究室の加藤千沙様に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) O. Faltinsen and A. Timokha: On sloshing modes in a circular tank, *Journal of Fluid Mechanics*, **695**, 467/477 (2012)
- 2) B. Robu, L. Baudouin, C. Prieur and D. Arzelier: Simultaneous H_∞ vibration control of fluid/plate system via

reduced-order controller, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **20**-3, 700/711 (2012)

- 3) K. Yano and K. Terashima: Robust Liquid Container Transfer Control for Complete Sloshing Suppression, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **9**-3, 483/493 (2001)
- 4) 浜口, 寺島, 野村: 各種設計条件における液体タンクの最適搬送制御, *日本機械学会論文集 (C編)*, **60**-573, 182/189 (1994)
- 5) 矢野, 戸田, 東川, 寺嶋: スロッシング抑制を考慮した自動注湯ロボットの制御, *日本機械学会論文集 (C編)*, **69**-678, 387/395 (2003)
- 6) 杉江, 芦谷: 凸最適化と H_∞ 制御に基づく液体タンク最適制御, *システム制御情報学会論文誌*, **9**-4, 172/178 (1996)
- 7) 山形, 金子: 移動する円筒タンク内液体のスロッシング抑制制御, *日本機械学会論文集 (C編)*, **64**-621, 200/208 (1998)
- 8) R.A. Ibrahim: *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*, 970, Cambridge University Press (2005)
- 9) 佐藤, 酒井: 特徴量抽出を用いた多項式空間上の視覚制御法と高次スロッシング制振, *日本機械学会 Dynamics and Design Conference (D&D)*, 855/864 (2012)
- 10) D.G. Luenberger: *Optimization by Vector Space Methods*, 344, Wiley-Interscience (1968)
- 11) 新井朝雄: 現代ベクトル解析の原理と応用, 364, 共立出版 (2006)
- 12) 齊藤正彦: 線形代数入門, 274, 東京大学出版会 (1966)
- 13) A.J. Van der Schaft: *L2-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*, 168, Springer-Verlag (1996)
- 14) 足立修一: MATLABによる制御のための上級システム同定, 325, 東京電機大学出版局 (2004)
- 15) B. Pridgen, K. Bai and W. Singhose: SLOSH Suppression by Robust Input Shaping, *IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2316/2321 (2010)

[著 者 紹 介]

佐 藤 正 和

2011年信州大学工学部機械システム工学科卒業, 2013年信州大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年(株)富士通ゼネラル入社, 現在に至る。ロボットビジョンを用いたスロッシング制御系の開発に従事。

永 井 和 幸

2012年信州大学工学部機械システム工学科卒業, 同年信州大学大学院理工学系研究科修士課程入学。現在, 在学中。ロボットビジョンを用いたスロッシング制御系の開発に従事。

酒 井 悟 (正会員)

1998年京都大学工学部交通土木工学科卒業, 2003年同大学大学院農学研究科博士課程修了。同年同大学院情報学研究科にて日本学術振興会特別研究員(PD), 2004~2005年トウエンテ大学電気工学科客員研究員, 同年千葉大学電子機械工学科助教, 2010年信州大学工学部機械システム工学科准教授。現在に至る。ロボット工学, 制御理論の研究に従事(農学博士)。