

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5988143号
(P5988143)

(45) 発行日 平成28年9月7日(2016.9.7)

(24) 登録日 平成28年8月19日(2016.8.19)

(51) Int. Cl. F 1
G 0 5 B 13/02 (2006.01) G O 5 B 13/02 J
F 1 6 F 15/02 (2006.01) F 1 6 F 15/02 A

請求項の数 3 (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2012-139656 (P2012-139656) (22) 出願日 平成24年6月21日 (2012.6.21) (65) 公開番号 特開2013-30162 (P2013-30162A) (43) 公開日 平成25年2月7日 (2013.2.7) 審査請求日 平成27年6月18日 (2015.6.18) (31) 優先権主張番号 特願2011-140430 (P2011-140430) (32) 優先日 平成23年6月24日 (2011.6.24) (33) 優先権主張国 日本国(JP)</p>	<p>(73) 特許権者 504180239 国立大学法人信州大学 長野県松本市旭三丁目1番1号 (72) 発明者 酒井 悟 長野県長野市若里四丁目17番1号 国立 大学法人信州大学工学部内 (72) 発明者 佐藤 正和 長野県長野市若里四丁目17番1号 国立 大学法人信州大学工学部内 (72) 発明者 永井 和幸 長野県長野市若里四丁目17番1号 国立 大学法人信州大学工学部内 審査官 稲垣 浩司</p>
---	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 移動体の動作制御装置及びこれを用いたスロッシング制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

制御対象物である移動体と、
 移動体を駆動する駆動部と、
 前記移動体の動きにともなって変動する検知対象を視認する視認部と、
 前記視認部による前記検知対象の画像情報に基づき、前記駆動部を介して前記検知対象が特定の目標状態に整定されるように前記移動体の動きを制御する制御部とを備え、
前記制御部は、
サンプリング周期にしたがって前記視認部から順次入力される個々の画像情報を、輝度値を要素とする行と列の画素からなる行列に変換し、
あらかじめ規定した行列空間の正規直交基底と前記行列との内積を演算して、個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分を求め、
安定化制御方法により、
前記個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分と、前記検知対象の目標状態における目標画像の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分とが一致するように、前記移動体を制御することを特徴とする移動体の動作制御装置。

【請求項2】

前記安定化制御方法として、LQG制御方法を利用することを特徴とする請求項1記載の移動体の動作制御装置。

【請求項3】

水を収容した移動体としての水槽と、該水槽を一方向に往復動させる駆動部と、前記水槽を視認する視認部としてのカメラと、該カメラにより取得された画像情報に基づき前記駆動部により前記移動体を制御して前記水槽内の水を揺動状態から静止状態へ整定する制御部とを備えるスロッシング制御装置であって、

前記制御部は、

サンプリング周期にしたがって前記視認部から順次入力される個々の画像情報を、輝度値を要素とする行と列の画素からなる行列に変換し、

あらかじめ規定した行列空間の正規直交基底と前記行列との内積を演算して、個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分を求め、

安定化制御方法により、

前記個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分と、前記検知対象の目標状態における目標画像の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分とが一致するように、前記移動体を制御することを特徴とするスロッシング制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は画像情報をもとに移動体を駆動制御する制御装置、及びこの制御方法を利用するスロッシング制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

鑄造に用いる溶湯、タンクに収容されている油、水といった流体の揺動を防止する方法（スロッシング防止）として、制振装置を設けたり、油や水の表面を監視して制御したりする方法が考えられている。制振装置は容器自体の振動を抑えることにより容器に収容されている油や水等の揺動を防止しようとするものであるが、溶湯を搬送する場合のように容器そのものを動かして使用する場合は、容器の動きを制御することにより、油や水の揺動をできるだけ抑えて搬送することが可能である。このような制御は、いわば、移動体の動きを積極的に利用して油や水の揺動を抑えるものである。

【0003】

刻々変動する移動体の動作を制御するには、移動体の動作状態、すなわち移動体が現在どんな状態にあるかを検知し、移動体を目標とする動作状態に徐々に導いていく（安定化させる）ように制御する。たとえば、スロッシング防止方法には、容器に収容されている流体の重心の位置に着目し、容器内の流体の揺動とともに変動する重心を流体の静止状態における重心の位置に収束させるように制御する方法がある（特許文献1等）。このような制御方法は、移動体の動作状態を特定の特徴量（この例では重心位置）を抽出し、特徴量を特定の目標値に安定化させるという制御方法である。

【0004】

制御対象物である移動体の動作状態を検知する方法には、さまざまなセンシング方法がある。カメラで移動体を監視し、得られた移動体の画像情報から移動体の状態を検知する方法もその一つである。移動体を監視（視認）するかわりに、移動体（自動車、ロボット等）に設けたカメラからの画像情報をもとに移動体の動作状態（移動位置等）を検知することも可能である。これらの画像情報をもとに移動体の動作状態を解析して移動体を制御する従来手法は、画像情報から上述した重心位置のような特徴量を検出し、その特徴量に基づいて移動体を制御する方法である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開平9-10924号公報

【特許文献2】特開2004-264925号公報

【特許文献3】特開平6-89103号公報

【発明の概要】

10

20

30

40

50

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上述した移動体の動作状態を示す画像情報から特徴量を抽出して、その特徴量に基づいて移動体を制御する方法は、画像情報から得られる対象によって人為的に特徴量を定義する必要があり、画像情報に基づいて移動体を制御する方法として汎用的に適用することができないという問題があった。すなわち、特徴量を定義しやすい画像情報には適用できても、特徴量の定義が困難な画像情報には適用しにくいという問題、特徴量の定義が的確になされず効果的な制御ができないという問題があった。

【0007】

本発明は、移動体の状態を反映するデータとして得られる画像情報をもとに、特徴量を抽出するという手法を用いずに、移動体を的確に制御することを可能にする移動体の動作制御装置及びこの適用例としてスロッシング制御装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る移動体の動作制御装置は、制御対象物である移動体と、移動体を駆動する駆動部と、前記移動体の動きにともなって変動する検知対象を視認する視認部と、前記視認部による前記検知対象の画像情報に基づき、前記駆動部を介して前記検知対象が特定の目標状態に整定されるように前記移動体の動きを制御する制御部とを備え、前記制御部は、サンプリング周期にしたがって前記視認部から順次入力される個々の画像情報を、輝度値を要素とする行と列の画素からなる行列に変換し、あらかじめ規定した行列空間の正規直交基底と前記行列との内積を演算して、個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分を求め、安定化制御方法により、前記個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分と、前記検知対象の目標状態における目標画像の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分とが一致するように、前記移動体を制御することを特徴とする。

ヒルベルト空間には、数ベクトル空間、多項式空間、実行列空間等の種々の空間が定義される。数ベクトル空間による制御方法は、いわゆる特徴量を抽出して制御する方法に相当する。本発明は、画像情報を、行列空間の1点と解釈して制御する方法であり、画像情報から特徴量を抽出することなく制御する方法である。

安定化制御方法とは、移動体を所望の状態に整定させるための制御手法であり、LQG制御方法、H_∞制御方法などが利用できる。

【0009】

また、本発明に係るスロッシング制御装置は、水を収容した移動体としての水槽と、該水槽を一方方向に往復動させる駆動部と、前記水槽を視認する視認部としてのカメラと、該カメラにより取得された画像情報に基づき前記駆動部により前記移動体を制御して前記水槽内の水を揺動状態から静止状態へ整定する制御部とを備えるスロッシング制御装置であって、前記制御部は、サンプリング周期にしたがって前記視認部から順次入力される個々の画像情報を、輝度値を要素とする行と列の画素からなる行列に変換し、あらかじめ規定した行列空間の正規直交基底と前記行列との内積を演算して、個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分を求め、安定化制御方法により、前記個々の画像情報の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分と、前記検知対象の目標状態における目標画像の行列の前記正規直交基底の各基底に対応する成分とが一致するように、前記移動体を制御することを特徴とする。

【発明の効果】

【0010】

本発明に係る移動体の移動制御装置は、画像情報を行と列の画素からなる行列として捉えて、移動体を制御するから、画像情報から特徴量を抽出するという操作を経ずに制御することができ、さまざまな画像情報が取り込まれた場合でも汎用的に解析して移動体を制御することができる。

【図面の簡単な説明】

10

20

30

40

50

【 0 0 1 1 】

【図 1】試験に使用したスロッシング制御装置の構成を示すブロック図である。

【図 2】水槽内において波が生じた状態の画像の例である。

【図 3】図 2 の画像について、水面の計測結果と近似曲線を示すグラフである。

【図 4】同定モデルの出力と実際の出力とを比較したグラフである。

【図 5】図 4 における 50 ~ 150 秒の範囲を拡大して示したグラフである。

【図 6】重心を制御対象とした場合の同定モデルの出力と実際の出力とを比較したグラフである。

【図 7】図 6 における 50 ~ 150 秒の範囲を拡大して示したグラフである。

【図 8】指令電圧の時間変化を示すグラフである。

10

【図 9】多項式空間の成分の時間変化を示すグラフである。

【図 10】重心の時間変化を示すグラフである。

【図 11】水槽の前面を遮蔽した状態の画像である。

【図 12】モータの回転角度の時間変化を示すグラフである。

【図 13】画像情報をグレースケール化し、(6、6)型の行列に低次元化するイメージ図である。

【図 14】同定モデルの出力と実際の出力とを比較したグラフである。

【図 15】本発明に係る制御方法による場合の行列 $M(t)$ と推定行列 $\hat{M}(t)$ のノルムを示すグラフである。

【図 16】従来の制御方法による場合の水面座標 $y(t)$ と推定座標 $\hat{y}(t)$ のノルムを示すグラフである。

20

【図 17】本発明に係る制御方法 (Proposal) と従来の制御方法 (Conventional) による場合におけるモータの入力電圧を示すグラフである。

【図 18】本発明に係る制御方法と従来の制御方法による場合における水槽の移動状態を示すグラフである。

【図 19】LQG制御とP制御による場合のモータの入力電圧を示すグラフである。

【図 20】LQG制御とP制御による場合の水槽の移動状態を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 2 】

(スロッシング制御装置の構成)

30

本発明に係る移動体の動作制御装置の適用例として、スロッシング制御装置を構成した例について説明する。

図 1 は、スロッシング制御装置の構成を示すブロック図である。本実施形態のスロッシング制御装置は、水を収容した水槽 10 と、水槽 10 を一方向に進退駆動するモータ 12 と、水槽 10 の前方に配置され水槽 10 の前面全体を撮影するカメラ 14 と、カメラ 14 から得られる画像を解析し、解析結果に基づいてモータ 12 を駆動制御する制御部 16 とを備える。本実施形態のスロッシング制御装置においては、水槽 10 が制御対象である移動体、モータ 12 が移動体の駆動部、カメラ 14 が視認部に相当する。移動体の動きにもなって変動する検知対象は、この場合、水槽 10 内における水の状態 (波の状態) である。

40

【 0 0 1 3 】

水槽 10 は、透明なガラス板からなる直方体の容器に形成され、水平に支持された平板からなる支持板上に、支持板の往復動方向と長手方向を平行に固定支持される。支持板の往復動方向は支持板の底面に固設したガイドレールにより一方向に規定される。支持板はモータ 12 の出力軸に連結したラックギアに連繋して設けられ、モータ 12 の正逆回転にもなって支持板 (水槽 10) は一方向に進退駆動される。モータ 12 には DC サーボモータを使用し、制御部 16 に入力されるエンコーダパルスに基づいて水槽 10 の移動位置を検出するように構成した。

【 0 0 1 4 】

本実施形態においては、水槽 10 に収容した水の表面の位置 (表面の形状) を識別しや

50

すくするため、水槽 10 の全量の約半分量を青色に着色した水とし、残り分を流動パラフィン（透明）として水槽 10 を水と流動パラフィンにより充填し、水槽 10 を密閉した。流動パラフィンは水よりも軽いから、水槽 10 が静止した状態では、水槽 10 の下側に水面が水平になった状態で水が収容され、水の上に流動パラフィンがのった状態になる。流動パラフィンを充填したのは、水槽 10 を揺動（往復動）させて波を起こしたときに、波頭が巻き込むような形態にならないようにして、波の形状を認識しやすくするためである。

【 0 0 1 5 】

（制御方法：多項式空間の考え方による制御）

モータ 12 を駆動制御する制御部 16 は、水槽 10 内で生じた波を、水槽 10（支持板）の往復動作を制御して水を静止させる（水面が水平になるようにする）。本試験では、水槽 10 をはじめに一定時間往復動させて波を起こさせた後、制御を開始して水槽 10 内の水を静止させるようにした。

本実施形態においては、カメラ 14 によって取得した水槽 10 内の波の画像を解析し、安定化制御方法により水槽 10 の動きを制御して水を静止させた。水槽 10 内の波の状態は刻々と変化するため、カメラ 14 からは短周期（実施例では 15fps）で水槽 10 の画像を取得し、個々の画像ごとに解析を行い、それぞれの解析結果に基づいて水槽 10 の動きを制御して波を静止させた。

【 0 0 1 6 】

図 2 は、水槽 10 を一方向（水槽の長手方向に平行な方向）に往復動させ、水槽 10 内で波を起こさせた状態の画像の例である。水槽 10 の下側の色の濃い領域が水である。

図 3 は、この画像を解析して求めた近似曲線（破線）を示す。近似曲線は便宜的に 1 次曲線によって近似している。

水槽 10 内の水面の形状（波の形）は、カメラ 14 によって取得した画像を RGB 化し、特定の閾値以上の画素の集合を選択して水面として特定した。得られた水面の形状（波の形）を関数としてみると、水面の形状はヒルベルト空間として定義される多項式空間における基底の一次結合として表現することができる。

水槽 10 内の水の表面は実際には 3 次元的に揺らぐが、本実施形態のように長手方向に平行に水槽 10 を往復動させて波を起こした場合は、波が 2 次元的に変動するとみても制御上、大きな誤差は生じない。

【 0 0 1 7 】

なお、多項式空間の正規直交基底 $e_m(x)$ は次式(1)のルジャンドル多項式によって表現される。

【数 1】

$$e_m(x) = \sqrt{\frac{2m-1}{2}} \cdot \frac{1}{2^{m-1} \cdot (m-1)!} \cdot \frac{d^{m-1}}{dx^{m-1}} (x^2-1)^{m-1} \quad (1)$$

$$(m = 1, 2, 3 \dots n), \quad -1 \leq x \leq 1$$

多項式空間の元 $f(x)$ は、(1)式の正規直交基底を用いて次式(2)のように、基底の一次結合によって表現できる。すなわち、本実施形態において画像として得られる波の形は、この基底の一次結合として表現することができる。

【数 2】

$$\langle f(x), e_m(x) \rangle = a_m \quad (m \leq n)$$

$$f(x) = \sum_{m=1}^n a_m e_m(x) \quad (2)$$

波の形は時間的に変化するため、時間的に変化する波の形は、次式(3)の多項式 $f(x, t)$ ($0 \leq t \leq T$) によって表現される。すなわち、波の変化は成分 $a_m(t)$ の時間変化としてあらわれるから、この成分 $a_m(t)$ を監視制御することによって波を制御することが可能である。

【数3】

$$\langle f(x, t), e_m(x) \rangle = a_m(t) \quad (m \leq n)$$

$$f(x, t) = \sum_{m=1}^n a_m(t) e_m(x) \quad (3)$$

【0018】

(システムの同定)

本実施形態における制御部16による制御手法は、観測した波の形状を多項式空間における基底の一次結合として表現した場合の成分 $a_m(t)$ の時間変化を監視し、その後の変化を推定して、目標とする状態(水面を静止させる状態)に漸近安定化させるものである。10
制御対象である観測量 $a_m(t)$ の次数は制限されるものではないが、本実施形態においては、検証のための第一段階として観測量を $a_2(k)$ 、すなわち観測対象の成分のうち1次の成分を制御対象とする状態変数として制御することにし、予測誤差法の式誤差モデルであるARX法を用いてシステムを同定した。このモデルでは、次式(4)の離散時間線形時不変システムによって入出力応答が定義される。

【数4】

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \quad (4)$$

【0019】

以下のチャープ信号 $u(t)$ を印加してシステムを同定した。この同定操作は、水槽10をさまざまな周波数により揺動(往復動)させ、外力に対して水槽10(システム)がどのようにレスポンスするかを特定するという意味であり、本実施形態では次数34まで同定した。20

$$u(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_0 + \alpha t^2)$$

A: 振幅0.55 (V)、 f_c : 中心周波数0.198 (Hz)、 α : チャープ率 2.3761×10^{-3} (Hz/s)、 ϕ_0 : 初期位相 - (1/2) (rad)

【0020】

システムの同定条件は以下のとおりである。

水: 2.52(l)、水温: 22.4 (°C)、流動パラフィン: 5.05(l)、パラフィン温度: 22.1 (°C)、水槽サイズ: 横幅490×奥行180×高さ300(mm)、カメラモード: 5Mモード、カメラ高さ: 130(mm)、カメラ-水槽距離: 430(mm) 30

【0021】

同定した式(4)の行列A、B、C、Dを以下に示す。

【数 5】

$$A = \begin{bmatrix} 0.24724 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0.071825 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0.135 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0.176840 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0.092708 & 0 & & & & & & 0 \\ 0.055195 & 0 & & & & & & 0 \\ 0.039742 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.016015 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.026688 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.019278 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.046919 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.032359 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.018304 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.018947 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.029619 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.019281 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.017454 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.0058192 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.003066 & 0 & & & & & & 0 \\ 0.0058926 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.019414 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.00094892 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.021076 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.045757 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.038157 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.02622 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.043846 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.022438 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.014052 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.010804 & 0 & & & & & & 0 \\ -0.017456 & 0 & & & & & & 0 \\ 0.0092558 & 0 & & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.012844 & 0 & & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.012382 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

10

20

【数 6】

$$B = \begin{bmatrix} -0.03085 \\ 0.57526 \\ -0.28011 \\ 1.4146 \\ -0.46259 \\ 1.3498 \\ -0.14924 \\ 1.1486 \\ -0.461 \\ 1.1364 \\ -0.80446 \\ 1.0892 \\ -0.96015 \\ 0.94382 \\ -0.97566 \\ 0.78558 \\ -0.91899 \\ 0.60659 \\ -0.82325 \\ 0.42939 \\ -0.70754 \\ 0.22189 \\ -0.56182 \\ 0.045289 \\ -0.42375 \\ -0.073981 \\ -0.29979 \\ -0.11947 \\ -0.18091 \\ -0.12335 \\ -0.0916 \\ -0.053669 \\ -0.063755 \\ 0.00019617 \end{bmatrix}$$

30

40

【数 7】

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$$

【数 8】

$$D = [0.015843]$$

【 0 0 2 2 】

図 4 は同定モデルの出力と実際の出力とを比較したグラフである。図 5 は図 4 における 50 ~ 150 秒の範囲を拡大して示したものである。グラフから、実際の出力と同定モデルの出力とが良く一致していることがわかる。すなわち、上述した本システムの同定モデルが妥当であることが確認できた。

【 0 0 2 3 】

なお、比較のため、従来手法である重心の位置を制御対象とする場合についても制御試験を行った。重心 (x_G, y_G) は次式 (9) によって与えられる。

【数 9】

$$(x_G, y_G) = \frac{1}{W} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_i, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Y_j \right) \quad (9)$$

式(9)において、Wは全画素値の総和であり、n、mは画像のドット数、 X_j 、 Y_j は座標値である。図 3 に、式(9)によって求めた重心の位置をドットで示した。

【 0 0 2 4 】

重心の位置を制御対象とする場合も、あらかじめ同定する必要がある、上述したARX法により、 x_G を要素とする状態変数ベクトルを制御対象とし、式(4)の離散時間線形時不変システムを定義して同定した。チャープ信号及び同定条件は前記と同様である。

図 6 に実際の出力と同定モデルの出力を示した。図 7 は図 6 の 50 ~ 150 秒の範囲を拡大したものである。実出力と同定した出力が略一致しており、同定モデルが妥当であることを示す。

【 0 0 2 5 】

(制御試験)

本実施形態の制御試験においては、式(4)に示す線形時不変システムに対し、目標とする水面の形状(水平面)にまで安定化させる手法としてLQG制御方法を利用した。制御対象を特定の挙動をなすように制御する手法にはさまざまな手法があり、LQG制御方法に限定されるものではない。

【 0 0 2 6 】

LQG制御方法においては、次式(10)を評価関数Jとし、評価関数Jを最小とする状態フィードバックFを加えるように設計する。

【数 1 0】

$$J = \sum_0^{\infty} (x(k)^T Q_f x(k) + u(k)^T R_f u(k)) \quad (10)$$

式(10)中の $Q_f > 0$ 、 $R_f > 0$ は最適フィードバック重みである。

フィードバックゲインFは、リカッチ方程式

【数 1 1】

$$\Pi A + A^T \Pi - \Pi B R_f^{-1} B^T \Pi + C^T Q_f C = 0 \quad (11)$$

の解 $\Pi > 0$ を用いて、次式(12)によって与えられる。

【数 1 2】

$$F = R_f^{-1} B^T \Pi \quad (12)$$

本実施形態においては、フィードバックゲインを $R_f = 5$ 、 $Q_f = I \times 0.001$ として設計した。この場合のフィードバックゲインを以下に示す。

10

20

30

40

【数 1 3】

$$F = \begin{bmatrix} 0.0039952 \\ 0.003911 \\ 0.0043019 \\ 0.0038208 \\ 0.0049654 \\ 0.003341 \\ 0.0050692 \\ 0.0032121 \\ 0.0047743 \\ 0.0021083 \\ 0.0044752 \\ 0.00058781 \\ 0.0039397 \\ -0.00091609 \\ 0.0030117 \\ -0.0022073 \\ 0.0018757 \\ -0.0032432 \\ 0.00061676 \\ -0.0040602 \\ -0.00059612 \\ -0.004561 \\ -0.0018542 \\ -0.0047048 \\ -0.0028701 \\ -0.0046371 \\ -0.0036355 \\ -0.0043933 \\ -0.0040419 \\ -0.0040682 \\ -0.0040308 \\ -0.0037386 \\ -0.0034795 \\ -0.0034465 \end{bmatrix}^T$$

10

20

【 0 0 2 7 】

制御試験で使用したシステムの条件は、前述した同定条件において、水温20.8()、パラフィン温度21.0()である以外は同一である。

試験では、0~15.00(s)までの間は、モータ(DCモータ)12への入力電圧を $0.55\sin(2\pi t \times 0.285)$ (V)として水槽10を揺動させ、15.00(s)経過後に制御を開始して、その後の水槽10の挙動を観察した。

【 0 0 2 8 】

図8は、本実施形態による制御方法、重心を制御対象とする制御方法、まったく制御を行わない場合(無制御)について、指令電圧の時間変化を示す。15秒経過時までは周期的に電圧が印加されていること、本実施形態の制御方法によれば15秒経過後、徐々に指令電圧が小さくなって収束に向かっていることがわかる。重心を制御対象とする制御方法では、15秒経過後は、初期の印加電圧よりも指令電圧が抑制される傾向にあるが、本実施形態の制御方法と比較すると収束度が劣っている。制御を行わない場合は、15秒経過後の指令電圧が0(V)となる。

【 0 0 2 9 】

図9は、上記の3方法について、多項式空間の成分 a_2 の時間変化、いいかえれば水槽10内の波の動き(揺れ方)を示す。本実施形態による制御方法の場合と、重心を制御対象とする制御方法の場合ともに、無制御の場合にくらべて短時間で波が収まっている(整定する)ことがわかる。

図10は、上記の3方法について、重心 x_G の時間変化を示す。この場合も、本実施形態の制御方法と、重心を制御対象とする制御方法とともに、無制御の場合にくらべて整定時間が短くなっており、スロッシングを防止する制御がなされていることがわかる。

【 0 0 3 0 】

図11は、水槽10の前面の一部を紙で遮蔽した場合にスロッシング防止機能が働くか否かを試験した例である。水槽10の前面の左半部を紙で隠し、カメラ12からは水槽10の右半部の波の動きのみ検知できるようにして制御試験を行った。

図12は、そのときのモータの回転角度を示す。試験結果は、本実施形態の制御方法に

10

20

30

40

50

よる場合は、15秒間水槽10を揺動させた後、制御開始すると徐々に波が整定されて収束したが、重心を制御対象とした場合は途中で拡散し、制御不能となった。

【0031】

この試験結果は、本実施形態の制御方法においては、特徴量を抽出して制御するという考え方によるものではないために、部分的な画像情報からも、水槽10全体の波の動きを予測して制御することが可能となり、重心位置のような特徴量を抽出して制御する方法では制御不能な場合であっても的確な制御が可能であることを示す。

【0032】

なお、上記実施形態は、画像情報から特徴量を抽出することなく挙動を制御する方法として、従来の数ベクトルの概念を利用することなく制御する一例として、スロッシング防止装置の制御を取り上げたものである。実施形態では、制御を容易にするために、水槽の動き方向を一方向に限定し、水槽中の波が2次元内において変化する設定とし、ヒルベルト空間の一つである多項式空間を想定することによって制御の可能性を検証した。その検証結果は、画像情報から特徴量を抽出することなく制御する方法が有効に利用できることを示している。

【0033】

(制御方法：行列空間の考え方による制御)

上述した実施形態では、スロッシング制御装置の制御方法として水槽内の水面の形状を多項式空間の基底の一次結合とみて制御した。以下では、線形制御理論を行列空間上に再構築する方法によって制御する方法について説明する。

【0034】

行列空間はヒルベルト空間であり、この空間における正規直交基底は以下で示される。

【数14】

$$e_{1,1} = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}, e_{1,2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}, \dots, e_{n,m} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

行列空間内の元である行列 X と、正規直交基底 $e_{k,l}$ との内積を用いることにより、行列 X は次式のように線形結合として表すことができる。

【数15】

$$X \in R^{n \times m} \quad \langle X, e_{k,l} \rangle = a_{k,l} \quad (k \leq n, l \leq m)$$

$$X = a_{1,1}e_{1,1} + a_{1,2}e_{1,2} + \cdots + a_{k,l}e_{k,l} + \cdots + a_{n,m}e_{n,m}$$

時間変化する行列 $X(t)$ の場合、行列の成分は $a_{k,l}(t)$ で示され、以下のように書き表される。

【数16】

$$X(t) \in R^{n \times m} \quad \langle X(t), e_{k,l} \rangle = a_{k,l}(t) \quad (k \leq n, l \leq m)$$

$$X(t) = a_{1,1}(t)e_{1,1} + a_{1,2}(t)e_{1,2} + \cdots + a_{k,l}(t)e_{k,l} + \cdots + a_{n,m}(t)e_{n,m}$$

また、行列空間は数ベクトル空間と同様にヒルベルト空間であるので、以下の線形制御理論が成り立つ。

【数17】

$$\dot{X} = A \circ X + B \circ U$$

$$Y = C \circ X + D \circ U \quad X \in R^{n \times m}, U \in R^{k \times l}$$

すなわち、カメラから得られた画像情報を行列空間内の1点としてとらえ、線形制御理論を適用して制御することが可能である。

【0035】

10

20

30

40

50

本実施形態においても前述したスロッシング装置を使用した。実験では、画像情報のサンプリング周期を15[fps]とし、カメラ14から得られるRGB行列（画像情報：480×640画素）をグレースケール空間に座標変換した行列（（480、640）型）を、平均値をとって（6、6）型の行列（ $M(t)$ ）に低次元化し、行列 $M(t)$ と行列空間の正規直交基底の内積によって得られる成分を制御量（ $a_{k,j}(t)$ ）とした。図13に、画像情報をグレースケール化し、（6、6）型の行列に低次元化する例をイメージ図で示す。

【0036】

行列空間の考え方を利用して制御するため、装置の同定試験を行った。

モータ12にチャープ信号（入力電圧 $c(t)$ ）を入力し、同定出力を行列 $M(t)$ と行列空間における正規直交基底 $e_{k,j}(t)$ との内積によって得られる成分 $a_{k,j}(t)$ とする。システムを 10
入力1、出力36のSIMO系とし、部分空間法によって同定した。部分空間法として本実施形態ではn4sid法を利用した。使用したチャープ信号は下記のものである。

$$c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad [V]$$

A: 振幅0.6 (V)、 f_c : 中心周波数 1.28×10^{-2} (Hz)、 ϕ : チャープ率 9.0×10^{-6} (Hz/s)

ϕ : 初期位相 - (1/2) (rad)

【0037】

6×6の各同定出力 $a_{k,j}(t)$ について、モデルの出力と実出力との適合率を計算したところ、水槽10の水面の境界面に相当する4行目の成分については、適合率が64.97(%)、74.75(%)、62.36(%)、36.1(%)、67.98(%)、65.35(%)となり、モデル化が良好であること 20
が確かめられた。

図14に、同定出力の例として、出力 $a_{4,j}(t)$ の実出力とモデル出力を示す。図14(b)は、図14(a)の100~120秒の範囲を拡大して示したものである。

【0038】

（比較試験）

上記のスロッシング制御装置について、本実施形態の制御方法と、従来の重心に着目して制御する方法について比較実験を行った。

本実施形態による制御方法では、上述した同定結果に基づき、行列 $M(t)$ に対してLQG制御を施した。レギュレータの重み $R_1 = 5 \times 10^4 I$ 、 $Q_1 = 100$ 、カルマンフィルタの重み $R_g = 1 \times 10^8 I$ 、 $Q_g = 1 \times 10^{-6} I$ とした。 30

従来法の重心を制御対象とする場合も、重心に対して同定する操作を行い、この同定結果に基づいてLQG制御を施した。レギュレータの重み $R_1 = 1$ 、 $Q_1 = 1$ 、カルマンフィルタの重み $R_g = 1 \times 10^3$ 、 $Q_g = 1$ とした。

【0039】

比較試験は、はじめに0~15秒間、モータ12に正弦波電圧を入力し水槽10を一方向に（直線的に）往復駆動させた後、水面を静止状態に移行させる制御を開始して推移を観察した。実験では、制御開始時に、カメラ14の視野を横切るようにカメラ14の前で手を動かして、カメラ14の視野を短時間遮るオクルージョンを行って各々の制御による挙動を調べた。

【0040】

図15は、本実施形態の制御方法の場合の行列 $M(t)$ と推定行列 $\hat{M}(t)$ のノルムを示す。往復動を開始して15秒経過した時点で行列 $M(t)$ のノルムが大きく変動している。これはオクルージョンの影響によるものである。行列 $M(t)$ のノルムが大きく変動する一方、推定行列 $\hat{M}(t)$ のノルムは、オクルージョンによってはほとんど影響されず、強制振動を停止後、短時間のうちに整定されている。 40

ここでノルムとは行列 $M(t)$ と目標画像との差の行列、または推定行列 $\hat{M}(t)$ と目標画像との差の行列について、全成分の二乗を足し合わせて平方根をとったものである。よって推定行列 $\hat{M}(t)$ のノルムが、オクルージョンによってはほとんど影響されないことは、オクルージョンが雑音として除去されて推定行列 $\hat{M}(t)$ を乱さないことを示す。同時に、ノルムがゼロになったとき行列 $M(t)$ または推定行列 $\hat{M}(t)$ は目標画像に整定したといえる。 50

【 0 0 4 1 】

図 1 6 は、従来法の制御による場合の水面座標 $y(t)$ と推定座標 $\hat{y}(t)$ のノルムを示す。LQG制御により、水面が揺動する状態から水面が静止する状態へ移行させるように制御したが、図 1 6 に示すように、オクルージョンの影響を受けて推定座標 $\hat{y}(t)$ が大きく変動した。つまり、従来法ではオクルージョンが雑音として除去されずに推定座標 $\hat{y}(t)$ を乱していることを示す。

【 0 0 4 2 】

図 1 7 は、本実施形態と従来法の制御による場合のモータ 1 2 の入力電圧（制御電圧）を示す。0~15秒間の入力電圧があらかじめ設定した正弦波電圧、15秒経過後が制御電圧である。従来法の制御の場合は、15秒経過後の電圧がオクルージョンの作用によって大きく変動したのに対し、本実施形態の制御による場合は、オクルージョンの影響をほとんど受けることなく、短時間のうちに電圧が 0 [V] 近傍に収束し、短時間で水面の揺動が整定されている。

【 0 0 4 3 】

図 1 8 は、本実施形態と従来法による制御状態での水槽の支持板上の移動位置を示す。水槽をはじめに往復駆動（周期的な往復動）させている状態から制御を開始すると、水面を静止させるために水槽は微妙な動きをする。図 1 8 に示す本実施形態の制御では、制御開始後、短時間のうちに水槽は動きを停止し、水面を静止させた状態になった。一方、従来法による場合は、オクルージョンの影響によって水槽は左右（一方向）に大きく移動している。

【 0 0 4 4 】

以上の比較実験の結果は、行列空間の考え方を利用した制御方法が、水槽の水面の整定に有効に利用できること、とくに、重心のような特徴量に着目する制御方法では、わずかなオクルージョンの影響であっても的確な制御ができなくなるのに対して、本実施形態のように特徴量に着目せずに制御する方法は、オクルージョンの影響を受けることなく、的確に制御できることが確かめられた。

【 0 0 4 5 】

なお、制御方法の相違による制御状態を比較するため、LQG制御とP制御（比例制御）を利用して水面を静止させる実験を行った。いずれも、はじめに15秒間水槽を往復駆動させた後、カメラの視野を遮るオクルージョンを行い、その後の経過を観察した。

図 1 9 は、LQG制御とP制御でのモータの入力電圧を示す。P制御による場合はオクルージョンの作用によって制御開始後の電圧が大きく変動するのに対して、LQG制御では短時間のうちに整定されている。

図 2 0 は、支持板上の水槽の位置を示す。LQG制御による場合は制御開始とともに一定位置に整定されているのに対して、P制御では水槽の制御が的確になされずに発散している。この実験結果は、LQG制御がP制御に比較して優位であること、行列空間におけるLQG制御理論が有用であることを示す。

【 0 0 4 6 】

以上、各実施形態において説明したように、画像情報に基づいて、特徴量を抽出することなく制御する方法は、多項式空間に限らず、行列の和とスカラー倍が定義されるベクトル空間である行列空間についても適用される。行列空間は多項式空間と同様にヒルベルト空間の一つであり、画像情報を多項式空間の 1 点として制御する方法と同様に、行列空間の 1 点として制御することが可能である。画像情報を多項式空間の 1 点あるいは行列空間の 1 点と解釈して制御する方法は、制御しようとする対象ごとに、重心位置といった特定の特徴量を見出して、その特徴量を制御しなければならない従来方法とくらべて、少なくとも、制御する対象を問わずに、画像情報をもとに汎用的に制御できる方法を提供できる点において有効であると考えられる。

なお、行列空間の考え方は、制御対象がまったく限定されずいかなる制御対象にも汎用的に利用できる、特徴量を全く抽出しないので画像処理・制御系設計の段階が試行錯誤的にならないという特徴がある。また、多項式空間の考え方は、制御対象が水槽の水面のよ

10

20

30

40

50

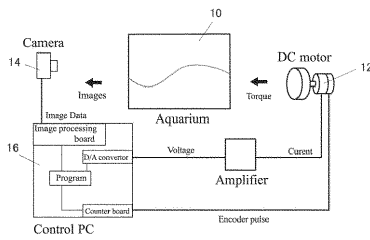
うに曲線で表されるもので多項式空間の考え方が適用しやすいものについては、効果的な制御が可能になるという特徴がある。

【符号の説明】

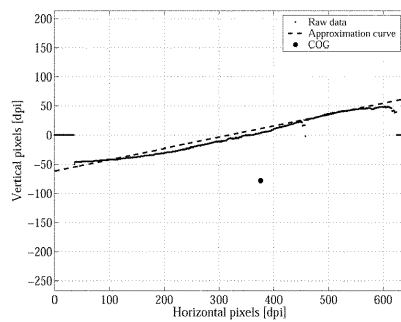
【 0 0 4 7 】

- 1 0 水槽
- 1 2 モータ
- 1 4 カメラ
- 1 6 制御部

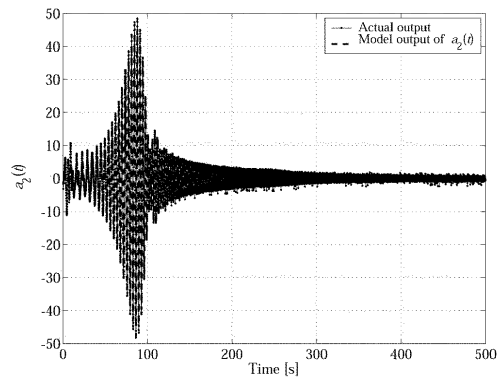
【 図 1 】



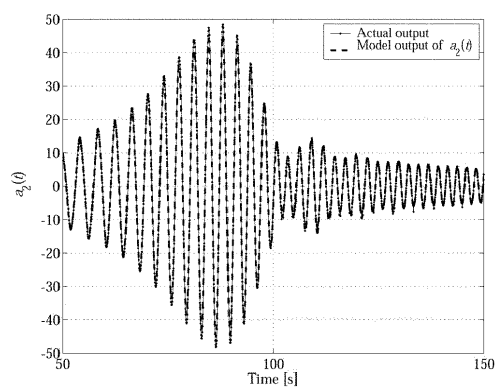
【 図 3 】



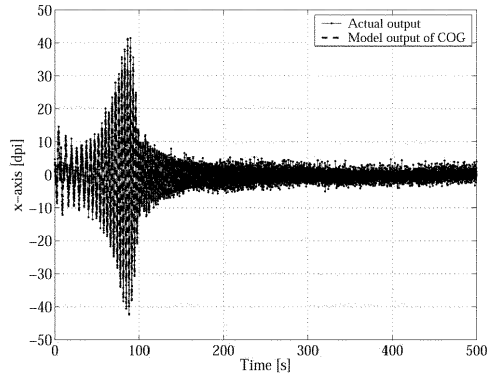
【 図 4 】



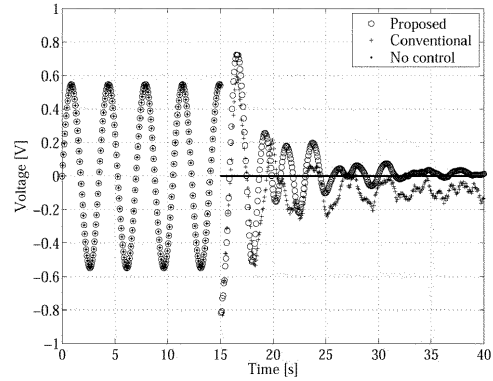
【 図 5 】



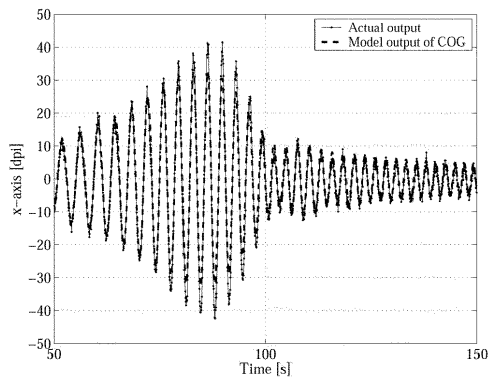
【 6 】



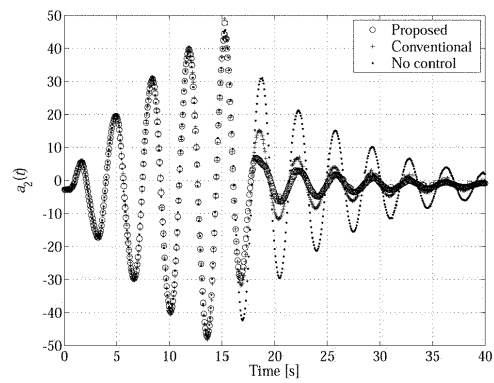
【 8 】



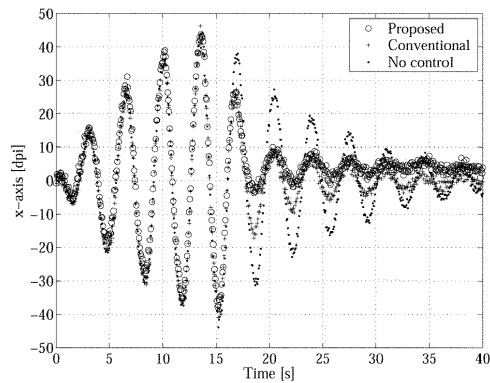
【 7 】



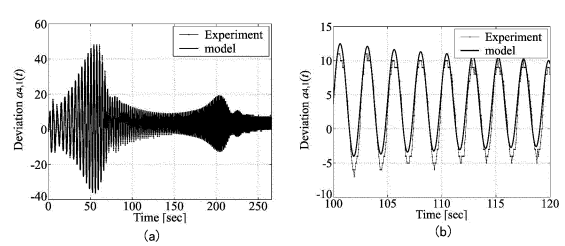
【 9 】



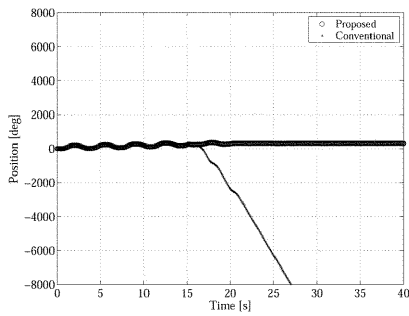
【 10 】



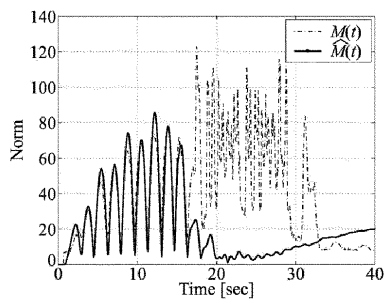
【 14 】



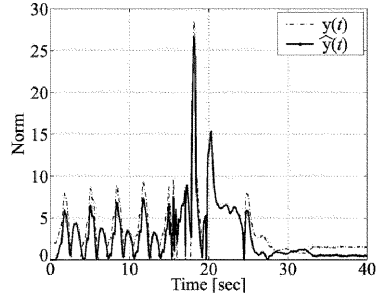
【 12 】



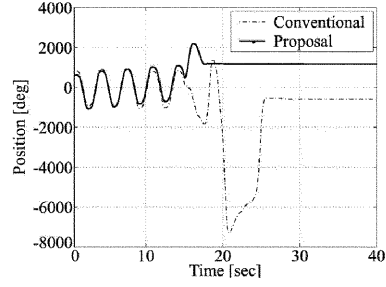
【 15 】



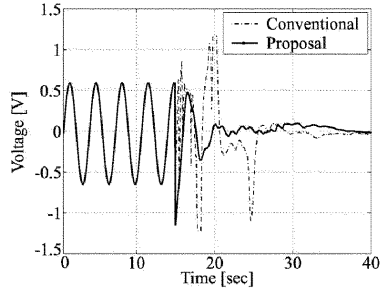
【 16 】



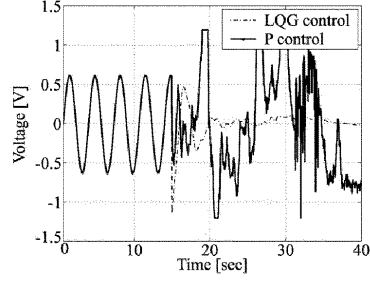
【 18 】



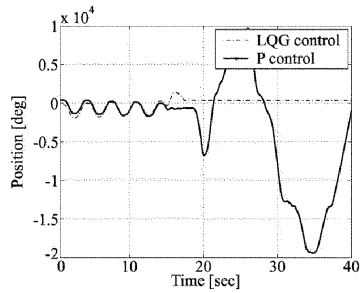
【 17 】



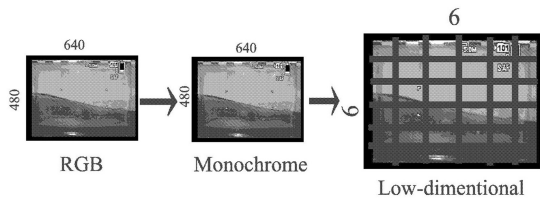
【 19 】



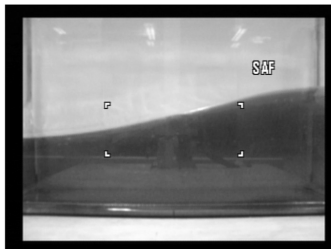
【 20 】



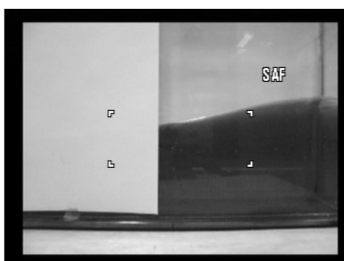
【 13 】



【 2 】



【 11 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平09 - 010924 (JP, A)
特開平06 - 089103 (JP, A)
特開2004 - 264925 (JP, A)
佐藤正和, 酒井悟, ビジュアル・カルマンフィルタに基づく水面形制御に関する基礎的研究, 「
運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 一般社団法人日本機械学会, 2011年 6月2
9日, p. 673 - 678
- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G05B 13/02
F16F 15/02