

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06227

研究課題名（和文）幾何的特徴を用いない視覚制御のための非線形性を考慮した基底生成

研究課題名（英文）A Basis Generation for Nonlinear Visual Feedback without Geometric features

研究代表者

酒井 悟（SAKAI, Satoru）

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：90400811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：従来の基底を用いると入出力線形性が低い対象について、出力の再定義に着目して、高い入出力線形性を達成する新しい基底の生成法を提案した。特に基底生成のための未知参照同定モデルについての仮定（FIRの仮定）の緩和および基底生成の自由度活用による同定誤差の低減について提案した。視覚制御数値シミュレーションと視覚制御実験から有効性を示した。従来の基底を用いると入出力線形性が低い対象に対しても既存のシステム同定・既存の線形補償器設計ツールが適用可であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在もスロッシングは鋳造ライン、タンカー、液体ロケットなどに存在する重要な対象である。最近では原子力発電所の災害・事故の直後に想定される余震によるスロッシングは、設計段階とは異なる未知の境界条件のもと、許容不可能な大きなリスクである。提案法の応用範囲はスロッシングに限定されず他の連続体を含む。特に、設計段階とは異なる未知の境界条件のもと、物理パラメータ同定が不要な連続体形状応答シミュレーションも可能である。

研究成果の概要（英文）：For a visual feedback without geometric features, this study suggests to apply a new basis made by an optimization problem to improve the input-output linearity on matrix space or polynomial space, and so on. The validity is confirmed by the experimental feedback for non-planar sloshing.

研究分野：機械システムの力学と制御

キーワード：視覚 モデリング 制御 油圧ロボット

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者が過去に提案した視覚制御系は、視覚対象に依存する幾何的特徴を定義する必要が無いため汎用性が高く、かつ動的な対象に対してオクルジョン効果がある場合安定性(既存のシステム同定・線形補償器設計ツールの適用可)を達成する。しかし従来基底を用いると、入出力線形性が低くなり、既存のシステム同定・線形補償器設計ツールが適用不可という問題が生じ得る。そこで動画像である出力ではなく入出力関係を評価し、高い入出力線形性を達成する新しい基底生成法の提案による視覚制御系全体のシステムティックな設計法(Figure 1)の確立が強く期待される。

### 2. 研究の目的

入出力線形性が低い(非線形性の強い)対象について、出力ではなく入出力関係を評価し、高い入出力線形性を達成する新しい基底生成法を提案する。さらにオンライン基底生成法・物理パラメータが未知の連続体の振動を再現するシミュレータ構築法、新しい実時間視覚制御装置を提案する。実時間視覚制御実験にて提案法の有効性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

[S1] 従来基底を用いると入出力線形性が低い対象について、出力の再定義に着目して、高い入出力線形性を達成する新しい基底生成法を提案して、視覚制御数値シミュレーションと実時間視覚制御実験から有効性(既存のシステム同定・既存の線形補償器設計ツールが適用可)を調べる。特に、未知線形モデル(以下、未知参照同定モデル)の仮定緩和、および、従来法(POD基底、Walsh基底の手法、他研究者の手法)との比較解析などが課題である。

[S2][S2-1] 入出力線形性が低速変化する対象について、[S1]の手法を逐次化することで、オンライン基底生成法を提案して、視覚制御実験にて有効性を調べる。特に[S1]の手法のオンライン化、および、オンライン化の際に安定性が達成される入出力線形性の変動クラスを明らかとすることなどが課題である。

[S2][S2-2] 物理パラメータが未知の連続体(例:余震or施工中の水槽・橋梁)の振動では一般に高次モードほど、従来センシングでは多量のセンサ(例:水位計、加速度計)や多量の幾何的特徴が必要という問題が生じる。振動を再現するシミュレータ構築のため、提案法を多項式空間に適用して、実時間視覚制御実験にて有効性を調べることが課題である。

[S2][S2-3] まず幾何的特徴を用いない実時間視覚制御装置は市販装置だけで実現されるかを調べる。現時点の規格の幾何的特徴を用いない実時間視覚制御装置では、デバイスドライバ・実時間化の主要部分は、研究代表者の過去の開発によるものであって担当学生の修士論文などへの記載に限定され、関連する部品メーカーなどの立場から研究代表者以外での使用はできない。そこで新しい規格の幾何的特徴を用いない実時間視覚制御装置の開発が課題である。

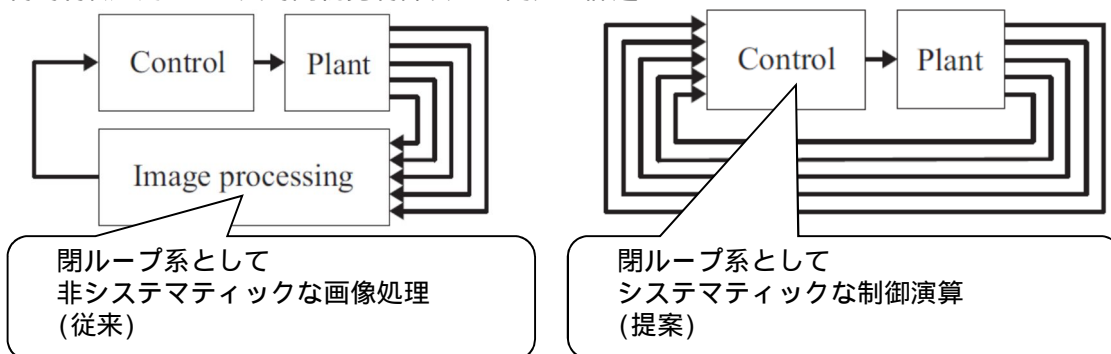


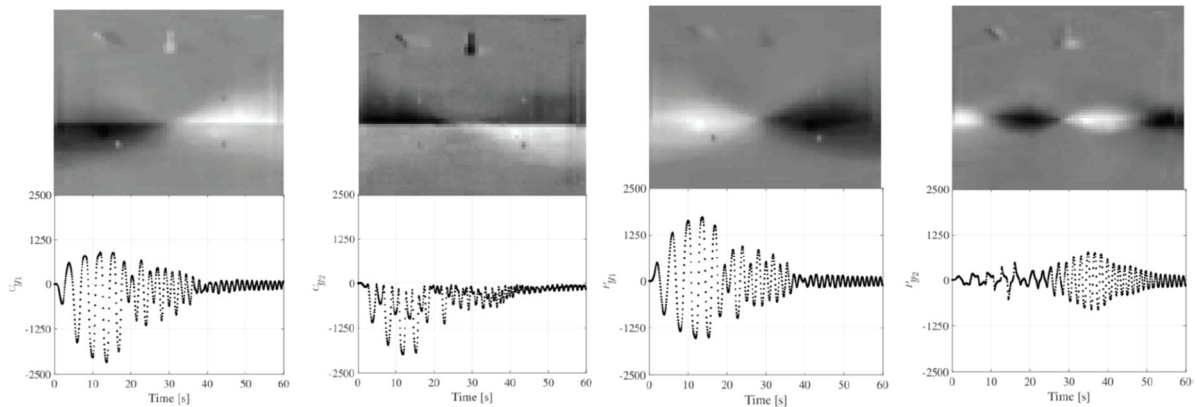
Figure 1 左:従来法の視覚制御,右:提案法の視覚制御

(従来法では幾何的特徴を抽出するための画像処理が必要であるが、提案法では幾何的特徴を抽出するための画像処理が不要であるため、汎用性が高い。)

### 4. 研究成果

[S1] 打ち切り作用素で定義される因果性と相互相関関数に関する相関性が同時に考慮された目的関数、および、正規直交性などの拘束条件から構成される最適化問題を定義して、厳密解として提案基底を生成する解法を提案した。提案基底を生成する際の未知参照同定モデルについての仮定(FIRの仮定)の緩和、提案基底を生成するための自由度活用による同定誤差の低減について提案した。以上の提案法を実時間視覚制御装置に実装して、数値的かつ実験的に有効性(既存のシステム同定・既存の線形補償器設計ツールが適用可)を確認した。

従来法のPOD基底と比較すると、Figure 2に示すように、POD基底の第2番目は上下対称、提案基底の第2番目は左右対称であった。低周波から高周波まで変化する振動入力のもと、入出力線形性を比較すると、POD基底の成分応答よりも提案基底の成分応答は入出力線形性が高くなった。達成された目的関数値を比較すると、提案基底の値はPOD基底の値の数倍となった。なお、POD基底のための目的関数とは異なって、提案基底のための目的関数は、出力を自身の入力でフィルタリングする構造を有しており、出力だけではなく入出力関係を評価する関数である。



**Figure 2 上段: 従来基底と成分応答, 下段: 提案基底と成分応答**  
 (従来基底の成分応答は非線形性が強くなった(POD基底の成分応答は非線形性が弱くなった)が提案基底の成分応答は非線形性が弱くなったため、既存の制御ツールが適用可となる.)

従来法の Walsh 基底では生成・実装の各段階を考慮した解像度の指定が可能であって、POD 基底と異なって全探索法による大域的最適化が常に保証されるため、Walsh 基底に限定した場合の同定結果・制御結果は、限界性能を与えないものの、Walsh 基底以外の一般の場合の同定結果・制御結果に対する有用な指針や考察を与える。まず Walsh 基底の生成負荷・実装負荷などを定量的に明らかとするため、Walsh 基底を制御応用する立場から、油圧アームに実在する不確かさ(ベルヌーイ則のモデル化誤差)を表現する物理テーブル(産業界のルックアップテーブルと異なって、テーブル値は流量センサなどの計測値ではなく物理モデルを介した計算値)を用いた圧力推定実験に Walsh 基底を応用した。実験の結果、様々な使用条件における Walsh 基底の生成負荷・実装負荷を実験的に確認した。生成負荷・実装負荷を考慮して解像度が指定された Walsh 基底に限定した場合において、提案した目的関数に関する最適化問題について、全探索法から高い入出力線形性を達成する Walsh 基底の生成法を提案した。提案法を実時間視覚制御装置に実装して、数値的かつ実験的に有効性を確認した。

従来法その他研究者(R. M. Murray ら)の球面多様体  $S^2$  での(局所的)手法では共通の視覚対象と全方位カメラを想定して解析した。

[S2][S2-1] グラムシュミット法が可能となるヒルベルト空間を前提とする局所的オンライン基底生成法を提案して、実時間視覚制御装置に適用して有効性を予備実験において確認した。大域的オンライン基底生成法として、安定性が達成される入出力線形性の変動クラスを明らかとするため、通常座標変換の自由度とは異なる設計自由度として、そもそもの出力空間の設計自由度(乱暴に言えば、ラグランジュ観測をするか、オイラー観測をするかの自由度)に注目して、ラグランジュ観測・制御のための出力空間(多項式空間の時間微分)とオイラー観測・制御(行列空間の時間微分・空間差分)の関係について、スロッシングを例題として、比較解析した。

[S2][S2-2] 連続体形状を数ベクトル空間ではなく多項式空間に定義する既報(TCST2014)のモデリング法と提案法を組み合わせ、物理パラメータが未知の連続体の振動を再現するシミュレータ法を提案した。多項式空間の提案基底を実時間視覚制御装置に実装して、実験の結果、液面形状の時間応答を計測した。比較のため、多項式空間の POD 基底についても同既報のモデリング法と組み合わせ、液面形状の時間応答を計測した。実験の考察として、提案基底によって入出力間の写像の非線形性が弱くなった(入出力間の写像の線形性が強くなった)と考えられ、提案法の有効性が確認された。

[S2][S2-3] 幾何的特徴を用いない実時間視覚制御装置の関連技術の調査を実施した。調査項目はソフトウェア名称(システム名称)・カメラ規格・通信規格(BUS 規格を含む)・サンプリング周波数(実時間性能)・チャンネル数・価格などである。調査の結果として、

- A 幾何的特徴を用いない実時間視覚制御装置は市販技術ではないこと、
  - B 実時間視覚制御に必要な要件を外した場合であっても、複数のカメラ規格・通信規格(バス規格を含む)が存在しており、数か月の単位で規格の市場順位が変化しうること(収束していないこと)、
- が明らかとなった。再調査時点を数か月単位で遅らせ、別規模の応募枠と研究環境が不可欠と考えられる。

以上、動画像である出力ではなく入出力関係の評価し、高い入出力線形性を達成する新しい基底の生成法を提案して、視覚制御系全体のシステムティックな一設計法の有効性を数値的または実験的に確認した。提案法の応用範囲はスロッシングに限定されず他の連続体を含む。特に、設計段階とは異なる未知の境界条件のもと、物理パラメータが未知の連続体の振動を再現するシミュレータ法については手順を以下に整理しておく。

- <手順1> 連続体(例:本震・余震後もしくは施工中の構造物・圃場)への入力(例:実際の地震加速度・実際の風速・実際の日射量)と標準基底についての出力(例:通常の映像、高速カメラの映像)の計測、
- <手順2> 物理パラメータの同定が不要な入出力のみから提案基底を生成、
- <手順3> 入力と提案基底についての出力からシステム同定、
- <手順4> 連続体への想定入力(例:想定される地震加速度・風速・日射量)に対する形状応答(例:構造物形状の時間変化、圃場濃度分布の時間変化)のシミュレーション。

以上

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 那花優将, 永井一輝, 酒井悟	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 油圧アームの非定常流量要素の最適行列同定とオンライン推定への応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本フルードパワーシステム学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Satoru, Ando Masayuki, Kobashi Shunsuke	4. 巻 27
2. 論文標題 Visual Feedback Without Geometric Features Against Occlusion: A Walsh Basis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY	6. 最初と最後の頁 864-871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCST.2017.2780176	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Satoru, Stefano Stramigioli	4. 巻 23
2. 論文標題 Visualization of Hydraulic Cylinder Dynamics by a Structure Preserving Nondimensionalization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE-ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS	6. 最初と最後の頁 2196-2206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2018.2854751	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Satoru Sakai	4. 巻 2
2. 論文標題 Piston Asymmetry vs. Pipeline Asymmetry in Hydraulic Cylinder Dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Hydromechatronics	6. 最初と最後の頁 260-270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJHM.2019.102895	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計17件(うち招待講演 0件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Satoru Sakai
2. 発表標題 Further Result on the Fast Computation of a Class of Hydro-Mechanical Systems
3. 学会等名 IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Cheng Hongsheng, Satoru Sakai
2. 発表標題 On the Fast Computation of Hydraulic Cylinder Optimizations
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shota Morozumi, Kumho Lee, Satoru Sakai
2. 発表標題 Visual Modeling of Non-Planar Sloshing via a Linearizing Basis
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihiro Tatsuoka, Satoru Sakai, Qin Zhang
2. 発表標題 Modeling of Hydraulic Robots with an Open-Center Dynamics
3. 学会等名 SICE International Symposium on Control Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永井一輝, 那花優将, 酒井悟
2. 発表標題 油圧アームの非定常流量要素の最適行列同定
3. 学会等名 フルードパワーシステム講演会講
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村祐希, 酒井悟
2. 発表標題 水平1自由度油圧アームのカセンサレス直接教示
3. 学会等名 フルードパワーシステム講演会講
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木遼平 酒井悟
2. 発表標題 幾何的特徴量を用いない行列空間上の視覚制御のための斜交基底
3. 学会等名 計測自動制御学会中部支部シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoru Sakai
2. 発表標題 A structure preserving nondimensionalization of hydraulic rotational joints
3. 学会等名 IEEE ICRA 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塩井優, 渥美翔太, 酒井悟
2. 発表標題 鉛直油圧アームの交差検証とオンライン故障検出
3. 学会等名 平成29年度春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yu Shioi, Satoru Sakai
2. 発表標題 Casimir based gravity compensations for hydraulic arms
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hongsheng Cheng, Satoru Sakai
2. 発表標題 An application of the special nondimensionalization for hydraulic cylinders
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Nabana, Satoru Sakai
2. 発表標題 A Validation of the Practical Non-Bernoulli Modeling for Asymmetric Hydraulic Arms
3. 学会等名 SICE MSCS 2018 (March) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 Masaki Obara, Koji Sekiguchi, Satoru Sakai
2. 発表標題 Toward a Faster MPC of Hydraulic Arms
3. 学会等名 Proceedings of SICE AC (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoru Sakai
2. 発表標題 A Direct Teaching Control via Casimir of Force Sensorless Hydraulic Arms
3. 学会等名 Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉井敦司, 酒井悟
2. 発表標題 幾何的特徴量を用いない視覚制御のためのWalsh基底の一選定
3. 学会等名 日本機械学会運動と振動の制御シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋康輝, 永井一輝, 酒井悟
2. 発表標題 油圧アームの非定常流量要素の最適行列同定の精度向上
3. 学会等名 令和元年度秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 宇城友貴, 酒井悟
2. 発表標題 Walsh基底に基づく非平面スロッシング視覚制御実験
3. 学会等名 Dynamcis and Design Conference
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 酒井 悟	4. 発行年 2017年
2. 出版社 近代科学社	5. 総ページ数 1024
3. 書名 ロボット制御ハンドブック第2 5章農業用支援ロボット	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 制御流量推定用ルックアップテーブルおよび圧力推定方法	発明者 酒井 悟	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、P181S54	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<a href="http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.upymgbye.html">http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.upymgbye.html</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考