

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32675
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2019～2022
課題番号：19H02163
研究課題名（和文）スパースセンシングの制御系設計への展開

研究課題名（英文）sparse sensing for control theory

研究代表者

小西 克巳（Konishi, Katsumi）

法政大学・情報科学部・教授

研究者番号：20339138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,530,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、計測および制御対象から僅かな情報量のセンシングデータしか取得できない場合、これらのサンプリングデータを用いて制御系を設計する手法を導出した。具体的には、観測データが線形でない低次元部分空間に属する場合のスパースセンシング手法の導出、導出された手法を用いた予測制御手法の導出、および、高速計算手法を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、入出力データの全てが既知でない場合、部分的に欠損がある場合、不等間隔サンプリングデータである場合でも、入出力データを修復し再構成することで、制御形設計が可能となった。線形システムだけでなく、非線形システムにも対応した。システム生物学分野や、医療応用分野では、不等間隔サンプリングデータしか得られないことが多い。本研究により、これらの分野における数学モデルの構築や制御手法の導出などが可能となり、社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This work proposed a method for designing control systems using sparse data when only a small amount of informative sensing data can be obtained from the measurement and control target. Specifically, we derived a sparse sensing method, a predictive control method using the derived method, and a fast computation method when the observed data belong to a nonlinear low-dimensional subspace.

研究分野：制御工学

キーワード：スパースモデリング

1. 研究開始当初の背景

技術的な制約やコスト制約により、時間解像度や取得する測定量の解像度が極めて低い場合や、等しい時間間隔でないサンプリングデータしか得られない場合など、計測制御対象から僅かな情報量のセンシングデータしか得られず、数理モデルや制御ロジックの構築が困難な場合がある。例えば、システム生物学分野における細胞内の DNA を介する情報伝達機構の数理モデル構築では、計測する度に細胞が死滅するため、実験コストの観点から、サンプリングの定理を満たすような等時間間隔で計測することは困難で、僅か十数点の不等時間間隔センシングデータしか得られない。細胞の機能発現の場合では、ある物質の濃度が閾値を超えたときに機能が発現し、その時に初めて出力が観測されるルベグサンプリングデータとなることや、測定量が 0 か 1、または、それに近い極めて解像度の低いセンシングデータとなるなど、僅かな情報量のセンシングデータしか取得できない。また、アトピー性皮膚炎などの病気のメカニズムを数理モデル化し、その数理モデルに基づいて予測制御、すなわち、投薬や治療の計画を設計する研究では、対象者が通院した時のみしか観測できない。これらのような情報量が少ないセンシングデータから、十分な情報量のセンシングデータを再構築する手法はスパースセンシングと呼ばれている。スパースセンシングにおけるセンシングデータの再構成の研究は多く進められているが、スパースセンシングで得られたセンシングデータを用いて制御系設計に利用する研究は、あまり進められていなかった。そこで、スパースセンシング手法の確立とスパースセンシング制御の体系化が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、計測および制御対象から僅かな情報量のセンシングデータしか取得できない場合、これらのサンプリングデータを用いて制御系を設計する手法の確立を目指す。具体的には、以下の手法の構築が目的である。

- (1) 観測データが線形でない低次元部分空間に属する場合のスパースセンシング手法の確立
- (2) (1) を用いた予測制御手法の確立
- (3) (1) および (2) の高速計算手法の確立

3. 研究の方法

本研究では、スパースセンシング手法の確立とスパースセンシング制御の体系化のため、上記研究目的に対応した以下の 3 項目の研究を実施する。

- (1) 計測データが線形でない低次元部分空間に属する場合のスパースセンシング手法の導出
- (2) (1) を用いた予測制御手法の導出
- (3) (1) および (2) の高速計算手法の導出

4. 研究成果

本研究では、以下の 4 項目の研究成果について説明する。

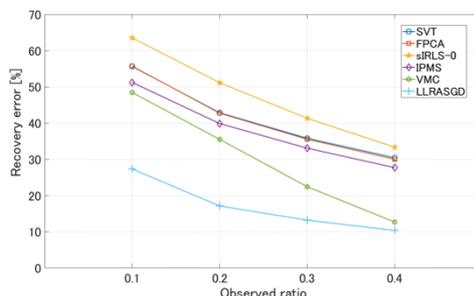
- (1) 観測データが線形でない低次元部分空間に属する場合のスパースセンシング手法の確立

観測データが線形部分空間に属すると仮定した場合は、観測データベクトルを並べた行列が低ランク行列になるように行列を再構成することで密な観測データを得ることができる。行列の核ノルム最小化手法など、多くの手法が提案されている。しかし、実際の観測データが線形部分空間に属することは稀であり、非線形な低次元部分空間に属するケースが多い。そこで本研究では、k-means 法に基づく手法と局所的な接平面に着目する手法の 2 種類の手法を提案した。

k-means 法に基づく手法では、非線形な低次元部分空間を複数個の低次元アフィン部分空間に分割し、各低次元アフィン空間で観測データを再構成する手法を導出した。k-means 法に基づき、行列を k 個に分割し、各行列を低ランクに再構成する手法である。同手法では、

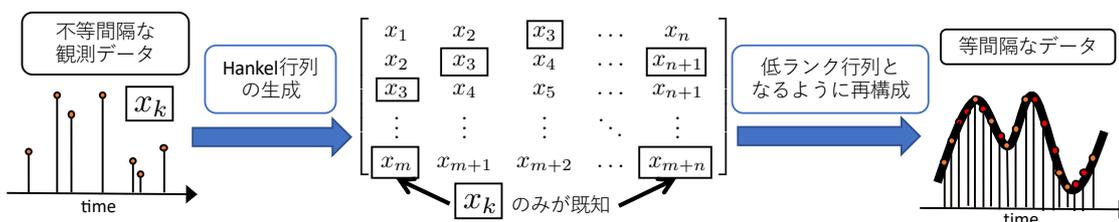
行列の分割（ベクトルのグループ化）と再構成を繰り返す。このとき、分割数を大きくした方が再構成の精度は向上するが、計算速度が大幅に低下するという問題がある。そこで、少ない分割数の再構成を複数同時に行い、再構成の精度を保ったまま計算速度を向上する手法を導出した。

局所的な接平面に着目する手法では、観測データが低次元可微分多様体に属すると仮定し、ある観測点の接平面に注目し、その接平面上で観測データを再構成する手法を導出した。k-means 法に基づく手法では、観測データをグループに分割したが、本手法では各観測データに重み付けを行い、複数の重み付された行列を低ランクになるように再構成している。これにより、k-means 法に比べて飛躍的に再構成の精度が向上した。右図が他手法との比較である。横軸が全のデータに対して観測されたデータの割合、縦軸が修復誤差である。提案手法（locally low-rank approach using stochastic-gradient-like algorithm, LLRASGD）が他の手法に比べて、修復精度が高いことがわかる。



(2) (1) を用いた予測制御手法の導出

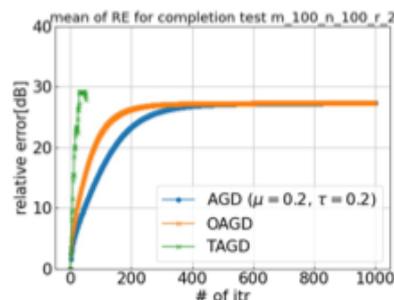
時系列信号に欠損がある場合、下図のように、その時系列信号を並べた Hankel-like 行列を修復することで欠損信号を推定することができる。



本研究では、所望の出力信号を与えたとき、この出力に対応する入力を欠損信号とみなして予測制御を実現する手法を導出した。過去の入出力信号に欠損がある場合でも対応することが可能なスパースセンシングを用いた予測制御手法である。

(3) 深層展開による行列再構成手法の高速化

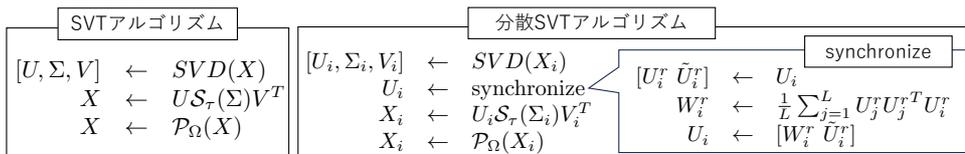
項目 (1) で導出した方法は大規模行列を対象とした場合、膨大な計算時間を要する。また、最急降下法に基づく手法であり、解の精度と収束速度がアルゴリズム内部のパラメータに強く依存する。そこで、最急降下法に基づく手法のパラメータを深層学習を用いて最適化する手法である深層展開を用いた手法を導出した。右図が数値計算の結果である。横軸がアルゴリズムの繰り返し数、縦軸が真の解との相対誤差である。既存手法の AGD (alternative gradient descent) および OAGD (optimized AGD) に比べ、提案手法である TAGD (trainable AGD) が極めて短い繰り返し数で精度の高い解を与えていることがわかる。



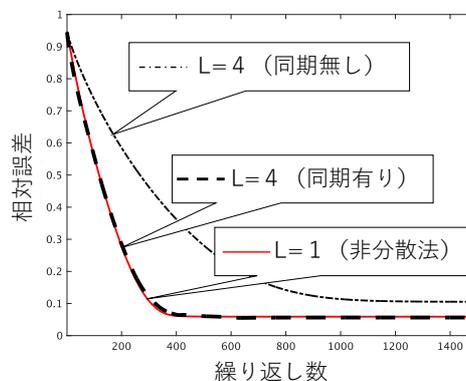
(4) 分散核ノルム最小化手法の導出

行列の再構成手法である核ノルム最小化手法の多くは特異値分解に基づく手法であり、行列が大規模になると膨大な計算量を要する。計算の高速化のため GPU による計算を用いるが、大規模行列の場合には GPU のメモリ不足により計算が不可能となってしまう。例えば、 $100,000 \times 100,000$ を超える大規模行列を対象とする場合、GPU メモリ容量の制限により行列を扱うことが出来ずに適用不可能である。実用上は $1,000,000 \times 1,000,000$ を超える超大規模行列の補完手法が望まれている。これに対し、本研究では、行列を分割して核ノルム最小化を実現する分散アルゴリズムを提案し、大規模行列補

完手法を導出した。下図のようなアルゴリズムである。最も利用されている核ノルム最小化手法である SVT (singular value thresholding) 法に基づき、分散 SVT アルゴリズムを導出した。行列を分割し、左特異ベクトル行列を同期する手法である。



右図は $3,000 \times 4,000$ サイズでランク 3 の行列の 10% の成分が既知の場合に未知成分を推定した結果である。横軸が繰り返し回数、縦軸が真値との相対誤差であり、従来の非分散 SVT 法と、行列を 4 分割した場合の分散 SVT 法 (同期あり)、および、4 分割し同期しなかった場合の比較結果を示している。分散 SVT 法において左特異ベクトル行右列を同期することで、従来の非分散 SVT 法とほぼ同程度の推定精度が得られることが確認できる。



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 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomohiro TAKAHASHI, Katsumi KONISHI, Kazunori URUMA, Toshihiro FURUKAWA	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Multiple Subspace Model and Image-Inpainting Algorithm Based on Multiple Matrix Rank Minimization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2682-2692
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2020EDP7086	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 佐々木 亮平, 小西 克巳, 古川 利博	4. 巻 J103-D
2. 論文標題 多様体低次元化に基づく行列因子分解アルゴリズムの提案と協調フィルタリングへの応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 D	6. 最初と最後の頁 506-517
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transinfj.2019JDP7062	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 Sasaki Ryohei, Naito Rin, Konishi Katsumi	4. 巻 36
2. 論文標題 深層展開に基づく行列完成手法の高速化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 106 ~ 112
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5687/iscie.36.106	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 Sasaki Ryohei, Konishi Katsumi, Takahashi Tomohiro, Furukawa Toshihiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 Local low-rank approach to nonlinear matrix completion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EURASIP Journal on Advances in Signal Processing	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） 10.1186/s13634-021-00717-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

[学会発表] 計14件(うち招待講演 2件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Katsumi Konishi, Tomoki Shise, Ryohei Sasaki, Toshihiro Furukawa
2. 発表標題 Multiple k-Means Clustering Based Locally Low-Rank Approach to Nonlinear Matrix Completion
3. 学会等名 2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Shise, Katsumi Konishi, Ryohei Sasaki, Toshihiro Furukawa
2. 発表標題 Multiple Piecewise Affine Model Based Locally Low-Rank Approach to Image Inpainting
3. 学会等名 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryohei Sasaki, Guo Bin, Katsumi Konishi
2. 発表標題 Neural Network based on Local Dimensionality Reduction for Matrix Completion
3. 学会等名 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsumi Konishi, Ryohei Sasaki
2. 発表標題 A parallel nuclear norm minimization algorithm for matrix rank minimization problems
3. 学会等名 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuto Wada, Ryhohei Sasaki, Katsumi Konishi
2. 発表標題 K-Means Based Matrix Shrinkage Iterative Algorithm for Input and Output Signal Recovery
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsumi Konishi, Ryhohei Sasaki
2. 発表標題 Distributed Nuclear Norm Minimization Algorithm for Low-Rank Matrix Completion and Its Application to Low-Rank Tensor Completion
3. 学会等名 IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小西克巳
2. 発表標題 深層展開の信号修復への応用
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuto Wada, Ryhohei Sasaki, Katsumi Konishi
2. 発表標題 Adaptive Subspace Reconstruction Algorithm for Subspace Clustering
3. 学会等名 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 和田拓土, 佐々木亮平, 小西克巳
2. 発表標題 部分空間クラスタリングのための適応的な部分空間再構成アルゴリズム
3. 学会等名 第11回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Katsumi Konishi, Ryhohei Sasaki
2. 発表標題 Distributed Nuclear Norm Minimization Algorithm for Matrix Completion and Its Application to Signal Recovery of Piecewise Affine Models
3. 学会等名 Proc. of The 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 亮平, 小西 克巳
2. 発表標題 局所低ランク化に基づく行列補完の高速解法
3. 学会等名 第36回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 郭 斌, 佐々木 亮平, 小西 克巳
2. 発表標題 行列補完のためのニューラルネットワークによる局所低ランク近似
3. 学会等名 第36回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Sasaki, Katsumi Konishi
2. 発表標題 Acceleration Technique for Multiple k-means Clustering based Locally Low-rank Approach to Nonlinear Matrix Completion
3. 学会等名 European Signal Processing Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小西克巳
2. 発表標題 行列完成問題のための行列ランク最小化と最尤推定
3. 学会等名 信号処理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	澤田 賢治 (Sawada Kenji) (80550946)	電気通信大学・i - パワードエネルギー・システム研究センター・准教授 (12612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------