

# 研究終了報告書

## 「周期／非周期分離制御の開拓」

研究期間：2020年11月～2023年3月

研究者：村松 久圭

### 1. 研究のねらい

本研究課題は制御工学分野において単一的に取り扱われてきたシステムの状態へ、周期／非周期視点を導入し、準周期状態と準非周期状態で構成される周期／非周期状態として状態を再定義する。本定義に基づき、分離した状態制御および情報解析を実現する最適周期／非周期分離フィルタの理論構築、ロバスト周期／非周期分離制御の理論構築、周期／非周期インタラクティブロボットの開発・実装を遂行する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究課題では、最適周期／非周期分離フィルタ、ロバスト周期／非周期分離制御、多腕ロボット開発と周期／非周期運動制御、周期／非周期分離に基づく工作機械モニタリングを実施した。

まず、これまで単一的に取り扱われてきたシステムの状態へ、周期／非周期視点を導入し、準周期状態と準非周期状態、そしてそれらで構成される周期／非周期状態を新たに定義した。そして、それらの直交性および線形性を明らかにした。定義に則り、周期／非周期状態を準周期状態と準非周期状態へ分離する周期／非周期分離フィルタを設計するとともにカルマンフィルタと統合し、雑音にロバストな最適周期／非周期分離フィルタを実現した。次に、周期／非周期・準周期・準非周期外乱を推定・補償し、ロバストな周期／非周期分離制御を実現した。

周期／非周期分離の応用として、多腕ロボットの開発と工作機械モニタリングの共同研究を実施した。特に、工作機械モニタリングにおいては、切削力から加工面を悪化させるびびり振動を周期／非周期分離により抽出し、最適閾値変化および切削条件変化に対するロバスト化を実現した。

#### (2) 詳細

研究テーマ「最適周期／非周期分離フィルタ」

##### ● 目的

周期／非周期、準周期、準非周期を定義・解析し、最適周期／非周期分離フィルタを実現する。

##### ● 達成状況

周期／非周期状態、準周期状態、準非周期状態を以下の図のように新たに定義し、それを分離する周期／非周期分離フィルタを提案した。まず、状態をリフティング変換によりリフ

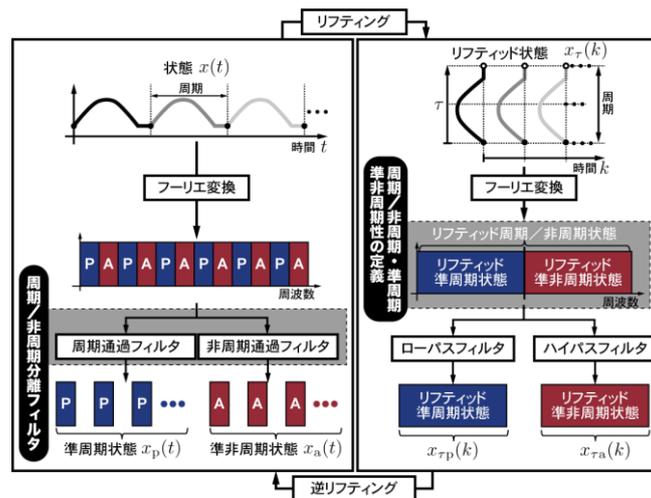


図1. 準周期状態および準非周期状態の定義と周期／非周期分離フィルタの設計.

リフティッド状態へと変換する. これにより, サイクルごとのダイナミクスに着目が可能となり, リフティッド状態をフーリエ変換し, 低周波を含む状態をリフティッド準周期状態と, 高周波を含む状態をリフティッド準非周期状態として定義した. それらリフティッド状態を逆リフティング変換し, 準周期状態と準非周期状態を定義した. これに則り, リフティッド状態をリフティッド準周期状態および準非周期状態へ分離するローパスフィルタおよびハイパスフィルタを逆リフティング変換することで, 周期／非周期分離フィルタを導出した.

定義した周期／非周期性, 準周期性, 準非周期性に対して, 準周期状態の和および準非周期状態の和は準周期状態および準非周期状態となり, それらの実数との積もまた準周期状態および準非周期状態となることを示した. さらに, 準周期状態および準非周期状態を定義する準周期関数および準非周期関数の直交性を明らかにした. 最後に, 周期／非周期状態から準周期状態および準非周期状態を抽出する周期通過関数と非周期通過関数の線形性を明らかにした.

周期通過関数と非周期通過関数をフィルタとして実現し, 高次周期／非周期分離フィルタの設計論を構築した. その後, カルマンフィルタと統合し, 以下のような雑音を含む信号から準周期信号と準非周期信号を推定するロバストな最適周期／非周期分離を実現した.

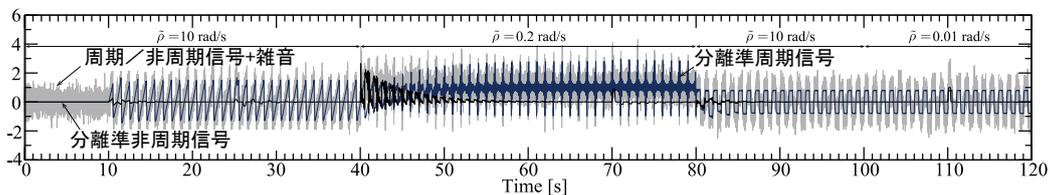


図2. 雑音下における周期／非周期分離.

研究テーマ「周期／非周期分離に基づく工作機械モニタリング」

● **目的**

工作機械の切削において発生し加工面を劣化させるびびり振動をリアルタイム高速検知する, 周期／非周期分離に基づくびびり振動検知アルゴリズムの開発.

## ● 達成状況

以下の図に示すようなボールネジテーブルを有するフライス加工機を対象に研究を実施した。切削中に発生する切削力をボールネジテーブルを駆動するモータへの電流入力・回転エンコーダ・リニアエンコーダ情報から推定した。そして、本研究課題にて提案した周期／非周期分離フィルタを用いて推定切削力を準周期力と準非周期力へ分離した。ここで、準周期

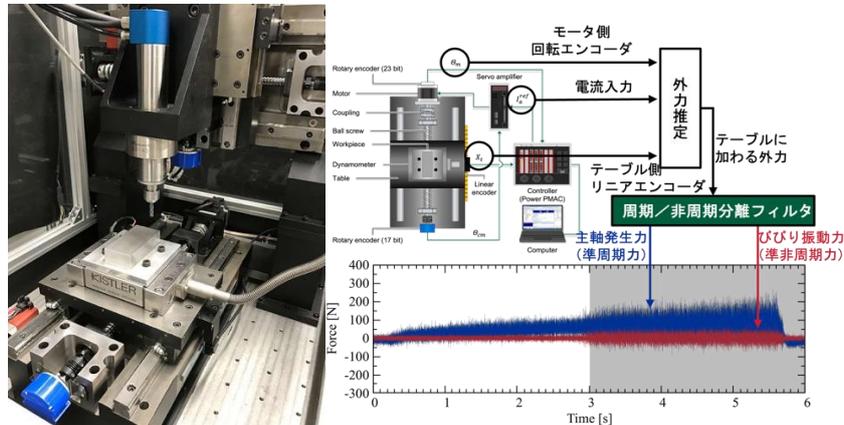


図3. フライス加工中の準周期力と準非周期力の推定。

(左:実験システム, 右:準非周期切削力推定アルゴリズム)

力が主軸によって発生する力に、準非周期力がびびり振動に対応することに着目し、準非周期力を用いたリアルタイムびびり振動検知アルゴリズムを構築した。

以下に、横軸を閾値として、縦軸を検知時間遅れ(誤差)とした実験結果を示す。なお、周期／非周期分離フィルタ(PASF)が有する設計パラメータである分離周波数を変化させた結果を複数示している。周期／非周期分離フィルタを用いない推定(図中の黒破線)と比較し、

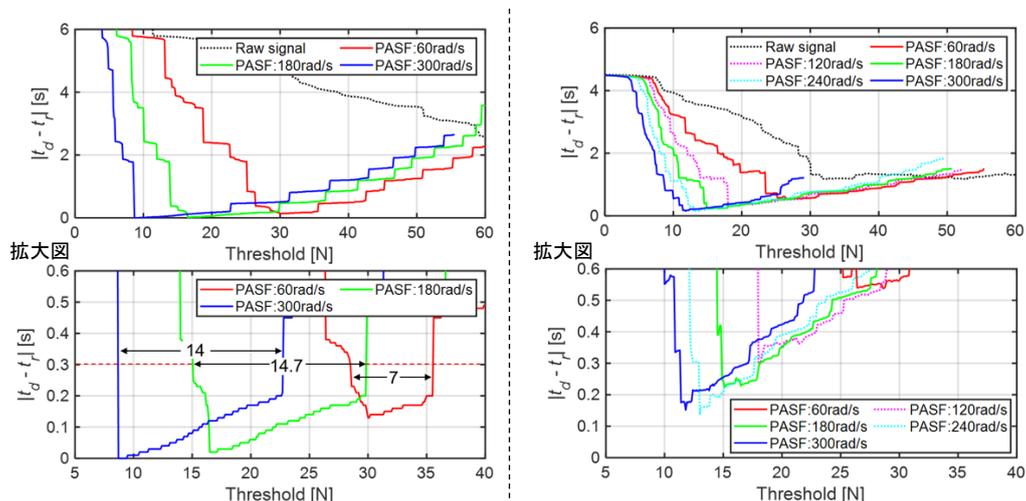


図4. びびり振動検知の実験結果. 閾値に対するびびり振動検知時間遅れ(誤差).

(左:1つの切削条件, 右:複数の切削条件間の平均値)

高速検知が実現されたことがわかる(図4左)。また、閾値の最適設計が困難な場合においても、素早い検知を実現する閾値の幅を有しており、その幅において検知の遅れは小さく抑えられた。切削条件を変化させた場合(図4右)においても、周期／非周期分離フィルタを用いな

い推定(図中の黒破線)と比較し, 高速検知を実現し, ロバストなびびり振動を実現した.

### 3. 今後の展開

将来的な社会実装として, 適応周期/非周期分離フィルタおよびその制御を今後3年間を通して確立し, その後3年間を通し, 企業との共同研究を通して協働ロボットおよび工作機械の周期/非周期分離制御の社会実装を目指す.

### 4. 自己評価

#### 研究目的の達成状況

研究目的として, 最適周期/非周期分離フィルタ, ロバスト周期/非周期分離制御, 周期/非周期インタラクティブロボットの開発・実装を設定していた. 当初の予定通り最適周期/非周期分離フィルタの理論を構築し, 当初の予定とは異なる方法にてロバスト周期/非周期分離制御を実現した. 周期/非周期インタラクティブロボットの開発・実装は当初とは異なる多腕ロボットの開発という新たな研究へと発展を成し遂げつつ, 一方で, 周期/非周期分離制御の実装には至っていない. 最後に, 当初予定していなかった周期/非周期分離に基づく工作機械モニタリングという新たな共同研究を達成した.

#### 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究実施者が主体的に研究および共同研究を実施でき, 良好な研究実施体制がひかれていた. 研究費は多腕ロボットおよび実験機の開発を中心に執行され, 良好な研究費執行状況であった.

#### 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

研究成果の科学技術への波及効果として, 本プロジェクトの成果となる周期/非周期分離フィルタは生産加工分野への波及効果をもたらし, 生産加工分野の研究者との共同研究を通してロバストな工作機械のびびり振動検知を実現した.

研究成果の社会・経済への波及効果として, 2件の特許出願を行った.

#### その他領域独自の評価項目に基づいた評価

周期/非周期分離フィルタとカルマンフィルタの統合を通して, モデルベース予測とむだ時間に基づくデータベース分離を融合することに成功した. これは, 数理モデル型アプローチとデータ駆動型アプローチの融合に寄与した. さらに, 周期/非周期分離に基づく工作機械モニタリングの研究は数理学と情報科学の知見を活かした他分野(生産加工分野)への応用を達成した.

### 5. 主な研究成果リスト

#### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

1. Hisayoshi Muramatsu. Separation and Estimation of Periodic/Aperiodic State. Automatica. 2022, vol. 140, no. 3, p. 110263.

周期/非周期状態, 準周期状態, 準非周期状態を新たに定義し, 周期通過関数と非周期通過関数の線形性および準周期状態関数と準非周期状態関数の直交性を証明した. さらに,



周期／非周期分離フィルタ(PASF)とカルマンフィルタ(KF)を統合した手法 KF-PASF を提案し、誤差の期待値が零となる不偏推定、誤差分散と準周期誤差分散および準非周期誤差分散の和が等しくなることを証明した。

2. Hisayoshi Muramatsu and Shuntaro Yamato. Harmonics Elimination by Periodic/Aperiodic Separation Filter for Chatter Detection. Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers. 2023, vol. 36, no. 3.

周期／非周期分離フィルタを工作機械のびびり振動検知へ応用した。フライス加工の切削力において、主軸回転による力が準周期力に、びびり振動による力が準非周期力に対応することに着目した。そして、周期／非周期分離フィルタを適用することで高調波を含む準周期力を抑圧し、びびり振動に関する力の抽出および振動検知のロバスト化を実現した。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数: 2件(特許公開前のものも含む)

## (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Hisayoshi Muramatsu and Shuntaro Yamato, "Design of Periodic/Aperiodic Separation Filter for Harmonics Elimination and Its Application to Chatter Detection," International Symposium on Flexible Automation (ISFA) 2022, Yokohama, Japan, 3-6 July 2022.
2. Hisayoshi Muramatsu and Seiichiro Katsura, "Periodic/Aperiodic Motion Control Using Periodic/Aperiodic Separation Filter," IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control, Padova, Italy, 18-20 February 2022.
3. Hiroki Tanaka and Hisayoshi Muramatsu, "Band-Stop Bandwidths Adjustment for a Periodic Disturbance Observer," The 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2021, Toronto, Canada, 13-16 October 2021.
4. Hisayoshi Muramatsu, "Periodic-Position and Aperiodic-Impedance Control Based on Periodic/Aperiodic Disturbance Compensation," The 7th IEEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2021), Chiba, Japan, 10-12 March 2021.
5. Masaki Hino and Hisayoshi Muramatsu, "Periodic/Aperiodic Hybrid Position/Impedance Control Using Periodic/Aperiodic Separation Filter," IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2021), Chiba, Japan, 7-9 March 2021.