

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560549

研究課題名(和文) 概周期運動のための制御理論の構築 実用的なヒューマンアシスト技術開発に向けて

研究課題名(英文) Development of Control Theory for Almost-Periodic Motions - Aimed at Practical Human Assist Technology

研究代表者

平田 健太郎 (HIRATA, Kentaro)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：00293902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：まず、むだ時間の伸縮を考慮した繰返し制御に関する研究を推進した。また、概周期信号の適応推定を元に、フィードフォワード的な制御をおこなうことを検討した。概周期信号の生成機構のダイナミクスに基づく状態推定、LPVシステム理論に基づく周期外乱オブザーバや、時変周期信号のための自己回帰モデル(TVSARモデル)を用いて、概周期信号そのものの適応推定をおこなう方法についても検討した。さらに、適応ノッチフィルタの採用によって、制御構造そのものを適応化することも検討した。

研究成果の概要(英文)：Repetitive control with varying time delay length is investigated first. Then, feed forward strategies based on adaptive estimation of almost-periodic signals are examined. Unknown input observer for the generator of almost-periodic signals, periodic disturbance observer based on LPV systems theory and Time-Varying Seasonal Auto Regressive Model (TVSAR model) are studied. Adaptive controller design based on adaptive notch filters is also considered.

研究分野：制御理論

キーワード：周期運動 エネルギー効率

## 1. 研究開始当初の背景

社会の持続的発展のために制御工学が担うべき分野として、ヒューマンアシスト技術、とりわけ周期運動に対する高エネルギー効率なパワーアシスト技術に着目している。ロボティクスの分野では、福祉利用をにらんだアシスト技術の研究開発が活発におこなわれているが、多くのロコモーションにみられる運動の周期性に着目した研究は少なかった。

## 2. 研究の目的

我々は先行研究において、電動自転車のパワーアシストを例にとり、エネルギー効率の観点からこの問題を検討した。得られた結果は、エネルギー損失を粘性摩擦損で代表させると、周期入力による速度変動を除去するアシスト戦略が最適であるというものであった。一方、実際の自転車をを用いた実験から、人のペダリングが概周期的であり、周波数ゆらぎを持つことが根本的な問題であることが分かった。定常性を背景にした周波数応答に基づく従来の制御系の解析・設計手法では、このような課題に対して必ずしも十分な結果が得られない。これを克服するためには、新たな数理的枠組みが必要であるという認識に基づいて、本研究では、概周期運動のための制御理論・手法の構築と、そのヒューマンアシスト技術への応用を目的とした。

## 3. 研究の方法

まず、むだ時間の伸縮を極限的に扱うために、微小伸縮を仮定した線形近似モデルに基づく方法を検討する。

次に、概周期信号の適応推定を元に、フィードフォワード的な制御をおこなうことを考える。例えばペダリングの例であれば、概周期信号であるペダリング力の生成機構である人の筋骨格系のダイナミクスに基づく状態推定により、ペダリング力の推定をおこなうことが考えられる。他にも、純粋に信号処理的立場から、概周期信号そのものの適応推定をおこなう立場もあり得る。周期外乱を推定するためのオブザーバの利用や、時変周期信号のための自己回帰モデルの採用を検討する。

他方、制御機構自体を適応的に調節するという立場もあり得よう。制御器の構造を適応的に変化させる方式についても検討する。

また、これらと並行して、定周期運動や一定むだ時間に対する従来理論、特にシステム表現に関する作用素論的アプローチの発展についても検討をおこなう。また、既存の電動自転車に限らない適用対象やアシスト機器そのものの開発、制御についても検討する。

## 4. 研究成果

(1) 制御方策に関して、むだ時間の伸縮を考慮した繰返し制御に関する研究を推進した。この結果をまとめた論文が計測自動制御学会論文誌に掲載された。これは先行研究において、遅延フィードバックのむだ時間伸縮を考えたものと双対的な関係をなすものであり、両者が明らかになったことの理論的な意義は大きい。また、この制御法を、医療機器(チューブポンプ)の圧力変動抑制に用いる共同研究も推進中である。

(2) 自転車のペダリング動作において、関節トルクの一部が未知である状況を想定し、閉リンク系に対する仮想切断法によるモデル化、逐次線形化と未知入力オブザーバによる推定を組み合わせた手法について、検討した。これは人間の概周期的運動を適応的に推定して、アシスト制御につなげる研究のひとつである。後出の周期信号オブザーバや時変季節性 AR モデルによる概周期信号自体のモデル化ではなく、人間の筋骨格系ダイナミクスも含めたモデル化・推定を試みている点に特徴がある。モータ駆動の脚を想定した検討に留まり、実際の筋骨格系のモデル化には至っていない。

(3) 前項とは異なり、純粋に信号処理的立場から、概周期信号そのものの適応推定をおこなう研究も推進した。ひとつめは、周期外乱オブザーバと適応推定機構によって概周期運動を推定・制御する方法である。周期外乱の生成ダイナミクスが、外乱周波数をアフィンパラメータとして含む LPV システムとして記述できることから、ゲインスケジューリング制御に類似の考え方によって LPV システム集合に対する共通のオブザーバゲインが設計できる。適応周波数推定器とこれを組合せて、外周期外乱の瞬時値を推定し、フィードフォワード入力によりその影響をキャンセルする。これについては電動アシスト自転車に対する実機実験まで完了しており、今後成果をまとめる予定である。

(4) もうひとつの方法は、時変季節性 AR (TVSAR) モデル (Time-Varying Seasonal AR model) によって概周期運動を推定する方法である。ペダリング動作に適用した場合、周期内のサンプルデータの前後関係を全く考慮しないにもかかわらず、比較的精度の高い推定が可能であった。クランク角によって一巡前の時点を正確に把握していることの影響が大きいと考えられる。これについて国際会議等で発表をおこなった。しかしデータ採取にあたり、モーションキャプチャーをテンポラリに使用してクランク角を測定していたため、恒常的に実機実験可

能な環境は構築できていない。今後の課題である。

(5) 制御機構を適応的に調節するという立場からは、適応ノッチフィルタを用いて、ペダリング周波数の変動に対応したアシストを行なう方法についての共同研究も進めており、共著成果を国際会議で発表し、共著論文を投稿中である。

(6) 従来的一定周期運動や固定むだ時間系に対する検討も並行して継続的に進めている。繰返し制御に基づくアシストによって、移動に関するエネルギー効率を高める手法を船舶に対して応用したショートペーパーが、計測自動制御学会論文誌に掲載された。当該技術の応用範囲を拡げる点で有用な結果である。

(7) むだ時間系に対する状態予測制御を、バックステッピングを用いて分布系と集中系の直列結合に変換して取扱うKristicらの研究に触発され、離散時間の状態予測制御系の固有値の配置に関する考察もおこなった。その結果は国際会議で発表している。その後、 $Z$ 変換を施す際の初期状態の取り扱いを変更することによって、周波数領域での議論が可能であることも分かった。現在は、同議論を連続時間系に並行に適用することを検討中である。

(8) 概周期運動の記述には時間領域でのシステム表現が適しており、これは状態遷移作用素によるむだ時間系のシステム表現に関係が深い。その一例であるモノドロミ作用素に基づく安定解析の研究を推進した。1次ホールド、エルミート補間を用いたスペクトル計算に関する論文がSICE JCMSI誌に掲載された。より高次の微分情報を用いた多項式補間に基づく数値計算法について、国内外の学会で発表した。滑らかな空間で定義されたモノドロミ作用素のコンパクト性、高次多項式近似によるスペクトルの連続性の数学的な証明を加えた論文を執筆中であり、近日中に投稿予定である。また、異なる関数空間上で定義されたモノドロミ作用素のスペクトルの不変性に関する共同研究結果については、国際会議発表を経て、国際論文誌に掲載が決定した。

(9) さらに研究代表者の異動に伴い、空圧駆動アシストハードウェアに関する基礎検討にも着手した。共著成果を国内会議で発表している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Jung Hoon Kim, Tomomichi Hagiwara and

Kentaro Hirata, Spectrum of Monodromy Operator for a Time-Delay System with Application to Stability Analysis, IEEE TAC, 査読有, 2015, accepted for publication

平田健太郎, 高橋健太郎, ある種の切り替え系に対する繰返し制御の局所安定解析, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 6, 2013, pp. 619-624

畑田和良, 平田健太郎, 規則向波中を航行する船舶における低燃費フィードバックエンジン回転数制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 2, 2013, pp. 313-315

Kentaro Hirata, Tomomichi Hagiwara and Atsushi Itokazu, Numerical Methods for Spectrum Computation of Monodromy Operators via Non-Causal Hold Discretization, SICE JCMSI, 査読有, Vol. 6, No. 1, 2013, pp. 45-53

〔学会発表〕(計 13 件)

Kazuyoshi Hatada, Kentaro Hirata and Takuma Sato, Power Assisting Method for Almost-Periodic Motions Based on Motion Prediction, IEEE ICIT 2015, 17-19 March, 2015, Seville, Spain

佐藤拓磨, 平田健太郎, 畑田和良, 杉本謙二, 周波数変動外乱の推定に基づくパワーアシスト制御の検討, 第15回計測自動制御学会SI部門大会, 15-17 Dec. 2014, 東京ビッグサイト, 東京

畑田和良, 平田健太郎, 佐藤拓磨, 運動予測に基づく概周期運動に対するパワーアシスト制御法の検討, 第15回計測自動制御学会SI部門大会, 15-17 Dec. 2014, 東京ビッグサイト, 東京

長山陸, 佐々木大輔, 平田健太郎, 高岩昌弘, ドラムブレーキ機構と空気圧人工筋を用いた肩部姿勢保持用パワーアシストスーツの開発, 第15回計測自動制御学会SI部門大会, 15-17 Dec. 2014, 東京ビッグサイト, 東京

佐々木寛史, 佐々木大輔, 平田健太郎, 高岩昌弘, 拇指対立運動補助機能を有する装着型手指動作支援装置の開発, 第15回計測自動制御学会SI部門大会, 15-17 Dec. 2014, 東京ビッグサイト, 東京

Yoichiro Masui, Kentaro Hirata and Tomomichi Hagiwara, On Numerical

Computation of the Spectrum of Monodromy Operators via Higher-Order Hold Discretization, MTNS 2014, 7-11 July, 2014, University of Groningen, Groningen, The Netherlands

Kazuyoshi Hatada and Kentaro Hirata, Power Assisting Control for Electric Bicycles Using an Adaptive Filter, IEEE ICIT 2014, 26 Feb.-1 Mar. 2014, Haeundae Grand Hotel, Busan, Korea

Lolynn Asuncion Mateo and Kentaro Hirata, Eigenvalue Structure of the Predictor Feedback for Discrete-time LTI Systems, IEEE ICIT 2014, 26 Feb.-1 Mar. 2014, Haeundae Grand Hotel, Busan, Korea

Jung Hoon Kim, Tomomichi Hagiwara and Kentaro Hirata, A Study on the Spectrum of Monodromy Operator for a Time-Delay System, Asian Control Conference 2013, 23-26 June, 2013, Istanbul, Turkey

増井詠一郎, 平田健太郎, 萩原朋道, 高次ホールド離散化によるモノドロミ作用素のスペクトル計算について, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会, 15-17, May, 2013, 兵庫県民会館

Kenichi Kato, Akiyuki Kawaguchi and Kentaro Hirata, State Estimation of State-Dependent Delay Systems Based on Discretized Switching Model, IEEE ICIT 2013, 25-28 Feb. 2013, Cape Town, South Africa

武部雄一郎, 平田健太郎, 畑田知良, 未知入力オブザーバを用いたペダリングトルクの推定, 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, 7, March, 2013, アクロス福岡

武部雄一郎, 畑田知良, 平田健太郎, ヒトのペダリング動作の計測とゆらぎの解析, 第 56 回システム制御情報学会研究発表講演会, 23, May, 2012, 京都テルサ

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

平田 健太郎 (HIRATA, Kentaro)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号 : 0 0 2 9 3 9 0 2