

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420423

研究課題名(和文) 予測情報の不確かさを克服する新たな予測制御論の確立とその応用

研究課題名(英文) A design method of preview control laws with uncertain information and its application to power grids/manipulator control systems

研究代表者

児島 晃 (Kojima, Akira)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：80234756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)： 予測情報に含まれる不確かさを克服し、所望の制御性能を達成する  $H_\infty$  予見制御法の構成法を明らかにした。そして、予見情報を状態に含めた広義のシステムを定め、予測情報とそれに印加される分布的外乱を同時に扱うことにより、予測情報を適切に更新し制御性能を達成する制御則の構成法を導いた。制御系は輸送系に準じた予測情報の推定機構とそれに基づくフィードバック制御により構成される。つぎに、成果を電力システムの制御(系統安定化制御、負荷周波数制御)、マニピュレータのアシスト制御(軌道生成と追従)に適用し、制御法の有用性を評価した。

研究成果の概要(英文)： A design method of  $H_\infty$  preview control laws which address the uncertainty of previewable information is proposed. The generalized plant for the  $H_\infty$  control problem includes time varying function-valued noise in the future reference signal and typical preview uncertainties are formulated in the proposed framework. Based on a function space approach, the solvability is characterized by auxiliary matrix Riccati equations, and it is shown that the controller is given by an observer-based preview control law. For evaluating the features of the resulting control systems, proposed design methods are applied to 1) load frequency control of power systems and 2) assist control of two-link manipulator systems.

研究分野：システム制御工学

キーワード：予測制御  $H_\infty$  制御 電力システム制御 負荷周波数制御 マニピュレータ 軌道追従制御

## 1. 研究開始当初の背景

目標値の未来の情報を利用する予見制御法は、メカトロニクス系の応答を改善する有用な制御法として注目され、様々な接近法により研究が進められてきた。しかし、それらは理想的な状況で達成される性能を示すことには成功したものの、予測情報に含まれる不確かさを克服し、制御性能を合理的に引き出す制御則の構成法は確立されていない。

予測情報の不確かさを克服する制御問題は、自然界・人間との相互作用を含む多くの工学分野に見受けられ、1)太陽光発電大量導入時の日射量予測と系統制御(分散エネルギーの協調制御)、2)マニピュレータのアシストと経路予測制御(人間・機械系の制御)においては、予測不確かさを前提とした新たな制御論の開発が必要になる。そして、特に1)では、近未来ほど精度がよい日射量予測からの確かな制御法を導き、2)では、操作者の印加する力の情報から大域的な経路を把握し、逆に近未来の操作の不確かさに対応する制御法を導くことが求められる。

研究代表者はこれまでに、H 予見制御法の開発に従事し、予測情報を状態の一部に含めた関数空間上のシステム表現から制御則の構成法を明らかにした。そして上述の手法では、予測情報に含まれる不確かさが分布的に印加される外乱により表されるため、さらに情報の不確かさを克服する新たな予見制御論が確立できると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、予測情報の不確かさを克服するH 予見制御問題を定め、予測情報の確度と達成される制御性能の関係、および制御則の構成法を明らかにする。そして、応用上重要な分野と考えられる太陽光発電大量導入時の日射量予測と系統制御、マニピュレータのアシストと経路制御に提案法を適用し、その効果を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、情報の不確かさを克服する予見制御法の確立と応用課題について、つぎの3つの課題を定め、以下の研究を実施する。

### (1) 予見制御法の確立

不確かさを含む予測情報に対して、H 予見制御問題を定め、達成し得る制御性能と制御則の構成法を明らかにする。このような問題は、予測情報の更新を輸送系の状態により表し、その不確かさを分布的に印加される観測外乱により定めれば、適当な関数空間上で定式化することができる。そこで、予測情報とその不確かさ(外乱)を定めた広義の一般化プラントにおいて、これらの外乱を抑制するH 予見制御問題の可解条件と解法(制御則)を明らかにする。

### (2) 太陽光発電大量導入時の系統制御

太陽光発電の大量導入時には、日射量の予測情報が系統制御に導入され、予測変動にも合理的に対処できる制御法を開発することが重要になる。そして、系統安定化、負荷周波数制御においては、発電機系の擾乱を短時間で抑制する必要があり、速応性を維持しつつ、予測情報の更新に柔軟に対応する制御系を構成することが要求される。本課題では、日射量予測、需要予測の情報に基づく予見制御系を課題(1)の成果に基づいて設計し、その特徴を明らかにする。

### (3) マニピュレータのアシストと経路制御

平行リンク2自由度マニピュレータにおいてアシスト予測制御系を構成し、課題(1)で得た制御法の有用性を評価する。このような制御系においては、操作者の印加する力の情報から予測軌道を生成し、その軌道にスムーズに追従する予見制御系を構成することが考えられる。本課題では、予測軌道が操作者の動作により逐次更新させることと、予見制御系の整合性について実験的な考察を行う。

## 4. 研究成果

予見制御論の確立とその応用課題において、以下の研究成果を得た。

### (1) 予見制御法の確立

はじめにこれまでの理論的な成果を総括し、複数の予測情報を用いるH 予見制御問題の可解条件と制御則の構成法を明らかにした(雑誌論文)。これらの結果は、複数の予測情報に対して、H 制御のみならずH 2 予見出力フィードバック則の構成法を同時に示したものであり、本課題を展開する基礎的成果と位置付けられる。つぎにこれらの結果を適用することにより、はじめに更新型の予測情報を用いて、制御系の内部状態を推定する方法を明らかにした(雑誌論文、他)。本結果は、予測情報に印加する分布外乱のパワーによりその不確かさを定め、推定機構が輸送型のダイナミクスにより与えられることを示したものである。本手法では、予測情報の確度と予測時間の関係を定めることが可能であり、近未来ほど情報の確度が高い場合など、予測情報の質と推定精度の関係を的確に表現することができる。つぎに本結果を予見制御問題に適用し、同様の予測情報を利用するH 予見制御法の構成法を明らかにした(雑誌論文、他)。当初制御則には、輸送型のダイナミクスが組み込まれ、その実装が複雑になるという課題が残されていたが(雑誌論文)、論文における検討により構造が簡略化され、これまで用いられている予見制御則と同様の構成により、制御則が実現されることが示された。

### (2) 太陽光発電大量導入時の系統制御

太陽光発電が大量に導入された系統にお

いては、日射量予測を利用することにより、より効果的な制御を行うことが可能になる。本課題では、はじめに一機無限大母線に太陽光発電が導入されたシステムを定式化し、需給の予測情報とシステム安定化制御の関係を考察した(学会発表)。そして、予測情報の援用により、相边角変動が効果的に抑制されることを確認した。つぎに、負荷周波数制御問題において、日射量と需給変動の予測情報を利用する制御系が構成できることを確認した。特に負荷周波数制御においては、昼間/夜間の需給変動がH2制御に適したノイズの分散により示されている。本課題では、(1)に示した理論的な成果を、H2制御指標を用いた場合に適用し、予測情報の不確かさと予測の効果の関係をシミュレーションにより評価した(雑誌論文、学会発表他)。これらの結果は、システムの規模が異なる場合にも適切にパラメータを設定することにより広く適用することが可能である。

### (3) マニピュレータのアシストと経路制御

2自由度マニピュレータと力覚センサからなる実験システムを整備し、力覚情報から操作者の意図する軌道を生成し、提案法により予測制御系を構成する実験的考察を行った。そして、対象から求めた線形近似システムに基づいて、軌道に滑らかに追従する制御系が構成できることを明らかにした(学会発表、他)。

本課題においては、力覚の情報からベース座標系で予測軌道を生成し、それらの予測情報を関節座標に変換してから予測制御系を構成する方法が用いられている。しかしながら、予測軌道が機構的制約にかかる場合には、軌道の修正など、さらに効果的な軌道生成のメカニズムを導入することが必要になる。今後、モデル予測制御と融合させ、より大域の非線形動作を可能にする制御系の構成法を示すことがひとつの指針になる。

以上の課題(1)-(3)に関する成果を総括し、特に実システムへの応用を考慮した場合には、予測サーボ系を構成した上でその過渡特性を改善することが重要であることが確認された。本着眼点から、課題(1)においてフィードフォワード型の補償則の導出を行い(雑誌論文、学会発表)、制御法を電力システムの予測負荷周波数制御(課題(2))に適用し、その特徴を明らかにした(学会発表)。

また、マルチエージェント系の合意問題に理論的成果(1)が展開できる点に着目し、予測を必要とする合意問題の基本結果を整備した(学会発表)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

發知 諒, 端倉弘太郎, 児島 晃, 益田

泰輔: H2 予見出力フィードバックの導出とその負荷周波数制御への応用, 電気学会論文誌C, 査読有, 137 巻, 2017, 834/844  
DOI: 10.1541/ieejc.137.834

児島 晃, 端倉弘太郎: 不確かな予見情報に基づくH<sub>∞</sub>制御則の構成, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 53 巻, 2017, 425/436

DOI: 10.9746/sicetr.53.425

Kotaro Hashikura, Akira Kojima: LQ preview state feedback with output regulation constraint, Proc. of 11th Asian Control Conference, 査読有, 1 巻, 2017, 2760/2765

DOI: 10.1109/ASCC.2017.8287614

Kotaro Hashikura, Akira Kojima: H-infinity control of discrete-time input-delay systems with observer-based prediction, Proc. of 2nd IFAC Workshop on Control of Systems Governed by Partial Differential Equations, 査読有, 1 巻, 2017, 論文番号 TuSaJB.3

児島 晃, 端倉弘太郎: 予見情報の不確かさを考慮したH<sub>∞</sub>推定器の構成, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 52 巻, 2016, 86/92

DOI: 10.9746/sicetr.52.86

Akira Kojima: H<sub>∞</sub> preview control with uncertain information, Proc. of 54th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 1 巻, 2015, 6643/6649

DOI: 10.1109/CDC.2015.7403265

Kotaro Hashikura, Akira Kojima: Delay-tolerant PSS with discrete-time H<sub>∞</sub> observer-based predictor, Proc. of SICE Annual Conference 2015, 査読有, 1 巻, 2015, 1091/1094

DOI: 10.1109/SICE.2015.7285414

Ryo Hotchi, Kotaro Hashikura, Akira Kojima, Masata Taisuke: Preview control design for frequency variation in power system, Proc. of SICE Annual Conference 2015, 査読有, 1 巻, 2015, 1077/1081

DOI: 10.1109/SICE.2015.7285372

Akira Kojima: H-infinity controller design for preview and delayed systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, 60 巻, 2015, 404/419

DOI: 10.1109/TAC.2014.2354911

Akira Kojima: H-infinity filtering for a system with uncertain preview information, Proc. of 53rd IEEE Conference on Decision and Control, 2014, 査読有, 1 巻, 2014, 4398/4403

DOI: 10.1109/CDC.2014.7040075

[学会発表](計13件)

高見賢和, 端倉弘太郎, 児島 晃, 益田泰輔: 予見フィードフォワード補償を用い

た負荷周波数制御系の構成，計測自動制御学会第 5 回制御部門マルチシンポジウム，2018

端倉弘太郎，児島 晃：時不変 Friedland-Tacker 型方程式による出力レギュレーション制約付き H2 制御，計測自動制御学会第 5 回制御部門マルチシンポジウム 2018  
根岸萌友，児島 晃：情報遅延を考慮した 2 重積分器型マルチエージェントシステムの収束値解析，平成 30 年電気学会全国大会，2018

浅津翔太，児島 晃：予見情報を用いたマニピュレータの軌道追従制御，第 60 回自動制御連合講演会，2017

浅津翔太，児島 晃：H 予見制御による平行リンクマニピュレータの関節角度制御，第 4 回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，2017

白石祐斗，端倉弘太郎，児島 晃：軌道計画変更を考慮した平行リンクマニピュレータのモデル予測制御，平成 28 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会，2016

堀田博司，白石祐斗，児島 晃：動作モードを考慮した予測型アシスト制御による上肢支援法の構築，第 3 回 制御部門マルチシンポジウム，2016

白石祐斗，堀田博司，石橋良太，児島 晃：Jerk の変動を考慮した平行リンクマニピュレータのモデル予測制御，第 58 回 自動制御連合講演会，2015

發知 諒，端倉弘太郎，児島 晃，益田泰輔：需給変動予測を用いた負荷周波数制御，第 58 回 自動制御連合講演会，2015

端倉弘太郎，児島 晃：離散時間入力むだ時間系に対するオブザーバ併合型 H 予測制御，第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会，2015

増田卓三，端倉弘太郎，石橋良太，児島 晃：遅れ要素をもつマスタ・スレーブシステムの  $\mu$  解析，第 57 回自動制御連合講演会，2014

梅田勝矢，端倉弘太郎，児島 晃：太陽光発電大量導入時の系統予見安定化制御，第 57 回自動制御連合講演会，2014

發知 諒，端倉弘太郎，児島 晃，益田泰輔：予見補償を導入した負荷周波数制御，第 57 回自動制御連合講演会，2014

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.tmu.ac.jp/stafflist/data/ka/467.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

児島 晃 (KOJIMA, Akira)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：80234756