

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15015

研究課題名(和文) 入力冗長系の高効率制御を実現する適応分配器設計

研究課題名(英文) Adaptive allocator design for the high-efficiency control in input redundant systems

研究代表者

川口 夏樹 (Kawaguchi, Natsuki)

兵庫県立大学・工学研究科・助教

研究者番号：90824392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、冗長な入力システムを有する動的システムを対象とし、その冗長性を活かした高性能かつ高効率な制御系設計法の実現を目指して「零空間補償制御」を提案した。ここでは制御対象内部で相殺される制御入力を適応的に削減する適応分配器を新たに導入しており、制御対象のパラメータが不明瞭である場合にも、冗長系における相殺制御力を自動的に削減できる。これにより余分なエネルギー消費や機器の摩耗の極めて少ない高効率・高性能な冗長制御系の実現に寄与することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、ハイブリッド・電気自動車や6つ以上のロータを備えたドローンなどの入力冗長系を対象として、高効率な制御を実現するための制御法を開発した。入力冗長系では、複数の駆動源が発揮する力が互いに打ち消しあい、余分なエネルギー消費や機器摩耗を引き起こす可能性がある。本研究では、こうした系の駆動に寄与しない制御入力成分をオンラインで自動的に削減しながら制御目標を達成する「零空間補償制御」を提案し、その設計法を開発した。この成果により、入力冗長系における余分なエネルギー消費や機器摩耗の極めて少ない高効率な制御システムの実現が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we proposed "null-space compensation control" for dynamic systems with redundant input channels, aiming to realize a high-performance and high-efficiency control system design method that takes advantage of such redundancy. An adaptive allocator is newly introduced to adaptively reduce the canceled control inputs within the controlled plant. The proposed method automatically reduces the canceled control forces in the redundant system even when the parameters of the control target are unknown. This can contribute to the realization of highly efficient and high-performance redundant control systems.

研究分野：制御工学

キーワード：入力冗長系 適応制御 零空間補償制御 故障診断

### 1. 研究開始当初の背景

現在、ハイブリッド/電気自動車やドローンなど、複数の駆動系統を持つ入力冗長系が注目されている。これらの系は複数の駆動源を有しており、ある出力軌道を実現可能な制御入力 of の組み合わせが無数に存在することから、適切な指標の下で制御入力を一意に決定する仕組みが必要となる。これは「制御分配問題」と呼ばれ、近年盛んに研究されている(鈴木・山下 システム制御情報学会誌 2016: Hoshino et.al Mechanical Engineering Journal 2015: Zaccarian Automatica 2009 他)。同一の制御目的を達成しうる制御入力の選択に自由度が存在するという事実は、裏を返せば、制御目的に寄与しない制御入力の集合が存在することを示唆している。こうした信号は、冗長な駆動源間で打ち消され、制御目的の達成に関して余分なエネルギーを消費し、制御効率の悪化を招く。そこで、制御動作に寄与しない入力成分を最小化する手法が研究されてきた。しかし、多くの先行研究では制御効率が最大となる解を詳細なモデルから導出することを前提としている。

一般に、駆動源を含む制御対象の特性は未知であり、さらに駆動源の特性は動的かつ制御系の運転状態に依存して変化する。しかし現状では、特性が未知の冗長駆動源を効率よく操作して制御目的を達成する制御設計法は報告されていない。本研究では冗長な制御入力の比率を適応的に調整する制御法を提案することで、特性が不明瞭な対象に対しても自動的に最適な制御入力を選択可能とし、制御効率の極めて高い冗長制御系を構築することを目指す。

### 2. 研究の目的

制御対象の詳細な特性が既知かつ時不変ならば、冗長駆動源を効率的かつ効果的に操作する冗長制御系をモデルベース手法により構成できる。しかし、未知パラメータを持つ冗長入力系統を有する制御対象を、効率的な制御状態で維持し続ける手法は未だ確立されていない。本研究では、オンラインで制御入力を補正する適応分配器を導入し、駆動源を含む制御対象モデルの特性を推定しながら最適な制御入力を維持できる冗長制御系を設計する。

### 3. 研究の方法

本研究の方法は主に(1) 零空間補償制御系の構造決定、(2) 2 入力冗長系に対する零空間補償制御設計、(3) 零空間補償制御の多入力冗長系への拡張、の3つの過程により構成した。

まず(1)における検討では、未知パラメータを含む対象を制御するために、制御系の枠組みとしてモデル規範形適応制御を利用することとした。これは系の未知特性を間接的に推定しながら制御目標を達成することを理論的に保証できる手法であり、本研究目的に適していると判断した。また系の駆動に寄与しない制御入力成分を“零空間成分”として特徴づけることに成功し、その成分をオンラインで適応的に最小化する“零空間補償制御”(図1)のアイデアを提唱し、新たな適応分配器を含む制御系の全体構造を決定した(図2)。

また(2)として、ハイブリッド自動車のパワートレインにみられるような2入力冗長回転機械系モデルを対象として、零空間補償制御系を設計した。ここでは制御入力の動く空間を考え、その中で単位ベクトルの偏角を適応ゲイン(図3)とおくことで、対象の零空間をオンラインで推定する。この適応分配器により制御入力を補正して零空間成分を補償する。ここでは正定関数を用いて、規範モデル追従誤差システムの漸近安定性を保証する適応ゲインの適応則を新たに導出した。提案理論では、線形な制御対象の規範モデル追従と制御入力中の零空間成分の最小化を理論的に保証することができる。

次に(3)では、(2)で提案した零空間補償制御の設計理論の対象を一般の  $m(>0)$  入力冗長系へと拡張するための理論構築を

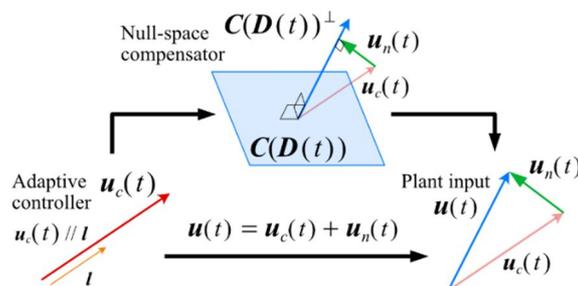


図1 零空間補償のアイデア概念図(引用:文献)

行った  $m$  入力冗長系においては制御入力空間が  $m$  次元空間となるため、適応分配器の構造も新たに拡張する必要がある。そこで、すべての入力チャンネル間に対応する適応分配ベクトルを個別に配置することで零空間制御系の設計を可能とした。これにより、規範モデル追従および零空間補償を達成する零空間補償制御系の適用範囲を一般の  $m$  入力  $n$  次の線形制御対象へと拡張することに成功した。

#### 4. 研究成果

本研究課題の主な成果は (i) 零空間補償制御理論の構築・拡張と (ii) 系の冗長性に着目した応用の 2 つに分けられる。

前者の零空間補償制御を用いた数値シミュレーション結果を図 4 に示す。図 4 (左) において実線で示される信号が制御出力であり、点線がその追従すべき規範モデルの出力の時系列信号である。ここではシミュレーション開始から 10 秒ほどで規範モデルと制御出力は一致しており、安定な追従制御が実現できていることがわかる。また図 4 (右) はそのときの制御入力中の零空間信号成分の大きさを評価した結果である。この大きさが小さいほど、冗長な駆動源間で打ち消される信号が少ないことを意味しており、したがって効率的な制御が実現できていることを表す。比較のため、図中青線は従来(零空間補償なし)の結果、橙線は零空間補償制御を行った結果を並べて表示している。これらの比較より、提案する零空間補償制御を用いることで効率的な制御を実現できたことがわかる(引用文献, など)。またこれらの発表成果が認められ、一般社団法人電気学会より優秀論文発表賞 A (2021 年度) を受けた。

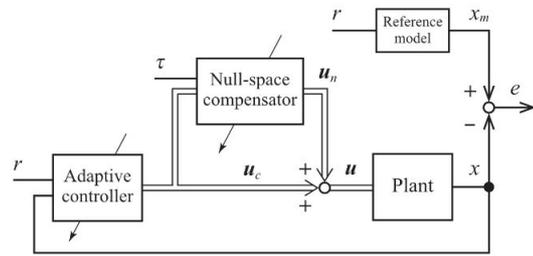


図 2 提案した零空間補償制御系(引用文献)

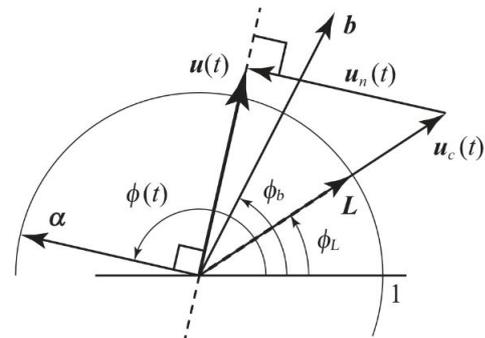


図 3 零空間補償器の動作イメージ(引用文献)

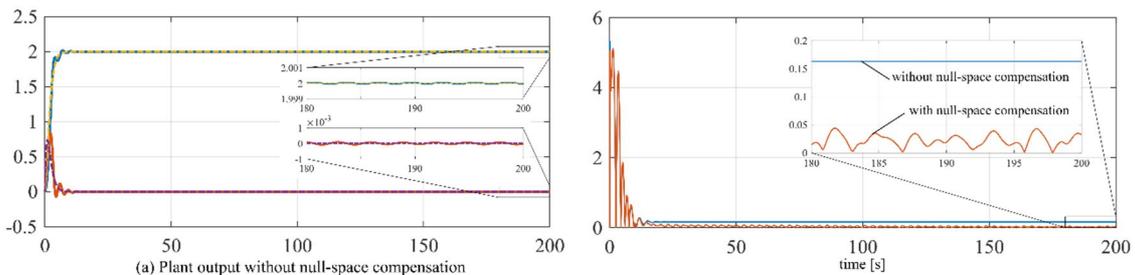


図 4 零空間補償制御を用いた 3 入力冗長 2 次系に対する制御シミュレーション結果 (左: 制御出力結果, 右: 零空間入力のノルムの推移)(引用文献)

また後者として、冗長系において系の駆動に寄与しない制御入力を活用した故障診断法(関連成果)や、並列補償器を有する系における過渡応答改善法(引用文献)の開発に取り組んだ。

#### < 引用文献 >

- 川口夏樹, 佐藤孝雄, 荒木望, 浅見敏彦, 黒田雅治, モデル規範形適応制御に基づいた 2 入力冗長系に対する零空間補償制御, 計測自動制御学会論文集, 56 巻 5 号, 2020, 293-298
- 川口夏樹, 佐藤孝雄, 荒木望, 黒田雅治, モデル規範形適応制御に基づいた多入力冗長系に対する零空間補償制御, 計測自動制御学会論文集, 58 巻 4 号, 2022, 229-235
- 川口夏樹, 佐藤孝雄, 荒木望, 黒田雅治, 冗長駆動アクティブ除振台に対するアクティブ故障診断設計, 電気学会論文誌 C, 141 巻 3 号, 2021, 288-294
- 川口夏樹, 東手悠太, 佐藤孝雄, 高木 太郎, 水本郁朗, 零空間調整器を付加した単純適応制御系に対する外乱補償器を用いた過渡応答改善, 電気学会論文誌 C, 142 巻 3 号, 2022, 264-272

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 KAWAGUCHI Natsuki, SATO Takao, ARAKI Nozomu, ASAMI Toshihiko, KURODA Masaharu	4. 巻 56
2. 論文標題 A Null-space Compensation Control for 2-input Redundant Plant Based on Model Reference Adaptive Control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 293 ~ 298
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.56.293	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 -
1. 著者名 Kawaguchi Natsuki, Sato Takao, Araki Nozomu, Kuroda Masaharu	4. 巻 141
2. 論文標題 Active Fault Diagnosis Design for Redundantly Driven Active Vibration Isolation Tables	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 288 ~ 294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.141.288	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 Kawaguchi Natsuki, Higashide Yuta, Sato Takao, Takagi Taro, Mizumoto Ikuro	4. 巻 142
2. 論文標題 Transient Response Improvement Using Disturbance Compensator for the Simple Adaptive Control System with the Null-space Adjustor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 264 ~ 272
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.142.264	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 Kawaguchi Natsuki, Araki Nozomu, Sato Takao, Kuroda Masaharu, Asami Toshihiko	4. 巻 7
2. 論文標題 Active fault-diagnosis method using adaptive allocator and fault-tolerant adaptive control system design	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	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/s40648-020-00175-0	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 -

1. 著者名 川口 夏樹, 佐藤孝雄, 荒木望, 黒田 雅治	4. 巻 58
2. 論文標題 モデル規範形適応制御に基づいた多入力冗長系に対する零空間補償制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 229 ~ 235
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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 川口夏樹, 荒木望, 佐藤孝雄, 黒田雅治
2. 発表標題 2入力冗長プラントを対象とした零空間補償制御系におけるアクティブ故障診断の検討
3. 学会等名 スマートシステムと制御技術シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口夏樹, 佐藤孝雄, 荒木望, 黒田雅治
2. 発表標題 多入力冗長1次系を対象とした零空間補償制御系設計
3. 学会等名 電気学会制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口夏樹, 佐藤孝雄, 荒木望, 黒田雅治
2. 発表標題 2 入力冗長プラントを対象とした零空間補償制御系における補助信号設計
3. 学会等名 スマートシステムと制御技術シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口夏樹, 佐藤孝雄, 荒木望, 黒田雅治
2. 発表標題 2入力冗長適応制御系における制御入力の一設計
3. 学会等名 計測自動制御学会 第7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 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

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