

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760319

研究課題名（和文） 実時間最適化に基づく高性能再構成可能制御システムの構築

研究課題名（英文） Synthesis of a high performance reconfigurable control system based on on-line optimization

研究代表者

和田 信敬（Nobutaka Wada）

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50335709

研究成果の概要（和文）：

本研究プロジェクトでは、アクチュエータの故障に対して頑健な制御系の構成法を提案した。提案制御則は、2モード型モデル予測制御則と修正目標信号生成機構から構成される。制御則は、凸最適化問題を実時間で解きながら実行される。また、この手法に基づき、車両に対する耐故障制御系の構成法を提案し、その有効性を動力学シミュレータにより検証した。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, we have developed a control system design method that is robust against actuator failures. The proposed control law consists of a dual-mode model predictive control law and a target recalculation mechanism. The control algorithm is reduced to an on-line optimization problem under linear matrix inequality constraints. The control algorithm has been applied to a fault-tolerant control problem of a vehicle.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野： 制御工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学・制御工学

キーワード： 実時間最適化，再構成可能，フィードバック，軌道計画，時変拘束

## 1. 研究開始当初の背景

機器の一部が故障した場合に、制御器の構造を故障状態に応じて変更することで、所望の制御性能を直ちに回復する制御システムを、再構成可能制御システムという。このような制御システムは、高い性能に加え、高度な安全性が要求される機械システムにおいて必要とされる。故障に対して頑健な制御系

を構築する手法は、受動的手法と能動的手法に大別出来る。受動的手法では、故障に対して頑健な固定時不変制御器が、 $H_{\infty}$ 制御理論等を用いて設計される。この手法では、故障・正常状態によらず共通の制御器が用いられるため、故障の検出および制御器の切り替えの必要性が無い。しかしながら、故障状態での制御性能を考慮するために、正常状態での

制御性能が犠牲となるという問題がある。一方、能動的な手法としては、故障状態に応じて制御器を切り替えるアプローチがある。この手法では、正常状態と故障状態で別の制御器が用いられるため、正常状態での制御性能は犠牲にならないという利点がある。また、様々なクラスの故障状態を取り扱えるという利点もある。このクラスの制御システムでは、制御器や制御対象のダイナミクスが故障発生時に不連続に変化する。そのようなシステムに対する制御系設計法は、近年、ハイブリッドシステム制御の分野で活発に研究されている。しかしながら、現時点開発されている手法は、オンラインあるいはオフラインでの計算量が膨大であり、高速化した現代のコンピュータを用いても、適用可能な制御対象のクラスは限られる（低次数、動特性が遅い等）。そこで、速い動特性を持つ高次の機械システムに対しても適用可能な、計算効率の良い実用的な能動的再構成可能制御システムを構築することが望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究では、考察する問題のクラスを、冗長なアクチュエータを有するシステムにおける、アクチュエータ故障に対する能動的再構成可能制御システム構成問題に限定する。その上で、効率的に解ける凸最適化問題に帰着可能な、新たな再構成可能制御システムの構成法を構築することを目的とする。さらに、その有効性を、アクチュエータに冗長性を有する車両システムに適用し、検証する。

## 3. 研究の方法

ある故障したアクチュエータの出力信号は、外乱としてシステムに影響を及ぼす。この外乱の影響は適切な補助信号を用いることで、他の正常なアクチュエータへの入力信号に対する飽和制限値の時間変化に帰着出来る。時変な入力・状態飽和を有するシステムに対する制御系設計法については、体系的な成果は国際的にもこれまでほとんど示されていなかったが、研究代表者はこの問題について基礎的な成果を最近得た。この方法では、入力信号の飽和制限値に依存してゲインを変化させる可変ゲイン制御器を用いることで、高い制御性能と広い漸近安定領域を同時に達成することが可能となっている。この手法を、モデル予測制御型の開ループ軌道計画法と統合化することにより制御器の構造を一般化する。これにより、制御性能の向上を図る。

## 4. 研究成果

本研究課題の主要な成果として、1) 汎用的な能動的再構成可能制御アルゴリズムの構築、および、2) 車両のための具体的耐故

障制御手法の構築の二点が挙げられる。以下それぞれについて説明を行う。

### 1) 汎用的な能動的再構成可能制御手法：

本研究で構築した能動的再構成可能制御システムを Fig. 1 に示す。提案制御器は、時変な入力飽和に対して閉ループ系の内部安定性を保証する飽和レベル依存フィードバック制御器  $K$  と、過渡的に目標値  $r$  への追従が困難な場合に、修正目標値  $w$  を算出する目標信号計算機構  $F$  から構成される。

飽和レベル依存可変ゲイン制御器の設計問題は、線形行列不等式 (LMI) の可解問題に帰着されており、数値的最適化により容易に解くことが可能である。上位レベル制御器としては、飽和レベル依存可変ゲイン制御器を終端制御器として用いる dual-mode 型モデル予測制御を構成した。

提案制御器を用いると、アクチュエータの飽和レベルが大きい場合には、それを最大限に活用した積極的な制御が行われる。一方、故障等の理由によりあるアクチュエータの飽和レベルが減少した場合には、閉ループ系の安定性が保たれる範囲で、元の目標信号に出来るだけ近い値を持つ修正目標信号が算出され、これに制御量が速やかに追従するように制御入力が算出される。

提案制御手法の最大の特徴は、最終的に得られた制御アルゴリズムについて、可解性および漸近的追従性が理論的に保証されることにある。この成果については、雑誌論文 4 (制御工学分野における主要国際誌の一つ) に掲載されている。

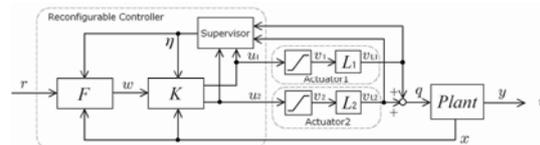


Fig. 1 能動的再構成可能制御システム

### 2) 車両耐故障制御アルゴリズムの構築：

アクティブ前輪操舵と左右輪独立制駆動が備えられた車両に対する耐故障制御アルゴリズムを具体的に構築した。構築した制御システムを Fig. 2 に示す。

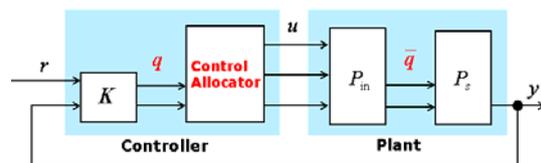


Fig. 2 車両耐故障制御システム

この制御器は、フィードバック制御器  $K$  と、制御分配器から構成される。制御分配器では、各々の入力チャンネルの正常・故障状態が診断され、ある入力チャンネルが故障した場合、

制御システムの性能の劣化が出来るだけ小さくなるように、他の入力チャンネルに制御信号の分配が行われる。このときの分配量の決定問題は、凸二次計画問題に帰着される。提案制御器設計法を用いると、任意の故障状態について、フィードバックシステムの安定性が理論的に保証される。制御系設計問題はLMI可解問題に帰着される。

提案制御手法の有効性を数値シミュレーションにより検証した結果を Fig. 3 に示す。赤い車両は、正弦波状の目標ヨーレート信号への追従制御を行ったものであり、故障は生じていない。黒い車両は、走行中に前輪操舵アクチュエータが故障し、前輪が直進状態でロックした場合を表している。その結果、故障発生時刻以降、操舵不能となり直進を続けている。白い車両は、提案耐故障制御アルゴリズムを適用した場合を表している。黒い車両の場合と同様に、ある時刻以降、前輪操舵アクチュエータは故障しているが、左右後輪の前後力を適切に制御することにより、正常車両に比較的近い運動を実現している。この数値シミュレーションは、本研究助成により導入した車両動力学シミュレータ CarSim を用いて行ったものである。

なお、この研究成果は、雑誌論文1（車両制御の分野における主要国際の一つ）において発表している。



Fig. 3 車両制御シミュレーション

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

1. Nobutaka Wada, Kosuke Fujii, Masami Saeki, Reconfigurable Fault-tolerant Controller Synthesis for a Steer-by-wire Vehicle Using Independently Driven Wheels, Vehicle System Dynamics, to appear, 査読有
2. Takuma Iwamoto, Masami Saeki, Satoshi Satoh, Nobutaka Wada, Speeding Up of Calculation for mu-synthesis of Low Order H-infinity Controllers, SICE
- Journal of Control, Measurement, and System Integration, to appear, 査読有
3. Masami Saeki, Assi Mouhammad, Nobutaka Wada, Robust Performance Design of a State Predictive Controller on Parameter Space, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, to appear, 査読有
4. Nobutaka Wada, Hiroyuki Tomosugi, Masami Saeki: Model predictive tracking control for a linear system under time-varying input constraints, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.23, No.9, pp.945-964, 2013, 査読有
5. Masami Saeki, Nobutaka Wada, Satoshi Sato, Gain Estimation with Filterbank Using a Transient Response and Extension Theorem, Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 49, No.4, pp.425-431, 2013, 査読有
6. Nobutaka Wada, Akihiro Takahashi, Masami Saeki, Masaharu Nishimura, Vehicle Yaw Control Using an Active Front Steering System with Measurements of Lateral Tire Forces, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.1 pp. 83-93, 2011, 査読有
7. Nobutaka Wada, Masayuki Minami, Masami Saeki, Masaharu Nishimura, Tracking Control of Input Constrained Discrete-Time Systems Considering Transient Response, Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers C, Vol.76, No.772, pp.3612-3621, 2010, 査読有
8. Nobutaka Wada, Akihiro Takahashi, Izumi Masubuchi, Masami Saeki, A Design Method of an Active Front Steering Controller Using Measurement of Lateral Tire Forces, Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers C, Vol.76, No.770, pp.2528-2535, 2010, 査読有
9. Nobutaka Wada, Hiroyuki Tomosugi, Masami Saeki, Masaharu Nishimura, Model Predictive Tracking Control Using State-dependent Gain-scheduled Feedback, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No. 4, pp.590-600, 2010, 査読有
10. Shunsuke Takamatsu, Unggul Wasiwitono, Masami Saeki, Nobutaka Wada, Design of Static Anti-Windup Compensator

Considering Controller State, Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers C, Vol.76, No.769, pp.2248-2254, 2010, 査読有

11. Masami Saeki, Masashi Ogawa, Nobutaka Wada, Low order H-infinity controller design on the frequency domain by partial optimization, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 20, Issue 3, pp.323-333, 2010, 査読有
12. Unggul Wasiwitonon, Shunsuke Takamatsu, Masami Saeki, Kiyoshi Ochi, Nobutaka Wada, Dynamic Anti-windup Compensator Design Considering Behavior of Controller State, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No.4, pp.601-615, 2010, 査読有

[学会発表] (計6件)

1. Nobutaka Wada, Kosuke Fujii, Masami Saeki, Reconfigurable Fault-tolerant Control of a Vehicle with a Steer-by-wire System, International Conference on Advanced Mechatronics, 18-21 September, 2012, Tokyo, 査読有
2. Nobutaka Wada, Akihiro Takahashi, Masami Saeki, Masaharu Nishimura, Vehicle Yaw Control Using an Active Front Steering System with Measurements of Lateral Tire Forces, International Conference on Advanced Mechatronics, 4-6 October, 2010, Osaka, 査読有
3. Shunsuke Takamatsu, Unggul Wasiwitonon, Masami Saeki, Nobutaka Wada, Anti-Windup Compensator Design Considering Behavior of Controller State, IEEE Multi-conference on Systems and Control, 8-10 September, 2010, Yokohama, 査読有
4. Nobutaka Wada, Hiroyuki Tomosugi, Masami Saeki, Masaharu Nishimura, Model Predictive Tracking Control Using a State-dependent Gain-scheduled Feedback, International Conference on Modelling, Identification and Control, 17-19 July, 2010, Okayama, 査読有
5. Masami Saeki, Keisuke Kawanishi, Nobutaka Wada, A Search Method for a Fixed-Order Controller of  $H_2/H_\infty$  Control Problems, SICE Annual Conference, pp.3024-3029, 18-21 August, 2010, Taiwan, 査読有
6. Masaharu Nishimura, Tatsuya Murao, Nobutaka Wada, Basic Study on Active

Acoustic Shielding : Phase 2 Noise Reducing Performance for a Small Open Window, International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 13-16 June, 2010, Portugal, 査読有

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/nwada/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和田 信敬 (Nobutaka Wada)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号 : 5 0 3 3 5 7 0 9

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし