

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24年5月15日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560468

研究課題名（和文） パフォーマンスモニタリングとネットワークによる情報型適応制御系設計に関する研究

研究課題名（英文） Research on a Data-Driven Adaptive Control System Design based on Performance Monitoring and Networking

研究代表者

水本 郁朗 (MIZUMOTO IKURO)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：30239256

研究成果の概要（和文）：本研究では、出力のみをフィードバックする制御手法(出力フィードバック)に基づく制御系の制御性能評価に基づく再設計法および出力フィードバックに基づく複数のサンプリング(マルチレート)によるネットワーク制御系設計法についてそれぞれ個別に基礎研究を行った。さらに、それぞれで得られた制御系設計法の基礎的な結果に対する理論的拡張を行い、制御性能評価に基づく制御手法およびネットワーク制御系設計法を融合させた情報型適応制御手法の体系化について検討した。

研究成果の概要（英文）：In this research, a redesign method of the output feedback based control system and a network control system based on a multi-rate control have been investigated. Furthermore, we have tried to expand the obtained methodology and have considered systematizing the methods to a data-driven adaptive control strategy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：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：制御理論

1. 研究開始当初の背景

近年、コンピュータや情報機器の発達により、メガバイト (MB)、ギガバイト (GB) におよぶ膨大な量の情報が蓄積され、また、活用される時代となっている。今後、テラバイト (TB) さらにはペタバイト (PB) の情報も簡単に蓄積され活用される時代が到来することは疑う余地もない。このような情報を如何に有用に活用し新しい技術または既存の技術の改善に役立てるか、ま

た、膨大な情報の必要な部分のみを如何に有効に活用するかといった技術の構築は、今後の情報化時代において必要かつ不可欠な科学技術といえる。

本研究で対象とする制御工学の分野においても、得られたさまざまな情報を有効かつ効率的に利用できれば、制御系の安定性の保証や制御性能の向上に役立てられることが期待できる。このようなことから、これまででは、あまり有用に利用されていな

かった（蓄積された）情報やネットワークを介して共有できるようになった情報を如何に有効に効率よく制御系設計や制御性能評価および制御器の改善に用いるかが、今後の新しい制御技術の発展に対する重要な課題の一つといえる。

このようなことから、この10数年の間、盛んに研究されている研究の一つにパフォーマンスモニタリングがある。このパフォーマンスモニタリングの研究は、主に制御されたシステムの挙動および制御性能が希望通りになっているかを計測された情報から、効率よく観察する手法の構築を目指したもので、最近では、プロセス系やメカニカルシステムなど幅広い分野で意欲的に研究が行われている。しかし、現在までの研究は、その多くが上述したようにモニタリングがメインテーマであり、観察した結果をどのように直接的に制御系設計（再設計）や制御系の性能改善に役立てるかについては、あまり多くの研究はなされていない。さらに、ネットワークを介した制御系設計も今後の情報社会における新しい制御技術として、近年活発に研究が行われており、これらの情報化時代に沿った新しい制御技術を構築、融合することは、今後の重要な課題の一つであった。

2. 研究の目的

研究代表者らは、これまで、不確かなシステムに対する適応制御系設計法に関する研究を行ってきたが（これまでに受けた研究費とその成果等参照）、適応制御において、制御環境の変化に、より柔軟に対応し高性能を維持するためには、より多くの情報を効率よく取り入れ、それを制御系の再設計に活用することが不可欠であり、今後の高性能化および安全（安定）性の保証のためにも重要な課題といえる。

以上のことから、本研究では、パフォーマンスモニタリングにより得られたシステムの観測結果を有効に利用した制御系設計技術を構築するため、さらにはネットワークシステムを有効に活用するためパフォーマンスモニタリングおよびネットワーク制御を融合させた新しい適応制御系設計手法を確立することを目的とし、次世代型の情報社会を念頭に入れた制御系設計手法の確立を目指した。

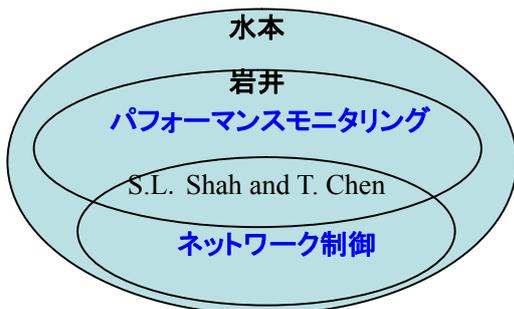
具体的には、基本として、研究代表者らが長年構築してきた大規模、複雑かつ不確かなシステムにも有用に適用できる出力フィードバックに基づく適応制御手法に

パフォーマンスモニタリング手法を取り入れた新しい適応制御系（再）設計法の検討を行うことを目的とした。さらに、ネットワーク制御に関しては、近年国内外においてその制御系設計法が意欲的に研究されているが、本研究では、研究代表者らがこの数年研究を行っている出力フィードバックに基づくマルチレート手法を用いたネットワーク制御手法の構築を行い、上述のパフォーマンスモニタリングによる制御系設計手法と融合させることでパフォーマンスモニタリングおよびネットワーク制御を融合させた新しい制御系設計手法の確立をめざすことを目的とした。

構築しようとする制御系設計手法は、研究代表者らが取り組んできた、構造の比較的簡素な出力フィードバックに基づく適応制御手法に基づいているため、本研究により、より実用的かつメンテナンスフリーを実現する制御系の実現が期待できる。また、得られた結果を実験室レベルではあるが、実システムへ適用しその有用性を検証することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、はじめに、出力フィードバックに基づく制御系のパフォーマンスモニタリングを用いた再設計法の基本となる基礎理論の構築および出力フィードバックに基づくマルチレートによるネットワーク制御系設計に関する理論展開を行い、基礎理論の構築を行う。また、得られた基礎理論からパフォーマンスモニタリングおよびネットワーク制御を融合させる上での問題点を明らかにし、さらに、基礎理論を発展させる形で、パフォーマンスモニタリングおよびネットワーク制御を融合させた、新しい情報型の適応制御系設計法の構築を行う。また、この研究により開発した制御系設計法の有効性の検証を数値シミュレーションおよび実システムに対する実験により行う。なお、本研究は、海外共同研究者である、アルバータ大学（カナダ）のS. L. Shah教授およびT. Chen教授と連携を取りながら行った。図のように研究全体の取り纏めを水本が行い、連携研究者の岩井は、主にパフォーマンスモニタリング手法を用いた制御系再設計に関する基礎理論構築を申請者と連携して担当した。また、Shah教授とはパフォーマンスモニタリングに関する理論研究で協力し、Chen教授とはマルチレートによるネットワーク制御系設計に関して協力して研究を行った。



具体的には、各年度で下記のような計画で研究を遂行した。

(1) 平成 21 年度の研究方法

平成 21 年度は、出力フィードバックに基づく制御系のパフォーマンスモニタリングを用いた再設計法および出力フィードバックに基づくマルチレートによるネットワーク制御系設計それぞれに対して個別に理論的検討を中心に基礎研究を行う。具体的には、以下の項目に対して、個別に検討を行った。

① パフォーマンス評価を用いた出力フィードバック制御系の再設計に関する基礎研究

システムが概強正実 (ASPR) であるとき、適応出力フィードバックにより安定化可能であり、ロバストかつ高精度な制御系が設計できることがこれまで明らかになっているが、この ASPR 性は、実システムに対し大変厳しい条件であることが知られている。この問題の最も有効な解決策として、並列フィードフォワード補償器 (PFC) を併用した設計法が提案されている。ここでは、PFC を含んだシステム全体のパフォーマンス評価を行うことで、制御器のみでなく PFC を含んだ制御系全体の再設計手法に関する基礎的かつ理論的研究を行う。担当は水本、岩井が中心となり、海外共同研究者の Shah 教授と連携を取って行った。

② マルチレート手法を用いたネットワーク出力フィードバック制御系設計に関する基礎研究

ネットワーク制御系は、ネットワーク通信により、情報を得たり、制御したりするシステムであるが、通信遅延やパケットロスなどのさまざまな問題が指摘されている。ここでは、マルチレート手法を発展させた手法によりこれらの問題を解決する制御系設計法の理論的研究を行う。担当は、海外共同研究者の Chen 教授と連携を取りながら、水本が中心となり行った。

(2) 平成 22 年度以降の研究方法

平成 22 年度は、前年度得られたパフォーマンスモニタリングによる制御系設計法及びマルチレート手法によるネットワーク制御系設計法の基礎的な結果に対する理論的

拡張を行い、さらに得られた結果を数値シミュレーションおよび実システムによる実験により検証する。具体的には、下記のような検討を行う。

① パフォーマンスモニタリングとネットワーク制御手法を融合させた情報型適応制御手法の体系化

21 年度に検討したパフォーマンスモニタリングによる制御系設計法及びマルチレート手法によるネットワーク制御系設計法に関して、得られた設計条件や数値シミュレーションにより把握できた設計上の問題点等を考慮の上、理論的拡張をそれぞれに対して行った。その後、それぞれの手法を融合させた新しい情報型適応制御手法の体系化を図った。

② 実験的検証

開発したそれぞれの手法および最終的に本研究により体系化した情報型適応制御手法の有効性および実用性を実験室レベルの実験装置により検証した。具体的には、研究所所有の非線形 3 タンクプロセス実験装置により、新しく開発したパフォーマンスモニタリングベースの適応出力フィードバック制御器の有用性の検討を実験的に行った。さらに、本実験装置では、人為的にパケットロスを生じさせることにより、既存の実験装置においてネットワーク制御系を仮想的に実現し、新しく構築したマルチレート手法によるネットワーク制御手法の有効性および実用可能性の検証も行った。

4. 研究成果

本研究では、最初に、出力フィードバックに基づく制御系のパフォーマンスモニタリングを用いた再設計法および出力フィードバックに基づくマルチレートによるネットワーク制御系設計それぞれに対して個別に理論的検討を中心に基礎研究を行った。その後、得られた制御系設計法及びマルチレート手法によるネットワーク制御系設計法の基礎的な結果に対する理論的拡張を行い、パフォーマンスモニタリングおよびネットワーク制御系設計法への拡張およびパフォーマンスモニタリングとネットワーク制御手法を融合させた情報型適応制御手法の体系化について検討した。

具体的には、以下の項目に対して、成果が得られた。

(1) パフォーマンス評価を用いた出力フィードバック制御系の再設計に関する基礎研究

システムが概強正実 (ASPR) であるとき、適応出力フィードバックにより安定化可能であり、ロバストかつ高精度な制御系が設計できることがこれまで明らかになっているが、この ASPR 性は、実システムに対し大変

厳しい条件であることが知られている。この問題の最も有効な解決策として、並列フィードフォワード補償器 (PFC) を併用した設計法が提案されている。本研究では、パフォーマンス評価を用いたシステムの再設計手法の検討のひとつとして、1回の実験結果のみを用いたモデルフリーな制御器のみでなく PFC を含んだ制御系全体の設計手法の開発を行った。

(2) マルチレート手法を用いたネットワーク出力フィードバック制御系設計に関する基礎研究

ネットワーク制御系は、ネットワーク通信により、情報を得たり、制御したりするシステムであるが、通信遅延やパケットロスなどのさまざまな問題が指摘されている。ここでは、マルチレート手法を発展させた部分的に出力の検出できないシステムに対する出力推定器を用いる手法による制御系設計法の理論的研究を行い、基本的な設計法を開発した。

(3) パフォーマンスモニタリングとネットワーク制御手法を融合させた情報型適応制御手法の体系化

パフォーマンス評価を用いたシステムの再設計手法の検討のひとつとして、1回の実験結果のみを用いたモデルフリーな FRIT 手法を用いた PFC を含んだ制御系全体の設計手法をパフォーマンスモニタリングによる適応制御系設計に拡張し、モデルフリーな制御器のみでなく PFC を含んだ制御系全体を適応設計する設計手法に関する検討を行い、得られた設計条件や数値シミュレーションにより把握できた設計上の問題点等を考慮した設計法の理論的な再検討を行い、より体系化された設計法を得ることができた。さらに、基本的に検討してきたマルチレート手法を発展させた部分的に出力の検出ができないシステムに対する出力推定器を用いる制御系設計法を各サンプリングで出力が非一様にサンプリングされる非一様なマルチレート手法に拡張し、ネットワーク制御系設計法への拡張について検討した。さらに、これらの結果に基づき、パフォーマンスモニタリングとネットワーク制御手法を融合させた情報型適応制御手法の体系化について検討した。

(4) 数値シミュレーション・実験による検証

開発したそれぞれの手法の有効性および実用性を実際の実験により検証した。タンクプロセスによる制御実験では、人為的にパケットロスを発生させることにより、既存の実験装置においてネットワーク制御系を仮想的に実現し、新しく構築したマルチレート手法によるネットワーク制御手法の有効性および実用可能性の検証を行った。また、磁気浮上システムによる制御実験では、構築した

モデルフリーな制御系設計手法の有効性および実用可能性の検証が行えた。

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 13 件)

① Ikuro Mizumoto and Yotaro Fujimoto, Fast-rate Adaptive Output Feedback Control with Adaptive Output Estimator for Non-uniformly Sampled Multirate Systems, Proc. of IEEE CDC-ECC 2011, 査読有, pp. 8297-8303, 2011

② Ikuro Mizumoto, Sota Fukui, Kenshi Yamanaka and Sirish L. Shah, Performance-Driven Adaptive Output Feedback Control System with a PFC designed via FRIT Approach, Proc. of the 2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2011), 査読有, CD-ROM, 2011.

③ Ikuro Mizumoto, Yotaro Fujimoto, Zenta Iwai, Fast-rate Output Feedback Control with Adaptive Output Estimator for Non-uniformly Sampled Multirate Systems, IFAC World Congress, 査読有, pp. 6541-6548, 2011.

④ Ikuro Mizumoto, Yotaro Fujimoto, Nao Watanabe and Zenta Iwai, Fast rate Adaptive Output Feedback Control of Multirate Sampled Systems with an Adaptive Output Estimator, International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), 査読有, Vol.7, No.7, pp. 4377-4395, July, 2011.

⑤ Ikuro Mizumoto, Hiroki Tanaka and Toru Tokimatsu, Adaptive Output Regulation of A Class of Discrete-Time Nonlinear Systems based on Output Feedback and NN Feedforward Control, Proc. of 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2010), 査読有, pp. 4631-4636, 2010.

⑥ Ikuro Mizumoto and Hiroki Tanaka, Model Free Design of PFC for Adaptive Output Feedback Control and Application to a Control of Magnetic Levitation System, 2010 IEEE International Conference on Control Applications, Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC), 査読有, pp. 35-40, 2010.

⑦ Ikuro Mizumoto and Hiroki Tanaka, Model Free Design of Parallel Feedforward Compensator for Adaptive Output Feedback Control via FRIT with T-S Fuzzy Like Model, Proc. of IFAC Workshops, Adaptation and Learning in Control and Signal Processing

(ALCOSP 2010), 査読有, CD-ROM, 2010.

⑧ Ikuro Mizumoto, Satoshi Ohdaira, Zenta Iwai, Output Feedback Strictly Passivity of Discrete-time Nonlinear Systems and Adaptive Control System Design with a PFC, Automatica, 査読有, Vol. 46, No.9, pp. 1503-1509, 2010.

⑨ Ikuro Mizumoto, Satoshi Ohdaira, Nao Watanabe, Hiroki Tanaka, Hiroshi Harada, Yotaro Fujimoto, Hiroyuki Kinoshita and Zenta Iwai, Output Feedback Control of Multirate Sampled Systems with an Adaptive Output Estimator and Its Application to a Liquid Level Process Control, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 4, No. 2, pp. 314-330, 2010.

⑩ Ikuro Mizumoto, Daisuke Ikeda, Tadashi Hirahata, Zenta Iwai, Design of Discrete Time Adaptive PID Control Systems with Parallel Feedforward Compensator, Control Engineering Practice, 査読有, Vol.18, No. 2, pp.168-176, 2010.

⑪ Ikuro Mizumoto, Yuji Okamatsu, Hiroki Tanaka and Zenta Iwai, Output Regulation of Nonlinear Systems based on Adaptive Output Feedback with Adaptive NN Feedforward Control, International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), 査読有, Vol.5, No. 10, October, pp.3527-3539, 2009.

⑫ 水本郁朗, 岩井善太, 概強正実性 (ASPR) 性に基づく適応PID制御系設計, 計測と制御, 査読有, Vol. 48, No. 8, pp.640-645, 2009.

⑬ Ikuro Mizumoto, Hiroki Tanaka and Zenta Iwai, Adaptive Output Regulation of Nonlinear Systems based on Output Feedback and NN Feedforward Control, Proc. of the European Control Conference 2009, 査読有, pp.981-986, 2009.

[学会発表] (計5件)

①高木太郎, 福井創太, 山中乾元, 水本郁朗, 離散時間系に対するFRITによるPFC設計手法を用いたパフォーマンス駆動適応出力フィードバック制御」, Sirish L. Shah 平成23年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 富山大学(富山), 2011.9.7

②福井創太, 山中乾元, 水本郁朗, Sirish L. Shah, FRITによるPFC設計手法を用いたパフォーマンス駆動適応出力フィードバック制御, システム制御情報学会研究発表講演会, 大阪大学(大阪), 2011.5.17

③藤本陽太郎, 水本郁朗, 非一様マルチレートシステムに対する適応出力推定器を用いたFast-rate 適応出力フィードバック制御, 第11回計測自動制御学会制御部門大会, 琉

球大学(沖縄), 2011.3.18

④藤本陽太郎, 水本郁朗, 非一様マルチレートシステムに対する適応出力推定器を用いたFast-rate 出力フィードバック制御, 第39回制御理論シンポジウム, ホテルコスモスクエア国際交流センター(大阪), 2010.9.27

⑤福井創太, 田中宏樹, 水本郁朗, 適応出力フィードバック制御における並列フィードフォワード補償器のモデルフリー設計と磁気浮揚システムへの応用, 平成22年電気学会電子・情報・システム部門大会, 熊本大学(熊本), 2010.9.3

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水本 郁朗 (MIZUMOTO IKURO)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 30239256

(3) 連携研究者

岩井 善太 (IWAI ZENTA)

熊本大学・大学院自然科学研究科・名誉教授
研究者番号: 40026109

(4) 海外共同研究者

Sirish L. Shah

アルバータ大学(カナダ)・教授
研究者番号: なし

Tongwen Chen

アルバータ大学(カナダ)・教授
研究者番号: なし