

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560210

研究課題名（和文）目標追従特性の指定が容易なシンプル繰返し補償器の設計法に関する研究

研究課題名（英文）Study on a design method for simple repetitive controllers those can specify the reference-tracking characteristic easily

研究代表者

山田 功 (YAMADA KOU)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20240012

研究成果の概要（和文）：修正繰返し制御系は、不確かさや周期外乱の存在のもと周期目標入力に小さな定常偏差で追従する制御系である。これまでの修正繰返し補償器を用いると、たとえ制御対象にむだ時間がなかったとしても、周期目標入力から出力までの伝達関数が無限個の極を持つ。そのため、入出力特性の指定と外乱抑制特性の指定が困難であるといった問題がある。実用上、周期目標入力から出力までの伝達関数と外乱から出力までの伝達関数は、有限個の極を持つことが望ましい。本研究では、周期目標入力から出力までの伝達関数と外乱から出力までの伝達関数が有限個の極を持つ繰返し補償器をシンプル繰返し補償器と定義を与える。また、安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにする。

研究成果の概要（英文）：The modified repetitive control system is a type of servomechanism for periodic reference input. Even if the plant does not include a time delay, the transfer functions from both the reference input and the disturbance of the output of the modified repetitive control system generally have an infinite number of poles, and for this reason it is difficult to settle the input-output and the disturbance attenuation characteristics of a modified repetitive control system. From a practical point of view, the input-output and the disturbance attenuation characteristics of a control system need to be settled easily, and thus, it is desirable that the transfer functions from both the reference input and the disturbance to the output have a finite number of poles. In order to easily specify the input-output and the disturbance attenuation characteristics, we propose the concept of a simple repetitive control system in which the controller works as a stabilizing modified repetitive controller and the transfer functions to the output from both the reference input and the disturbance have a finite number of poles. In addition, the parameterization of all stabilizing simple repetitive controllers is clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010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：制御工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：繰返し制御，むだ時間系，不確かさ，有限個の極

1. 研究開始当初の背景

繰返し制御とは、周期外乱や不確かさの存在のもと、周期目標入力に対し、小さな定常偏差で追従する制御系である[1-10]。陽子シンクロトロン電磁石電源の高精度制御を目的としてはじめられた研究であり、これまで多くの理論とその応用に関する研究が発表されている[1]。任意の周期目標入力に対し定常偏差なく追従する完全な繰返し制御系は、中立型むだ時間系となり安定化が難しいことが知られている[4]。そのため、任意の周期目標入力に定常偏差なく追従するためには、制御対象がバイプロパーである必要性が指摘されている。池田、高野[5]は、周期目標入力のすべての周波数成分に対し定常偏差なく追従するのは、物理的に無理があることに着目し、制御対象の相対次数が1次であったとしても、高周波成分を持たない周期信号に対しては繰返し制御系がL2安定であることを示した。実際の制御対象は、真にプロパーで相対次数が1次とは限らないため、相対次数が任意の真にプロパーな制御対象に適用可能な繰返し制御系の設計法が検討されている。なかでも、周期目標入力の低周波成分に対し高精度で追従し、周期目標入力の高周波成分に対する偏差を許容するというアイデアをもとに、ローパスフィルタを繰返し補償器内部に含めて安定化する方法は、構成が簡単であるという特徴があるため、修正繰返し補償器と呼ばれ多くの実システムに適用されている。

安定化修正繰返し補償器すべてを求める問題、いわゆる安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーションは、原、山本によりはじめて検討された[6]。参考文献[6]では、修正繰返し制御系の安定条件が H_1 ノルムの問題になることに着目し、Nevanlinna-Pickの補間問題に帰着して安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーションを与えている。加藤、舟橋は、ベズー方程式を厳密に解くことにより、最小位相系に対する安定化修正繰返し制御系のパラメトリゼーションを与えている[7]。参考文献[7]は、修正繰返し制御系が内部安定であるための十分条件をもとにパラメトリゼーションを与えていないため、参考文献[6]の補償器よりも広いクラスの補償器を記述できているものと期待できるという点で、重要である。しかし、参考文献[7]には、修正繰返し補償器内部のローパスフィルタの相対次数が制御対象のそれと等しくならなければならないという制約と、制御対象が安定である必要があるため、限られたクラスの最小位相系に対する安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにしているにすぎないという問題がある。参考文献[8]では、参考文献[7]の

問題を解決し、真にプロパーな最小位相系に対する安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーションを与えている。

山田、佐藤、奥山は、参考文献[8]を拡張し、並列補償法とベズー方程式を解くことにより、あるクラスの非最小位相系に対する安定化修正繰返し制御系のパラメトリゼーションを与えている[9]。

佐藤、山田、荒川は、参考文献[9]とは異なる方法で、任意の非最小位相系に対する安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーションを与えている[10]。その後、山田らはロバスト安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーション、むだ時間系に対する修正繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにしている[11]。

参考文献[10]の安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いると、たとえ制御対象が有理関数で記述されていたとしても（有限個の極しか持たなかったとしても）、入力から出力までの伝達関数が無限個の極を持ち入出力特性の指定が難しいという問題がある。入力から出力までの伝達関数が有限個の極しか持たなければ、入出力特性の指定が容易になるが、これまで入力から出力までの伝達関数が有限個の極しか持たない修正繰返し制御系の設計法は検討されていない。

参考文献

- [1] 井上他：陽子シンクロトロン電磁石電源の繰返し運転における高精度制御，電気学会論文集(1980)。
- [2] T. Omata, S. Hara and M. Nakano: Nonlinear repetitive control with application to trajectory control of manipulator, J. of Robotic Systems(1987)。
- [3] 小林他：繰返し制御を応用したモータの回転むら低減法，電気学会論文集(1987)。
- [4] 渡部，山足：スペクトル分解法による繰返し制御系の安定化，(1986)。
- [5] 池田，高野：入出力直結経路を持たないシステムの繰返し制御，計測自動制御学会論文集，(1988)。
- [6] 原，山本：多変数繰返し制御系の安定化-安定条件と安定化補償器のクラス，(1986)。
- [7] 加藤，舟橋：繰返し制御器の一構成法，(1996)。
- [8] 山田，奥山：最小位相系に対する繰返し制御系のパラメトリゼーション，(2000)。
- [9] 山田，佐藤，奥山：あるクラスの非最小位相系に対する繰返し制御系のパラメトリゼーション，(2003)。
- [10] 佐藤，山田，荒川：非最小位相系に対する修正繰返し補償器のパラメトリゼーション，(2005)。

[11] K. Yamada, N. Matsushima: A design method for Smith predictors for minimum-phase time-delay plants, (2005)

2. 研究の目的

修正繰返し制御は、陽子シンクロトロン of 電磁石電源の高精度制御、繰返し動作が必要な産業用ロボットの制御、モータの回転むらの抑制などのために始められた研究である。すなわち、周期外乱や不確かさの存在のもと、出力が周期目標入力に小さな定常偏差で追従する制御系である。これまで、多くの繰返し制御に関する理論研究、応用研究が発表されているが、これまでの修正繰返し補償器を用いると、たとえ制御対象にむだ時間を含んでいなかったとしても、周期目標入力から出力までの伝達関数が無限個の極を持ってしまい、目標追従特性の指定が困難であるという問題があった。

本研究の目的をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 周期目標入力から出力までの伝達関数が有限個の極しか持たない繰返し制御系をシンプル繰返し制御系と呼び、その定義を与える。
- (2) シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーション、すなわち制御系を安定化するシンプル繰返し補償器のすべてを明らかにする。
- (3) シンプル繰返し補償器の設計法を検討する。

3. 研究の方法

申請者の非最小位相系に対する修正繰返し補償器のパラメトリゼーションの結果[12]と申請者の修正スミス予測器のパラメトリゼーション[13]の結果を融合し、入力から出力までの伝達関数が有限個の極しか持たないシンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを理論的に明らかにする。得られたパラメトリゼーションを用いたシンプル繰返し補償器の設計法を検討する。さらに、数値シミュレーションによって、提案方法の有用性を検証する。

参考文献

[12] 佐藤, 山田, 荒川: 非最小位相系に対する修正繰返し補償器のパラメトリゼーション, (2005)

[13] K. Yamada, N. Matsushima: A design method for Smith predictors for minimum-phase time-delay plants, (2005)

[14] 山田, 佐藤: ロバスト安定化修正繰返し補償器のパラメトリゼーション, (2007)

[15] 山田, 佐藤, 荒川: むだ時間系に対する修正繰返し補償器のパラメトリゼーション, (2005)

4. 研究成果

- (1) 目標入力から出力までの伝達関数が有限個の極しか持たない繰返し補償器をシンプル繰返し補償器と呼ぶこととし、定義を与えた。一入力一出力線形システムに対し、安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーション (安定化補償器のすべてを求める問題) を明らかにした。安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いたときの制御特性を検討し、パラメトリゼーションに含まれる自由パラメータの役割を明らかにした。さらに、設計法を与えた。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(15)にまとめた。
- (2) 目標入力から出力までの伝達関数が有限個の極しか持たない多重周期繰返し補償器をシンプル多重周期繰返し補償器と呼ぶこととし、定義を与えた。一入力一出力線形システムに対し、安定化シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。安定化シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いたときの制御特性を検討し、パラメトリゼーションに含まれる自由パラメータの役割を明らかにした。さらに、設計法を与えた。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(14)にまとめた。
- (3) むだ時間系に対する安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いたときの制御特性を検討し、パラメトリゼーションに含まれる自由パラメータの役割を明らかにした。さらに、設計法を与えた。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(13)にまとめた。
- (4) これまで発表してきたシンプル繰返し補償器は、目標追従特性とフィードバック特性を独立に指定することができなかった。目標追従特性とフィードバック特性を独立に指定できる2自由度シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(12)にまとめた。
- (5) むだ時間系に対する安定化シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。安定化シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いたときの制御特性を検討し、パラメトリゼーションに含まれる自由パラメータの役割を明らかにした。さらに、設計法を与えた。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(11)にまとめた。
- (6) 一入力一出力線形システムに対し、ロバスト安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。この

結果をまとめ、主な発表論文「雑誌論文」の(10)にまとめた。ロバスト安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いたときの制御特性を検討し、パラメトリゼーションに含まれる自由パラメータの役割を明らかにした。さらに、設計法を与えた。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(8)にまとめた。

- (7) 一入力一出力線形システムに対し、ロバスト安定化シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。この結果をまとめ、主な発表論文「雑誌論文」の(9)にまとめた。ロバスト安定化シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いたときの制御特性を検討し、パラメトリゼーションに含まれる自由パラメータの役割を明らかにした。さらに、設計法を与えた。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(5)にまとめた。
- (8) これまでのシンプル繰返し補償器は、目標追従特性を指定することに困難さが残っていた。目標追従特性の指定がより簡単な目標追従特性を指定したシンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。制御特性を検討し、パラメトリゼーションに含まれる自由パラメータの役割を明らかにした。さらに、設計法を与えた。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(7)にまとめた。
- (9) これまで発表してきたシンプル多重周期繰返し補償器は、目標追従特性とフィードバック特性を独立に指定することができなかった。目標追従特性とフィードバック特性を独立に指定できる2自由度シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(6)にまとめた。
- (10) 目標追従特性の指定が容易な目標追従特性を指定したロバスト安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(4)にまとめた。
- (11) 多入力多出力系に対し、安定化シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(3)にまとめた。
- (12) むだ時間系に対し、目標追従特性を指定したロバスト安定化シンプル繰返し補償器のパラメトリゼーションを明らかにした。このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(2)にまとめた。
- (13) シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションをモータの回転むら抑制に適用し、その有用性を検証した。

このことを、主な発表論文「雑誌論文」の(1)にまとめた。

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15件)

- (1) 坂主, 山田, 安藤, 村上, 松浦, シンプル多重周期繰返し補償器のパラメトリゼーションを用いたモータの回転むら抑制, 日本AEM学会誌, Vol.19, No.2 掲載決定, (2011) 査読あり
- (2) T. Sakanushi, K. Yamada, Y. Ando, I. Murakami, S. Matsuura, J. Hu, Robust stabilizing simple repetitive controllers for time-delay plants with the specified input-output characteristic, ICIC Express Letters, accepted for publication, 査読あり
- (3) T. Sakanushi, K. Yamada, Y. Ando, T. M. Nguyen, S. Matsuura, A design method for simple multi-period repetitive controllers for multiple-input/multiple-output plants, ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, accepted for publication, 査読あり
- (4) T. Sakanushi, K. Yamada, T. Hagiwara, Y. Ando, I. Murakami, S. Matsuura, The Parameterization of all robust stabilizing simple repetitive controllers with the specified input-output characteristic, ICIC Express Letters, Vol.5, No.4(A), pp.959-964(2011), 査読あり
- (5) T. Sakanushi, K. Yamada, T. Hagiwara, H. Takenaga, M. Kobayashi, S. Matsuura, The parameterization of all robust stabilizing simple multi-period repetitive controllers, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.59, pp.93-109(2011), 査読あり
- (6) Y. Ando, T. Sakanushi, K. Yamada, I. Murakami, T. Hagiwara, M. Kobayashi, A design method for two-degree-of-freedom simple multi-period repetitive control systems, Applied Mechanics and Materials, Vol.36, pp.243-252(2010), 査読あり
- (7) I. Murakami, T. Sakanushi, K. Yamada, Y. Ando, T. Hagiwara, S. Matsuura, The parameterization of all stabilizing simple repetitive controllers with the specified input-output characteristic, ICIC Express Letters, Vol. 4, No. 5(B), pp.1773-1778(2010), 査読あり
- (8) K. Yamada, T. Sakanushi, Y. Ando, T.

Hagiwara, I. Murakami, H. Takenaga, H. Tanaka, S. Matsuura, The parameterization of all robust stabilizing simple repetitive controllers, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No.3, pp.457-470(2010), 査読あり

(9) K. Yamada, Y. Ando, T. Hagiwara, M. Kobayashi, T. Sakanushi, A design method for robust stabilizing simple multi-period repetitive controllers for time-delay plants, ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.8, No.1, pp.11-21(2010), 査読あり

(10) K. Yamada, Y. Ando, I. Murakami, M. Kobayashi, N. Li, A design method for robust stabilizing simple repetitive controllers for time-delay plants, International Journal of Innovative computing, Information and Control, Vol.5, No.12(A), pp.4531-4540(2009), 査読あり

(11) K. Yamada, N. Li, M. Kobayashi, H. Takenaga, A design method for simple multi-period repetitive controllers for time-delay plants, International Journal of Innovative computing, Information and Control, Vol.5, No.10(B), pp.3313-3328(2009), 査読あり

(12) K. Yamada, M. Kobayashi, T. Hagiwara, Y. Ando, I. Murakami, T. Sakanushi, A design method for two-degree-of-freedom simple repetitive control systems, ICIC Express Letters, Vol.3, No.3(B), pp.787-792(2009), 査読あり

(13) K. Yamada, H. Tanaka, H. Takenaga, M. Kobayashi, A design method for simple repetitive controllers for time-delay plants, ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.7, No.1, pp.42-51(2009), 査読あり

(14) K. Yamada, H. Takenaga, A design method for simple multiperiod repetitive controllers, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.4, No.12, pp.3231-3245, (2008), 査読あり

(15) K. Yamada, H. Takenaga, Y. Saitou, K. Satoh, Proposal for simple repetitive controllers, ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.6, No.1, pp.64-72(2008), 査読あり

[学会発表] (計13件)

(1) T. Sakanushi, K. Yamada, T. Hagiwara, Y. Ando, I. Murakami, S. Matsuura, The parameterization of all robust

stabilizing simple repetitive controllers with the specified input-output characteristic, Fifth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICIC2010), Xi'an, China (2010.12.22)

(2) T. Sakanushi, K. Yamada, S. Matsuura, T. Hagiwara, Y. Ando, I. Murakami, A design method for two-degree-of-freedom simple repetitive control systems for multiple-input/multiple-output plants, World Automation Congress 2010 (WAC2010), Kobe, Japan (2010.9.22)

(3) T. Sakanushi, K. Yamada, Y. Ando, T. Hagiwara, I. Murakami, S. Matsuura, The parameterization of all stabilizing simple repetitive controllers with the specified input-output characteristic, Third International Symposium on Intelligent Informatics (ISII2010), Dalian, China (2010.9.6)

(4) T. Sakanushi, K. Yamada, T. Hagiwara, I. Murakami, S. Matsuura, A design method for two-degree-of-freedom simple multi-period repetitive control systems for multiple-input/multiple-output plants, The 25th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC2010), Pattaya, Thailand (2010.7.5)

(5) T. Sakanushi, K. Yamada, Y. Ando, T. M. Nguyen, S. Matsuura, A design method for simple multi-period repetitive controllers for multiple-input/multiple-output plants, 2010 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology, Chiang Mai, Thailand (2010.5.20)

(6) K. Yamada, T. Hagiwara, I. Murakami, Y. Ando, T. Sakanushi, N. M. Tuan, M. Kobayashi, A design method for simple repetitive controllers for multiple-input/multiple-output plants, Symposium on Learning Control at IEEE CDC 2009, Shanghai, China (2009.12.15)

(7) K. Yamada, T. Sakanushi, Y. Ando, I. Murakami, T. Hagiwara, M. Kobayashi, A design method for 2-degree-of-freedom simple multi-period repetitive control systems, 1st International Symposium on Robotics and Mechatronics, Hanoi, Viet Nam (2009.9.22)

(8) K. Yamada, M. Kobayashi, T. Hagiwara, Y. Ando, I. Murakami, T. Sakanushi, A design method for 2-degree-of-freedom

simple repetitive control systems, The Second International Symposium on Intelligent Informatics, Qinhuangdao, China (2009.9.14)

(9) K. Yamada, Y. Ando, T. Hagiwara, M. Kobayashi, T. Sakanushi, A design method for robust stabilizing simple multi-period repetitive controllers for time-delay plants, 2009 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology, Pattaya, Thailand (2009.5.7)

(10) K. Yamada, Y. Ando, I. Murakami, M. Kobayashi, N. Li, A design method for robust stabilizing simple repetitive controllers for time-delay plants, 2008 International Symposium on Intelligent Informatics, Kumamoto, Japan (2008.12.12)

(11) K. Yamada, T. Hagiwara, H. Takenaga, M. Kobayashi, A design method of robust stabilizing simple multi-period repetitive controllers, International Federation of Automatic Control World Congress 2008, Seoul, Korea (2008.7.7)

(12) K. Yamada, N. Li, M. Kobayashi, H. Takenaga, A design method of simple multi-period repetitive controllers for

time-delay plants, Third International Conference on Innovative Computing, Information and Control, Dalian, China (2008.6.20)

(13) K. Yamada, H. Tanaka, H. Takenaga, M. Kobayashi, A design method for simple repetitive controllers for time-delay plants, 2008 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication, and Information Technology, Krabi, Thailand (2008.5.15)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 功 (YAMADA KOU)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20240012

(2) 研究分担者

なし.

(3) 連携研究者

なし.