

## 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 21 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560438

研究課題名（和文） ネオ・ロバスト制御理論とその設計ツールの構築—超高性能ロバスト制御を目指して—

研究課題名（英文） Neo-Robust Control Theory and Its Design Tool - Toward a Super High Performance Robust Control -

研究代表者

劉 康志 (KANG-ZHI LIU)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70240413

研究成果の概要（和文）：

不確かさを有するシステムを制御する際、如何に制御性能を最大限に引き出すかはきわめて重要な問題である。従来のロバスト制御理論は、モデル不確かさに関する情報の一部分のみを活用するものであったため、制御性能を十分に高めることが困難であった。

この問題を解決するため、本研究ではモデル不確かさのゲイン情報のみならず、位相情報もフルに活用できる、新しいロバスト制御理論を構築した。本理論は、不確かさのゲイン・位相の情報を取り入れたプラント集合モデル、ロバスト安定条件、ロバスト感度条件およびロバスト帯域幅条件によって構成される。そして、従来理論に比べ、性能を格段に向上できることを理論的、実証的に示した。この理論は、ロバスト制御系の性能を大幅に改善できる可能性を秘めている。

研究成果の概要（英文）：

In the control of systems with model uncertainty, it is an extremely important issue how to enhance the control performance to the limit. In the conventional robust control theories, almost all only make use a part of the uncertainty information. For this reason, it is rather difficult to improve the control performance of the system.

To resolve this problem, this research established a new robust control theory, which utilizes not only the gain information, but also the phase information of the uncertainty. This theory is composed of a model for the set of plant which includes both the gain information and the phase information of the uncertainty, the robust stability condition, the robust sensitivity condition and the robust bandwidth condition. Further, it is proved both theoretically and via a benchmark system, that the new theory is able to enhance the robust performance significantly, as compared with conventional robust approaches. This theory has a potential of greatly improving the performance of robust control systems in industrial applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

### 1. 研究開始当初の背景

高性能ロバスト制御問題は、従来のロバスト制御理論では解決できない。従来のロバスト制御の根幹は小ゲイン原理、受動性原理と2次安定性である。最もポピュラーな小ゲイン原理では、モデル不確かさをそのゲインだけで捉え、位相情報を完全に無視している。その結果、小ゲイン条件を満たすために、不確かな高次振動モードの共振周波数よりかなり低い帯域から制御器のゲインを低く抑えざるを得なくなり、高次共振周波数まで制御帯域幅を上げることができない。このような小ゲイン原理に基づくロバスト制御の保守性と限界が多く、産業応用で報告されており、ロバスト制御技術の普及と高性能化の障害となっている。図1に示されるように、

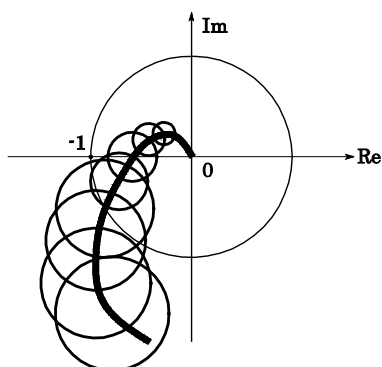


図1：不確かさのゲインだけを考える場合の開ループ系のナイキスト軌跡

不確かさをそのゲインだけでモデル化するとき、プラント集合の範囲は大幅に拡大し、開ループゲインを十分に上げられない。

一方、受動性原理では公称システムと不確かさ両方に正実性(位相が $\pm 90^\circ$ 以内)を要求するため、適用範囲が狭い。そして、受動性を有するシステムがゲイン変動に対して強いロバスト安定性を持つが、必ずしも高性能に結びつかないことが近年申請者の研究によ

って分かってきている。

さらに、パラメータ変動に対しては2次安定性に基づく方法があり、小ゲイン方法のように不確かさを拡大する欠点を持たない。しかし、2次安定性という概念自身は変化するシステム集合に対して一つのリアプノフ関数でその安定性を保証するものであり、そもそもその出発点が大きな保守性を有している。

### 2. 研究の目的

本研究は、超精密・超高速制御のための、新しいロバスト制御の体系作りを目指す。超精密・超高速制御を実現するには、広い制御帯域幅と低感度が求められる。この場合、モデル化が困難な高周波数特性(モデル不確かさ)は無視できない。広帯域化のために不確かさのゲインのみならず、位相も考えて設計しなければならない。そのための理論を体系化し、従来のロバスト制御理論を超越できる新しい理論を確立するのが本研究の目標である。

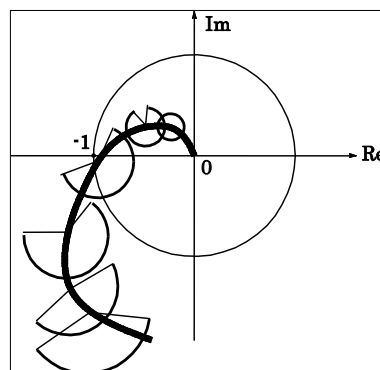


図2：不確かさのゲインと位相を考える場合の開ループ系のナイキスト軌跡

本理論は、モデル不確かさのゲイン情報だけにに基づく従来のロバスト制御とは大きく異なり、不確かさの位相情報もフルに活用するものである。その原理を図2で簡単に説明する。不確かさのゲインと位相両方の情報を用いることにより、プラント集合はよりコンパクトになり、開ループゲインを高めることができるようになる。ネオ・ロバスト制御理論を確立することによって、超高性能のロバスト制御系を実現可能にする。

### 3. 研究の方法

ネオ・ロバスト制御理論の体系を作り上げるために、以下の研究を展開する。

#### (1) ゲイン・位相情報を取り入れた不確かさのモデル化

システム同定の立場に立ち、不確かさのゲインと位相の範囲に関する情報をどのように表現したらよいかを検討し、そのモデルを提案する。

#### (2) 周波数域におけるロバスト安定解析

ナイキストの安定定理に基づいて、不確かさの位相・ゲイン情報を含んだプラント集合に対するロバスト安定性の必要十分条件を導出する。

#### (3) 周波数域におけるロバスト感度解析

目標値追従性などの性能仕様は、低感度化によって達成されるものである。ここで、不確かさが存在しても超精密な制御を実現するために欠かせないロバスト感度を詳しく解析し、そのための必要十分条件を導く。

#### (4) 周波数域におけるロバスト帯域幅解析

システム応答の高速化は、基本的に制御帯域幅を広げることによって達成されるものである。ここで、不確かさが存在するときの広帯域化の必要十分条件を導く。

#### (5) 設計ツールボックスの開発

ネオ・ロバスト制御系の設計に際し、効率的に位相整形・ゲイン整形を実行する必要がある。このためのソフトウェアを MATLAB ベースで開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) 位相情報を取り入れた不確かさのモデル化方法

モデル不確かさについて、周波数ごとに位相の変化範囲をその上界と下界

で、ゲインの変化範囲をその上界で規定するモデルを提案できた。この不確かさモデルはプラントのシステム同定データから作成できる。

#### (2) 周波数域におけるロバスト安定解析

不確かさの位相・ゲイン情報を含んだプラント集合に対して、ナイキストの安定定理に基づき、閉ループシステムがロバスト安定となるための必要十分条件を導出できた。図 3 を用いて説明すると、各周波数において、公称閉ループ伝達関数  $M(s)$  がグレーの領域（不確かさの位相範囲で定まる）の外に存在するか、もしくは領域 I に入るときに小ゲイン条件を満たすならば、閉ループ系はロバスト安定となる。

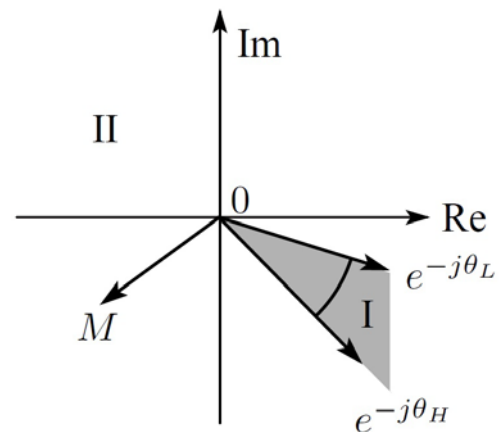


図 3 ロバスト安定条件の幾何学的意味

#### (3) 周波数域におけるロバスト感度解析

不確かさが存在しても、超精密な制御を実現するために欠かせないロバスト感度条件について詳しく解析し、そのための必要十分条件を導いた。この条件とは、先のロバスト安定条件に加えて、公称閉ループ伝達関数  $M(s)$  が図 4 の領域 I, II, IV に存在する場合、それぞれあ

るゲインに関する条件を満たす必要がある。

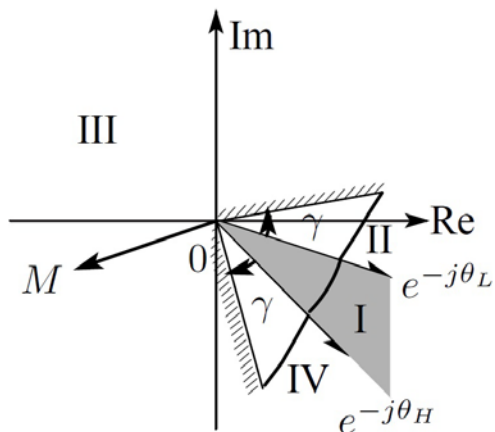


図4 ロバスト感度条件の幾何学的意味

#### (4) 周波数域におけるロバスト帯域幅解析

システム応答の高速化に必要な不可欠な広帯域化について、不確かさが存在するときの必要十分条件を導いた。この条件とは、不確かさのゲイン・位相の境界値によって決まるあるゲイン条件、もしくは位相条件を満たすことである。

#### (5) 他のロバスト制御方法との理論的比較

本研究で提唱するネオ・ロバスト制御理論は、不確かさのゲイン・位相情報の両方用いているため、他の手法より優れた性能を発揮できる。これを明確にするために、ロバスト性能を中心に、小ゲイン原理、受動性原理などに基づくロバスト制御手法との違いについて、理論的な比較を行い、本理論がすべての面において優れていることを明らかにした。さらに、この優位性をベンチマーク問題を使って実証した。

#### (6) 逆相不確かさへの対策

実システムを単純に公称プラントと不確かさの和として扱う場合、不確かさが

逆相になることがあり、制御性能向上を難しくしている。この問題を回避するために、プラント集合を公称プラントと不確かさの積で表わす、いわゆる因子分解型のプラント集合を考案した。この種のプラント集合に対して、ロバスト性能の必要十分条件を明らかにした。因子分解型のプラント集合表現法は、特にプロセス系に有効である。

#### (7) 設計ツールの開発

低次のシステムに対して、制御器の構造を事前に定めた場合、ロバスト制御の条件を周波数応答で確認しながら、制御パラメータを調整することを補助できるソフトウェアを開発した。

#### (8) ロバスト制御の正実化方法

以上のロバスト制御条件は、周波数域において区分的に分割された周波数帯上のゲイン条件と位相条件となっており、状態空間で設計することが困難であった。そこで、設計法開発の中間点として不確かさの位相情報だけを使うロバスト制御法を状態空間で開発した。具体的には、不確かさが正実な伝達関数であるクラスを対象に、まず、公称閉ループ系を強正実もしくは厳密な正実化にすることで閉ループシステムをロバスト安定化する方法を状態空間で確立した。これをベースに、ロバスト性能問題を等价的に正実なモデル不確かさを持つシステムのロバスト安定化問題に変換することによって、ロバスト性能の設計方法を確立した。

以上の成果は、モデル不確かさを持つシステムに対するロバスト制御を大きく前進させるものであり、産業応用などにおいて重要な意味を持つ。

#### 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 9 件)

- ① 劉康志, 横澤裕司, 片根保, 中川崇史: 降圧型 DC-DC コンバータの MPC-PI 制御法とその実装, 電気学会論文誌 D, 査読

- 有, Vol. 133, No. 8, DOI: 10.1541/ieejias.132.1 (2013.08)
- ② W. Wang, K.Z. Liu, T. Zanma: A Gain Scheduled Method for Speed Control of Wind Driven Doubly Fed Induction Generator, Engineering (Scientific Research), 査読有, Vol. 5, No. 1b, pp. 89-95, DOI: 10.4236/eng.2013.51B016 (2013.01)
- ③ 劉康志: **制御におけるロバストネス—ロバスト制御とネオ・ロバスト制御—**, システム/制御/情報(解説), 査読有, Vol. 55, No. 4, pp.135-140 (2011.04)
- ④ 高木良太, 劉康志: 半導体ウェーハ一用 RTP 装置のモデルベース制御, 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol. 131, No. 2, pp.159-165, DOI: 10.1541/ieejias.131.159 (2011.02)
- ⑤ A. Zaharin, K.Z. Liu and H. Kinoshita: High performance algorithms for the control of buck DC-DC converters, International Journal of Engineering Science and Technology, 査読有, Vol. 2(10), pp. 5799-5812, <http://www.ijest.info/abstract.php?file=10-02-10-170> (2010.10)
- ⑥ K.Z. Liu: **Neo-robust control theory -- Beyond the small-gain and passivity paradigms--**, in Theory and Applications of Complex Systems and Robust Control, 査読有, pp.217-231, Tsinghua University Press (2010.08)
- ⑦ D. Akasaka and K.Z. Liu: Output feedback control for saturated systems and its application, in Theory and Applications of Complex Systems and Robust Control, 査読有, pp.119-133, Tsinghua University Press (2010.08)
- ⑧ A. Zaharin and K.Z. Liu: A new model predictive control approach to DC-DC converters based on combinatory optimization, SICE Journal of Control, Measurement and System Integration, 査読有, Vol. 3-1, pp. 39-42 (2010)
- ⑨ R. He, K.Z. Liu: LPV modeling and gain-scheduled control approach for the transient stabilization of power systems, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol. 5-1, pp. 87-95 (2010.01)

[学会発表] (計 5 件)

- ① K.Z. Liu, K. Arima, K. Kondo: Adaptation of Stator and Rotor Resistances for The Vector Control of Induction Motors: A Method Based on Reduced Order Current Observer, Proc. of CCC2013, Xian, China (2013.07)
- ② Y. LIU, K.Z. Liu, X. Yang: Hysteresis Compensation Control for Reluctance Actuator Force Using Neural Network, Proc. of CCC2013, Xian, China (2013.07)
- ③ W. Wang, K.Z. Liu, T. Zanma: A Gain Scheduled Method for Speed Control of Wind Driven Doubly Fed Induction Generator, Proc. of 2013 Power and Energy Engineering Conference, Sanya, China (2012.12)
- ④ K.Z. Liu, Y. Yao: **Positive Real Method for Robust Control Problems**, Proc. of CCC2012, Hefei, China (2012.07)
- ⑤ H. Kinoshita, K.Z. Liu, A. Zaharin and Y. Yokozawa: High performance algorithms for the control and load identification of boost DC-DC converters, Proc. of IEEE VPPC 2010, France (2010.09)

[図書] (計 4 件)

- ① Kang-Zhi Liu and Yu Yao: **Robust Control: Theory and Applications**, John Wiley & Sons (2014.08)
- ② 劉康志, 姚郁: 线性鲁棒控制理论, 中国科学出版社 (2013 年 1 月)
- ③ 分担執筆: 制御の事典(ロバスト制御担当), 朝倉書店 (2013 年出版予定)
- ④ 分担執筆: 自動車エンジンのモデリングと制御(第 8 章), コロナ社 (2011 年 3 月)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

千葉大学・大学院工学研究科・教授  
劉康志 (KANG-ZHI LIU)

研究者番号: 70240413