

システム制御工学シリーズ 11

実践ロボスト制御

博士(工学) 平田 光男 著

コロナ社

システム制御工学シリーズ編集委員会

編集委員長 池田 雅夫 (大阪大学・工学博士)
編集委員 足立 修一 (慶應義塾大学・工学博士)
(五十音順) 梶原 宏之 (九州大学・工学博士)
杉江 俊治 (京都大学・工学博士)
藤田 政之 (東京工業大学・工学博士)

(2007年1月現在)

□□□□□□□□□ 刊行のことは □□□□□□□□□

わが国において、制御工学が学問として形を現してから、50年近くが経過した。その間、産業界でその有用性が証明されるとともに、学界においてはつねに新たな理論の開発がなされてきた。その意味で、すでに成熟期に入っていると同時に、まだ発展期でもある。

これまで、制御工学は、すべての製造業において、製品の精度の改善や高性能化、製造プロセスにおける生産性の向上などのために大きな貢献をしてきた。また、航空機、自動車、列車、船舶などの高速化と安全性の向上および省エネルギーのためにも不可欠であった。最近、高層ビルや巨大橋梁きょうりょうの建設にも大きな役割を果たしている。将来は、地球温暖化の防止や有害物質の排出規制などの環境問題の解決にも、制御工学はなくてはならないものになるであろう。今後、制御工学は工学のより多くの分野に、いっそう浸透していくと予想される。

このような時代背景から、制御工学はその専門の技術者だけでなく、専門を問わず多くの技術者が習得すべき学問・技術へと広がりつつある。制御工学、特にその中心をなすシステム制御理論は難解であるという声をよく耳にするが、制御工学が広まるためには、非専門のひとにとっても理解しやすく書かれた教科書が必要である。この考えに基づき企画されたのが、本「システム制御工学シリーズ」である。

本シリーズは、レベル0(第1巻)、レベル1(第2～7巻)、レベル2(第8巻以降)の三つのレベルで構成されている。読者対象としては、大学の場合、レベル0は1,2年生程度、レベル1は2,3年生程度、レベル2は制御工学を専門の一つとする学科では3年生から大学院生、制御工学を主要な専門としない学科では4年生から大学院生を想定している。レベル0は、特別な予備知識なしに、制御工学とはなにかが理解できることを意図している。レベル1は、少

し数学的予備知識を必要とし、システム制御理論の基礎の習熟を意図している。レベル2は少し高度な制御理論や各種の制御対象に応じた制御法を述べるもので、専門書的色彩も含んでいるが、平易な説明に努めている。

1990年代におけるコンピュータ環境の大きな変化、すなわちハードウェアの高速化とソフトウェアの使いやすさは、制御工学の世界にも大きな影響を与えた。だれもが容易に高度な理論を実際に用いることができるようになった。そして、数学の解析的な側面が強かったシステム制御理論が、最近では数値計算を強く意識するようになり、性格を変えつつある。本シリーズは、そのような傾向も反映するように、現在、第一線で活躍されており、今後も発展が期待される方々に執筆を依頼した。その方々の新しい感性で書かれた教科書が制御工学へのニーズに応え、制御工学のよりいっそうの社会的貢献に寄与できれば、幸いである。

1998年12月

編集委員長 池 田 雅 夫

□□□□□□□□□ ま え が き □□□□□□□□□

工作機械，ロボット，ハードディスクや光磁気ディスクなどの情報機器，およびステッパなどの半導体製造装置の位置決め制御においては，高性能化に対する要求から，高速，高精度，高信頼性の実現が求められている。そのためには，制御系の広帯域化が不可欠となるが，モデル化誤差や制御対象が持つ機械共振モードの影響などから必ずしも容易ではない。そのため，今まで設計時に考慮しなかった，もしくはそれが難しかったモデル化誤差や摂動要素を何とか設計時に考慮し，より不確実さに強い頑健な制御系を設計しようという考えが生まれた。これらがロバスト制御であり，90年代後半までに H_∞ 制御や μ 設計法などとして体系化された。それまでは，制御系設計において理論と実際には大きなギャップがあり，設計どおりの制御性能はなかなか得られないという共通の認識が制御系設計技術者の間にはあったが，ロバスト制御の出現でこうした「理論と実際のギャップ」はしだいに少なくなっている。これは，ロバスト制御がギャップの存在をいかにして埋めるかということに力が注がれたからにはほかならない。

当初，ロバスト制御は簡単な問題であっても解の計算が非常に難しかった。しかしながら，2リッカチアルゴリズム^{1)†}が導出されたことに加えて MATLAB などの制御系設計支援ツールも整い，今では誰もがすぐに設計に取りかかれるようになってきている。制御器の計算部分が制御系設計支援ツールの関数としてあらかじめ用意されているため，難しい理論書を読んで内容を完全に理解しなくても解が求められるからである。したがって，現場の制御技術者は， H_∞ 制御解の導出を理解することより，むしろ制御系設計者の立場から，与えられた制御問題をいかにして H_∞ 制御問題として定式化し，さらにそれらを MATLAB

† 肩付き数字は巻末の引用・参考文献の番号を表す。

などの制御系設計支援ツールを使ってどのように答えを求めるか、といった実践的な側面が重要になってきている。そのためには、極端な話、最初のうちは解の導出過程はブラックボックスであってもよいといえる。

そこで、本書では、 H_∞ 制御および μ 設計法について、これらの設計法をロバスト制御系設計のツールとしていかに使いこなすかという点に主眼を置いて平易に解説することを試みた。まず、第1章で、実際の制御系設計の流れの中で、ロバスト制御がなぜ必要になるかを説明する。そして、第2章で H_∞ 制御理論について説明する。まず、問題設定と定式化および H_∞ ノルムについて説明した後、通常よく用いられる標準 H_∞ 制御問題とそこで置かれるさまざまな「仮定」について、できるだけ詳しく説明する。 H_∞ 制御では制御器設計のための「一般化プラント」の構成が重要となるが、そのためには仮定の意味をきちんと理解しておく必要がある。一方、解法については、MATLAB を使えば解が求まるので、必要最低限の説明にとどめた。

第3章では、不確かさの表現について説明した後、それら不確かさに対して制御系がロバスト安定となるための条件をスモールゲイン定理を使って導出する。その結果を使って、第4章では、混合感度問題と呼ばれる典型的な H_∞ 制御問題とその問題点および解決方法について説明する。また、 H_∞ 制御が苦手とする時間応答の改善によく用いられる2自由度制御についても説明する。

第5章では、具体的な設計例としてハードディスクドライブ (HDD) のヘッド位置決め制御を取り上げ、HDD ベンチマーク問題^{2),3)} で定義された制御対象に対し、一般化プラントの構成および重みの選択から制御器の実装までを、MATLAB のプログラムを示しながら説明を加える。さらに、オーバーシュートを抑えた設計や、ゲイン余裕や位相余裕の条件を満たす設計、そして、制御器の離散化など、より実践的な内容についても触れる。

最後の章である第6章では、 μ 設計法⁴⁾ について説明する。 μ 設計法では、 H_∞ 制御では取り扱うことの難しい構造的摂動やロバスト性能問題を扱うことができる。特に、MATLAB の Robust Control Toolbox (以下、RCT) を使うと、 H_∞ 制御とほぼ同じ感覚で μ 設計が行えることから、RCT の使用前

提とし、MATLAB のプログラムを示しながら設計手順をできるだけ詳しく説明する。さらに、RCT ではバージョン R2009a から実数の摂動がある場合の μ 設計（混合 μ 設計）が行えるようになったことから、このパワフルな機能を活用できるよう、混合 μ 設計の設計例も紹介する。

本書を理解するためには、線形システムの基礎に関する知識が必要となることから、特に本書と関連の深い内容について付録 A にまとめた。また、第 6 章で用いる線形分数変換については付録 B にまとめた。必要に応じて参照されたい。演習問題については、単なる内容の確認だけでなく、本文で書ききれなかった内容を演習問題の形にしたものも含まれることから、すべての問題に取り組まれることをお勧めする。

本書を片手に、ぜひ、ロバスト制御系の設計に挑戦していただきたい。

最後に、本書を執筆する機会を与えてくださった『システム制御工学シリーズ』の編集委員会委員各位に深く感謝する。特に、東京工業大学 藤田政之 先生には、ドラフト原稿をていねいに読んでいただき、不適切な表現や誤りなどを数多くご指摘いただいた。また、この場を借りて、筆者をロバスト制御の分野に導いてくださった故・美多 勉 先生に心より感謝する。そして、原稿の完成を長きにわたって辛抱強く待っていただいたコロナ社に厚く感謝する。

2017 年 2 月

平田光男

□□□□□ 本書で使用するソフトウェアについて □□□□□

本書では、MATLAB の使用を前提としている。MATLAB 本体のほか、Control System Toolbox (CST) と Robust Control Toolbox (RCT) も必要となるので注意してほしい。本書執筆時の実行環境および MATLAB のバージョンを表に示す。表よりも新しいバージョンであれば基本的に動作すると思われるが、MATLAB 実行エンジンの改良などによって、計算結果が若干異なる場合がある。

表 実行環境と MATLAB のバージョン

オペレーティングシステム	Windows 7 Professional 64 bit
MATLAB	Ver.8.2 (R2013b)
Control System Toolbox	Ver.9.6 (R2013b)
Robust Control Toolbox	Ver.5.0 (R2013b)

本書で示したプログラムは、下記の URL からダウンロードできる。プログラムの実行方法などについては、ダウンロードファイルに添付されているドキュメントを参考にされたい。

<http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339033113/>

1. ロバスト制御のシナリオ

1.1	ロバスト制御とは	1
1.2	フィードバック制御系	3
1.3	モデル化誤差とロバスト性	8
1.4	摂動の種類とロバスト制御の代表的な方法	14
1.4.1	構造的摂動と非構造的摂動	14
1.4.2	H_∞ 制御と μ 設計法	16
1.5	ロバスト制御系設計のためのソフトウェア	17
	演習問題	20

2. H_∞ 制御理論

2.1	問題設定および定式化	21
2.2	一般化プラント	24
2.3	標準 H_∞ 制御問題	28
2.4	H_∞ 制御問題の解法	33
2.5	MATLAB による H_∞ 制御器設計	37
	演習問題	38

3. 不確かさの表現とロバスト安定化

3.1	乗法的摂動と加法的摂動	40
-----	-------------------	----

3.1.1	乗法的摂動	40
3.1.2	加法的摂動	43
3.1.3	乗法的摂動と加法的摂動の見積もり	44
3.2	ロバスト安定化問題	46
3.2.1	スモールゲイン定理	46
3.2.2	乗法的摂動に対するロバスト安定化	47
3.2.3	加法的摂動に対するロバスト安定化	48
3.2.4	ロバスト安定化条件の意味	49
	演習問題	50

4. H_∞ 制御系設計

4.1	混合感度問題	52
4.2	2自由度振動系に対する設計例	56
4.2.1	摂動を持つ制御対象の定義	56
4.2.2	乗法的摂動の見積もりと重み関数	60
4.2.3	感度関数に対する重みと H_∞ 制御器の計算	62
4.2.4	閉ループ特性の評価	65
4.3	修正混合感度問題	69
4.3.1	混合感度問題の問題点と解決方法	69
4.3.2	一般化プラントの構成	72
4.4	2自由度制御による目標値応答の改善	78
	演習問題	85

5. ハードディスクドライブの H_∞ 制御

5.1	制御対象	87
5.2	修正混合感度問題による設計	92
5.2.1	設計 I	92

5.2.2	設計 II (W_{PS} の変更)	100
5.2.3	設計 III (W_T の変更)	104
5.3	安定余裕を考慮した設計	108
5.3.1	はじめに	108
5.3.2	安定余裕と円条件	109
5.3.3	設計 IV (設計例)	112
5.4	制御器の実装	118
5.4.1	最適解と準最適解	118
5.4.2	制御器の離散化	120
5.4.3	制御器実装と演算量の低減	123
	演習問題	129

6. μ 設 計 法

6.1	構造化特異値 μ	131
6.2	パラメータ摂動の LFT 表現	134
6.3	構造的摂動に対するロバスト安定化	143
6.4	ロバスト性能と μ	144
6.5	$D-K$ イタレーションによる μ 設計	147
6.6	設 計 例	149
6.6.1	はじめに	149
6.6.2	3 慣性系ベンチマーク問題	149
6.6.3	問 題 設 定	152
6.6.4	設計 I (非構造的摂動+ロバスト性能)	153
6.6.5	設計 II (構造的摂動+ロバスト性能)	166
6.6.6	設計 III (実数の構造的摂動+ロバスト性能)	171

付録 A. 線形システムの基礎

A.1	システムの表現	176
A.1.1	線形時不変システム	176
A.1.2	伝達関数	176
A.1.3	状態空間実現	180
A.1.4	伝達関数と状態空間実現の関係	182
A.2	システムの解析	184
A.2.1	安定性	184
A.2.2	可制御性	186
A.2.3	可観測性	188
A.2.4	多入出力システムの零点	190
A.3	基本的なフィードバック制御系	191
A.3.1	フィードバック制御系の適切さ	191
A.3.2	内部安定性	192

付録 B. 線形分数変換

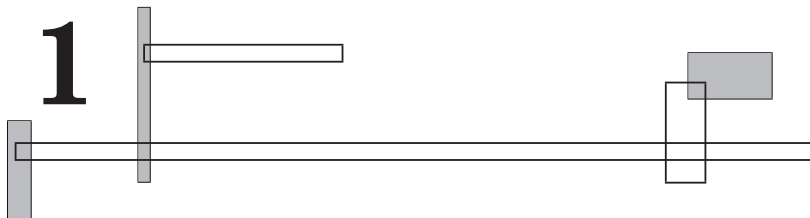
B.1	準備	194
B.2	上側線形分数変換 (upper LFT)	195
B.3	下側線形分数変換 (lower LFT)	195
B.4	LFT の表現自由度	196

引用・参考文献	200
---------	-----

演習問題の解答	202
---------	-----

あとがき	212
------	-----

索引	214
----	-----



ロバスト制御のシナリオ

本章では、ロバスト制御の概要と、それがなぜ必要になるのかについて、簡単な例を通して説明する。そして、ロバスト制御としてよく知られる H_∞ 制御と μ 設計法について、それらの特徴をまとめる。

1.1 ロバスト制御とは

例えば、エレベータの制御系を考えよう。エレベータは、誰も乗っていない場合もあれば、満員の場合もある。しかし、積載重量によらず、各階にスムーズに停止しなければならないし、積載重量によって、エレベータの挙動が大きく変わるようなことがあってはならない。飛行機の自動操縦系も事情は同じで、乗客の人数や荷物の積載量によって飛行性能が大きく変わるようでは安心して乗れない。

したがって、制御系は、制御対象の不確かさや変動の影響を受けにくいように設計しなければならない。言い方を変えれば、制御対象の不確かさや変動に強い、つまり、頑健（ロバスト）な制御系が求められており、これを実現する制御をロバスト制御（robust control）という。

制御対象の不確かさや変動にはさまざまなものがある。以下に、いくつか例をあげる。

2 1. ロバスト制御のシナリオ

- **経時変化, 経年変化** 長い年月を経て制御対象の物理的特性が変化する。例えば, 機構系の粘性摩擦係数の変化など。また, 電源を入れた直後と十分ウォームアップされた状態では特性が異なることが多い。
- **使用環境の変化** 抵抗値は温度によって大きく変わる。例えば, モータの出力トルクを高めるために大電流を流すと, 発熱して巻き線の抵抗値は大きくなる。また, メカニカルシステムにおいて, 粘性摩擦は温度によって大きく変わる。冒頭で述べた, エレベータや飛行機などの積載重量の変動などもこれに該当する。
- **製造ばらつき** 製品を 100 台作れば, それらの特性は微妙に異なる。高性能な部品や高価な材料を使えば製造ばらつきを抑えられるかも知れないが, コストダウンのために実現できないことのほうが多い。

ロバスト制御では, このような制御対象が持つさまざまな不確かさや変動を摂動 (perturbation) と呼ぶ。

ところで, 多くの制御理論は, 制御対象の数式モデルを使って制御系設計を行う。その流れを図 1.1 に示す。まず, 制御対象を数式で表現する。これをモデリング (modeling) と呼ぶが, その際, 現実のシステムを一切の誤差なく数式表現することは不可能なので, さまざまな仮定が置かれる。例えば, 剛体を質点と見なす, 動作角は十分小さいと見なす, 線形近似を行う, など。つまり, モデリングではモデル化誤差 (modeling error) がつねに付きまとう。したがっ

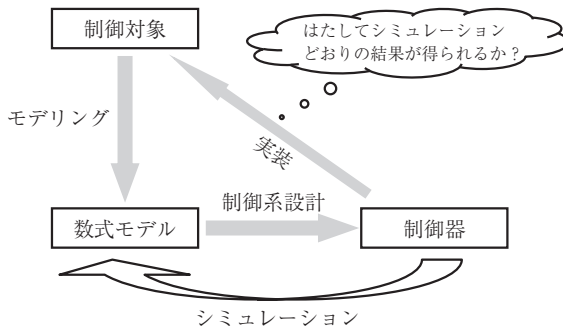


図 1.1 制御系設計の流れ

て、数式モデルを使ったシミュレーションによって満足のいく性能が得られたからといって、現実のシステムに対してもそうであるとは限らない。

しかし、「設計」である以上、現実の制御対象に対して想定どおりの制御性能が得られなければ、その意味をなさない[†]。したがって、モデル化誤差に対してロバストであることは、制御系設計にとってとても重要なこととなる。この、モデル化誤差も摂動の一つである。

1.2 フィードバック制御系

摂動が制御系にどのような影響を与えるかを見る前に、**図 1.2** に示す最も基本的な直結フィードバック制御系について、フィードバック制御の目的と望ましいフィードバック特性、そして、それを達成するための制御器の設計法についてまとめておく。

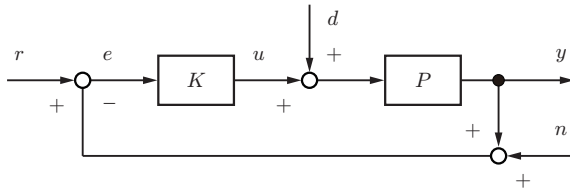


図 1.2 直結フィードバック制御系

図 1.2 において、 P 、 K は制御対象およびフィードバック制御器の伝達関数を表し、 r は目標値、 u は制御入力、 y は出力を表す。また、 d は外乱、 n は観測ノイズを表す。そして、直結フィードバック制御系は内部安定と仮定し、さらに簡単のため、制御対象は 1 入出力系と仮定する。

フィードバック制御の目的は、さまざまな目標値 r に対して、出力 y が偏差なく追従することである。その際、外乱 d や観測ノイズ n の影響を受けないようにしたい。また、 P が摂動を持って、それらの要求が満たされるようにし

[†] 例えば、家を建てる際に、設計図どおりの家ができないのが当たり前としたら、どうなるであろう。

たい。 P の摂動に対するロバスト性については1.3節に譲ることとし、ここでは、目標値への追従、外乱の抑圧およびノイズの影響を抑えるために、フィードバック制御系の各伝達関数がどのような特性を持つべきかについてまとめておく。

目標値 r から出力 y までの伝達特性は

$$y = \frac{PK}{1 + PK} r$$

と表せるので、出力 y があらゆる目標値 r に完全に追従するためには

$$T = \frac{PK}{1 + PK} = 1 \quad (1.1)$$

が成り立つ必要がある。ここで、 T は相補感度関数 (complementary sensitivity function) と呼ばれる。

一方、目標値 r から偏差 $e = y - r$ までの伝達特性は

$$e = \frac{1}{1 + PK} r \quad (1.2)$$

となり、 $S = 1/(1 + PK)$ は感度関数 (sensitivity function) と呼ばれる。 S と T の間には、 P 、 K によらず、つぎの恒等式

$$S + T = \frac{1}{1 + PK} + \frac{PK}{1 + PK} = \frac{1 + PK}{1 + PK} = 1$$

が成り立つ。したがって、 $T = 1$ ならば $S = 0$ となることから、式 (1.2) よりあらゆる目標値 r に対して偏差 e はつねに 0 になることがわかる。

なお、感度関数の由来は、 S が P の変化に対する目標値追従特性 (= T) の変化の感度を表していることによる。つまり

$$\begin{aligned} S &= \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta T/T}{\Delta P/P} = \frac{dT}{dT} \frac{P}{T} \\ &= \frac{K(1 + PK) - PK^2}{(1 + PK)^2} \frac{P}{PK/(1 + PK)} = \frac{1}{1 + PK} \end{aligned}$$

となるところから来ている。

さて、現実にはどのような目標値 r に対しても偏差がつねに 0 になるような

制御系を構成することは難しい。例えば、制御対象がメカニカルシステムの場合、それを駆動するアクチュエータが応答できる周波数には上限があり、どこまでも高い周波数に追従することは物理的に無理である。例えば、スピーカやヘッドフォンが再生できる周波数の上限が 50 kHz や 100 kHz となっていることと同じであり、これ以上高い周波数の信号を入れても、振動子は十分な振幅で振動できない。したがって、通常は、ある限られた周波数の範囲内で式 (1.1) が成り立つように制御器を設計する。つまり

$$T(j\omega) \cong 1, \quad \omega \in [0, \omega_b] \quad (1.3)$$

となる。ここで、 ω_b はバンド幅 (bandwidth) あるいは制御帯域 (control bandwidth) と呼ばれる。 ω_b が高いほど、より高い周波数成分を持つ目標値に追従できるため、制御性能が高くなる。同時に $S + T = 1$ の関係から

$$|S(j\omega)| \ll 1, \quad \omega \in [0, \omega_b] \quad (1.4)$$

が成り立つことにも注意する。

外乱 d について考えると、その影響が出力 y にできるだけ現れないようにするためには、外乱 d から出力 y までの伝達特性

$$y = \frac{P}{1 + PK} d = P \frac{1}{1 + PK} d = PSd$$

において PS のゲインをできるだけ小さくする必要がある。制御対象 P の特性は変えられないので、やはり、感度関数 S のゲインを小さくする必要がある。通常、外乱の周波数成分は低周波域に集中するので、式 (1.4) が成り立てば、外乱抑圧も期待できる。

一方、観測ノイズ n から出力 y までの伝達特性は

$$y = \frac{-PK}{1 + PK} n = -Tn$$

となることから、制御帯域とノイズの周波数成分が重なると、式 (1.3) から、ノイズの影響が出力にそのまま現れることになる。したがって、ノイズの観点からは制御帯域 ω_b はむやみに高くできない。例えば、ノイズの周波数成分の下限

□□□□□□□□□ あ と が き □□□□□□□□□

読者が本書を片手に MATLAB を使いながら、実際にロバスト制御系が設計できるようになるために、筆者がこれまで関わった実制御対象への適用経験をもとに、なるべく具体的に解説した。したがって、内容に若干の偏りがあることは否めない。制御対象についても、筆者がこれまで研究対象としていたハードディスクドライブや多慣性システムになっているのもそのせいである。しかし、本書で紹介した設計法をマスターすれば、よりアドバンストな設計法への展開や、別の制御対象に対しても応用が利くであろう。

本書で紹介できなかった内容の中で、実システムへの有用性が認識されている設計法として、ゲインスケジュールド H_{∞} 制御（以下、GS 制御）がある。この方法は、制御対象の摂動が直接的あるいは間接的に観測できるときのロバスト制御であり、摂動の情報を使ってリアルタイムに制御器をスケジューリングする点が特徴となっている。固定制御器では、摂動が大きいと制御性能の向上が難しくなるが、GS 制御では摂動の情報をうまく使うことで、大きな摂動に対しても制御性能の向上が見込める。

筆者も、文献15)において、自動車のオートマチックトランスミッションのクラッチ制御系に対して GS 制御を適用した。制御対象の摂動が車速と相関が高いという点に着目し、車速で制御器をスケジューリングすることで、広い範囲の摂動に対してつねに良好な性能を達成する制御器を求めることができた。一方、文献29)には、アクチュエータに飽和を持つシステムやセミアクティブサスペンションシステムなどの非線形システムを、摂動を持つ線形システムとしてモデル化し、GS 制御を適用する例が紹介されている。文献30)では、同じ考えを、ディーゼルエンジンの吸排気系の制御に適用し、効果を上げている。RCT には、GS 制御のための関数も備わっていることから、ぜひ試してみたいだ

きたい。

本書では、制御対象を1入出力システムに限定し、多入出力システムの場合の設計については、触れることができなかった。多入出力システムでは、ゲイン線図のかわりに特異値プロットを使うことになる。基本的な考え方は、1入出力システムの場合と大きく変わらないが、重み関数も多入出力システムとなり、調整パラメータが増える分、設計は難しくなる。1入出力システムに対する設計を通して基本的な考え方をマスターしてから、多入出力システムの設計に挑戦するのがよいだろう。

RCTは、最新の研究成果をベースに、制御器の構造を固定した H_∞ 制御問題(hinfstruct)や、複数の目的関数や制約条件、例えば、 H_2 ノルム指標、安定余裕度、閉ループ極の領域制約や外乱抑圧性能などを同時に考慮した、制御器の自動チューニング問題(systune)なども取り扱えるようになるなど、つねに進化し続けている。このような新しい設計法を理解するうえでも、本書が役に立つことを期待したい。

最後になるが、ロバスト制御を使っても、制御対象の摂動が大きければ大きいほど得られる制御性能は低くなる。摂動の小さな制御対象を構築するという努力を怠ってはならないのはいうまでもない。

【あ】	
安定	184
安定化解	34
安定行列	186
安定極	185
安定固有値	186
【い】	
一般化プラント	21
インプロバ	177
【う】	
上側線形分数変換	195
【お】	
重み関数	25
【か】	
可安定	188
外部入力	21
可観測	188
可観測性行列	188
可観測モード	189
可検出	189
重ね合わせの理	176
加算器	126
可制御	187
可制御性行列	187
可制御モード	187
加法的摂動	43
観測出力	22
感度関数	4

【き】	
規範モデル	80
共振ピーク	104
極	177
【け】	
係数乗算器	126
厳密にプロバ	177
【こ】	
交差周波数	7
構造化特異値 μ	131
構造的摂動	15
混合感度問題	54
混合 μ 設計	172
【さ】	
最悪外乱	23
最大特異値	22
サンプル値 H_∞ 制御理論	123
【し】	
次数差	177
システム	176
システム行列	190
下側線形分数変換	195
入出力安定	184
修正混合感度問題	71
出力	181
出力端混合感度問題	55
出力方程式	180
準相補感度関数	48

状態	180
状態空間実現	180
状態ベクトル	181
状態変数	180
状態方程式	180
乗法的摂動	40, 92
【す】	
スター積	197
スピルオーバー	12
スモールゲイン定理	46
【せ】	
制御帯域	5
制御入力	22
制御量	22
正規ランク	190
摂動	2
ゼロクロス周波数	7
零点	177
漸近安定	185
線形システム	176
線形時不変システム	176
線形分数変換	194
【そ】	
双 1 次変換	120
相似変換	182
相補感度関数	4
【た】	
台形積分法	120
代数型リッカチ方程式	34
多入出力システム	179

単位遅延要素 126 【ち】 中心解 36 重複スカラブロック 131 直接型 I 125 直接型 II 126 直結フィードバック制御系 191 【て】 デジタルフィルタ 124 ディスクリプタシステム 142 適切 192 適切さ 192 伝達関数 177 伝達行列 179 伝達零点 190 【と】 ドイルの記号法 183 動的システム 176 動的摂動 42 特性多項式 177 特性方程式 177 【な】 内部安定 193	【に】 入力 181 入力端混合感度問題 55 入力端に加わる外乱 92 【の】 ノミナル性能 16 【は】 バイプロバ 177 ハミルトニアン行列 34 バンド幅 5 【ひ】 非構造的摂動 15 標準 H_∞ 制御問題 28 標準形 127 【ふ】 不安定極 185 不安定固有値 186 不可観測 188 不可観測モード 189 不可制御 187 不可制御モード 187 不変零点 190 プリワーブ 122 フルブロック 131	ブロッキング零点 190 プロバ 177 【む】 無限遠点零点 178 無限次元システム 177 【も】 モデリング 2 モデル化誤差 2 モデル集合 42 モデルマッチング 2 自由度制御系 79 【ゆ】 有限次元システム 177 有理関数 177 【り】 リップル 123 【る】 ループ整形法 6 【ろ】 ロバスト安定化問題 16, 46 ロバスト制御 1 ロバスト性能問題 16
--	--	---



【英字】 $D-K$ イタレーション 148 H_∞ 制御 16, 22 H_∞ ノルム 22	【ギリシャ文字】 γ イタレーション 24 μ 解析 147 μ 設計 147 μ 設計法 17	【数字】 1 自由度制御系 79 1 入出力システム 176 2 自由度制御系 79 2 ポートシステム 195
---	--	---

— 著者略歴 —

1991年 千葉大学工学部電気工学科卒業
1993年 千葉大学大学院工学研究科修士課程修了(電気工学専攻)
1996年 千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了(生産科学専攻)
博士(工学)
1996年 千葉大学助手
2004年 宇都宮大学助教授
2007年 宇都宮大学准教授
2013年 宇都宮大学教授
現在に至る

実践ロバスト制御

Practical Robust Control

© Mitsuo Hirata 2017

2017年4月17日 初版第1刷発行

検印省略

著者 　　ひら　　た　　みつ　　お
　　　　平　　田　　光　　男
発行者 株式会社　　コロナ社
　　　　　　代表者　　牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社　　コ　　ロ　　ナ　　社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03311-3 (新井) (製本:愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします