

## ま え が き

フィードバック制御に関する良書は多数出版されているが、その応用例はPID制御によるプロセス制御に関するものが大半で、周波数領域の設計法である位相進み・遅れ補償を用いた機械系の制御に関する具体的な応用例を扱ったものはあまり多くない。本書は、おなじみの光サーボ機構によるコンパクトディスク（CD）、磁気浮上によるリニアガイド、変位振動計などに対するフィードバック制御の著者らが手掛けた応用例を紹介しながら、フィードバック制御の基礎知識の重要性を理解してもらうことを意図して書かれた。

本書に先立つ1979年、著者（背戸一登）は恩師・故富成襄先生、畏友・岡田養二先生との共著「サーボ設計論」（コロナ社）を世に問うた。当時はプロセス制御が全盛の時代で、同書でおもに扱っているサーボモータによる機械系の制御はメジャーではなかった。関連学会で著者が研究発表したときはその他のセッションに回された記憶がある。この書物は東京都立大学（当時）機械工学科の富成襄教授のもとでまとめた研究論文が基礎になっている。富成研究室の特徴は自前の実験装置を用いて研究することであった。したがって、サーボ系のフィードバック制御に不可欠な直流増幅器も自前であった。1968年当時は真空管が現役の時代であったので、それを用いた直流増幅器の増幅率は頑張っても $10^3$ 倍程度であった。それをトランジスタに置き換えて製作したときは大苦戦した記憶がある。ところが、月面に人を送り込むアポロ計画実現のために米国で開発され、その後に出回り始めた演算増幅器（operational amplifier, OPアンプ、オペアンプ）は増幅率が $10^6$ を超えて、しかも安価であった。この増幅率の意味については3章で触れている。演算増幅器を基本要素にすれば加減算器も積分器も微分器、そして位相進み・遅れ補償器も容易に実現できる。その後に誕生したデジタルICは、そのとき開発された技術が基になっていることを考えれば、画期的な出来事であった。そこで、本書は「サーボ設計論」を基礎にしながら、渡辺亨先生との共同作業により、その後のフィードバック制御に関する新しい応用事例を取り込んで、要点をコンパクトにまとめた書籍にした。

著者は、今日のメカトロニクスの誕生はこの演算増幅器の貢献が大であると

思っている。それまではトランジスタの活用は電子工学の専売分野であったが、安価な演算増幅器の普及によって機械技術者が容易に機械系に電気系を組み込めるようになったのである。メカトロニクスは機械工学の (mechanics) と電子工学の (electronics) を合成した mechatronics の和製英語であるが、今日では世界的に通用する工学用語となっている。

著者が防衛大学校に着任した 1971 年に最初に手掛けたのが、電気油圧サーボを用いた工作機械テーブルの高速位置決め制御であるが、この制御装置もすべて自前で、市販の演算増幅器がおおいに役立った。この概要については 9 章で述べられている。その後、多関節ロボットアーム、四足歩行ロボットへと発展していくのであるが、これらも制御ボードに演算増幅器が組み込まれている。今日、光サーボ機構は CD、DVD、Blu-ray などのデータ読み取り機構の心臓部になっているが、これらも超小型化に演算増幅器は欠かせない。長周期・大地震による建物の揺れを観測し、制御することは今日の課題である。それに用いる変位振動計の実現もフィードバック制御によって実現できそうである。

これらの応用例はすべて古典的なフィードバック制御に基づくものである。1980 年代から現代制御による振動制御に着手し、研究成果を「パソコンで解く振動の制御」(丸善)、「構造物の振動制御」(コロナ社)、「Active Control of Structures」(John Wiley & Sons) などの著書にまとめて公表したが、古典制御の良さはコンピュータがなくとも仕事ができることである。その良い例は 9 章の末尾にまとめた「磁気浮上リニアガイドによる無重力落下カプセルの制御」である。手元には FFT アナライザーしかない北海道上砂川にある炭坑跡の現場で落下カプセルの周波数応答特性を計測し、それを基に位相進み補償器を設計製作し、無事に落下目的を達成したことは無上の喜びであった。

最後に、絶対変位振動計開発にオイレス工業株式会社と日本大学理工学部機械工学科・渡辺研究室との共同研究が有益であった。関係諸氏に感謝する。機械系のフィードバック制御の面白さを伝授いただいた恩師・故 富成襄先生、富成先生を介して懇意にいただいた故 中田孝先生、故 高橋安人先生には本書を批評いただけないのが残念である。この書物の発刊に至るまで御支援・御協力いただいたコロナ社の皆様に感謝します。

2013 年 9 月

背戸 一登

# 目 次

## 1. 序 論

1.1	フィードバック制御とは	1
1.2	フィードバック制御の歴史	2
1.3	フィードバック制御の分類	5
1.4	PID 制御と位相進み・遅れ補償による制御	6
1.5	フィードバック制御の利点と課題	7
	章末問題	8

## 2. フィードバック制御系の構成例と要求される性能

2.1	電気・機械サーボ機構	9
2.2	電磁アクチュエータ	10
2.3	ロボットアームの角度制御機構	11
2.4	光サーボ機構	12
2.5	フィードバック制御に要求される性能	14
	章末問題	16

## 3. システムの記述

3.1	ラプラス変換	17
3.1.1	ラプラス変換の公式	18
3.1.2	部分分数展開	21
3.2	伝達関数表示	23
3.3	ブロック線図	26

3.4 直接解を得る方法, メイソンの公式	30
3.5 応用例	34
3.5.1 加減算器	34
3.5.2 DC モータのブロック線図表示	35
3.5.3 サーボモータによる角度制御表示	37
3.5.4 サーボモータによる位置制御表示	40
3.5.5 磁気軸受のブロック線図による表示	41
章末問題	44

## 4. 伝達関数とその応答

4.1 伝達関数の周波数応答	47
4.2 ボード線図	50
4.3 伝達関数のインパルス応答	54
4.4 伝達関数のステップ応答	57
4.5 定常誤差定数	63
4.6 定常誤差に見るプロセス系とサーボ系の相違	67
4.6.1 プロセス系と定常誤差	67
4.6.2 サーボ系と定常誤差	69
章末問題	70

## 5. 安定判別

5.1 フィードバック制御系の安定性	71
5.2 ラウス・フルビッツの安定判別法	73
5.3 ナイキストの安定判別法	76
5.4 ナイキストの簡易安定判別法	80
5.4.1 簡易安定判別法とは	80
5.4.2 ゲイン余裕と位相余裕	81
5.5 ボード線図による安定判別	82
5.6 応用例	85

章末問題	87
------	----

## 6. 根軌跡法

6.1 根軌跡法の概略	88
6.2 根軌跡の描き方	90
6.3 多項式の根を求める計算プログラムによる根軌跡の求め方	95
章末問題	99

## 7. 制御系の周波数応答と要求される設計仕様

7.1 開ループと閉ループの周波数特性, ニコルス線図	100
7.2 2次系の周波数応答	104
7.3 フィードバック制御系に要求される設計仕様, 性能評価法	106
7.4 特性設計における性能評価	107
7.5 $s$ 平面上の根配置による性能仕様	114
7.6 定常特性とループゲイン	116
7.7 特性設計の要点	117
7.8 特性設計における制御系補償法	118
7.8.1 PID 制御法	119
7.8.2 位相進み・遅れ補償による制御系設計法	120
7.8.3 PID 制御法と位相進み・遅れ補償による制御法の対応関係	121
7.8.4 位相進み・遅れ補償器とその周波数応答特性	122
7.9 評価関数	123
章末問題	124

## 8. フィードバック制御系の特性設計

8.1 特性設計の手順	125
8.2 ゲイン調整	126
8.3 直列補償によるシステム設計	130

8.3.1 直列補償要素	130
8.3.2 位相進み補償による設計	136
8.3.3 位相遅れ補償による設計	146
8.3.4 位相進み・遅れ補償による設計	156
章末問題	159

## 9. フィードバック制御の応用例

9.1 光サーボ機構の制御への応用	160
9.1.1 光サーボアクチュエータの構造	160
9.1.2 フォーカシングサーボとトラッキングサーボについて	161
9.1.3 フォーカシング誤差, トラッキング誤差の検出方法	162
9.1.4 周波数応答特性	163
9.2 長周期・大振幅振動測定用変位振動計の開発への応用	165
9.2.1 絶対変位振動計の構造	165
9.2.2 周波数伝達関数	166
9.2.3 各フィードバックゲインの効果	167
9.2.4 実測により得られた周波数応答特性と期待される効果	168
9.3 工作機械のテーブル位置決め装置	169
9.4 無重力落下カプセルの磁気浮上リニアガイドへの応用	170
9.4.1 無重力落下実験施設	170
9.4.2 磁気浮上リニアガイドの構造	172
9.4.3 磁気浮上リニアガイドのフィードバック制御	172
9.4.4 考 察	175
付 録	176
引用・参考文献	179
索 引	181

制御理論は、生み出された順に便宜上、古典制御、現代制御、ポスト現代制御に分類されている。本章では、まずフィードバック制御への導入として、それら3世代の制御理論の特徴を紹介するが、周波数領域で扱う古典制御が実用的であり、今日でも広く使われている。そのため、本書では古典制御に基盤を置いており、運動にかかわる物理量の制御の質の向上を対象とするサーボ機構に関するフィードバック制御をおもに扱うこととして、次章以降の概要を紹介する。

## 1.1 フィードバック制御とは

フィードバック制御とは、**出力信号**を検出して前へ戻し、**入力信号**との差から**誤差信号**を作り、その誤差をなくすように制御系を動作させることをいう。制御系の多くはフィードバック制御を使用している。そのおもな理由は、制御系に要求されるパワー増幅と高い精度という二つの相反する性質を実現させることにある。フィードバック制御を使うならば、前向きの制御要素ではそれほど精度は良くとも、パワー増幅を行って、フィードバック要素に高い検出精度を持ったものを使用し、全体として高精度でエネルギーレベルを増加する制御系を構成できる。

図 1.1 に、代表的なフィードバック制御系を**ブロック線図**で表した構成例を示す。希望する入力信号に対して、その制御対象から出力される信号を**フィードバック要素**に帰還させ、そこでフィードバック信号を作り、両信号の差を誤差信号として**制御器**に入力し、制御信号を作る。その制御信号は**駆動部**によっ

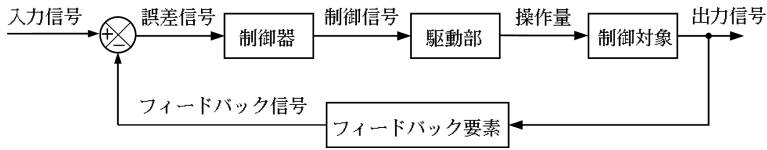


図 1.1 フィードバック制御系の基本構成

て操作量に変換され、**制御対象**が操作される。誤差信号から出力信号までに含まれる要素を**前向き要素**と呼び、出力信号から**フィードバック信号**までの帰還要素が**フィードバック要素**である。この循環ループがフィードバック制御の特徴である。このループがうまく機能すれば、誤差がなく速やかに希望通りの出力信号が得られる。制御器は**コントローラ**とも呼ばれ、希望する制御結果を得るための最重要設計要素である。駆動部は**アクチュエータ**とも呼ばれ、希望するパワーの発生源である。この制御器と駆動部を合わせたものを**制御要素**と呼ぶが、駆動部が制御対象に組み込まれる場合もある。フィードバック要素は、入力信号と出力信号が同一物理量として比較できるようにするための**信号変換器**である。

フィードバック制御系の最大の欠点は、フィードバックループによる不安定の問題である。フィードバックは必然的に閉ループを作り、このループ内の信号の流れによって系全体が激しい振動を起こしたり、制御系を不安定にすることがある。したがって、フィードバック制御系の最も大切なことは、要求される性能を満足させ、かつ安定に動作する制御系を作ることである。

## 1.2 フィードバック制御の歴史

18 世紀の中頃にジェームス・ワットが蒸気機関の速度調整のために考案した調速機により、希望する原動機の出力が得られるようになり、第 1 次産業革命の基礎が築かれたといわれている。自動制御の歴史は、この調速機に始まるともいわれている。今日でも**遠心調速機** (centrifugal governor) として改良されて発電所の原動機や、プロペラ式航空機、大型ディーゼルエンジンなどに使



われている。その原理を蒸気タービンの調速に例をとって図 1.2 に示す。

いま、蒸気タービンの回転速度  $\phi$  が目標値から増加した場合を考えよう。そのとき、タービン軸から歯車を介して調速機軸に伝達された回転速度  $\omega$  [rad/s] も増加するので、質量  $m_g$  の遠心振り子の遠心力

$m_g \omega^2 r \sin \alpha$  も増加して質量  $m$  のスライダを引き上げる。その結果、スライダとリンク機構で結ばれた調節弁が押し下げられ、供給する蒸気量が減じられるので蒸気タービンの速度の増加が抑えられるのである。このリンク機構が誤差の検出と増幅の役割を果たし、フィードバック制御が実現されている。ワットの遠心調速機は比例制御であり、負荷変化によりオフセット（目標値とのずれ）が生じる。その後、この欠点を除くため積分型の調速機が考案されたが、今度はハンティングと呼ばれる回転速度の周期的に大きく変動する不安定が問題になってきた。19 世紀には制御系に生じるオフセットと安定性の問題の解決が重要課題になった。この問題は 19 世紀末になって、ラウス（Routh）やフルビッツ（Hurwitz）によって高次系の安定問題に対する解答として示され、今日ではラウス・フルビッツの安定判別法として知られている。

20 世紀に入り、自動制御はプロセス工業や船舶のオートパイロットを中心に急速に発達した。その頃の理論的研究としては、ナイキスト（Nyquist）によるフィードバック制御系の安定性を周波数応答特性に基づいて判別する図式解法の考案、さらにボード（Bode）によってナイキストの方法を基礎にしてフィードバック制御系設計を体系化したことが特筆される。その後、ジエグラー（Ziegler）とニコルス（Nichols）によって PID 調節計のパラメータを調節する実用的方法が提案された。現在でも、PID 制御はプロセス制御の基幹的制

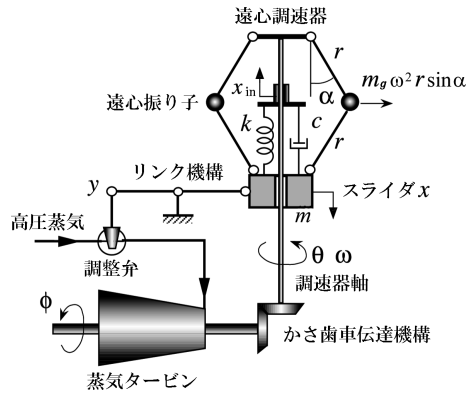


図 1.2 遠心調速機による蒸気タービンの調速

御技術の一つになっている。

ニコルスのもう一つの功績は、ニコルス線図の考案によって、開ループ系の特性を閉ループ系に置換する図的解法の考案である。1948年にエバンス (Evans) によって根軌跡法が発表され、フィードバック制御の古典的設計法がほぼ完成した。

古典的設計法の数学的基礎はラプラス変換である。一つの入力、一つの出力に着目してシステムを伝達関数で表し制御系を設計する。1960年代に入って新しい波が起こった。カルマン (Kalman) の提唱する状態空間法である。システムを微分方程式を基礎にする状態方程式で表し、ある評価関数を最小にする最適制御理論の誕生である。この理論では多入力・多出力が扱えるので、線形代数を基礎とする**現代制御理論**と呼ばれるようになった。しかし、この理論は、システムを厳密な微分方程式や状態方程式で記述された数学モデルがなければ実用できない。

その問題を緩和する手法として、制御対象に含まれるモデル誤差を考慮し得る制御理論の枠組み、いわゆるポスト現代制御の考え方が1980年にゼイムス (Zames) によって提案された。これを踏まえてドイル (Doyle) らにより整備された  $H^\infty$  制御理論は、ロバスト制御を可能とする制御理論として、1980年代後半に急速に一般化した。現在は古典制御と現代制御、その上にロバスト制御が代表するポスト現代制御が並立使用されている状況にある。**表 1.1**には古典制御の特徴をつかむために3世代の制御理論を比較してみた。

しかし、古典制御の良さは、厳密もしくは準厳密な制御対象の数学モデルがなくとも、計測や実験的に求めた伝達関数があれば制御系が設計できることである。そこで、本書では古典制御に重きを置き、フィードバック制御理論とそれによるシステム設計事例を述べることにする。古典制御理論は現在でも実用の中心にあるが、その活用事例は最終章で紹介する。

表 1.1 3 世代の制御理論の比較

	古典制御	現代制御	ポスト現代制御
設計領域	周波数領域	時間領域	周波数領域と時間領域
入出力の数	1 入力 1 出力	多入力多出力	多入力多出力
記述と表現法	伝達関数と周波数特性	状態方程式と時間応答	状態方程式と伝達関数
設計ツール	ナイキスト線図, ボード線図, ニコルス線図, 根軌跡図など	線形代数学, 極配置理論, 最適レギュレータ理論 (LQ 理論)	線形代数学とロバスト制御理論
補償方法	おもに直列補償法	状態フィードバック法	出力フィードバック法
設計仕様	特性設計 (定常誤差, 安定性, 速応性)	最適設計 (2 次形式評価関数)	ロバスト設計
設計上の特徴	制御対象のおおまかな周波数特性がわかれば設計が可能	厳密な制御対象の数学モデルが必要	制御対象の数学モデルが必要であるが, 不確定性を念頭に置いた設計可能

### 1.3 フィードバック制御の分類

フィードバック制御系は, 制御量の種類によってつぎのように大別される。

#### 〔1〕 実施面での分類

(a) **サーボ機構** サervo機構で対象とする制御量は, 物体の位置, 速度, 加速度, 角度, 角速度, 物体に作用する力, トルクなどの物理量である。サーボ機構の例では, ロボットの制御, 機構の制御, 工作機械の制御, 乗り物の運動制御, 構造物の振動制御, 各種情報機器の制御などが挙げられる。おもに, 運動にかかわる物理量の制御の質の向上が対象になる。

(b) **プロセス制御** プロセス制御では温度, 圧力, 流量, 液位, pH などの工業化学分野における製品の品質を左右する変数がおもな対象となる。質の良い製品を得ることが制御目的であるから, 温度変化や圧力変動などの外乱に対する制御が重視される。プロセス制御の例としては化学工業, 食品工業, 製鉄などがある。

#### 〔2〕 目標値による分類

(a) **定置制御** 目標値が一定の制御であり, 室温や液位制御のような,

おもにプロセス制御にかかわる制御。

(b) **追従制御 (追値制御)** 目標値が任意に変化する制御であり，工作機械のならない制御のような，おもにサーボ機構に関する制御。

(c) **プログラム制御** 目標値があらかじめ定められて変化をする制御。

このようにフィードバック制御系は大別されるが，本書では，おもに運動にかかわる物理量の制御の質の向上を対象とするサーボ機構に関するフィードバック制御を扱う。

#### 1.4 PID 制御と位相進み・遅れ補償による制御

プロセス制御では，古くから**PID 制御**が制御系設計法に用いられてきた。一方，サーボ機構の制御系設計法には**位相進み・遅れ補償による制御**がおもに用いられている。その類似性と相違について言及しておく。

まず PID 制御は，**比例制御**あるいは**P 動作** (P は proportional の略)，**積分制御**あるいは**I 動作** (I は integral の略)，**微分制御**あるいは**D 動作** (D は derivative の略) の基本的な三つの動作からなる制御である。比例制御だけでは構造的に**オフセット**と呼ばれる出力信号 (出力値) と入力信号 (目標値) との**残留偏差**と呼ばれる誤差が残ってしまうので，それをなくすために積分制御が加えられる。しかしそれだけでは，急速に変化する目標値に対して即応することができないので，素早い変化に応じられる微分動作が加えられる。PID 制御は，これら比例ゲイン，積分ゲイン，微分ゲインを組み合わせた 3 ゲインを適切に調整する制御方式である。この 3 ゲインの設定による調整法には，ジューグラーとニコルスによる限界感度法やステップ応答法がとられており，時間領域の設計法である。

一方，位相進み・遅れ補償法は周波数応答法を採用しており，周波数領域の設計法である。周波数帯域を低周波数帯と高周波数帯に分けて，低周波数帯では位相遅れ補償による積分ゲインの設計，高周波数帯では位相進み補償による微分ゲインの設計を行う方法をとっている。比例ゲインは定常誤差の設計に用

いられる。

このように、PID 制御はステップ応答を基本にして3ゲインを適宜配分する一種の調整法である。それに対して、位相進み・遅れ補償法では後述するボード線図や根軌跡、ニコルス線図などの周波数領域の設計ツールを駆使した制御系設計を行う。そのような理由で、本書では制御系設計に位相進み・遅れ補償法を採用している。PID 制御と位相進み・遅れ補償法の数学的な対応関係については7章で述べる。

## 1.5 フィードバック制御の利点と課題

フィードバック制御が使用されるおもな理由は、制御系に要求されるパワー増幅と高い精度という二つの相反する性質を実現させることにある。そのわかりやすい事例を工作機械の位置制御によって説明する。図 1.3 は工作機械のテーブル位置制御装置の構成例<sup>27)</sup>† を示す。サーボモータの回転運動を歯車対とボールねじ駆動機構を介して直線運動に変えてテーブルを移動させる。これらを**前向きの制御要素**と呼ぶが、これらの精度はそれほど良くなくともパワー増幅を行い、フィードバック要素に高い検出精度を持ったものを使用し、全体として高精度でエネルギーレベルを増加する制御系を構成できる。例えば、フィードバック要素のテーブル変位検出器に 0.1  $\mu\text{m}$  の検出精度を持つマグネスケールを使用すれば、その精度はその変位検出器の検出精度に依存し、高い精

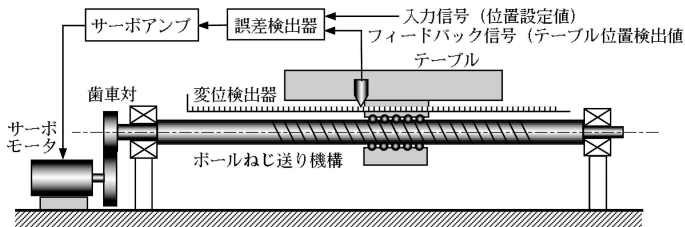


図 1.3 工作機械のテーブル位置制御装置の構成例

† 肩付数字は、巻末の引用・参考文献番号を表す。

度のテーブルの位置決め制御が可能になる。

サーボ機構には要求されるパワー増幅と高い精度という二つの相反する性質が求められるが、単一のものでエネルギーを増大してかつ精度の良いものはそう数多くあるものではない。フィードバック制御を使用すれば、前向きの制御要素はそれほど精度は良くなくとも、パワー増幅を行って、フィードバック要素に高い検出精度を持ったものを使用し、全体として高精度でエネルギーレベルを増加する制御系を構成できる。

しかし、前述したようにフィードバック制御系の最大の欠点は、フィードバックループによる不安定の問題である。たとえ不安定でなくとも、安定性が不足して応答が振動的になることがある。この問題解決のためにフィードバック制御系設計法があるといってもよい。

### [章末問題]

- 1.1 本書ではフィードバック制御に限定しているが、ほかの制御手法としてフィードフォワード制御がある。両者の違いと特質について調べなさい。
- 1.2 図 1.1 にならって、図 1.2 に示した遠心调速機をブロック線図で表現しなさい。
- 1.3 制御工学では表 1.1 に示した 3 世代の制御理論の比較から、古典制御が現時点でもおおいに活用されている根拠を見い出しなさい。
- 1.4 プロセス制御では PID 制御が一般的に用いられている。そこで用いられている PID 制御器の事例を示しなさい。また、プロセス制御がおもに化学プラントの制御に用いられてきた理由を考察しなさい。
- 1.5 サーボ機構はレーダの制御に始まり、ロボットの制御で発展しているように、機械系や電気系がおもな制御対象である。第 2 次世界大戦中に米国で開発されたレーダ装置が、大砲の照準精度に大きく寄与したといわれている。その仕組みについて調べなさい。

# 索引

<b>【あ】</b>	過減衰	61	時定数	60	
アクチュエータ	2	加算積分器	35	周波数応答	47
アナログ加算回路	34	カスケード接続	27	——の位相角	48
安定性	71, 117	加速度誤差定数	67	——の共振の最大値	15
安定判別法	73	過渡特性	107	——のゲイン	48
	<b>【い】</b>		周波数伝達関数	48	
位相遅れ補償	120, 130	逆ラプラス変換	18, 21	出力信号	1
位相遅れ補償領域	118	共振周波数	15, 105	状態フィードバック	119
位相遅れ要素	133	共振ピーク	105	初期値の定理	20
位相差周波数	81	極	89	信号変換器	2
位相進み・遅れ補償	120	近似インパルス	55	振動計	165
——による制御	6		<b>【く】</b>		
位相進み補償	120, 130	駆動部	1	<b>【す】</b>	
位相進み補償領域	118		<b>【け】</b>	スケール変換	127
位相進み要素	130	ゲイン交差周波数	81	ステップ応答	59
位相余裕	81	ゲイン余裕	81	ステップ関数	20, 57
1型の系	64	減衰率	53, 105		<b>【せ】</b>
位置決め装置	169	現代制御	5	制御器	1
位置誤差定数	65	現代制御理論	4	制御対象	2
1次遅れ要素	51		<b>【こ】</b>	制御要素	2
1次系	51	誤差信号	1	整定時間	15
1次進み要素	51	誤差伝達関数	64	積分制御	6
一巡伝達関数	77	古典制御	5	0型の系	64
インディシャル応答	58	根軌跡	89		<b>【そ】</b>
インパルス	54	コントローラ	2	速応性	117
インパルス応答	55		<b>【さ】</b>	速度誤差	66
インピーダンス	16	最終値の定理	20	速度誤差定数	66
	<b>【え】</b>	最適設計	106		<b>【た】</b>
演算子法	18	サーボ機構	5	畳込み積分	56
遠心調速機	2	サーボ系	69	立上り時間	15
	<b>【お】</b>	残留偏差	6		<b>【ち】</b>
オーバシュート	62		<b>【し】</b>	直列接続	27
オフセット	6, 65	時間移動の定理	19	直列補償	119, 125
オペアンプ	34	磁気軸受	41		<b>【つ】</b>
重み関数	56	磁気浮上	41	追従制御	6
	<b>【か】</b>	磁気浮上リニアガイド	172	月着陸船	140
開ループ伝達関数	100				

<b>【て】</b>	バンド幅	15, 105	—での安定判別法	83
定常誤差	15, 64, 116, 117		<b>【ま】</b>	
定常誤差定数	63	<b>【ひ】</b>	前向き制御要素	7
定常速度誤差	66	光サーボ機構	前向き要素	2
定常特性	107	微分制御		
定置制御	5	評価関数		
デシベル	50	比例制御		
電気・機械サーボ	9		<b>【む】</b>	
電気・機械サーボ機構	9	<b>【ふ】</b>	無減衰共振周波数	60
電磁アクチュエータ	10	フィードバック	無重力落下カプセル	170
伝達関数	24	フィードバック信号		
		フィードバック制御	<b>【め】</b>	
<b>【と】</b>		フィードバック補償	メイソンの公式	30
特性根	25	フィードバック要素		
特性設計	106, 117	フォーカシングサーボ	<b>【ゆ】</b>	
特性方程式	25	複素関数	行過ぎ時間	15
トラッキングサーボ	161	符号反転器	行過ぎ量	14
		部分分数展開		
<b>【な】</b>		ブラシレスサーボ	<b>【ら】</b>	
ナイキスト軌跡	78	フルビッツの安定判別法	ラウスの安定判別法	74
ナイキストの安定判別法	78	プログラム制御	ラウス・フルビッツの安定判別法	73
ナイキストの簡易安定判別法	80	プロセス制御	ラプラスの演算子	18
		ブロック線図	ラプラス変換	4, 17
		分岐点	ランプ関数	20, 58
<b>【に】</b>			<b>【り】</b>	
2型の系	64	<b>【へ】</b>	ループゲイン	126
ニコルス線図	101	閉ループ伝達関数		
2次遅れ要素	53	並列接続	<b>【る】</b>	
入力信号	1	ベクトル軌跡	ループゲイン	126
			<b>【れ】</b>	
<b>【は】</b>		<b>【ほ】</b>	零点	89
歯数比	38	補償		
パラボリック関数	58	補償回路	<b>【ろ】</b>	
半値時間	15	補償器	ロボットアーム	11
ハンテイング	3, 85	補償法		
ハンテイング現象	87	ポスト現代制御		
		ボード線図		
<b>【A】</b>		<b>【I】</b>	<b>【N】</b>	
A-D変換器	34	I動作	NC工作機械	169
<b>【C】</b>			<b>【P】</b>	
CDプレーヤ	12	<b>【M】</b>	PID制御	6, 119, 121
<b>【D】</b>		MATLAB	P動作	6
D動作	6	$M_p$ 規範		
		M軌跡		



— 著者略歴 —

背戸 一登 (せと かずと)

1962年 日本大学理工学部機械工学科卒業  
1962年 日本大学理工学部精密機械工学科助手  
1971年 東京都立大学大学院工学研究科  
博士課程修了 (機械工学専攻)  
工学博士  
1971年 防衛大学校講師  
1973年 防衛大学校助教授  
1986年 防衛大学校教授  
1993年 日本大学教授  
2006年 日本大学総合科学研究所教授  
2006年 有限会社背戸振動制御研究所代表取締役  
現在に至る  
2007年 日本大学退職

日本機械学会名誉員  
技術士 (機械部門), APEC エンジニア

渡辺 亨 (わたなべ とおる)

1989年 慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業  
1992年 慶應義塾大学院理工学研究科  
修士課程修了 (機械工学専攻)  
1994年 慶應義塾大学大学院理工学研究科  
後期博士課程修了 (機械工学専攻)  
博士 (工学)  
1994年 慶應義塾大学助手  
1998年 慶應義塾大学専任講師  
2000年 日本大学専任講師  
2007年 日本大学准教授  
2010年 日本大学教授  
現在に至る

フィードバック制御の基礎と応用

Fundamentals and Applications of Feedback Control

© Kazuto Seto, Toru Watanabe 2013

2013年10月21日 初版第1刷発行



検印省略

著者 背戸 一登  
渡辺 亨  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 新日本印刷株式会社

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 978-4-339-03207-9

(横尾)

(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