

# まえがき

日本の製造業は、自動組立機、計測器、数値制御工作機械などの自動化機器を利用した高い生産技術力によって支えられている。工具やテーブルを数マイクロメートル以下の精度で運動させるための精密位置決め・送り装置は、これらの機器の性能に大きな影響を与える。数値制御技術に代表されるメカトロニクス技術は、80年代から急速に発展し、位置決め・送り装置の性能向上を牽引してきた。いまでは、数マイクロメートルオーダの精度で物体の位置を制御することが汎用技術として実現できるようになっている。このような技術は、高度化する研究にも大きな影響を与えている。従来はアイデアにとどまっていた研究を実証できるインフラが整ってきたのである。

本書は、主に機械系の学生や若いエンジニアの方々が精密位置決め・送り系の設計を行うために習得しておくべき制御工学の知識をまとめたものである。

著者は加工制御の研究を行っている研究者、つまり制御理論のユーザである。世の中に制御理論の教科書はたくさんあるにもかかわらず、このような本を執筆しようと思った理由を説明しておく。

精密位置決め・送り技術が必要になったとき、装置を買ってくるか、自分でつくるかの二つの選択肢がある。たとえば、我々の研究室では機械加工の研究を行っているが、アイデアの実証程度が目的の場合は自分たちでつくり、実用化研究の場合は装置メーカーに作ってもらう。このとき、どのような設計を行えば、どの程度の性能が得られるかを予測するには、機械系と電機系をあわせた制御システム全体の特性を理解しておく必要がある。しかし、そういったことを勉強するための教科書があまり見あたらない。既存の制御理論の教科書を使うと、「自分にとって必要な知識を見つけるのに時間を費やしてしまう」という問題を筆者は感じてきた。特に若い方々は経験がないので、何を勉強してどう使ったらいいのかわからないという迷路に入り込む。

制御理論は、古典-現代-アドバンストと壮大な体系をもち、高度な数学を駆使するので、この迷路は結構複雑である。実際、目標レベルをステップアップすれば誰でも迷路に入り込むのであるが、すでに明らかになっていることに時間を使いすぎるのはもったいない。もちろん、体系をきちっと学ぶように指導するのが大学教員としての

## ii まえがき

本分であろう。しかし、目の前にある問題を解決するために藁をもつかむ状態では、そんな余裕はない。そこで、理論家の方々からご批判を頂くことは覚悟し、ユーザの立場で問題解決型学習のための自習書を書こうと思った次第である。

以上の理由から本書は次のような構成をとっている。

第1章では、精密位置決め・送り技術の基本知識を解説した。用語はできるだけ事例とあわせて説明した。

第2章と第3章では、制御の中核となる動的システムのモデル化と解析の基本的な知識をまとめた。必要な知識はできるだけ重要なものに絞り、いくつかは付録に回している。

第4章では、基本的な制御系（軸サーボ系）について述べた。本書ではカスケード型制御系のみを対象としている。カスケード型制御系には制約もあるが、その制約のおかげで理解がしやすい。また実際、応用範囲も広いので、その制約（型）を徹底的に利用した。

第5章では、指令値の生成方法について述べた。特に制御系の一部として、指令値生成法がどう機能するかを中心にまとめた。第4章とあわせると、簡単なシステムのシミュレーションができる。

第6章では、モータの回転原理と制御法について述べた。モータ技術者、制御技術者にとってはあたりまえだが、機械技術者にとっては理解しにくい知識をまとめている。

第7章では代表的な位置決め・送り機構であるボールねじ送り機構の力学モデルについてまとめている。機械設計に用いることができるように、個々の設計パラメータから力学モデルを導出する手順を示している。

ここまでの章で述べた内容を統合し、第8章では実際の1軸サーボ系の解析方法、第9章では2軸サーボ系により輪郭運動を行った場合の運動誤差の解析方法、第10章では摩擦により発生する運動誤差の解析方法について解説している。これらの章では、実際に装置を作るときに遭遇する典型的な問題を例題としている。

各章には、MATLAB/Simulinkを用いた例題と演習問題をできるだけ多く載せた。これらの例題に用いたプログラムは、森北出版のホームページ

<http://www.morikita.co.jp/soft/91981/>

からダウンロードできるので、自由にお使い頂いて結構である。ただし、次の点に注意されたい。MATLABのプログラムは、バージョン6.1で作成している。上位のバージョンでも実行可能であるが、上位バージョンはさらに便利になっているので、プログラムは簡単にできる可能性がある。また、プログラムは研究室の学生や著者自身が研究開発で作成したものをまとめたものであり、初学者にはやや高度な内容も含まれる。当然、ミスも含まれている。ミスによって発生する損失（著者の恥も含む）より、

学習の効率を優先して公開したという考えをご理解頂ければ幸いである。

あと、全体についても言い訳をさせて頂くと、執筆の動機と手段および著者の経験・知識量の限界から、厳密な点は他の教科書を参照して頂きたい。このために参考文献は豊富にあげた。

最後に、この本の執筆にご協力頂いた方々に感謝の意を伝えたい。まず、さまざまな研究開発を通じて本書を著すための基礎を与えて頂いたサーボ研究会（著者が主催する産学の勉強会）の方々、執筆のための資料をご提供頂いた会社・団体の方々、校正に協力してくれた学生の皆さんと秘書の石塚さん、辛抱強く執筆につきあって頂いた森北出版の石井氏、そして執筆を応援して頂いた皆様に、感謝を申し上げる。

2008年8月

松原 厚

# 目 次

<b>第 1 章 位置決め・送り系の基礎</b>	<b>1</b>
1.1 位置決め・送り・輪郭運動制御 .....	1
1.2 自由度・制御軸 .....	2
1.3 軸ユニットの構成 .....	5
1.4 制御系の構成 .....	10
1.5 位置決め分解能・位置決め精度 .....	11
1.6 運動精度 .....	14
1.7 位置決め・送り系の設計 .....	16
<b>第 2 章 動的なシステムのモデル化</b>	<b>20</b>
2.1 フィードフォワード制御系とフィードバック制御系 .....	20
2.2 ブロック線図 .....	22
2.3 動的なシステムのモデル .....	23
2.4 伝達関数 .....	26
2.5 ブロック線図の等価変換 .....	28
2.6 伝達関数の一般形と 1 次・2 次系 .....	30
2.7 状態空間モデル .....	34
2.8 伝達関数モデルと状態空間モデルの関係 .....	36
2.9 SLK モデルを用いた MATLAB 上でのモデリング .....	37
2.10 SISO 系と MIMO 系 .....	39
演習問題	41
<b>第 3 章 動的なシステムの解析法</b>	<b>42</b>
3.1 時間応答 .....	42
3.2 周波数応答 .....	50
3.3 2 次系の応答 .....	56

3.4	応答の評価指標 .....	59
3.5	根軌跡を用いたフィードバック制御系の解析 .....	62
3.6	周波数応答法を用いたフィードバック制御系の解析 .....	64
3.7	時間遅れの影響 .....	67
	演習問題	70
<b>第4章 軸サーボ系の基本構成</b>		<b>71</b>
4.1	カスケード型制御系の基本構成 .....	71
4.2	速度比例制御 .....	74
4.3	速度 PI 制御系と I-P 制御系 .....	78
4.4	位置制御系 .....	84
4.5	フィードフォワード制御 .....	89
	演習問題	90
<b>第5章 指令値の生成</b>		<b>92</b>
5.1	指令値生成部の機能と構成 .....	92
5.2	補間処理 .....	93
5.3	加減速回路 .....	97
5.4	加減速回路のフィルタ表現 .....	102
5.5	補間前加減速 .....	103
	演習問題	107
<b>第6章 モータ制御系</b>		<b>108</b>
6.1	DC モータから AC モータへ .....	108
6.2	同期 AC モータのモデル .....	113
6.3	電流制御系と簡略化モデル .....	119
	演習問題	122
<b>第7章 ボールねじ駆動機構と力学モデル</b>		<b>123</b>
7.1	ボールねじ駆動機構 .....	123
7.2	ボールねじ駆動機構の設計 .....	125
7.3	力学モデル .....	131
7.4	ブロック線図と周波数応答 .....	134
7.5	機械パラメータの振動特性への影響 .....	137
	演習問題	141

<b>第8章 1軸サーボ系</b>	<b>143</b>
8.1 1軸サーボ系の構成	143
8.2 1慣性系の速度制御	145
8.3 共振と速度制御系の安定性	150
8.4 FIR フィルタによる制振制御	151
8.5 制御系の振動特性	154
8.6 振動の抑制	159
演習問題	162
<b>第9章 輪郭運動誤差の解析</b>	<b>163</b>
9.1 輪郭運動誤差とは	163
9.2 軸サーボモデル	166
9.3 直線補間指令に対する輪郭運動誤差	168
9.4 機械特性差と輪郭運動誤差	172
9.5 円弧補間指令に対する輪郭運動誤差	173
9.6 コーナを含む直線補間指令に対する輪郭運動誤差	181
9.7 まとめ	184
演習問題	184
<b>第10章 摩擦に起因する輪郭運動誤差</b>	<b>185</b>
10.1 摩擦のモデル	185
10.2 スティックモーションとロストモーション	188
10.3 摩擦に起因する運動誤差の抑制	191
10.4 スティックモーションの解析	193
演習問題	198
<b>付録A 制御理論</b>	<b>199</b>
ラプラス変換/ ラプラス変換の性質/ ブロック線図の等価変換/ 時間応答の計算/ 根軌跡の性質/ 安定判別/ 定常特性と制御系の型	
<b>付録B 座標変換</b>	<b>212</b>
<b>付録C 単位</b>	<b>214</b>
<b>演習問題の解答</b>	<b>215</b>
<b>参考文献</b>	<b>225</b>
<b>索引</b>	<b>230</b>