

ま え が き

電気工学科あるいは機械工学科の習得科目の一つに制御工学がある。筆者らは数年にわたって、この科目を担当してきた。中間・期末試験で優秀な成績をおさめた学生、あるいはそうでない者も研究室に配属され、そして研究テーマと向き合うことになる。このとき、習得したはずの制御工学の基本的知識を活用できない学生が多く、失望感を味わうことは常であった。実務における知識活用能力と、座学で優秀であることの間に、相関がほとんどない。むしろ、座学の成績が悪くとも、自然現象を面白がる学生の方が研究テーマを自分のものとする。知識そのものの習得と、この活用は異なる。だからこそ、工学部では研究室配属が行われ、ここでの実務経験を通して知識の血肉化を図る。このことは了解している。しかし、講義に力を入れている教員としては、習得した技術用語を使って実験結果を表現して欲しい。現象を理解するために制御の解析・設計技術を自然に使うと望むのである。

このような状況を改善するために、筆者らは最初に意見交換を行った。この結果、制御工学のテキストを開いたとき、道具立てとしての数式の記載が多すぎる。これを理解できない場合、制御はかけられないと思ってしまう。さらに、世の中で稼動している実システムとの関連が薄いので、親しみがわからない。このような理由が、制御工学に対する学生の取っ付きの悪さを招いているのではないかと、という共通の確信を得た。そうであるならば、伝統的なテキストの構成を意欲的に変更したいと考えた。冒頭に、制御技術が生かされている実システムを紹介して、まず、制御が面白い技術であることを理解してもらおう。つまり、全体像の理解を最初に行い、順次に数学的背景を説明していくという記載の構成をとった。このような著者らの意図が、初めて制御工学を学ぶ学生はもとより、若いエンジニアに有益な成果をもたらすものと信じている。

最後に、出版にあたり多大なるご尽力を頂いたコロナ社の皆様に感謝します。

2011年11月

著者一同

本書の特徴

- (1) いままでのテキストでは、1章を「まえがき」にあてたとき、続く2章では「数学的基礎」を配置する。しかし、本書では、2章で「フィードバック制御の実例」を載せている。数学の背景をもたずとも制御をかけられる事例から、順次に数学的背景を踏まえた設計例を配置している。制御は面白い、簡単に制御をかけられそう、と感じてもらい、次に、より精密な制御をかけるとき、制御工学の数学的基礎が必要であることを学ぶためである。
- (2) 従来のテキストでは、基礎的内容の解説を積み上げる結果、制御工学の応用法を記載する章が末尾の所にやっと出てくる。応用の章が最も大事にもかかわらず、講義の時間数にも依存するが、この章が割愛あるいは講義未到達になることが多い。そこで、多少の理解不良には目をつぶって、テキスト先頭で、制御工学の全体像を概観することを狙った。
- (3) 一般理論を理解するために、数値例題を使って解説を行うことが多い。しかし、親近感がわかないため、理解を妨げることがある。そこで、可能な限り、世の中で稼働している実システムを使った例題を使って解説を行っている。
- (4) 図番、式番の表記は「章・節・連番」とした。図番および式番は、引用して参照させるためにつけるが、節の範囲内での引用がほとんどである。そのため、図面の場合、図 2.1.1、図 2.2.2、…のように、式の場合は、式 (3.2.1)、式 (3.2.2)、…のように記載した。
- (5) 図面表記を統一してない。例えば、周波数応答の代表としてボード線図がある。横軸に(角)周波数を、縦軸にゲインおよび位相をとる。このとき、横軸の表記を角周波数 ω あるいは周波数 f のどちらか一方に統一すべきであるが、本書ではあえて混在させている。角周波数 ω を主に用いる制御分野がある一方、周波数 f を主に使う場合もあるからである。また、講義において、図面表記の変更だけにもかかわらず、これから情報を読み取れない場合がある。そのため、様々な図面に慣れるため表記は統一しない。
- (6) テキストの場合、図面内の表記を日本語に統一しているものが多い。一方、学術論文の場合には、英語の使用が一般的である。ここでは、様々な表記に慣れるために、日本語と英語を混在させる。
- (7) 章末には演習問題を、巻末には全解答をつけた。一般的には、簡単な解答がつけられる。自力解答を促すために、ポイントだけの記載となっている。自発的な学習行動という教育的効果を期待するためである。しかし、解答できない場合、そのまま放置してしまうことが多い。そこで、本書では、解答例を詳細に記載することにした。
- (8) 各章の主たる執筆担当者は、1章(涌井、高梨)、2章(涌井、橋本、高梨)、3章(中村)、4章(高梨、涌井)、5章(涌井、中村)、6章(高梨)、7章(涌井、橋本、中村)、そして8章(橋本)である。主担当者がたたき台としての原稿を作成し、次にこれに基づき意見を出し合い、そして原稿を完成するという執筆方法をとった。したがって、執筆者全員が全章の記載内容に関与している。

目 次

1 序 論

1.1	フィードバック制御とは	1
1.2	制御工学で用いられる用語	2
1.3	フィードバック制御の必要性	5
1.4	フィードバック制御とフィードフォワード制御の関係	6

2 フィードバック制御の実例

2.1	温 度 制 御	8
2.2	光ヘッドの位置制御	10
2.3	磁気軸受の制御	13
2.4	スイッチング電源の制御のための同定	17
2.5	大型重量構造物（半導体露光装置）の同定と制御	18
2.6	モータの制御	21
2.6.1	磁気型モータの制御	21
2.6.2	ピエゾモータの制御	27
2.6.3	超音波モータの制御	30

3 制御系のブロック線図による表現

3.1	ブロック線図のメリット	33
3.2	微分方程式によるモデル化	34
3.3	微分方程式の解法とラプラス変換	36
3.4	ラプラス変換の基礎	39
3.4.1	ラプラス変換表	40

3.4.2	ラプラス変換の基本性質	42
3.4.3	逆ラプラス変換	45
3.4.4	初期値と定常値 (最終値)	50
3.5	伝達関数によるモデル化	53
3.5.1	伝達関数の導出とブロック線図	53
3.5.2	代表的な伝達関数	55
3.6	ブロック線図	57
	演習問題	63

4 時間応答

4.1	時間応答に関する技術用語	65
4.2	時間応答の計算	70
4.2.1	1次遅れ系のインパルス応答	70
4.2.2	1次遅れ系のステップ応答	72
4.2.3	2次遅れ系のステップ応答	75
4.2.4	極配置と応答波形	77
4.2.5	零点配置と応答波形	79
4.3	定常偏差 (位置偏差, 速度偏差, 加速度偏差)	81
4.3.1	定常位置偏差	81
4.3.2	定常速度偏差	83
4.3.3	定常加速度偏差	83
4.3.4	外乱に対する定常偏差	84
	演習問題	86

5 周波数応答

5.1	時間と周波数の関係	87
5.2	周波数応答とその種類	88
5.3	周波数応答の読み取り	90
5.3.1	周波数応答と時間応答の対応関係	90
5.3.2	実測の周波数応答	92
5.4	ボード線図の描画とベクトル軌跡	98
	演習問題	113

6 制御系の安定性

6.1 システムの安定・不安定	114
6.2 安定性と内部安定性	116
6.3 周波数伝達関数に基づく安定判別法	117
6.3.1 ゲイン余裕と位相余裕	117
6.3.2 ボード線図による安定判別	118
6.3.3 ナイキスト線図による安定判別法	119
6.4 伝達関数に基づく安定判別法	124
6.4.1 ラウスの安定判別法	124
6.4.2 フルビッツの安定判別法	126
6.5 その他の安定性の尺度	129
6.5.1 根軌跡	129
6.5.2 実システムにおける不安定要因	135
演習問題	136

7 制御系の設計

7.1 解析と設計	137
7.2 周波数応答と時間応答による評価	139
7.2.1 閉ループ周波数応答による評価	139
7.2.2 開ループ周波数応答による評価	140
7.2.3 時間応答による評価	140
7.3 PID補償を使った制御系設計と調整	141
7.3.1 PI補償器の設計	142
7.3.2 PD補償器の設計	145
7.3.3 PID補償器の設計	147
7.3.4 PID補償の調整則	150
7.3.5 PID補償器の実用的な実装	154
7.4 位相進み・位相遅れ補償器を使った制御系設計	157
7.4.1 位相進み補償器の設計	157
7.4.2 位相遅れ補償器の設計	160
7.4.3 位相進み遅れ補償器の設計	163

vi	7.5 周波数整形の基本.....	164
	7.5.1 高周波領域での特性.....	165
	7.5.2 低周波領域での特性.....	167
	7.6 外乱オブザーバ.....	167
	7.6.1 外乱抑圧特性.....	169
	7.6.2 ノミナル化特性.....	169
	7.7 内部モデル制御法.....	173
	7.7.1 制御対象が積分特性をもたない場合.....	174
	7.7.2 制御対象が積分特性をもつ場合.....	175
	7.8 むだ時間補償法.....	177
	7.9 ノッチフィルタによる振動特性の改善.....	181
	7.10 制御器の離散化実現法.....	185
	7.10.1 後退差分法による離散化実現.....	187
	7.10.2 双一次変換法による離散化実現.....	189
	7.11 非干渉化補償.....	193
	7.12 性能向上の方法.....	198
	演習問題.....	200

フィードフォワードの導入

8.1 2自由度制御系.....	201
8.2 フィードバック型2自由度制御系.....	204
8.3 連続軌跡追従制御系.....	207
8.4 アンチ・windアップ補償.....	210
演習問題.....	213

付 録 (A 状態方程式, B オイラーの公式, C 部分積分, D 置換積分, E スモールゲイン定理, F ノルム).....	215
参考文献	219
演習問題解答	221
索引	245

目次

1

序

論

本章では、自転車の走行を例にして制御の本質的な理解を行う。次に、制御工学で使用する技術用語の定義を述べる。制御工学が汎用的な技術体系であるために、抽象的な用語になることを理解していただきたい。最後に、フィードバック制御の必要性を考える。

1.1 フィードバック制御とは

フィードバック制御 (feedback control) の振舞いを定性的に理解するために、人間が自転車に乗る場面を分析してみよう。小さな子どもが自転車に乗れるようになるには、「学習」といわれる行動が必要である。ここでは、学習は済んでいるとする。そのうえで、図 1.1.1 を参照しながら自転車に乗るときの動作を考える。

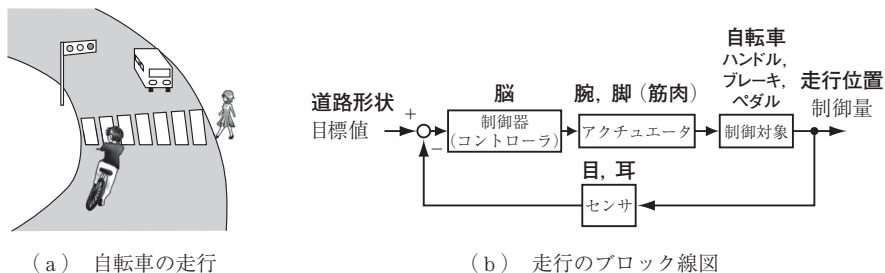


図 1.1.1 フィードバック制御の一例

自分の家から大学や会社まで、転倒しないように自転車に乗るためには、ハンドル、ブレーキ、そしてペダルの操作が必要である。これらの操作は、手指や腕、あるいは脚 (筋肉) などのアクチュエータ (actuator) が行う。ただし、これらをどのように操作するかは、そのときの状況によって異なる。状況の判断は、目、耳などのセンサ (sensor) から得られる情報 (周辺の状況) によって変化するからである。信号機や障害物、歩行者、対向車 (自転車) などの情報を目から得て、さらに、車の走行音、緊急車両のサイレン、踏切の警報音などを耳で聞いて周辺の状況を瞬時に理解している。

ここでの目的は、道路に沿って、目的地まで到達するよう自転車进行操作することである。そのため、現在の走行位置と目標経路との差異を視覚で検出し、これの中で比較し、次に加える動作の指令を、瞬時にあるいは多少の遅れをもって脳という**コントローラ** (controller) が考える。考えるとは、「反省」することと等価である。考えた結果は、指令として筋肉に送られる。このようにして、自転車に乗った人間は、転倒することなく無事に目的地に到達する。以上のように、生まれながらにして五感としての「センサ」、腕や脚などの「アクチュエータ」、そして頭脳という「コントローラ」を備えた人間は、普段の生活の中で意識することなしに「制御」を実現している。

人間を例として制御動作を説明したが、メカトロニクスでは人の手足、目・耳、そして脳に代わって、それぞれアクチュエータ、センサ、そしてコンピュータを使って機械を動かす。物体の位置、姿勢などの機械的物理量を任意に動かす制御系のことを特に**サーボ系** (servo system) と称する。概念的な定義を言えば、フィードバック制御とは、「対象とする物を意図どおりに操ること」である。

1.2 制御工学で用いられる用語

制御工学で用いられる特有の技術用語の説明を行う。位置決め機器の開発者は、位置決めステージを制御する。自動車の走行制御に従事する開発者あるいは研究者は、自動車そのものを制御する。自明なことである。しかし、制御工学の適用は、ステージや自動車という個別の対象に限定されない。汎用的な技術体系であるために、制御工学では、個々の名称を一般化した技術用語を使用する。そのため技術用語は堅くなり、制御工学に馴染みがない者に違和感や疎外感を抱かせやすい。制御の専門家が、門外漢を無意識のうちに排斥しやすい。反対のことも言える。複合技術を融合させた技術開発の場面であって、正しくとも難しい制御用語を多用しすぎると、制御技術者自身が疎外されるので注意を要する。

図 1.2.1 にフィードバック制御系の基本構成を示す。この図面を参照しながら、用語の説明を行う。

〔1〕 **制御対象** (controlled object), あるいは**プラント** (plant) 文字どおり、制御する対象物のことを指す。ロボット開発者ならばロボットが、航空機の開発者にとっては航空機が制御対象である。

〔2〕 **入力** (input) 制御器、制御対象、そしてセンサを示す四角のブロック (3章参照) に対して、流れ込む信号のこと。図中では矢印 (→) で表されている。

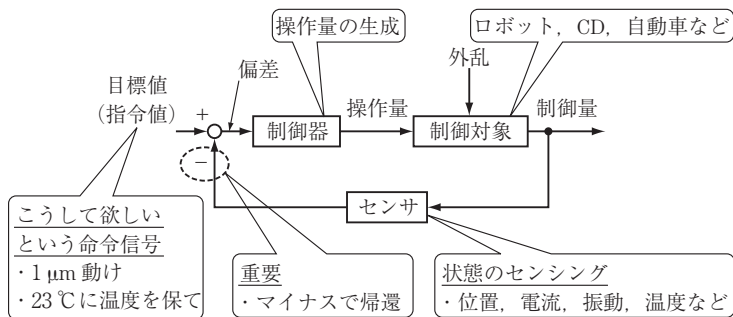


図 1.2.1 フィードバック制御系の基本構成

〔3〕 **操作量** (manipulated variable), あるいは**制御入力** (control input) 特に, 制御対象に加えられる入力のことを操作量, あるいは制御入力と呼ぶ。例えば, ヒータを使った温度制御系のとき, ヒータを加熱する電力アンプの入力電圧が, モータ制御の場合には電流アンプの入力電圧が, それぞれ操作量となる。

〔4〕 **出力** (output) システムを表すブロックから出ていく信号のこと。

〔5〕 **制御量** (controlled variable) 特に, 制御対象の出力のことを制御量と呼ぶ。例えば, 位置決め装置にあつては「可動物体の位置 = 制御量」となる。

〔6〕 **制御系** (control system) 制御器, 制御対象, アクチュエータ, センサ等で構成され, 制御対象を意図どおりに操る, すなわち制御を実現するシステムのことである。図 1.2.1 のようにセンシングした計測値が制御に反映される制御系を**フィードバック制御系** (feedback control system) という。

〔7〕 **外乱** (disturbance) 外部からの入力であり, 動作を乱すものを外乱と総称する。「制御対象」という用語と同様に, 制御対象に応じて外乱も千差万別である。

具体的に, 図 1.2.2 の吹き出しの中を参照しよう。上段の CD プレーヤの場合, ケースを揺らす振動が外乱となる。中段は, 一定速度で走行する自動車である。平地から凸凹道に自動車が入り込んだとき, これが一定速度の走行にとっての外乱となる。下段

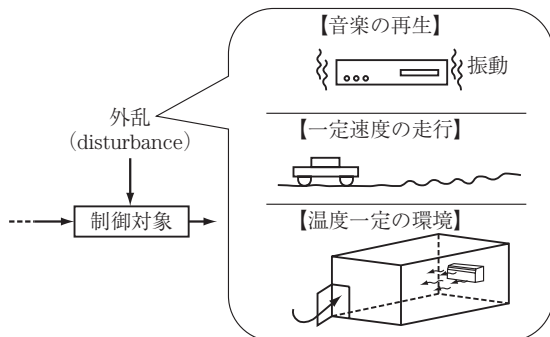


図 1.2.2 外乱とは

は、一定温度に空調された部屋に、遅刻した学生が入室した様子を示す。外気が入り込む、あるいは部屋の空気が流れ出す結果、一定に保たれていた部屋の温度が乱れる。

さて、再び図 1.2.2 を参照して、四角で囲む制御対象の上部中央から外乱の入り

を示す矢印が差し込まれている。初心者
は戸惑う表記である。外乱の入り方をより詳しく描くと、例えば図 1.2.3 (a) のように表現できる。なお、図 1.2.1 と図 1.2.3 (a) では、制御対象に唯一の外乱が加わるという描き方をしているが、実際の制御系では、図 (b) のように、制御対象の入力側に外乱が入る場合、図 (c) のように出力側に外乱が入る場合が存在する。

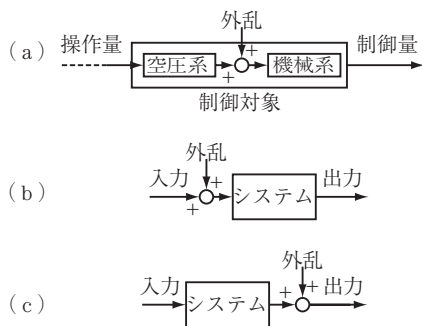


図 1.2.3 外乱の印加点

〔8〕 **制御器** (controller) 操作量を生成する機能をもつ。制御対象の動作を安定化する機能をもたせているため**補償器** (compensator) と呼ぶ。

〔9〕 **目標値** (desired value), **指令値** (command), あるいは**参照値** (reference)

制御量が希望の値になるように、目標として閉ループの外から与えられる値のこと。位置決め制御の場合、停止位置から $1\ \mu\text{m}$ 先の位置に位置決めしたいとき、 $1\ \mu\text{m}$ に相当する電圧あるいは数値が目標値となる。

〔10〕 **偏差** (error), あるいは**制御偏差** (controlled deviation) 目標値から制御量を差し引いたもの。制御量が目標値と一致するとき偏差は 0 となる。つまり、偏差の観測によって、目標値に対する追従性が評価できる。なお、error を直訳すると「誤差」であるため、偏差信号を誤差信号と言う技術者もいる。誤認のもととなる可能性があるので注意したい。

〔11〕 **フィードバック** (feedback) 図 1.2.1 中の \circ 印は、信号の加算点 (3 章参照) を意味する。加算点の箇所では、センサ出力はマイナス符号で入力されている。これを**負帰還** (negative feedback) という。ほとんどの場合、マイナスのフィードバックであるが、**安定性** (6 章参照) 確保のうえプラスのフィードバックを行う場合もある。これを**正帰還** (positive feedback) と呼ぶ。フィードバックを有するシステムを**閉ループ系** (closed loop system, フィードバック系ともいう) という。

〔12〕 **ブロック線図** (block diagram) 図 1.2.1 のように、機能・役割を四角

の枠で、信号の流れを矢印で表現したものをブロック線図と呼ぶ。フィードバック制御系の解析にあたって、各要素を数式のままで扱っても構わない。しかし、制御工学では、解釈、解析、評価を容易にするため、数式をビジュアル化したブロック線図を多用する（3章参照）。

〔13〕 フィードフォワード（feedforward） 図 1.2.1 に示すフィードバック制御系では、制御対象の出力である制御量が、同対象への入力である操作量を生成するために連続的に利用されている。これに対して、フィードフォワードでは、この操作量を生成するために制御量を利用してない（8章参照）。図 1.2.4 に示すように、「先行的」に制御対象を駆動する入力を生成する。

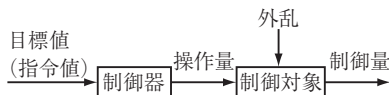


図 1.2.4 フィードフォワード制御系

1.3 フィードバック制御の必要性

フィードバック制御を行うには、制御量を検出するセンサと制御器を備え、これらを接続して閉じたループにする。このような「閉じた系」では、安定性を保証するための設計や調整が必須である。すなわち、取り扱いが面倒となる。可能ならば、閉ループ系にすることなく、ものを思いどおりに動かすことが理想である。極論を言えば、制御工学不要でものを動かせることが理想となる。

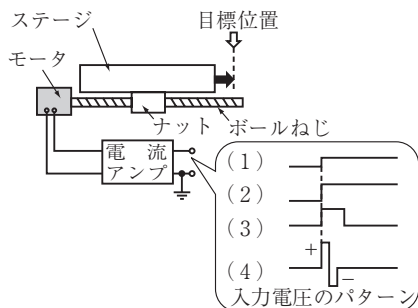


図 1.3.1 オープン駆動による位置決めを試行

そこで、閉ループ系の構成をとらない理想を実現するために、図 1.3.1 の位置決め装置を対象にして、ほぼ中央にあるステージを縦の破線で示す目標位置まで位置決めさせる場面を考えよう。図中の(1)～(4)の入力電圧を使って、試行の内容を述べる。

(1) まず、小さな電圧を印加した。

しかし、ステージは動かない。

(2) そこで、より大きな電圧を印加

する。すると、ステージは位置決めしたい方向に移動し始めた。しかし、一定電圧を連続して印加しているので、目標位置を通り過ぎた。

(3) この通り過ぎを回避するために、一定電圧を所定の時間だけ印加し、目標位置手前で、印加電圧を遮断すればよいと考えた。具体的に、電圧の印加時

間を試行錯誤で変えて、目標位置により接近させようとした。その結果、目標位置には正確に止められないが、近傍には止められた。しかし、振動が装置に入り込んだとき、ステージの位置ずれが発生した。同一の場所にステージを保持する機能をもたないので、機械振動が装置に入り込まないようにせねばならないことがわかった。この問題点は棚上げにして、再度の試行を行った。しかし、その後も目標位置を外れることが頻発した。

- (4) さらにこの問題も棚上げにして、速く動かそうと試みることにした。急激に加速して、次には減速をかければよいと考えて、図中の(4)に示すような正と負の電圧を印加することを行った。速い動作は実現できるものの、移動させたい位置に精度よく止めることは至難であった。

以上のような状況となる。理由は明らかである。図1.3.1を参照して、ボールねじ・ナット部の摩擦は、位置決めの試行ごとに変化し、これに起因する不可避な位置ずれが発生したとき、これを修正する機能がないからである。また、所定の位置に止められたとしても、外乱が入ってステージの位置がずれたとき、これを引き戻す機能をもたせていないからである。そのため、「ずれ」が発生したとき、これを修復する機能をもつフィードバック制御が必要となる。

図1.3.1を一般化した図面は、図1.2.4に示したフィードフォワード制御系となる。制御対象の特性が安定、既知、特性変動なし、加えて外乱が不変であれば、制御量が目標値と一致するように操作量を生成する制御器を制御対象に前置するフィードフォワード制御系の構成がとれる。しかし、制御対象の特性が安定、既知、特性変動なし、加えて外乱が不変という条件が、実システムにおいて満たされることはない。そのためフィードバック制御が必要となる。

まとめると、フィードバック制御系の目的・機能は、(a) 制御対象の安定化(6章参照)、(b) 制御対象の特性変動に起因する影響の抑制、(c) 過渡状態および定常状態(4章参照)における目標値追従性の確保、(d) 外乱の影響の抑圧、となる。

1.4 フィードバック制御とフィードフォワード制御の関係

図1.2.4と図1.3.1に基づきフィードフォワード制御の機能を説明したが、図示の構成が単独で用いられることは少ない。ほとんどの場合、フィードバック制御を施したうえで、フィードフォワード制御を併用する。併用の目的を大別すると、(i) 目標値応答の整形、(ii) 外乱補償、である。

まず、(i) の目標値応答の整形のための一般構成を図1.4.1に示す。

索引

<p style="text-align: center;">【あ】</p> <p>I-P 制御 204 I-PD 制御 214 アウトループ 22 アクチュエータ 1 圧電素子 143 アナロジー 74 アンチ・windアップ 補償 211 安定 114 安定限界 115, 119</p> <p style="text-align: center;">【い】</p> <p>行き過ぎ時間 67 行き過ぎ量 69 位相 89 位相安定化手法 182 位相遅れ補償 157 位相交差角周波数 118 位相進み遅れ補償 163 位相進み補償 157 位相余裕 118 1次遅れ系 56 1自由度制御系 202 一巡伝達関数 63 位置制御 26 位置偏差定数 82 一般解 37 移動平均フィルタ 183 イナータンス 20 因果関係 7 インディシャル応答 70, 141 インナループ 22 インパルス応答 70 インプロパー 168</p>	<p style="text-align: center;">【え】</p> <p>エスアイ・エスオー (SISO) 193 s 平面 77 エムアイ・エムオー (MIMO) 193</p> <p style="text-align: center;">【お】</p> <p>オイラーの公式 47, 217 遅れ時間 66 オートチューニング 9 オーバシュート 69 温度制御 8</p> <p style="text-align: center;">【か】</p> <p>外乱 3 外乱オブザーバ 168 開ループ伝達関数 63 可観測正準形 216 拡張根軌跡 134 拡張ナイキストの安定判別法 123 カスケード結合 62, 163 可制御正準形 216 加速度信号 42, 83 加速度偏差定数 84 過渡特性 67 干渉 193 感度関数 165</p> <p style="text-align: center;">【き】</p> <p>機械的時定数 74 擬似積分 16, 105 擬似微分 155 逆システム 79 逆ぶれ 79</p>	<p>逆ラプラス変換 39 共振 104 共振角周波数 104 共振周波数 139 共振値 104, 139 極 54 局所フィードバック 156 極零相殺 111 極配置 77, 229</p> <p style="text-align: center;">【く】</p> <p>加え合せ点 57, 149</p> <p style="text-align: center;">【け】</p> <p>ゲイン 55, 89 ゲイン安定化手法 181 ゲイン交差角周波数 118 ゲイン余裕 117, 118 限界感度 150 限界感度法 150 限界周期 150 減衰係数 57 減衰振動 66, 224 減衰比 57 厳密にプロパー 154, 168</p> <p style="text-align: center;">【こ】</p> <p>高応答 210 後退差分法 187 コ・クアド線図 89 固角周波数 57 固有周波数 57 コロケーション 81 根軌跡 129 コントローラ 2 コンプライアンス 20, 113</p>
--	--	---

	【さ】	制御入力	3	直結フィードバック系	63
		制御偏差	4		
		制御量	4	【て】	
最終値定理	51	整形	91	低域通過フィルタ	168
サーボアナライザ	89, 92	整定時間	67	デジタル再設計	186
サーボ系	2	静的システム	35	定常位置偏差	82
サーボ問題	137	積分要素	56	定常加速度偏差	83
参照値	4	折点周波数	102	定常速度偏差	83
サンプリング定理	187	セットポイントキック	155	定常特性	67
	【し】	零クロス周波数	164, 195	定常偏差	81
時間応答	65, 90	線形系	35	ディラックのデルタ関数	40
磁気軸受	13, 146	線形時不変系	36	decade (デカード)	94
軸ねじり振動	107	センサ	1	デューティ比	17
システム同定	19	前置フィルタ	206	電機子	14, 73
実現	185			電氣的時定数	73
時定数	56	【そ】		伝達関数	53
時不変系	35	双一次変換法	187	電流制御	23
時変系	35	操作量	3		
周波数伝達関数	89	相対次数	168	【と】	
出力	3	相補感度関数	165	等価変換	59, 61, 242
出力方程式	215	速度制御	24	同次線形微分方程式	37
小ゲイン定理	166	速度偏差定数	83	動的システム	35
状態空間モデル	215			特解	37
状態方程式	215	【た】		特性多項式	54
状態量	215	対角行列	196	特性方程式	54
乗法的不確かさ	166	台形速度	209	トルク制御	23
初期値定理	50	対数減衰比	68	トレードオフ	165
指令値	4	代表根	77		
	【す】	ダイポール	230	【な】	
推移定理	44	多重ループ	27	ナイキスト周波数	187
スイッチング電源	17	タスティン変換法	189	ナイキスト線図	89
数学モデル	34	たたまみ込み積分	44	ナイキストの安定判別法	
ステップ応答	70	立ち上り時間	66		117
スミス補償法	177	単位インパルス関数	40	内部安定	116
スモールゲイン定理	166	単位ステップ関数	41	内部モデル原理	84
	【せ】	単一フィードバック系	62, 81	内部モデル制御	173
正帰還	4			【に】	
制御器	4	【ち】		2次遅れ系	56
制御系	3	超音波モータ	30	2自由度制御系	202
制御仕様	138	直接速度フィードバック	81	入力	2
制御対象	2	直列結合	62		
		直列補償	157		

【の】		フィードフォワード	5	【む】	
ノッチフィルタ	109	不完全微分	155	∞ノルム	166
ノミナルモデル	166	負帰還	4	むだ時間	57
ノルム	218	不確かさ	166	【も】	
ノンコロケーション	81	ブッシュアップ	14	目標値	4
		物理モデリング	19	モーダル解析	72
【は】		負の剛性	16, 146	モデル化誤差	166
バイプロパー	168	負ばね	16	モデルベースド制御	173
パデ近似	181	部分的モデルマッチング			
バンド幅	139		153	【ゆ】	
ハンマリング試験	71	部分分数展開	46	有理関数	46
		プラント	2		
【ひ】		プロセス制御系	137	【よ】	
PID 補償	141	ブロック	57	1/4 減衰法	151
PI-D 制御	155	ブロック線図	4, 33		
PI 補償器	142	プロパー	168	【ら】	
BIBO 安定	116	プロファイル	199, 209	ラウスの数列	125
ピエゾモータ	28	【へ】		ラウス・フルビッツの安定	
光ピックアップ	10	閉ループ系	4	判別法	124
光ヘッド	10	閉ループ伝達関数	62	ラプラス演算子	39
非干渉化補償	193	並列結合	62	ラプラス変換	39
引き出し点	57	ベクトル軌跡	89	ランプ関数	42
非線形系	35	ベクトル線図	89		
PD 補償器	145	へビサイドの展開定理		【れ】	
非同次線形微分方程式	37		46, 226	零点	54
微分キック	155	偏差	4	レギュレーション問題	137
微分方程式	34	【ほ】		連続軌跡追従制御系	207
微分要素	55	ボイスコイルモータ	11	連続時間システム	185
比例要素	55	飽和関数	212	【ろ】	
【ふ】		補償器	4	ロバスト	168
不安定	114	ボード線図	88	ロバスト安定性	166
不安定零点	79	【ま】		ロールオフ	96
フィードバック	4	マイナーループ	156	【わ】	
フィードバック結合	62			ワインドアップ	211
フィードバック制御	1				
フィードバック制御系	3				

— 著者略歴 —

涌井 伸二 (わくい しんじ)

1977年 信州大学工学部電子工学科卒業
1979年 信州大学大学院修士課程修了(電子工学専攻)
1979年 株式会社第二精工舎(現セイコーインスツル株式会社)勤務
1989年 キヤノン株式会社勤務
1993年 博士(工学)(金沢大学)
2001年 東京農工大学大学院教授
現在に至る

高梨 宏之 (たかなし ひろゆき)

1998年 宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業
2000年 宇都宮大学大学院工学研究科博士前期課程修了
2003年 宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程修了博士(工学)
2003年 立命館大学総合理工学研究機構ポストドクトラルフェロー
2004年 秋田県立大学助手
2006年 秋田県立大学助教
現在に至る

橋本 誠司 (はしもと せいじ)

1994年 宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業
1996年 宇都宮大学大学院工学研究科博士前期課程修了
1996年 日本学術振興会特別研究員
1999年 宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程修了博士(工学)
1999年 宇都宮大学 SVBL 研究員
2000年 小山工業高等専門学校助手
2002年 群馬大学助手
2005年 群馬大学助教授
2007年 群馬大学大学院准教授
現在に至る

中村 幸紀 (なかむら ゆきのり)

2004年 京都工芸繊維大学工学部電子情報工学科卒業
2006年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了
2008年 日本学術振興会特別研究員(DC2)
2009年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了, 博士(工学)
2009年 日本学術振興会特別研究員(PD)
2009年 東京農工大学大学院助教
現在に至る

現場で役立つ 制御工学の基本

Fundamentals of Control Engineering Available to Industry

© Wakui, Hashimoto, Takanashi, Nakamura 2012

2012年1月20日 初版第1刷発行



検印省略

著者 涌井 伸二
橋本 誠司
高梨 宏之
中村 幸紀
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

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 978-4-339-03202-4 (高橋) (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