

ま え が き

自動制御の技術は、現場における計算機制御の発達によって、ビジュアルなモジュール（要素）ベースの問題向き言語、すなわち POL（problem oriented language）化が生み出した連続要素とロジック要素のハイブリッド調節制御時代から、さまざまな入力手段を備えシーケンス制御も融合した総合ハイブリッド制御時代へと移行しつつある。一方、60年代から急速に進化した状態技術（states of the art）によるシステム制御理論も、モデリングの技術と結び付いて、実験室規模の POL 化でも実現できるようになってきた。

本書は、大学の3年生前後期から一部大学院まで、および高専の高学年向けの半期用、あるいは通年用の実用的な入門書である。また、著者の経験から、企業における計装制御関係の実務技術者の研修入門書としても使えるように配慮した、広範な読者を想定した教科書であり、章を選んで使っていただきたい。

本書の第一の特徴は、機械・電気系の簡易なモデリング技術の解説にある。その上で、現代制御を現場で実現する時代を担うであろう学生諸君に、基礎から演習も交えながらわかりやすく解説する。

つぎに、特に変動やモデリング誤差の大きなプロセス制御の現場で一般的な PI 制御は、そのロバスト化によって、現場での重要性もさらに高まってきた。本書の第二の特徴は、ロバスト制御の基礎から発展まで視野に入れながら解説し、新たな観点での簡易ロバスト正規化 IP 制御を提示した点にある。

第三の特徴は、6章を設けて、一般的な授業レベルを越えるトピックスをまとめたことであるが、試験範囲外として授業中に教育研究の一環として取り組むのも、レベルの高い学生のためになると思う。

第四の特徴は、0章を設けて、制御の歴史を踏まえつつ、制御の展望や制御対象のモデル化とシステムの表現について述べた後、制御対象のシステム解析

や制御系設計について概観したことである。

本書では、そのあと、1章で、序論として制御やシステムの定義や概念、表現や表現変換法について述べ、2章で、種々の対象のモデリングについて述べ、3章で対象とシステムの解析について、4章でレギュレータとオブザーバについて、5章でロバスト制御について述べる構成とした。6章で、それまでの章から創発に関するものを集めて、システム制御創発について述べる構成としたが、創発について体系的に網羅したものではない。学部レベルを越えるための便宜的なものである。最後に付録として本書理解に必要な基礎的な制御数学について記載したが、より基本的な事項については、線形代数などの教科書を参考にさせていただきたい。

このような章を越えた移動式構成が本書の構成上の特徴である。最後まで読破された賢明な読者は再度、4章、5章に戻って演習としてほしい。

おわりに参考文献も示したが、本書に引用させていただいた内外の書物や文献の著者に感謝申し上げます。

本書を執筆するにあたり、お世話になったコロナ社の皆様に心から感謝いたします。

最後になりましたが、学生時代よりご指導いただきました大阪大学の多くの先生方および友人諸君、三菱重工業株式会社、明治大学、桐蔭横浜大学、東京工業大学、大阪工業大学、法政大学の皆様、その他本書執筆にあたり、協力・支援していただいた多くの皆様や長年家庭を支えてくれた妻と家族に、この場を借りて深く謝意を表します。

2014年8月

著 者

目 次

0. はじめに

0.1 制御とシステムとは	1
0.2 制御対象のモデル化とシステムの表現	6
0.3 制御対象のシステム解析	7
0.4 制御系の設計	8

1. 制御とシステムの基礎

1.1 制御の定義と種類	9
1.2 システムの概念	12
1.3 伝達関数表現と状態方程式表現	13
1.4 フィードバック制御システム	15
1.5 演算子法とラプラス変換	20
1.5.1 演算子法	21
1.5.2 ラプラス変換	23
1.6 直列結合と並列結合	26
1.6.1 一般の結合の場合	27
1.6.2 一次遅れとむだ時間の直列結合系	28
章末問題	29

2. 種々の対象のモデリングと表現

2.1 機械・振動系	30
2.1.1 力・トルクの動的平衡法	30
2.1.2 エネルギー・ラグランジュの運動方程式法	32
2.2 電気・振動系	37
2.2.1 オームの法則とキルヒホッフの法則	37
2.2.2 エネルギー法	38
2.3 サーボ機構 — DC モーター—	43
2.4 熱・流体系	46
2.4.1 直列結合加熱タンク	46
2.4.2 直列結合非加熱液位タンク	49
章 末 問 題	50

3. 対象とシステムの解析

3.1 静 特 性	52
3.1.1 最小二乗法による回帰直線	53
3.1.2 表形式回帰直線	55
3.1.3 等価パラメータ平面における最小二乗法	57
3.1.4 等価パラメータ空間における最小二乗法	58
3.2 ステップ応答	60
3.2.1 ステップ応答の定常偏差	60
3.2.2 右ゼロ点二次系のステップ逆応答	61
3.2.3 その他の1入力多出力 (SIMO) 系のステップ応答	62
3.2.4 求 根 法	63
3.2.5 根 軌 跡 法	65
3.2.6 フルビッツ法	69
3.3 周波数応答	73
3.3.1 周波数応答の複素入出力表現と実入出力表現	73

3.3.2	ベクトル軌跡	76
3.3.3	ボード線図	77
3.3.4	フーリエ級数	78
3.4	システムの5表現	81
3.4.1	状態方程式表現	81
3.4.2	解表現	82
3.4.3	伝達関数行列表現	82
3.4.4	ブロック図表現	82
3.4.5	LFT表現	83
	章末問題	84

4. レギュレータとオブザーバ

4.1	可制御・可観測	86
4.1.1	定義と判別法	86
4.1.2	実現と正準形	88
4.2	リアプノフの安定判別法	94
4.2.1	非線形系に対するリアプノフ安定と漸近安定	95
4.2.2	時不変線形系に対するリアプノフ方程式	96
4.2.3	リアプノフ方程式の解	96
4.3	無限時間最適制御	97
4.3.1	無限時間最適制御の解説	99
4.3.2	有限時間最適制御の解説	104
4.4	オブザーバ付きレギュレータ	108
4.5	積分器付きレギュレータ	111
4.6	離散値レギュレータ	112
	章末問題	114

5. 簡易ロバスト制御

5.1	ロバスト制御の種類	117
5.2	ハーディ空間とノルム	118
5.3	感度関数と相補感度関数	121
5.4	内部安定判別法	123
5.4.1	小ゲイン定理	123
5.4.2	有界実補題	124
5.5	ロバスト制御問題の定式化	125
5.6	簡易ロバスト正規化IP制御	129
5.7	パラメータ変動に対するPID制御のロバスト安定	131
5.7.1	パラメータ変動対象に対するI-PD標準二次系パラメータ調整	131
5.7.2	パラメータ変動標準二次系に対するPID制御の弱ロバスト安定	133
5.7.3	ロバスト安定領域における格子点探索	134
	章末問題	135

6. システム制御創発

6.1	4モード一体システム制御	136
6.2	PD簡易状態観測器付きLQRおよびPD簡易目標値予測器	138
6.3	機械系と電気系のアナロジー	139
6.4	実数回積分ベースシステム創発	146
6.5	ループ積分制御による非干渉化	147
6.6	方向制限装置と出力制限装置	148
6.7	シーケンスの集中と分散	149
6.8	むだ時間を有するプロセス制御	150
	章末問題	153

付 録	154
A. 行列の基本演算	154
B. 行列の微分・積分	160
C. 擬 逆 行 列	164
D. 陰関数最小・最大二乗法	166
E. 逆ラプラス変換表	169
参 考 文 献	170
章末問題解答	173
索 引	191

はじめに

本章では、制御とシステムの歴史を踏まえた展望や制御対象のモデル化とシステムの表現について述べた後、制御対象のシステム解析や制御系設計について概観し、最後に構成について述べる。

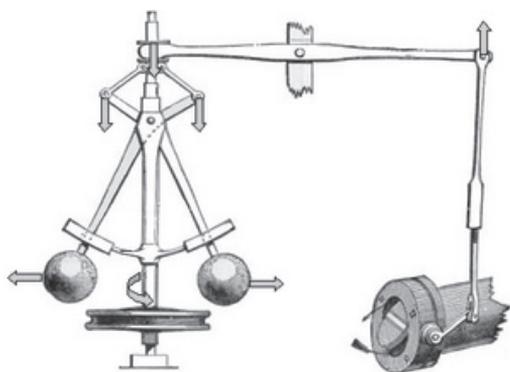
0.1 制御とシステムとは

われわれの身近な生活空間の中にはエアコンや冷蔵庫など制御技術を使ったものがたくさんある。例えば、エアコンには室温を自動的に制御する機能がついており、センサ (sensor) で室温を計測して、設定温度と比較して、冷房なら設定温度を越えたらクーラを起動し、設定温度以下になったら停止する。暖房なら設定温度を越えたらヒータを停止し、設定温度以下になったらヒータを起動する。このように起動か停止かの二つの状態を切り替えて操作する制御方式を、**オン・オフ制御** (on-off control) という。3 値以上を切り替える**多値 (離散値) 制御** (multi-value control) もある。操作状態が離散値ではなく、連続的に変化する制御を**連続制御** (continuous control) という。

エアコンの場合は制御目的が室温を調節することから、調節制御と呼ばれる。調節制御にも各種の方法があるが、本書ではおもにフィードバック制御について述べる。フィードバック制御とは、エアコンの例で説明すると、信号の流れの下流側にある室温を測って、上流側にある設定温度と比較して、その偏差によって操作を変える制御形態であり、下流側から上流側へ信号を戻して (バック) 制御器に供給 (フィード) することから、フィードバックと呼ばれる。

2 0. はじめに

このようなフィードバック自動調節制御の歴史は古く、産業革命の担い手となった蒸気機関の回転速度を制御するために、供給蒸気量を機械的に自動調節するサーボ機構として遠心ガバナ（**図 0.1**）が使用されていた。これは、蒸気機関の回転速度が速くなるとガバナに取り付けられたおもりが遠心力で開き、蒸気供給弁を閉じて蒸気供給量を絞る構造になっており、逆に遅くなればおもりが自重で閉じて蒸気供給弁を開き、蒸気供給量を増やすという制御上の仕組み（機構：からくり）となっている。弁の開閉のために、遠心力を用いる機械式ではなく、油圧を用いる油圧式や電気を用いる電気（電子）式があるが、発電プラントではタービンの大容量化と自動化に伴って、電子油圧式ガバナ（electro-hydraulic governor）が主流になってきている。遠心式は速度計測も遠心力を用いるが、最近では速度センサを用いるものも多い。



回転軸の速度が上昇すると連結されたおもりが遠心力で外側に広がって、てこ式レバーの反対側に設置された蒸気バルブが絞られ、回転数が下がる。逆に回転数が下がりすぎるとおもりが自重で狭まり、レバーにつながった蒸気バルブが開いて調速を行う

図 0.1 遠心ガバナ (Wikipedia)

ワット (Watt) の時代にはこのような制御機構はボイラのプロセス制御 (process control) にもあったようで、うきを使ったボイラ水位制御 (level control) と圧力制御 (pressure control) が行われていた。現代では、発電プラントにおいて、多くのプロセス量を計測して利用するセンサベースの大規模な分散型の計算機制御 (computer control) によるフィードフォワード・フィードバック制御 (feedforward-feedback control) などが行われている。

しかし、おもりやうきのような計測部や制御機構をもたないものであれば、

風が機体に当たる力のバランスを利用した風車の風向制御が、自動制御の起源だともいわれている。いずれにしても、紀元前の伝承を除けば18世紀が近代自動制御の起源であろう。その後普及した古典制御理論は演算子法からラプラス変換法 (Laplace transformation) への移行期を経て演算子法が復活し、両者の特徴を理解しながら混在して使用される時代へと移行しつつある。本書もこの立場である。古典制御の一時代を築いたPID制御は、^{いま}未だにプロセス制御の現場での王座を譲らず、2自由度制御や協調制御から簡易ロバスト制御へと進化し続けている。また、古典制御から現代制御への転換点は1963年に状態空間論 (state space theory) を導入したZadeh, Desoerのシステム理論が起源であろう。オブザーバやカルマンフィルタ (Kalman filter) による状態推定 (state estimation) と最適レギュレータ (optimal regulator) が現代線形制御理論の二つの花であり、両者は美しく融合化された。いまではLQR (linear quadratic control) やLQG (linear quadratic Gaussian control) と呼ばれてCAD (computer aided design) ツール化されるに至っている。

一方、温度、流量、圧力のような工業量を測定し、これを自動的に制御するセンサベースの自動制御は、1920年代にアメリカの石油精製プロセスで始まったようである。集中型のDDC (direct digital control) 時代から分散型に至るまで、発電プラントの大規模な計算機制御を可能にした転換点は、POL (problem oriented language) 言語での可視化プログラム (visual programming) の導入が起源であろう。

これによってプロセス制御の開発は大幅に高速化かつ省力化されたといえる。最近では可視化プログラムは制御系のCADツールとして、現場だけでなく教育機関でも使用できるようになってきている。

最近のロボットでも、サーボ機構を利用して外乱を絶縁してハードサーボ化する方法と、制御機能によってソフトサーボとハードサーボを選択する方法がある。外乱は絶縁せずに有効利用する技術も開発されているので、これらは目的によって使い分ける必要がある。

ロボットのように複数の要素が結合して、相互に影響し合いながら、全体と

4 0. はじめに

して一定の機能を果たすものをシステムと呼んでいる。身近なエレベータ・自動車・船舶・飛行機などの乗り物もシステムであり、機械の仕組み（機構：からくり）を利用した日本の古いロボットとしては、18世紀から19世紀につくられた茶運び人形（**図0.2**）もシステムである。



時計に使われていた歯車やぜんまいを利用してからくりがつくられたようである。国立博物館や大英博物館に現存する

図0.2 茶運び人形（Wikipedia）

制御を応用分野によって分類すれば、プロセス制御やサーボ機構や電気制御などがある。プロセス制御とは温度・流量・濃度などのプロセス量の制御であり、サーボ機構とは位置・速度・角度・角速度・姿勢などの機械量の制御であり、電気制御とは電圧・電流・力率・無効電力などの電気量の制御である。

さて、現代では計算機やマイクロコンピュータやヒューマンインタフェースや通信技術、さらには制御理論と制御系CADの急速な発達によって、制御を計算ベースで行うことが主流になっており、特にプロセス制御は制御機能モジュールを用いた可視化プログラムによって進展してきた。

大規模なプロセス制御では、自動制御は分散化されて電気配線や通信によって結合され、全体としてプロセスの自動化・制御という機能を果たすようにシステム化された計算機制御システムとなっている。大規模プロセスでは、自動電圧調整装置（automatic voltage regulator, AVR）などの電気制御や、ポンプ

やファン用のモータ速度制御などのサーボ機構もプロセス制御に統合されつつある。

さらに大規模プロセスでは、調節制御だけでなく、補機やプラント全体の起動・停止の自動化などのシーケンス制御を主とした**プロセスオートメーション** (process automation, **PA**) では、調節制御との連携による負荷変化運転や手動/自動 (M/A) の切換運転, あるいは機器の保護インターロック (interlock) などの安全運転が優れていた。

また、インテリジェントビルは空調やセキュリティ管理が優れている。両者にはコジェネレーション (熱電併給システム) が設置されて、買電も含めたエネルギーの総合管理が行われることもある。

プロセスやインテリジェントビルの自動化・インテリジェント化技法は、工場やオフィス、移動機械 (自動車・バス・電車・建設機械・農機など) や家庭へも展開されつつあり、**ファクトリーオートメーション** (factory automation, **FA**) や**オフィスオートメーション** (office automation, **OA**)、**ホームオートメーション** (home automation, **HA**)、あるいは**スマートハウス**などを産み出した。

最近では、携帯やスマートホンなどの無線通信との連携で、インテリジェント化やセキュリティ管理という面ではスマートハウスが前者を^しの凌ぎつつある。

無人化・ロボット化・統合化という面では、GPS や車車間通信を利用した移動機械の安全停止制御・無人運転・軌道追従運転などに特徴があった。

プロセスのみならずロボット分野においても、さまざまなレベルの可視化プログラムの低コストな**ロボット言語**が開発されてきた。プロセス制御用のようなPID制御モジュールや状態モデルモジュールなどの制御機能モジュールは、ブロック線図のように配置できるものではなく、前進・後退・右折・左折やUP・DOWN・開・閉・右回転・左回転などの動作モジュール、およびGO_TO・LABEL・FOR_NEXTなどのプログラム機能モジュール、さらにはセンサ追設のIF_THENプログラム機能モジュールを用いたものもあるし、遠隔マニュアル操作でのロボット動作を視認で確認しながら自動時間設定が可能な時限シーケンスモジュールをシリーズに並べて、再生や巻戻しができるものもあ

り、センサフィードバックを有する動作シーケンスの分岐・合流ループが可視化プログラムできるものまでである。さらに、産業用指向のロボットにはさまざまな高機能をもつものがあるが、本書では省略する。

今後はこれらのうち有用な自動化プログラミング技法がファジー・ニューロ・GA・AIなども含めながら進化し、プロセスオートメーションなど、さまざまな分野にも必要に応じてフィードバックされ、水平展開されている。

このように多くの自動化・インテリジェント化システムでは、調節制御だけでなくシーケンス制御も同一ハードや通信技術によって統合化されて機能や重要度を増しているが、本書の内容を超えるので、身近な例であるエレベータ制御への応用にとどめる。また、インテリジェント制御も省略する。

0.2 制御対象のモデル化とシステムの表現

制御対象を制御する方法として、モデル化の観点からは大きく分けて、モデルに基づく方法とモデルに基づかない方法がある。

前者は、さらに、物理モデルに基づく方法、モデル次数ごとの標準モデル（伝達関数や微差分方程式などがある）に基づく方法、**自己回帰モデル（AR）**や**移動平均自己回帰モデル（ARMA）**などの時系列モデル、**隠れマルコフモデル（HMM）**や**一般化線形モデル（GLM）**、**階層ベイズモデル（HBM）**や**一般化混合線形モデル（GLMM）**などの統計モデルに基づく方法などがある。特徴はモデルの完成には、システム同定、次数決定、パラメータ同定、統計的推定などが必要であり、必要な条件がそろえば制御シミュレーションによって制御性能評価が可能で、制御性能改善が理論的にできる点である。

後者は、オン・オフ制御のように制御量の目標値からの偏差の大きさのしきい値に基づく方法、実験的最適化制御のように評価関数の実験値に基づく方法、多くのシーケンス制御やプログラム制御のように、時間帯や作動・停止時間や各種条件に基づく方法、モデルに基づかないファジィ制御のように制御偏差とその変分のファジィ集合のメンバーシップ関数に基づく方法などがある。

本書は制御技術や制御結果のみを重視するものではなく、理学や工学と制御理論の理解による改善や進展によって、より優れた制御の発展と教育効果を期待する立場から、物理モデルに基づく制御を第一義に据えた構成としている。しかし、モデルに基づかない制御との融合を否定したり、嫌うものではない。

モデリングの例として扱っているおもな分野は物理、機械（熱・流体・振動）、電気などの集中系（微分方程式モデル）である。化学・生物系や分布系（偏微分方程式モデル）や離散事象系（不定期イベントモデル）や確率系（確率統計モデル）などは省略した。

システムの表現についても、モデル化の種類以上にあるといってもいいが、紙面の都合と汎用性と有用性の観点から、微差分方程式表現、解表現、伝達関数表現、ブロック線図のようなグラフ表現などの主要なものに限定した。

特に、微分方程式表現から伝達関数表現を求める方法としては、イギリスの電気エンジニアであるヘビサイドの微分演算子法と、フランスの数学者であるラプラスのラプラス変換法を併用する。むしろ両者の意味は違うがすべての初期値をゼロとすれば同じ形の伝達関数となることから、微分演算子とラプラス積分の核に用いる複素数を同じ記号 s として、便利であるという観点から混用する。

0.3 制御対象のシステム解析

制御対象のシステム解析手法は数多くあるが、増測の自動制御基礎理論などにかなり紹介されているので、本書では満足できない読者はそちらを参照してほしい。

本書では主として制御系計算機援用設計（CAD）ツールの定番である MATLAB[®]、Simulink[®]（Mathworks Inc.：以下省略）の線形変換ツールで採用されているもののうち、どの教科書にもあって重要度の高い、ステップ応答、根軌跡、ボード線図、ベクトル軌跡（ナイキスト線図）の四つを基本とした。

インパルス応答も伝達関数の逆ラプラス変換であるという重要な意味がある

が、ステップ応答の導関数であるという特性から想像が付きやすいので、必要なとき以外は割愛した。逆に、ステップ応答はインパルス応答の積分関数である。付録 E のインパルス応答を積分しても求められる。

安定性解析についても、多くの方法があるが、嘉納らの動的システムの解析と制御などにかなり紹介されているので、本書ではステップ応答やインパルス応答などの時間領域での解の有界性や漸近安定性を支配する特性方程式の根、すなわち極に基づくものと、制御後の閉ループも含めた自律系（自由応答系）のポテンシャル関数の安定性に基づくリアプノフ法、およびベクトル軌跡やボード線図のように開ループの周波数応答の安定度から閉ループにしたときの安定性を推定する方法に基づくものに限定した。

0.4 制御系の設計

制御系の設計方法としては、優れた規範モデル（一次系など）にマッチングするように逆システム補償器や制御パラメータを逆算で決定する**モデルマッチング法**、Ziegler-Nicols の**比例積分微分 (PID) 制御のパラメータ調整法**のように標準モデルの同定パラメータから経験的に決定する方法、極・ゼロ配置による**根軌跡改善法**、**ステップ応答改善法**、**周波数応答改善法**などがある。さらに、**適応同定制御**のように制御偏差の漸近安定性を保証するようにモデルパラメータや操作量を決定する方法、**最適化制御**や**教師なし学習制御**のように出力の評価関数を改善するように操作量を決定する方法、**教師あり学習制御**のように規範となる教師信号（目標値）を模倣したり、追従したりなど制御偏差の評価関数を改善するように操作量を決定する方法、**ロバスト制御**のように種々の要因に対するロバスト安定性を保証するように、制御対象の周波数特性を改善する方法と制御器のパラメータ調整に基づく方法など、さまざまである。

ここに挙げた方法も代表的な一例であり、それぞれの分野ごとに、あらゆる方法があるだろうといっても過言ではない。個々に細かな注意も多い。

そこで、本書では設計論には深く立ち入らないことにした。

制御とシステムの基礎

本章では本書全体を理解する上で必要な、定義や種類や概念や表現など、制御とシステムの基礎について述べる。

1.1 制御の定義と種類

本書の記載事項をより理解しやすくするために、初めに制御の定義と種類と分類を簡潔にまとめておく。本書では種類や分類として、つぎのようなものを挙げた。制御の機能と形態による種類、機械化および自動化の種類、自動制御や自動化の目的と目的別制御の種類、制御の応用分野別の種類、制御の動力源による種類、制御の目標値の種類による分類、制御の自由度による分類、制御信号の種類による分類、制御のループ数による分類、制御器とアクチュエータの距離による分類などである。

制御とは目的をもって制御対象に、なんらかの操作を加えることである。制御目的を表す量を目標値といい、制御目的を表す命令を**作業命令**と呼ぶ。操作には**連続操作**、**定周期操作**、**オン・オフ操作**、**限界操作**、**離散値操作**、**間欠操作**、**イベント（離散事象）操作**などがある。

制御には大きく分けて、室温制御のようにシステムの状態を定量的目標値に維持したり追従させたりする**調節制御**と、エレベータのようにシステムの状態を逐次変更する**シーケンス制御**（sequential control）がある。調節制御には、その形態によって、**フィードバック制御**（feedback control）や**フィードフォワード制御**（feed forward control）などがあるが、本書で扱うのは主に理論的

完成度が高いフィードバック制御理論である。

古来人手で行ってきた生産活動を，産業革命以降かなりの割合で機械で行うようになってきた。これが機械化である。このような生産活動や生活活動に浸透してきた機械を従来は人手で運転操作してきたが，それも含めて機械で行うようになってきた。機械化や自動化によって人間の体力や能力や感覚の限界を超えられるようになった。この機械の運転操作を自動化制御装置によって行うのが**自動化** (automation) である。すべての運転操作を装置が行う**全自動化** (full automation) と一部を人間の判断操作によって行う**半自動化** (semi automation) がある。自動化の重要な機能の一つが機械の制御である。制御装置によって自動的に行われる制御が**自動制御** (automatic control) であり，人間の判断と操作によって行われる制御が**手動制御** (manual control) である。制御装置と制御対象の系統的な組合せを**制御系** (controlled system)，自動制御が行われる制御系を**自動制御系**という。手動/自動切替装置も重要である。

自動制御や自動化の目的はさまざまであり，安全性 (safety) の向上，安定性 (stability) の向上，機器の保護，故障・劣化・余剰機器の停止・負荷抑制，待機機器の起動，省エネルギー，省力化，最適性の維持，機器の運転台数の選択，機器の応答の高速化，干渉の削減，自動化制御対象の変化変動に対する追従性・適応性 (adaptability) ・ロバスト性 (頑健性, robustness) ・学習能力の向上，不確定性 (uncertainty) や曖昧性 (fuzzyness) に対する対処，エキスパート (expert) の運転操作の模倣，機器の振動 (vibration) ・騒音 (noise) の抑制，渋滞 (congestion) やデッドロック (deadlock) の防止・抑制など数多くあり，新たな制御方法や自動化方法の進歩に伴い，機能が増え，目的も増えてきた。最初のグループのような安全保護制御を**インターロック** (interlock) と呼ぶ。つぎのグループが**最適化制御** (optimizing control) および**最適制御** (optimal control) である。**非干渉制御** (decoupling control)，**適応制御** (adaptive control)，**ロバスト制御** (robust control)，**学習制御** (learning control)，**ファジィ制御** (fuzzy control)，**人工知能制御** (artificial intelligent control)，**振動制御** (vibratory control)，**渋滞制御** (congestion control) などの目的別制御も含ま

索引

【あ】	エネルギー法	37	仮想変位	32
アーケ	エルミート行列	158	過渡応答	60
アナログ制御	遠隔制御	12	カルマンフィルタ	3
アナロジ	演算子法	20	間欠操作	9
有本・ポッター法	遠心ガバナ	2	間欠操作方式	114
安定極			慣性抵抗力	31
安定限界ゲイン	【お】		感度関数	121
	オイラー表現	75	感度低減問題	121
	オームの法則	37, 141	【き】	
	オフィスオートメーション		機械インピーダンス	140
【い】			機械回路	139
位相角線図	オブザーバ	5, 85	機械・振動系	30
位相交点	オン・オフ制御	1	擬逆行列	164
位相変数法	オン・オフ操作	9	逆応答	61
位相余裕			逆応答系	61
位置エネルギー	【か】		逆行列	156
一次遅れ	カーネル	23	逆行列算法公式	156
一次遅れ系	回帰直線	53	逆ラプラス変換	24
一次遅れ系の標準形	階層ベイズモデル	6	逆ラプラス変換形	169
一巡伝達関数	解表現	82	強化	138
一般化混合線形モデル	回路網	41	教師あり学習制御	8
一般化座標	可観測	86	教師なし学習制御	8
一般化線形モデル	可観測グラム行列	87	強プロバ	63
一般化力	可観測性行列	87	共役転置行列	158
移動平均自己回帰モデル	可観測対	86	行列関数の積分	162
イベント操作	核	23	行列関数の微分	162
インターロック	学習	138	行列級数	157
インパルス応答	学習制御	10	行列式	155
インパルス入力	隠れマルコフモデル	6	行列指数関数	158
	可視化プログラム	3	極	35
【う】	カスケード制御	11, 15	極指定レギュレータ	85
運動エネルギー	可制御	86	キルヒホッフの電圧法則	
運動量保存則	可制御グラム行列	87		141
	可制御性行列	87	キルヒホッフの法則	37
【え】	可制御対	86	近似パルス伝達関数	146
エージェント	仮想仕事の原理	32		
エネルギーバランス法				

【く】		【し】	
グレビルの定理	165	シーケンス制御	5, 9
訓練	138	時間応答解析	60
		時間領域	20
【け】		直達項	21
系	12	自己回帰モデル	6
計算機制御システム	4	システム	4, 12
ゲイン安定	76	システムの状態	13
ゲイン交点	76	実現	51, 88
ゲイン線図	77	実数回積分	146
ゲイン余裕	76	実数回微分	146
限界角周波数	65	質量行列	31
限界感度法	151	質量バランス	46
限界操作	9	時定数	22
限界点	76	自動	138
原関数	23	自動化	10
減衰行列	31	自動制御	10
		自動制御系	10
【こ】		自動電圧調整装置	4
剛性行列	31	シナリオ	138
剛性抵抗力	30	時不変リアプノフ方程式	96
後置型	16	時変係数系	13
交通制御	11	射影作用素	165
根軌跡	65	渋滞制御	10
根軌跡改善法	8	集中コンピュータ	149
混合感度低減問題	122	周波数応答	73
コンデンサの充放電	42	周波数応答改善法	8
		周波数整形	121
【さ】		周波数伝達関数	75
サーボ機構	3, 4, 43	主座小行列式	159
サーボ制御	11	主小行列式	159
最小二乗法	53	出力	12
最小実現	51, 88	出力方程式	81
最適化制御	10	手動	138
最適制御	10	手動制御	10
最適性原理	106	主フィードバック量	16
最適レギュレータ	3, 86	小ゲイン定理	123
作業命令	9, 19	状態推定	3
散逸エネルギー	38	状態遷移図	149
サンプル値制御	11	状態変数	13
		状態方程式	81
		状態方程式表現	14
		自力制御	11
		シルベスターの判別法	159
		シングルループ制御	12
		人工知能制御	10
		振動極	65
		振動制御	10
		【す】	
		随伴表現	89
		数値制御	12
		ステップ応答	8, 60
		ステップ応答改善法	8
		ステップ応答法	151
		ステップ関数	24
		ステップ入力	60
		スマートハウス	5
		スミス補償器	152
		【せ】	
		正規行列	158
		制御系	10
		制御装置	19
		制御動作信号	17
		制御偏差	16
		制御命令	19
		制御量	16
		正準形	88
		正則	156
		正定	158
		正定値	95
		正定値汎関数	95
		静電エネルギー	38
		静特性	12, 52
		絶対収束	158
		セルフロック	44
		ゼロパワー制御	11
		漸近安定	95
		線形行列不等式	124
		線形分数表現	83
		線形分数変換表現	126
		全自動化	10
		前置型	16

【そ】

像関数 23
 総合伝達関数 17
 相互創発 149
 操作 19
 操作量 16
 相似行列 159
 相似システム 88
 相似変換 88
 双線形 48
 双対システム 87
 創発 136
 相補感度関数 122

【た】

対称行列 158
 ダイナミックプログラミン
 グ 85, 105
 多項式系 48
 畳み込み積分 25
 多値制御 1
 他力制御 11
 ダンパ 31

【ち】

力・トルクの動的平衡法 30
 調節制御 1, 9
 直列結合 27
 直交行列 158
 直交射影作用素 58, 165
 直交相似行列 159

【つ】

追従制御 11

【て】

定係数系 13
 定周期操作 9
 定常ゲイン 22
 定常状態 60
 定常特性 52
 定常偏差 60

定常リカッチ方程式 101
 定値制御 11
 テイラー展開 106
 適応制御 10
 適応同定制御 8
 デジタル制御 11
 電気・振動系 37
 電気制御 4, 11
 電磁エネルギー 38
 電子油圧式ガバナ 2
 伝達関数 14, 169
 伝達関数行列表現 82
 伝達関数表現（初期値も
 含めた） 28

【と】

動特性 13
 特異値分解 118
 特異値分解定理 118
 特性方程式 35
 トリガ 136

【な】

ナイキストの安定判別法 76
 内部安定 123
 ナル空間 155

【に】

2 慣性機械系 142
 二次形式 158
 ニュートンの運動方程式 30, 140

入力 12

【ね】

ネガティブフィードバック 16
 熱・流体系 46
 熱バランス 46
 粘性抵抗力 30

【の】

ノード 12

ノッチフィルタ 67

【は】

ハーディ空間 118, 119
 ハードサーボ 44
 パデ近似 152
 ばね 31
 ハミルトン行列 102
 ハミルトンの原理 32
 パラメータ調整法 8
 パルス入力 60
 汎関数 95
 半自動 138
 半自動化 10
 半正定 158
 バンドパスフィルタ 67
 バンドリジエクトフィルタ 67

半負定 159
 半負定値 95

【ひ】

非干渉制御 10
 ヒステリシス 52
 非定常リカッチ方程式 105, 107
 非ホロノミック制約 32
 比例積分微分制御 8

【ふ】

ファクトリーオートメー
 ション 5
 ファジィ制御 10
 不安定極 65
 フィードバック結合 17
 フィードバック制御 9
 フィードフォワード制御 9
 フーリエ級数 80
 フーリエ係数 78
 フーリエ展開 80
 フーリエ変換 24
 不可観測性 109
 不可観測部分空間 94

	【A】		【H】	MWD	139
AR	6	HA	5	【O】	
ARMA	6	HBM	6	OA	5
AVR	4	HMM	6	【P】	
	【B】	H^∞ 空間	118	P_0 マトリックス	160
BID	139	H^∞ 制御	118	PA	5
BIR	139	H^∞ ノルム	118	PID 制御	8, 16
	【D】		【I】	POL	3
DC モータ	44	I-PD 制御	16	P マトリックス	160
DDC	3		【L】	【S】	
DP	85, 105	LFT 表現	83, 126	SISO 系	14
	【F】	LMI	124	SVD	118
FA	5	LQG	3, 152	【数字】	
	【G】	LQR	3	1 入力 1 出力系	14
GLM	6		【M】	3 次スプライン補間	59
GLMM	6	MATLAB	7	3 要素制御	15
		MIMO	85		

— 著者略歴 —

- 1976年 大阪大学工学部産業機械工学科卒業
1981年 大阪大学大学院博士後期課程修了
(産業機械工学専攻)
工学博士
1981年 大阪大学助手
1984年 三菱重工業株式会社勤務
1996年 桐蔭横浜大学助教授
2000年 大阪工業大学教授
2011年 法政大学大学院兼任講師
現在に至る

システム制御基礎理論

Basic Theory of Systems Control

© Makoto Katoh 2014

2014年10月2日 初版第1刷発行



検印省略

著者 加藤 誠
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 978-4-339-03209-3 (金) (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