

計測・制御
セレクション
シリーズ
7

計測自動制御学会 編

データ駆動制御入門

金子 修 著

コロナ社

刊行のことば

近年の科学技術は、情報化・グローバル化の中で驚くべき速さで発展している。計測・制御分野も例外ではなく、次々と新しい概念・理論・技術が発表され、その核心を理解するのに多大な努力を要する状況にある。さらに、各種の技術が単一の分野に閉じることなく、さまざまな分野が横断的に発展・連携・融合し、新たな分野へ多種多様な広がりを見せている。例えば、計測技術の発展は、知的システムを構築するための人工知能やデータサイエンスの発展にも大きく寄与し、両技術分野の融合による技術革新も期待されている。

計測自動制御学会（SICE）が扱う、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングといった分野は、もともと分野横断的な性格を備えていることから、SICE が社会において果たすべき役割がより一層重要なものとなってきている。SICE では、2018 年に完結した「計測自動制御学会（SICE）計測・制御テクノロジーシリーズ」の次世代となるシリーズ企画の在り方について模索し、議論を重ねてきた。その結果、めまぐるしく技術動向が変化する時代に活躍する技術者・研究者・学生の助けとなる書籍を、SICE ならではの視点からタイムリーに提供するというシリーズの方針を立てた。

この方針に基づき、従来のシリーズでのテーマや執筆者の選定から出版までのプロセスを見直し、これまでとは異なるプロセスでシリーズ企画を進めていくことにした。ユニークな取り組みとして、SICE がシリーズの執筆者の公募を行い、会誌出版委員会での選考を経て収録テーマを決定している点がある。また、公募と並行して、会誌出版委員会によるテーマ選定や、学会誌「計測と制御」での特集から本シリーズの方針に合うテーマを選定するなどして、収録テーマを決定している。テーマの選定に当たっては、SICE が今の時代に出版

する書籍としてふさわしいものかどうかを念頭に置きながら進めている。このようなシリーズの企画・編集プロセスを鑑みて、本シリーズの名称を「計測・制御セレクションシリーズ」とした。

本シリーズは、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングに関わる多種多様なテーマがタイムリーに収録されていくことをねらっている。本シリーズが変化の大きな時代の中で活躍する研究者・技術者・学生の役に立てば幸いである。最後に、このシリーズ企画を進めるに当たってご尽力いただいたコロナ社の各氏に感謝したい。

2021年5月

計測自動制御学会 会誌出版委員会 出版ワーキンググループ

ま え が き

近年、データを直接用以て制御器を設計・更新・調整するアプローチが提案され、理論の観点からの研究、応用の観点からの方法論の開発が行われ、実応用の現場でも実用例も出てきている。モデリングが困難な状況で操業データを有効に使い圧倒的なコストダウンを実現するこれらの方法論を整理し、体系化された入門書を備えておくことは、実応用の技術者にとって有益であると考えられる。また、モデルベースドアプローチと異なるデータ駆動制御の方法論を、一つのテーマとして勉強・研究をしている大学院生や研究者向けにも、その最初の足掛かりとしての基礎的事項をまとめておく書物を備えておくことは、学術的にも重要な意義がある。そのようなことから、本書はわが国初のデータ駆動制御の入門書であることを目的としている。

このように、読者として想定するのは、大学や企業などで、研究または開発において、この新しいデータ駆動制御という考え方に取り組もうとする学生、研究者、社会人である。必要最低限なレベルとしては、本書すべてを通読する場合でも、古典制御や現代制御のきわめて初歩の入門的事項を知っていることでよい。加えて、読み方によっては、すべては読まずとも「とりあえず1回の実験で制御器チューニングをしたい」ということであれば、3章や4章だけでよいし、「データ駆動予測だけ知りたい」なら7章だけでもよい、というように、目的に応じて飛ばしながら読んでもよい。例えば、これらのような場合は、必ずしも現代制御は触れたことがなくても読めると考えている。最適化問題については、本書では深くは触れないが、最小二乗法や代表的な非線形最適化の基礎などは付録にまとめておいた。ただ、筆者は最適化の専門家ではなくユーザであるため、アルゴリズムに関するいろいろな工夫、背景の理論は最適化の良書を参考にされたい。

データ駆動制御に関する書物をまとめるという構想は10年くらい前からあったが、このように遅くなった理由は、一つには著者の所属異動など諸事情により進めることができなかった、ということもある。しかしそれ以上に、いろいろな手法や性質などが明らかになり、データ駆動制御の研究自体もこの10年の中で進み、どこまでをまとめてよいか悩み続けていたことが、書籍として実現するということが遅れた大きな理由である。このようなときに、この「計測・制御セレクションシリーズ」の公募を通じて、本シリーズに加えていただけることになり、データ駆動予測といった最近の話題は含めつつも、この分野の入門書となりうるべく思い切って基本的な話題に限定することにした。

最後に、筆者の恩師である大阪大学名誉教授藤井隆雄先生、および元福井大学川谷亮治先生には、研究に関わるさまざまな面でご指導・ご鞭撻をいただいた。心より感謝の意を表す。また、本書の核は、筆者が大阪大学基礎工学研究科藤井研究室に助手として在籍していた当時の学生たちと0から着手し始めたFRITに関する研究がきっかけである。指導学生であった相馬将太郎君、吉田恭子さん、宮地誠君をはじめとして、金沢大学における和田垣祐介君、澤川史明君、Hien Thie Nguyenさん、北崎良彦君、そして、電気通信大学における高橋英輔さん（社会人博士課程学生、ブラザー工業株式会社）、中村岳男君、池崎太一君、廣岡優樹君、畝木唯さんと行ってきた研究は、本書の内容に関わる成果となっている。共同研究者として感謝の意を表す。さらに、本書をまとめるにあたり必要となったいくつかの実験やシミュレーションは電気通信大学金子研究室の池澤美紅さん、山本龍聖君に協力いただいた。ここに感謝の意を表す。そして、本書の企画では、東京工業大学の石崎孝幸先生をはじめとした計測自動制御学会の会誌出版委員会の方々、コロナ社に厚く御礼申し上げる。

2023年11月

著者

目 次

1. データ駆動制御とは

1.1	入口としての例題	1
1.2	なぜデータを直接用いる制御が必要か	3
1.3	データ駆動制御の立ち場	6
1.3.1	データから直接制御器をつくる	6
1.3.2	データから直接制御器を更新する	7
1.4	古くからあるデータ駆動制御とそれらの問題点	9
1.5	本書を通じて考える問題	11
1.5.1	目標応答への追従問題	11
1.5.2	目標応答を完全に実現する理想の制御器	14
1.5.3	安定性について	16
1.6	本書の構成とガイド	17
1.6.1	各章の概要	17
1.6.2	本書の読み方のガイド	19
1.7	本書を通じて注意すべき点	20
1.7.1	連続時間表記と離散時間表記について	20
1.7.2	表記について	21

2. Iterative Feedback Tuning (IFT)

2.1	IFTの基本的な考え方	25
-----	-------------	----

2.1.1	データを直接用いた素直な最適化	25
2.1.2	入力のペナルティ	30
2.1.3	制御器のパラメータ微分	32
2.2	実験による IFT の検証	34

3. Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT)

3.1	FRIT の概要	36
3.2	FRIT の基本的な考え方	38
3.2.1	擬似参照信号の意味と役割	38
3.2.2	$J_F(\rho)$ の最小化の直感的な説明	41
3.2.3	$J_F(\rho)$ の最小化の意義	43
3.3	FRIT における非線形最適化計算	45
3.4	FRIT の適用例	48
3.5	いくつかの注意	55
3.5.1	制御器の逆システム	55
3.5.2	雑音の影響	55
3.5.3	入力項のペナルティ	56
3.6	さまざまな立場からの FRIT の解釈	58
3.6.1	制御器の立場からの評価関数 $J_F(\rho)$ の解釈	59
3.6.2	モデリングの立場からの評価関数 $J_F(\rho)$ の解釈	60

4. Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT)

4.1	VRFT の概要	62
4.2	VRFT の基本的な考え方	63
4.2.1	仮想参照信号の意味と役割	63

4.2.2	$J_V(\rho)$ の最小化の直感的な説明	64
4.2.3	$J_V(\rho)$ の最小化の意義	66
4.3	VRFT における最小二乗法	68
4.4	VRFT における最適性を保証するためのプレフィルタ	70
4.5	FRIT への最小二乗法アプローチとプレフィルタ	80
4.5.1	最小二乗法による FRIT	80
4.5.2	FRIT における最適性を保証するためのプレフィルタ	81
4.5.3	PI 制御器への FRIT の最小二乗法アプローチ	85
4.6	FRIT と VRFT の比較	91
4.6.1	完全な目標応答追従が実現される場合	91
4.6.2	ループ特性の比較	92
4.6.3	プレフィルタの比較	94

5. さまざまな制御系に対するデータ駆動制御

5.1	FRIT と VRFT の拡張の基本的な考え方	97
5.2	比例微分先行型 PID 制御に対する FRIT	99
5.3	カスケード制御に対する FRIT	105
5.4	内部モデル制御 (IMC) に対する FRIT とその応用	111
5.4.1	IMC に対する FRIT の適用	111
5.4.2	IMC におけるモデルと制御の同時更新	112
5.4.3	スミス補償器におけるモデルと制御器の同時更新	117
5.4.4	非最小位相系への拡張-最小位相部と非最小位相部の直列結合 表現	125
5.4.5	非最小位相系への拡張-安定な伝達関数の比の表現	128
5.5	二自由度制御系に対する FRIT	129
5.5.1	基本的な考え方	129

5.5.2 非最小位相系・むだ時間系への拡張	131
5.6 FRIT と VRFT を併用した二自由度制御器の更新	137

6. 現代制御におけるデータ駆動制御

6.1 状態フィードバックによるレギュレーション問題	143
6.1.1 考える問題	143
6.1.2 基本的な考え方	146
6.1.3 評価関数の意味	148
6.1.4 最小二乗法による求解	150
6.2 状態フィードバックによる積分型サーボ系	156
6.2.1 積分型サーボ系の構成	157
6.2.2 考える問題	158
6.2.3 制御器周りの擬似参照信号を構成するアプローチ	159
6.2.4 最小二乗法による計算	161
6.3 オブザーバを併合した積分型サーボ系	164
6.3.1 考える問題	165
6.3.2 FRIT によるアプローチ	170
6.3.3 FRIT によるオブザーバに内包されたモデルの改善	171

7. データ駆動予測とその応用

7.1 データ駆動予測	176
7.1.1 なぜデータ駆動予測が必要か	176
7.1.2 考える問題	177
7.2 FRIT を用いたデータ駆動予測	178
7.3 状態フィードバック制御系に対するデータ駆動予測	184

7.4 データ駆動予測による目標応答更新	189
7.4.1 考える問題	189
7.4.2 データ駆動制御とデータ駆動予測による入力予測	192
7.4.3 入力制約を考慮した目標応答の更新	193
7.5 データ駆動予測による一回の実験データのみで可能な IFT	200

8. Estimated Response Iterative Tuning (ERIT)

8.1 二自由度制御系のデータ駆動予測	207
8.2 ERITの考え方	211
8.2.1 予測応答と目標応答の差の最小化	211
8.2.2 ERIT の評価関数の考察	214
8.2.3 ERIT と二自由度制御系に対する FRIT との比較	215
8.2.4 いくつかの拡張	215
8.3 目標応答更新を伴う ERIT	218

付 録	224
-----	-----

A.1 本書で必要とする数学的基礎	224
A.2 本書中に出てきた証明, およびいくつかの補足	238

引用・参考文献	248
---------	-----

索 引	256
-----	-----

第 1 章

データ駆動制御とは

1.1 入口としての例題

本書の目的と内容を最初に把握するために、まず簡単な実験例を示す。

例 1.1 図 1.1 に示すようなサーボモータの角度制御を考える。実験装置は Quanser 製のロータリーサーボモータ^{†1}であり、入力にはモータへの駆動電圧、出力はロータの角度である。これらは、センサからの角度出力をコントローラに読み込み、それに応じて適切な制御法で入力電圧を発生させる。ここでの制御はよく知られた PID 制御を採用することにする^{†2}。制御の目的は、ステップ応答を、時定数が 0.1s の 1 次遅れ系の応答に追従さ



図 1.1 ロータリーサーボモータ実験装置

^{†1} 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

^{†2} PID 制御については、式 (1.3) を参照。

せることとする。

まず、適当な PID 制御（比例ゲイン 5、積分ゲイン 20、微分ゲイン 0.01）による実験結果を図 1.2 (a) に示す。この図を見ると、安定に動作しているものの、オーバーシュートなどが起きて点線で示す目標とする応答ともずれており、よい応答とはいえない。つぎに、本書で説明するデータ駆動制御の方法に基づき制御パラメータの更新を行った得たパラメータ（比例ゲイン 5.9015、積分ゲイン 0.2970、微分ゲイン 0.1685）を実装した結果を図 (b) に示す。

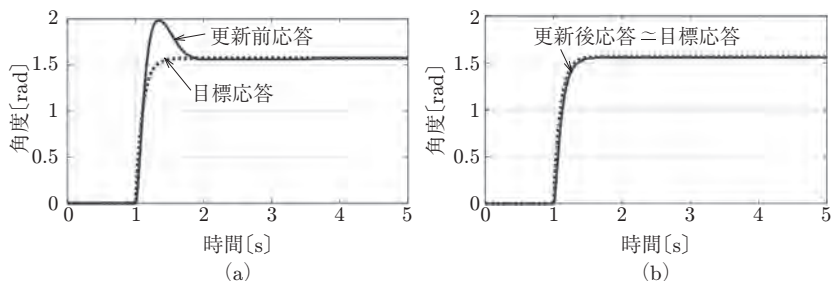


図 1.2 サーボモータの制御実験（各図の点線は目標応答）

図 (b) に示したように、目標応答へもきちんと追従しており良好な応答といえる。ここで、図 (a) から図 (b) への性能の向上は、モデルを用いて制御器を設計したのではなく、モデルに基づいたシミュレーションなどを経て更新したわけでもない。データだけ（図で示した出力としての角度データ、および図には示していないが入力電圧）を直接用いて、あるオフライン最適化を施すことにより、更新されたゲインを実装した結果である。

簡単な例ではあるが、この例で示したように「なぜデータだけを直接用いてこのように制御性能を更新、または設計できるのか？」そしてそれができるのであれば、「どのようにしてデータを直接用いて制御器をつくる、または更新すればよいのか？」に関する基礎的な方法論を示すこと、これが本書のメインテーマである。

次節以降では、まずこのようなことの背景から説明していくことにしよう。

1.2 なぜデータを直接用いる制御が必要か

モノやコトなどの動きをこちらの意のままに動かす「制御」という考え方は、家電製品、自動車、航空機、船舶などの日常生活になくはならない装置や乗り物から、鉄鋼や化学などの工場で稼働する設備、さらに電力や通信ネットワークなど社会を支える基盤インフラに至るまで、便利で快適な生活と安心・安全で豊かな社会を支えるための必要不可欠な科学技術である。さらに、近年では工学の分野以外でも、医療、経済、生物などにおいて制御の考え方が本質的に関わるようになってきており、今後もさまざまな分野での発展が期待される学問である^{2),3)}。

このように制御が活躍できる分野は非常に多岐にわたるが、どのような分野にせよ、目的に応じた適切な制御をするためには、制御を行う相手、すなわち制御対象のことを目的に応じて適切に知る必要がある。ここで扱う制御対象は「動き」（ダイナミクス）をもつ場合がほとんどである。その動きの法則を表すために、伝達関数 $G(s)$ を用いることでシステムの入力のラプラス変換 $U(s)$ と出力のラプラス変換 $Y(s)$ の関係を表した

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (1.1)$$

や、入力 u と出力 y の間に状態変数 x を導入し、適切な定数行列 A, B, C を用いてこれらの関係を一階の行列微分方程式で表した状態方程式

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1.2)$$

が、実世界の現象と机上の制御の理論をつなぐ架け橋として非常に重要な役割を演じている。同様に、これらをコンピュータでのデジタル的な信号処理を陽に意識した形で実現しようとするれば、式(1.1)と式(1.2)を離散時間で表現した数式モデルも重要な位置づけにある。そして、これらの数式モデルを制御目

的に合うように構築し、そのモデルに基づき適切な制御器を設計するアプローチが制御目的を達成するためには合理的であるといえる[†]。

ところで、制御のための理想的な数式モデルを得るためには、モデリングという重要な手順を必要とする。そのモデリングには、机上における物理法則等の数式操作によって行う第一原理モデリングから、実際の対象に信号を引加することで得る応答から数式を作成するブラックボックスモデリングまで、対象の不確かさの度合いに応じてさまざまなレベルで考えられる。ただ、実際には、前者の第一原理モデリングのような理想的な状況でモデルが得られることは稀であり、通常は後者のような、実験により数式モデルを得る、いわゆるシステム同定^{8),9)}を行うことが一般的である(図1.3)。

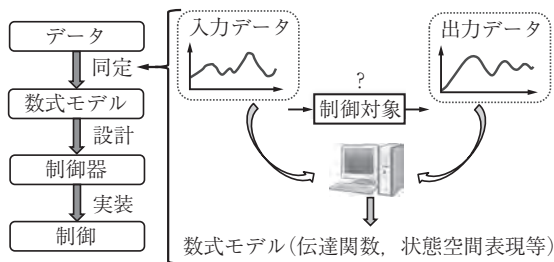


図 1.3 モデルベース制御の手順 (左) とシステム同定 (右)

そのシステム同定のための実験において、制御目的に応じた十分な周波数成分を含む信号、例えば M 系列 (図 1.4 参照) のような信号を制御対象に印加して対象の特性を励起することで、入出力関係を表現する数式モデルを構築することが望ましい。しかしながら、装置や生産ラインの安全性の観点から、そのような信号を用いて対象を励振させることが難しい状況も多く存在する。また、理想的なモデリングのための実験には、モデリングのための入力的设计や、さまざまな検討過程で必要とされるモデルの精度向上のための実験など、十分な時間の確保ができることが望ましい。一方で、納期や生産スケジュールの観

[†] 伝達関数をベースとした古典制御の基礎については文献 4), 5) が参考になる。状態空間をベースとした現代制御の基礎については文献 6), 7) が参考になる。

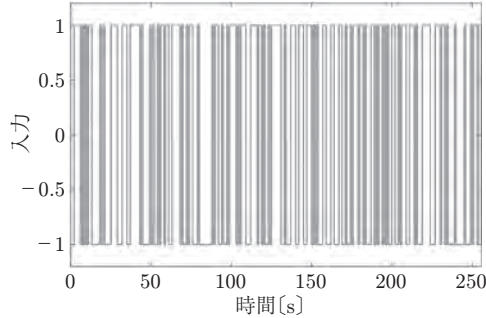


図 1.4 M 系列信号の例

点から、モデリングのための理想的な実験に多くの時間を割けない状況も存在する。

これらのように、モデリングのための理想的な実験の遂行が難しい状況において、操業データ・実験データを直接用いることで、なるべく短時間で所望の制御器を設計または更新することができれば、実用的な一つの制御の方法として有用であると期待できる。そこで、図 1.5 に示すように、制御対象の振舞や計測されたデータを直接用いることで、実現したい制御目標を達成するように、制御器を設計する・調整する、というアプローチが提案され、近年、活発に研究や技術開発が行われている。このような、データを直接用いる制御や制御器設計・調整のアプローチが、データ駆動制御^{10)~14)}と称されており、本書で扱

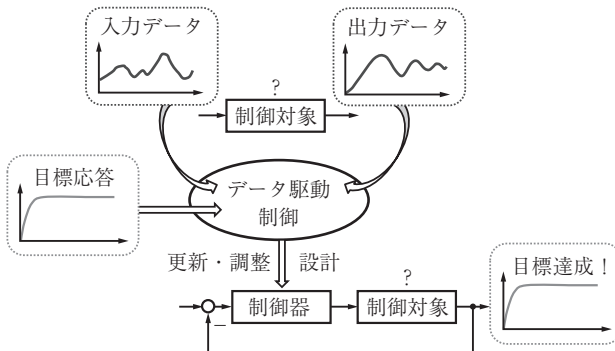


図 1.5 データ駆動制御のコンセプト

索引

	【あ】		【の】
安定性	16	自走式倒立移動二輪システム	
		153	ノミナルモデル
		自動運転	145
		102	
		シフトオペレータ	
		12	
		状態フィードバック	
		143	
		状態方程式	
		3	
		【す】	【は】
		数式モデル	パーセバルの定理
		3	44
		スミス補償器	
		117	
		【せ】	【ひ】
		積分型サーボ系	非最小位相系
		157	125
		積分ゲイン	非反証制御
		9	39
		全状態オブザーバ	微分ゲイン
		165	9
			ビハイビアアプローチ
			39
			比例ゲイン
			9
			比例微分先行型 PID
			99
			【ふ】
			不安定零点
			15
			フィードフォワード制御器
			129
			プレフィルタ
			62
			分離定理
			168
			【ほ】
			ボイラプラント
			52
			【ま】
			マニュアル操作
			102
			【む】
			むだ時間
			117
			【も】
			目標応答
			13
			目標応答更新
			189

	【い】		
位相余裕	138		
インナーアウター分解	126		
		【お】	
		オブザーバ	143
		【か】	
ガウス・ニュートン法	26		
カスケード制御	105		
仮想参照信号	63		
可調整パラメータ	12		
感度関数	13		
		【き】	
擬似外生信号	146		
擬似参照信号	37		
近似微分	9		
		【け】	
ゲイン余裕	138		
限界感度法	9		
		【さ】	
最急降下法	236		
最小二乗法	62, 228		
		【し】	
ジューグラー・ニコラス法	10		
システム同定	4		

	【せ】		
		相対的誤差	44
		【そ】	
		【た】	
		大域的最適化	96, 236
		ダイナミクス	3
		【て】	
		データ駆動制御	5
		データ駆動予測	176
		伝達関数	3
		【な】	
		内部モデル	60
		内部モデル制御	59, 111
		【に】	
		二自由度制御系	129

目標応答追従問題	11			連続時間	20
目標応答伝達関数	13	【り】			
モデリング	4	離散時間	20	【ろ】	
【ら】		【れ】		ロバスト制御	9
ラゲール関数	127	レギュレーション問題	143		



【B】		【F】		【P】	
BFGS 法	234	FRIT	36	PID 制御	7
【C】		【I】		【T】	
CMAES	236	IFT	25	Toeplitz 行列	239
【E】		IMC	60	【V】	
ERIT	207	【L】		VRFT	62
E-FRIT	57	LM 法	235		

—— 著者略歴 ——

1992年 長岡技術科学大学工学部卒業
1994年 長岡技術科学大学大学院工学研究科修了（創造設計工学専攻）
1994年 石川島システムテクノロジー株式会社勤務
1999年 大阪大学大学院基礎工学研究科後期博士課程（物理系専攻）単位取得退学
1999年 大阪大学助手
2005年 博士（工学）（大阪大学）
2007年 大阪大学助教
2009年 金沢大学准教授
2015年 電気通信大学教授
現在に至る

データ駆動制御入門

Introduction to Data-Driven Control

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2024

2024年1月10日 初版第1刷発行

検印省略

編者 公益社団法人
計測自動制御学会
著者 かねこ おきむ
金子 修
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
製本所 有限会社 愛千製本所

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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03387-8 C3353 Printed in Japan

(新宅)



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います。
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いません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。