

計測・制御
セレクション
シリーズ
2

計測自動制御学会 編

外乱オブザーバ

島田 明 著

コロナ社

刊行のことは

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

ii 刊 行 の こ と ば

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

物を動かす際に、摩擦や重力、外力が物の動きを妨げることがある。これらの外乱の値を推定できれば、制御系の安定性や追従性を向上させたり、情報処理などに利用できるだろう。外乱の推定方法の1つに「外乱オブザーバ」(disturbance observer; DOB)がある。

本来、「オブザーバ」は、会議の傍聴者を指すことばとして知られているが、制御工学の世界では「状態観測器」と訳され、状態変数を推定する機能を意味する。そのオブザーバは、1964年に当時スタンフォード大学の博士課程の学生であった D. G. Luenberger によって提案された^{1), 2)†}。

「外乱オブザーバ」は外乱を推定するオブザーバである。大石潔・大西公平らによる論文^{3), 4)}や解説^{5), 6)}が発表されて以来、広く注目されて、世界中の研究者・技術者たちにより研究や応用が続けられてきた^{7)~10)}。

一方、外乱を未知入力と解釈して推定するオブザーバが、少し前から報告されている。Meditch らによる論文¹¹⁾では、定常未知入力を推定する 0-Observer と k 次多項式で表される未知入力を推定する k -Observer の設計法が、設計可能な条件とともに報告されている。これらのオブザーバは、未知入力 $u(t)$ をもともとの状態変数 $x(t)$ に加えて、 $\bar{x} = [x^T(t), u^T(t)]^T$ と定義した上で、可観測性が成り立てば、一般的なオブザーバ理論に従って $x(t)$ も $u(t)$ も推定できるとしており、今日の状態空間表現での外乱オブザーバ設計法と変わらない。そのほかに、多くの論文^{12)~16)}でさまざまな未知入力推定法が報告されている。しかし、「外乱」に深く着目して「外乱オブザーバ」という名称や伝達関数によるわかりやすい表現を考案し、外乱を打ち消すように外乱推定値をフィードバックすることでほぼ完全な外乱抑制制御ができることや、パラメータ変動を抑え

† 肩付き数字は巻末の引用・参考文献を表す。

られること、加速度を自由に制御できることなどを含めた総合的な「外乱オブザーバ技術」は上記論文^{3),4)} や解説^{5),6)} から始まったと考えられる。

本書は、「外乱オブザーバ」の設計プロセスや応用方法、さまざまな性質を体系的に記すことにより、制御を学び、研究する多くの人々に役立ててもらうことを目的としている。読者として想定するのは、制御工学、モーションコントロールに関する理論や技術を学んでいる学生、社会人であり、古典制御理論の基礎をある程度学んだ人、そして現代制御理論についてもある程度知っている人々である。

執筆内容は、学部や大学院の授業で試用したほか、モーションコントロール研究室（島田研究室）のメンバーたち、特に松尾健太君、徳重一樹君、高瀬勝充君、中島綾也君、木村優花さんたちに多くの指摘をしてもらい、完成させた。また、島田研究室に属して修士課程を経た後、慶應義塾大学の博士課程に進み、村上俊之教授のもとで研鑽を重ねている大平峻君にも、記述の不備の指摘や提案をもらった。また、速度の計測と推定技術の執筆に関して、埼玉大学の辻俊明准教授と大西研究室出身の永富宏之氏に、特にご協力をいただいた。

さて、本書は、計測自動制御学会で公募された計測・制御セレクションシリーズの一冊としてまとめたものである。会誌・出版委員会において本書の担当を務めていただいた東京都立大学の増田士朗教授のご支援・ご助力をいただきながら完成に至ったものであり、深く感謝する。また、併せて計測自動制御学会、コロナ社の皆様に感謝申し上げたい。

2021年8月

島田 明

目 次

1. はじめに

1.1 外乱オブザーバの種類と制御系設計	2
1.1.1 外乱オブザーバの種類	2
1.1.2 オブザーバおよび制御系設計の考え方	3
1.2 例の形式と MATLAB の利用	5
1.2.1 例の形式	5
1.2.2 MATLAB/Simulink の利用	6
1.3 本書の構成と読み方	6
1.3.1 本書の構成	6
1.3.2 本書の読み方	8

2. 外乱オブザーバの基本

2.1 外乱とは	10
2.2 外乱推定の仕組み	13
2.3 外乱除去制御と加速度制御系	14
2.3.1 外乱除去制御と加速度制御系の考え方	14
2.3.2 外乱の捉え方による外乱オブザーバの違い	16
2.3.3 基本的な制御系設計	18
2.4 反力推定オブザーバ	21
2.5 内部モデル原理と 2 自由度制御系	27
2.5.1 内部モデル原理	27

2.5.2	フィードフォワード制御	32
2.5.3	外乱オブザーバとフィードフォワードを併用する制御系	33
2.6	観測ノイズとモデル化誤差の影響	35
2.6.1	観測ノイズの影響	35
2.6.2	モデル化誤差の影響	37
2.7	実システムのモデリング	41
2.7.1	DC モータのトルク制御モデル	41
2.7.2	台車モデルと回転型モータの関係	43
2.8	ロバスト制御としての考え方	44

3. 既約分解を用いた安定化制御系と外乱オブザーバ

3.1	既約分解と安定化制御器の導出	47
3.1.1	既約分解のためのパラメータの導出	47
3.1.2	安定化制御器と自由パラメータ	53
3.1.3	$Q(s)$ を含んだ二重既約分解	55
3.2	外乱オブザーバとの関係	56
3.3	既約分解と 2 自由度制御系の構成	57

4. 状態空間表現での連続時間系外乱オブザーバ

4.1	連続時間系の同次元入力端外乱オブザーバ	61
4.1.1	連続時間系の同次元入力端外乱オブザーバの設計法	61
4.1.2	可制御性と状態フィードバック	71
4.1.3	連続時間系の同次元外乱オブザーバ併用サーボ系	71
4.2	連続時間系の同次元反力推定オブザーバ	75
4.3	連続時間系の同次元出力端外乱オブザーバ	78

4.4	同次元高次外乱オブザーバの設計	82
4.5	最小次元外乱オブザーバと伝達関数表現への変換	86
4.6	周期外乱オブザーバの設計	94
4.7	可観測性と非入出力端外乱の扱い	99
4.7.1	DC モータの数学モデル	99
4.7.2	DC モータの可観測性行列とランク	101
4.7.3	外乱推定の可観測性	103
4.7.4	非入出力端外乱オブザーバと制御	104

5. デジタル系の外乱オブザーバ

5.1	同次元デジタル外乱オブザーバ設計	107
5.2	分離定理の確認	115
5.3	最小次元デジタル外乱オブザーバと伝達関数表現	117
5.4	同次元高次デジタル外乱オブザーバの設計	127

6. 振動系の外乱オブザーバの設計と制御

6.1	2 慣性系のモデリング	131
6.2	伝達関数表現での振動抑制制御	134
6.3	2 慣性系の外乱オブザーバ設計と安定化制御	137
6.3.1	入力軸外乱 τ_{d1} を推定するオブザーバ	137
6.3.2	出力軸外乱 τ_{d2} を推定するオブザーバ	140
6.4	2 慣性系の外乱オブザーバ併用サーボ系	143
6.4.1	入力軸外乱 τ_{d1} を考慮した入力軸サーボ系	144
6.4.2	出力軸外乱 τ_{d2} を考慮した出力軸サーボ系	146

7. 通信外乱オブザーバ

7.1 スミス法の概要	149
7.2 通信外乱オブザーバ	150
7.3 外乱のもとでの通信外乱オブザーバ併用制御	154

8. マルチレート外乱オブザーバ

8.1 マルチレート系のモデリング	158
8.2 マルチレート外乱オブザーバ：方法 1	161
8.2.1 外乱オブザーバ設計	161
8.2.2 マルチレートオブザーバを用いた制御系設計	161
8.3 マルチレート外乱オブザーバ：方法 2	166

9. 外乱オブザーバ併用モデル予測制御

9.1 モデル予測制御	170
9.1.1 モデル予測制御の概要	170
9.1.2 MPC 設計のための定式化と目的関数の定義	172
9.2 制約の記述法	176
9.2.1 制御入力 $\hat{u}(k)$ に関する制約の扱い	176
9.2.2 制御量 $\hat{z}(k)$ に関する制約の扱い	178
9.2.3 制御入力の変化量 $\Delta\hat{u}(k)$ に関する制約の扱い	178
9.2.4 制御入力と制御量に関する制約の扱い	179
9.3 モデル予測制御系設計	179
9.4 外乱オブザーバ併用モデル予測制御系設計	183

10. 外乱推定カルマンフィルタ

10.1 外乱推定カルマンフィルタ設計	186
10.2 外乱推定定常カルマンフィルタ設計	197
10.3 外乱推定拡張カルマンフィルタ設計	201

11. 適応外乱オブザーバ

11.1 適応オブザーバの構造	209
11.2 適応外乱オブザーバのための可観測正準系の導出	210
11.3 状態変数フィルタの作成	212
11.4 Kreisselmeier 型適応オブザーバの設計	217

12. 速度の計測・推定法

12.1 速度計測の重要性	224
12.2 速度計測・速度推定手法	226
12.2.1 擬似微分	226
12.2.2 計数法・計時法	227
12.2.3 M/T 方式	230
12.2.4 同期計数法	231
12.2.5 瞬時速度オブザーバ	233

付 録	236
-----------	-----

A.1 数学的基礎	236
A.2 古典制御理論に基づく基本的な制御系	237

A.3	連続系の現代制御理論の基礎とオブザーバ	240
A.4	ドイルの記法と二重既約分解表現の確認	251
A.5	デジタル系の現代制御理論の基礎とオブザーバ	253
A.6	最適計画法の表現と意味	258
A.7	描画プログラムの例	260
	引用・参考文献	263
	索引	269

第 1 章

はじめに

外乱オブザーバ (disturbance observer) はモーションコントロールの代名詞ともいわれ、世界中で高い評価を得てきた^{3)~6)}。外乱には、制御対象の入力に加わる場合、出力に加わる場合、さらには内部状態のどこかに加わる場合などがあり、また、外乱のみを推定するタイプのオブザーバと、位置や速度などからなる状態変数も併せて推定するタイプのオブザーバがある。後者を特に強調したい場合[†]を除き、一般に、外乱オブザーバと総称される。

さて、どんなに優れた制御法も推定法も万能ではない。新しい制御法が提案されると過大に期待され、ブームとなることがある。 H_∞ 制御、スライディングモード制御、モデル予測制御などである。しかしながら、しばらくブームが続くと、長所ばかりでなく短所も見えてくる。利用の仕方にはコツや熟練が必要であることや、制御対象との相性などがわかってくるものである。外乱オブザーバもけっして例外ではなく、その得失を理解して上手に使いこなすことが重要である。

本書は、古典制御理論の基礎をある程度学んだ人、そして現代制御理論についてもある程度知っている人を想定している。十分な知識を持っていない読者のために、最小限の解説を巻末の付録に示しておく。

[†] 速度を併せて推定することから「外乱・速度推定オブザーバ」^{17), 18)}、反力に特化して推定することから「反力推定オブザーバ」¹⁹⁾と称した例などがある。

1.1 外乱オブザーバの種類と制御系設計

1.1.1 外乱オブザーバの種類

外乱オブザーバを設計するために、本書では、表 1.1 のように 8 種類の外乱オブザーバを紹介する[†]。

表 1.1 外乱オブザーバの設計形式

系	DOB の設計形式	本書で解説するおもな機能
連続系	(1) 伝達関数	外乱や反力など特定の物理量のみを推定
	(2) 同一次元オブザーバ	外乱を含む全状態変数を推定
	(3) 最小次元オブザーバ	観測出力を除き、外乱と全状態変数を推定
	(4) 適応オブザーバ	パラメータと状態変数、外乱を同時推定
デジタル系	(5) 伝達関数	外乱や反力など特定の物理量のみを推定
	(6) 同一次元オブザーバ	外乱を含む全状態変数を推定
	(7) 最小次元オブザーバ	観測出力を除き、外乱と全状態変数を推定
	(8) 外乱推定カルマンフィルタ	ノイズを考慮した全状態変数を推定

多くの文献で目にする外乱オブザーバは連続系の伝達関数で表現され、外乱のみを推定する機能に特化していることがあり、それが表 1.1 の (1) と (5) に相当する。構成がシンプルでわかりやすく、実装も容易なためと思われる。一方、一般的なオブザーバ理論を用いると、外乱以外の状態変数、例えば速度や電流など、制御対象のもともとの状態変数も同時に推定できる。それが表の (2)～(4) や (6)～(8) である。さまざまな物理的な推定値を制御系設計の際に有効に使いたい場合には、同一次元オブザーバの設計法を用いて外乱オブザーバを設計するとよく、観測出力については推定する必要がないことを重視すれば、最小次元オブザーバの設計法を用いるとよい。

伝達関数で表現される外乱オブザーバは、原理的には、表の (3), (7) の最小次元オブザーバでの設計プロセスを経た後に、外乱推定機能だけを抜き出して

[†] 表 1.1 の (8) カルマンフィルタはオブザーバではないが、外乱を推定する目的で設計することからこの表に含める。また、カルマンフィルタも適応オブザーバとともに連続系とデジタル系のいずれの設計も可能だが、本書では上記に留める。

伝達関数の形式で表現し直したものと等価である。しかしながら、初めから伝達関数の形で示されることが多い。

連続系，デジタル系の違いは，連続系制御理論，デジタル系制御理論のいずれを用いて設計するかの違いである。制御周期の長短の影響を考慮する必要がない場合は，物理的な意味を把握しやすい連続系で設計すればよいであろうし，制御周期を考慮する必要がある，デジタルコンピュータへの実装プログラム作成を考慮する場合はデジタル系で設計するほうが望ましい。どの設計法がベストかは一概には決められず，設計者の判断に委ねられる。

外乱オブザーバによって推定される外乱推定値 (disturbance estimate)，あるいは状態推定値 (state estimate) をなにに使うのかを明確にすることは重要である。センサの代わり，つまり計測に代わる道具として使う場合と，推定値をフィードバックして外乱抑制制御のために使う，あるいは制御対象を見かけ上ノミナル化 (公称モデル化) するために使う場合などがある。設計者は外乱オブザーバの利用目的によって適した設計形式を選ぶとよい。

1.1.2 オブザーバおよび制御系設計の考え方

外乱オブザーバにおける外乱推定値 $\hat{d}(t)$ はしばしば，外乱を打ち消す符号でフィードバック (帰還) される[†]。図 1.1 に，外乱オブザーバを利用する基本的な制御系の構造を示す。図中，「外乱オブザーバ」が外乱推定値 \hat{d} を出力し，外乱 d を打ち消すように正帰還している。その結果，点線部の外から見ると外乱のない制御対象に見え，見かけ上の制御入力が \bar{u} となる。制御入力 u と \bar{u} は，直動機械であれば力 f [N]，回転機械ならばトルク τ [Nm]，電気回路の電圧入力ならば V [V] に対応する。出力 y も速度 v [m/s]，回転速度 ω [rad/s] や，位置 x [m]，回転角度 θ [rad] などが選ばれる。

本書ではおもに直動機械を例とするので，その前提で説明すると，制御対象

[†] 外乱が負符号で入力される場合は打ち消すために正帰還 (positive feedback) をし，正符号で入力される場合は負帰還 (negative feedback) をするが，外乱推定値の利用の仕方はさまざまであり，帰還は必ずしも必要ではない。

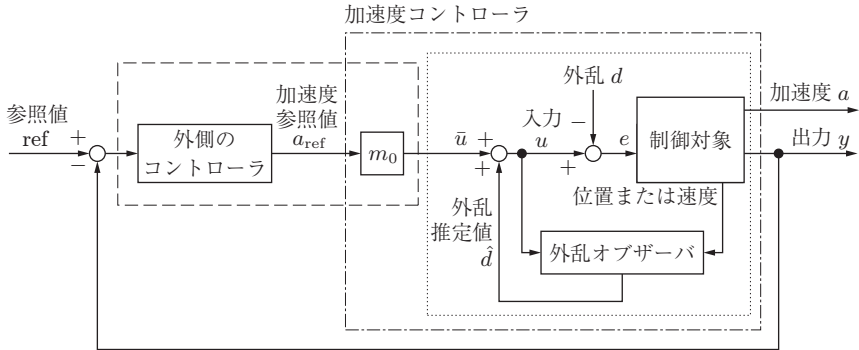


図 1.1 加速度制御に基づく制御系の基本構造

と外乱オブザーバの周りの点線で囲んだ部分は、外乱が推定値で打ち消された状態の「力で動く機械」を表している。この図における入力 u と \bar{u} は、具体的には力 f と \bar{f} である。

さて、外乱オブザーバは、**加速度制御**と呼ばれる制御法の実現を意図して用いられることも多い。点線で囲われた部分の前に質量の公称値 (=ノミナル値) m_0^\dagger を直列に接続し、見かけ上の制御入力を加速度参照値 a_{ref} と考える。実際の加速度を加速度参照値に一致させられるならば、制御対象は一点鎖線部分と見なせ、外側に、位置・速度コントローラや力コントローラを実装した、シンプルな制御系設計が可能になる。「機械を加速度で動かす」考え方により制御系内側に加速度コントローラを構成し、外側に用途に応じたコントローラを構成するのである。なお、加速度制御の考え方は、動力学系の問題を内部に封じ込め、以降は運動学モデルを制御対象とする考え方ともいえるが、摩擦などがなくなったわけではないので、機械の構造や力学上の本質的なことを見落とさないように注意が必要である。

「機械は力で動く (回転機械はトルクで動く)」という力学の基本を踏まえて設計する場合は、制御入力を、 a_{ref} ではなく、 u や \bar{u} (=直動系なら力 f 、回転系ならトルク τ) と考えればよく、一般的な動力学モデルに沿った制御系設計

[†] 本書では、基本的に制御対象の質量を m で表すが、特に公称値であることを強調したいときに限り、 m_0 と表記する。

を行う。その場合、破線で表す部分を外側のコントローラとして設計するので、 m_0 は必要ない。このほか、外乱推定値 \hat{d} をフィードバック（帰還）しない選択肢もある。例えば、状態空間モデルに基づいて同一次元外乱オブザーバを設計する場合や、外乱推定が目的ではなく、外乱の影響を考慮した状態変数 $x(t)$ の高精度な推定を目的とする場合などである。

本書では、さまざまな考え方を用いて、外乱推定法と各種制御法を紹介する。また、制御対象が多入力多出力系（multi input multi output system; **MIMO** 系と略される）である場合、非線形性を考慮すべき場合、不安定な場合、ノイズの影響をより検討したい場合など、さまざまな条件や環境のもとでは、古典制御、現代制御理論、その他のロバスト制御理論を臨機応変に活かすことで、外乱オブザーバの有用性をさらに広げることが期待される[†]。

1.2 例の形式と MATLAB の利用

1.2.1 例の形式

外乱オブザーバを扱う論文を検索すると、モータ制御を基本とした回転系の例が圧倒的に多いが、本書で紹介する例の多くは、**1 入力 1 出力系**（single input single output system; **SISO** 系）の台車をイメージした直動機械を台車モデルとして用いる。基礎理論を理解するために、単純でわかりやすいと考えるからである。回転系での設計が必要な読者は、適宜、直動モデルを回転モデルに変換してほしい。簡単なばねマスダンパ系を例にとると、位置 x 、速度 v 、力 f 、外力 f_{ex} 、直動系の質量 m [kg]、粘性摩擦係数 c [N/(m/s)]、弾性係数 k [N/m] として、次式を得るとする。

$$m\dot{v}(t) + cv(t) + kx(t) = f(t) - f_{\text{ex}}(t) \quad (1.1)$$

これに対して、回転角度 θ 、回転速度 ω 、トルク τ 、外乱トルク τ_{ex} 、直動系

[†] 本書で紹介する例の多くは 1 入力 1 出力系に限る。また、「低次元の対象しか扱っていない」との指摘も出るかもしれないが、わかりやすさを優先した結果である。

索引

【う】	
運動学モデル	4
【お】	
オブザーバ	iii
【か】	
外乱	10
外乱推定値	3, 14, 68
外乱抑制制御	3, 42
可観測	45, 99, 108, 256
可観測性	7, 100, 101, 211, 242
可観測正準系	210
可観測正準形式	217
拡大系	61, 63, 95, 108, 115, 118, 212
拡張カルマンフィルタ	201
可制御	45, 71, 255
可制御性	242
仮想仕事の原理	43
加速度制御	4, 17
加速度制御系	16, 18
可到達	255
カルマンフィルタ	2, 7, 186
観測行列	144
観測ノイズ	35, 186, 189
感度関数	28
【き】	
擬似微分	195, 226
既約	47
既約分解	6, 45-47

共振周波数	131
共振比制御	136
共分散行列	194
行列指数関数	236
極	241
極配置法	46, 78, 96, 138, 141, 162, 244
極零相殺	34
極零配置	37
【く】	
クーロン摩擦	11, 16, 25
【け】	
計時法	227
計数法	227
現在状態オブザーバ	166
現代制御理論	1, 14, 45, 61, 240
【こ】	
高次外乱	82
高次外乱オブザーバ	7
公称値	4, 13, 39, 234
後退差分	226
古典制御理論	1, 45
ゴビナスの設計法	246, 248
【さ】	
最終値の定理	29, 56, 239
最小次元オブザーバ	2, 86, 246
最小次元外乱オブザーバ	7, 14, 86

最小次元デジタルオブザーバ	117
最小2乗誤差推定値	188
最適計画法	170, 258
最適制御	45, 244
最適レギュレータ	138
サーボ系	27, 191, 250
サーボ系設計	146, 240
サンプリング周期	233
【し】	
次差数	57, 133
システムノイズ	186, 189
質量変化	39
周期外乱	94
周期外乱オブザーバ	7
周波数領域	14
出力端外乱	10, 78
出力端外乱オブザーバ	10
出力方程式	61, 107, 240
瞬時速度オブザーバ	233
状態フィードバック	243
状態変数	2, 240
状態変数フィルタ	209, 212, 214
状態方程式	61, 107, 240
初期値の定理	239
振動系	7, 131
振動抑制	136
【す】	
ステップ状参照値	28
スミス法	149
スモールゲイン定理	45

スライディングモード制御	1, 45	デジタルローパス		反力	21
		フィルタ	119	反力推定オブザーバ	12, 21, 75
【せ】		定常カルマンフィルタ	197	【ひ】	
正帰還	3, 21, 23, 30, 56, 68, 140, 208	適応オブザーバ	209	非最小実現	212, 214
正規性白色ノイズ	186	適応外乱オブザーバ	7	非入出力端外乱	10, 104
制御周期	3, 107, 158, 182, 253	適応制御	209	非入出力端外乱オブザーバ	11
制御ホライズン	172	伝達関数	2, 47, 88, 119, 125	【ふ】	
正弦波状外乱	94	電流フィードバック	42	フィードフォワード制御	32
静止摩擦	21, 25	【と】		フォークトモデル	26
正定行列	236	ドイツの記法	251, 252	不可制御	115
制約条件	170, 176, 258	同一次元オブザーバ	2, 245, 246	不変零点	242
前進差分	110, 182	同一次元外乱オブザーバ	7, 62, 64	プロパー	47
【そ】		同期計数法	231	分離定理	34, 116
双対性	243	特性方程式	237	【へ】	
相補感度関数	28	トルク制御	42	バズー等式	51, 55
速度計測	7, 224	【な】		【ほ】	
速度推定法	224	内部安定性	45, 54	ボード線図	37, 39
【た】		内部状態	1	【ま】	
台車モデル	5, 11, 237	内部モデル	256	マクスウェルモデル	26
多入力多出力系	5	内部モデル原理	6, 27	マッチング条件	105, 142
単純適応制御	45	【に】		窓パラメータ	172
弾性係数	5	二重既約分解	51, 53	マルチレート	
【ち】		入力多重化	158	外乱オブザーバ	161
力コントローラ	4	入力端外乱	10, 61	マルチレート制御系	7, 158
力センサレス制御	21	入力端外乱オブザーバ	10	マルチレートホールド	162, 165
直動機械	5	【ね】		【み】	
【つ】		粘性摩擦	11, 16, 25, 37	未知パラメータ	209
通信外乱オブザーバ	149	粘性摩擦係数	5	【む】	
通信遅延	7, 149	【の】		むだ時間遅れ	149
【て】		ノイズ	186	むだ時間外乱	7
デジタル外乱オブザーバ	108	ノミナル化	3, 39	【も】	
デジタル系	107, 118	ノミナル値	4	目的関数	176, 179, 259
デジタル系制御理論	3, 253	【は】			
		ハプティクス	8, 26		
		ハンチング現象	25		

モーションコントロール	1	ランク	80, 101, 103, 237
モデル化誤差	28, 37	ランプ状外乱	31, 82
モデル予測制御	1, 7, 170		
【ゆ】		【り】	
ユーラパラメータ	53, 54	リフティング	161
		量子化誤差	197
【よ】		【れ】	
予測ホライズン	172	零点	241
		レオロジーモデル	26
【ら】		連続系制御理論	3
ラグランジュの未定乗数	26		

【ろ】

ロータリーエンコーダ	197, 224, 227
ロバスト制御	44
ロバスト制御理論	7, 45
ロバスト適応制御	45
ローパスフィルタ	21, 226

【D】

DC モータ	41, 99
--------	--------

【F】

fmincon 関数	170, 259
------------	----------

【H】

H_∞ 制御	1, 45
---------------	-------

【L】

LQ サーボ系	73
LQ 制御	46, 121, 244
LQ 制御法	96, 162

【M】

MATLAB	6
MIMO 系	5, 12
MPC	7, 170
M/T 方式	230

【P】

PI 速度制御	237
PI 速度制御系	18, 39

【R】

RFOB	21
RH_∞	47

【S】

Simulink	6
SISO 系	5, 12

【数字】

0 次ホールド	107, 158
1 次外乱	82, 128
1 入力 1 出力系	5
2 慣性系	131, 134
2 次外乱	82, 128
2 次外乱オブザーバ	128
2 次計画問題	176, 179
2 自由度制御系	6, 28, 32, 57

—— 著者略歴 ——

島田 明 (しまだ あきら)

1983年 電気通信大学電気通信学部電子工学科卒業
1983年 株式会社第二精工舎 (現・セイコーインスツル株式会社)
1994年 千葉大学非常勤講師 (兼務) (~1998年)
1996年 博士 (工学) (慶應義塾大学)
1999年 千葉大学客員教授 (兼務) (~2002年)
2001年 職業能力開発総合大学校准教授
2009年 芝浦工業大学教授
現在に至る

外乱オブザーバ

Disturbance Observer

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2021

2021年10月13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 島田 明
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 978-4-339-03382-3 C3353 Printed in Japan

(新宅) G



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。