

システム制御工学シリーズ 10

適 応 制 御

工学博士 宮里 義彦 著

コ ロ ナ 社

システム制御工学シリーズ編集委員会

編集委員長 池田 雅夫 (大阪大学・工学博士)
編集委員 足立 修一 (慶應義塾大学・工学博士)
(五十音順) 梶原 宏之 (九州大学・工学博士)
杉江 俊治 (京都大学・工学博士)
藤田 政之 (東京工業大学・工学博士)

(2007年1月現在)

□□□□□□□□□ 刊行のことは □□□□□□□□□

わが国において、制御工学が学問として形を現してから、50年近くが経過した。その間、産業界でその有用性が証明されるとともに、学界においてはつねに新たな理論の開発がなされてきた。その意味で、すでに成熟期に入っていると同時に、まだ発展期でもある。

これまで、制御工学は、すべての製造業において、製品の精度の改善や高性能化、製造プロセスにおける生産性の向上などのために大きな貢献をしてきた。また、航空機、自動車、列車、船舶などの高速化と安全性の向上および省エネルギーのためにも不可欠であった。最近、高層ビルや巨大橋梁きょうりょうの建設にも大きな役割を果たしている。将来は、地球温暖化の防止や有害物質の排出規制などの環境問題の解決にも、制御工学はなくてはならないものになるであろう。今後、制御工学は工学のより多くの分野に、いっそう浸透していくと予想される。

このような時代背景から、制御工学はその専門の技術者だけでなく、専門を問わず多くの技術者が習得すべき学問・技術へと広がりつつある。制御工学、特にその中心をなすシステム制御理論は難解であるという声をよく耳にするが、制御工学が広まるためには、非専門のひとにとっても理解しやすく書かれた教科書が必要である。この考えに基づき企画されたのが、本「システム制御工学シリーズ」である。

本シリーズは、レベル0(第1巻)、レベル1(第2～7巻)、レベル2(第8巻以降)の三つのレベルで構成されている。読者対象としては、大学の場合、レベル0は1,2年生程度、レベル1は2,3年生程度、レベル2は制御工学を専門の一つとする学科では3年生から大学院生、制御工学を主要な専門としない学科では4年生から大学院生を想定している。レベル0は、特別な予備知識なしに、制御工学とはなにかが理解できることを意図している。レベル1は、少

し数学的予備知識を必要とし、システム制御理論の基礎の習熟を意図している。レベル2は少し高度な制御理論や各種の制御対象に応じた制御法を述べるもので、専門書的色彩も含んでいるが、平易な説明に努めている。

1990年代におけるコンピュータ環境の大きな変化、すなわちハードウェアの高速化とソフトウェアの使いやすさは、制御工学の世界にも大きな影響を与えた。だれもが容易に高度な理論を実際に用いることができるようになった。そして、数学の解析的な側面が強かったシステム制御理論が、最近では数値計算を強く意識するようになり、性格を変えつつある。本シリーズは、そのような傾向も反映するように、現在、第一線で活躍されており、今後も発展が期待される方々に執筆を依頼した。その方々の新しい感性で書かれた教科書が制御工学へのニーズに応え、制御工学のよりいっそうの社会的貢献に寄与できれば、幸いである。

1998年12月

編集委員長 池 田 雅 夫

□□□□□□□□□ ま え が き □□□□□□□□□

適応制御とは、生物が環境に対して適応する機能を制御器の設計に応用する技術のことである。具体的には、制御対象の未知パラメータや環境の変化に伴う変動パラメータについて、制御系全体の性能がつねに良好な状態に保たれるように、制御装置の特性を運転中に自動的に調整するのが、適応制御の考え方である。これに対して、ロバスト制御では、不確定性の範囲を特定して、原則として時不変の制御装置で一定の制御仕様を満足させようとする。適応制御はロバスト制御とは大きく異なる方針をとり、時変制御器を用いて積極的に制御対象の不確定性に対処する制御手法であり、さまざまな変遷を経ながら現在に至るまで研究が続けられている。

本書は、この不確定性に対する能動的制御法としての適応制御について、基礎事項を中心にまとめたものである。特に、これまで多く研究されてきたモデル規範形適応制御系に関して、理想的な条件下での安定論の確立から、現実的な不確定性のもとのロバスト適応制御、離散時間形式の適応制御、非線形制御とも関連の深いバックステッピング法、逆最適性に基づく適応制御系の設計と解析に至るまでの一連の話題について、わかりやすく説明することに留意して執筆した。

本書の構成は以下のとおりである。まず1章では、適応制御の概要を述べるとともに、MIT方式に基づいてモデル規範形適応制御を簡単な制御対象に適用する方法を説明する。ついで2章では、安定解析に必要な最低限の基礎事項に触れた後に、簡単な制御対象について、安定論に基づいてモデル規範形適応制御系を構成する方法を紹介し、モデル規範形適応制御の基礎を概観する。これに続く3章では、一般的な線形の制御対象に対してモデル規範形適応制御系を構成する方法について説明を行い、直接法と間接法により安定性の解析を行う。

4章では、3章で述べた理想的な条件に、未知の外乱やモデル化できない不確定要素が加わったときの、ロバスト適応制御の基礎事項について説明する。特にパラメータの発散を抑える適応則の修正方法を紹介し、不確定要素が存在しても有界性が保証される適応制御系の構成法について述べる。続く5章では、それまでの議論を離散時間形式に拡張して、確定的な問題設定としてのモデル規範形適応制御と、確率的な問題設定としてのセルフチューニングコントロールの統一的な説明を与える。6章と7章は、5章までの基礎的な事項に対して先端的な成果を紹介する。まず6章では、相対次数の大小にかかわらず、つねに出力誤差に基づいて適応制御系を構成するバックステッピング法について述べ、線形系の適応制御問題だけでなく、一部の非線形系の制御にもバックステッピング法を適用できることを示す。7章では、逆最適化の概念を用いることで、安定性の確保だけでなく、意味のある評価関数に対して最適性が保証される適応制御系の構成法について説明する。最後に、8章では、本書のより深い理解に繋がる数学的な補遺として、適応制御の有界性の証明（厳密な解析）に関わる事項を与える。

なお、本書を執筆するにあたって、もう一つ、さまざまな読者の要求に対して多種多様な読み方ができるように配慮した。まず、適応制御とその数理について必要最小限のことを知りたい場合は、最初のステップとして1.3節と(2.1節を準備として)2.2節を対比させて読むことを勧める。さらに、もう少し一般化した内容を追加したいのなら、最初のステップに加えて3.1~3.5節に目を通すことを出発点とすればよいだろう。その上で、連続時間形式のモデル規範形適応制御全般の基礎を知りたいのであれば、3.6節を読めばよい。また、適応制御の研究に深入りしたい場合は、8章の安定性の証明（厳密な解析）と3章を3.7節まで目を通すことで、研究の基礎としての重要な知見が得られるだろう。4章のロバスト制御についても、最小限の知識を速習するときは4.1~4.4節にまず目を通し、そのあとは必要に応じて4.5節と4.6節に移っていけばよい。離散時間適応制御は確定系と確率系について書かれており、まず確定系について最小限の知見を得る場合は5.1節と5.2節に目を通し、その後、必要に応じ

て5.3節の確率系の説明へ移っていけばよい。5章までの基礎事項から若干外れる6章と7章では、それぞれの事項について必要最小限の感触をつかむのであれば、6.1節と6.2.1項、および7.1~7.3節を読めばよい。さらに進んだ成果に興味がある場合は、必要に応じておのおのの章のその後の節を読んでいけば、重要な知見が得られる。

また、本書を通じて、それぞれの適応制御手法について、定理を示すだけでなく、表としてまとめる形式をとった。これらの表は、各方式に基づく適応制御系の構成にあたって役立ち、また表だけ目で追っていても適応制御全般のおおよその感覚を体得できるだろう。

本書を手にした制御工学の学修者の方々や、産業界で現実の問題に直面する制御技術者の方々に、適応制御に関心を持っていただき、理論と応用の両面から適応制御に関連する分野で多くの成果が生まれる契機となれば、著者にとって望外の喜びである。

最後に、著者が学生時代からご指導いただいている北森俊行先生（東京大学名誉教授）、池田雅夫先生（大阪大学名誉教授）をはじめとする本シリーズ編集委員の皆様、およびコロナ社の皆様に、心より御礼を申し上げます。

2018年1月

宮里義彦

1. 適応制御とは

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 1.1 | 未知の制御対象の制御 | 1 |
| 1.2 | 適応制御の概要 | 2 |
| 1.2.1 | 適応システムと適応制御 | 2 |
| 1.2.2 | モデル規範形適応制御 | 4 |
| 1.2.3 | セルフチューニングコントロール | 5 |
| 1.3 | MIT 方式に基づくモデル規範形適応制御系の構成 | 6 |
| 1.3.1 | 定常ゲインの調整 (1 次系の場合) | 6 |
| 1.3.2 | 定常ゲインと時定数の調整 (1 次系の場合) | 8 |
| 1.3.3 | 定常ゲインと動特性の調整 (2 次系の場合) | 11 |
| | 演習問題 | 14 |

2. モデル規範形適応制御の基礎

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 2.1 | 安定解析の基礎 | 15 |
| 2.1.1 | 関数空間 | 15 |
| 2.1.2 | 正実関数と Kalman-Yakubovich の補題 | 16 |
| 2.1.3 | 適応システムの安定解析 | 20 |
| 2.2 | 安定論 (リアプノフ法) に基づくモデル規範形適応制御系の構成 | 22 |
| 2.2.1 | 定常ゲインの調整 (1 次系の場合) | 22 |
| 2.2.2 | 定常ゲインと時定数の調整 (1 次系の場合) | 25 |
| 2.2.3 | 定常ゲインと動特性の調整 (2 次系の場合) | 27 |
| | 演習問題 | 34 |

3. 一般的なモデル規範形適応制御

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | 理想条件下の適応制御 | 35 |
| 3.2 | モデル追従制御の基本構造 | 36 |
| 3.3 | モデル追従制御の別の導出 | 41 |
| 3.4 | モデル規範形適応制御の問題設定 | 45 |
| 3.5 | モデル規範形適応制御系の構成法：状態変数または出力の微分が 既知の場合 | 46 |
| 3.5.1 | 状態変数と出力の微分が既知の場合 | 46 |
| 3.5.2 | 状態変数が未知で出力の微分が既知の場合 | 49 |
| 3.6 | モデル規範形適応制御系の構成法：入出力信号のみを用いた構成 | 53 |
| 3.6.1 | 相対次数が1次の場合 | 53 |
| 3.6.2 | 相対次数が2次以上の場合 | 56 |
| 3.7 | 間接法に基づくモデル規範形適応制御 | 63 |
| 3.7.1 | 相対次数が1次の場合 | 64 |
| 3.7.2 | 相対次数が2次以上の場合 | 68 |
| 3.7.3 | 考 察 | 73 |
| | 演 習 問 題 | 74 |

4. ロバスト適応制御

| | | |
|-------|------------------|----|
| 4.1 | 適応制御のロバスト化 | 75 |
| 4.2 | 問 題 の 発 端 | 76 |
| 4.3 | ロバスト化の方針 | 79 |
| 4.4 | 有界外乱に対するロバスト適応制御 | 79 |
| 4.4.1 | σ -修正法 | 79 |
| 4.4.2 | 射影法 | 85 |
| 4.4.3 | 不感帯法 | 87 |

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 4.5 | 有界外乱に対するロバスト適応制御 (一般形式) | 90 |
| 4.5.1 | システムの表現と誤差方程式の導出 | 90 |
| 4.5.2 | σ -修正法 | 92 |
| 4.5.3 | 射影法 | 96 |
| 4.5.4 | 不感帯法 | 100 |
| 4.6 | 有界外乱と寄生要素に対するロバスト適応制御 | 103 |
| 4.7 | ロバスト適応制御の考察 | 108 |
| | 演習問題 | 109 |

5. 離散時間適応制御

| | | |
|-------|--------------------------|-----|
| 5.1 | 離散時間形式の適応制御 | 110 |
| 5.2 | モデル規範形適応制御系 | 111 |
| 5.2.1 | 問題設定 | 111 |
| 5.2.2 | d ステップ予測器 | 112 |
| 5.2.3 | モデル追従制御の別の導出法 | 115 |
| 5.2.4 | モデル規範形適応制御系 | 118 |
| 5.3 | セルフチューニングコントロール | 131 |
| 5.3.1 | 基本概念 | 131 |
| 5.3.2 | 問題設定 | 131 |
| 5.3.3 | d ステップ予測器 | 133 |
| 5.3.4 | 最小分散制御 | 136 |
| 5.3.5 | セルフチューニングコントロールの構成 | 138 |
| | 演習問題 | 140 |

6. バックステッピング法

| | | |
|-------|-------------------------|-----|
| 6.1 | 出力誤差に基づく適応制御系の構成 | 141 |
| 6.2 | バックステッピング法による適応制御 | 143 |
| 6.2.1 | 相対次数が3次の場合 | 143 |
| 6.2.2 | 一般形式 | 154 |

6.3 バックステッピング法と正実化 167

6.4 非適応化システムのロバスト性と κ -補償 171

6.5 バックステッピング法による非線形系の安定化 174

6.6 バックステッピング法の考察 180

演習問題 182

7. 逆最適適応制御

7.1 適応制御と最適性 183

7.2 2次形式評価関数に対して最適な適応制御系 184

7.3 外乱を含む評価関数に対して最適な適応制御系 187

7.4 最適な適応制御系の考察 191

7.5 一般の場合の最適な適応制御系 192

7.5.1 問題設定と対象の入出力表現 192

7.5.2 入力項を評価に加えない場合 193

7.5.3 2次形式評価関数に対する最適制御の場合 194

7.5.4 適応 H_∞ 制御の場合 197

演習問題 201

8. 数学的補遺

8.1 安定解析の基礎 203

8.2 定理 3.4 の厳密な有界性の証明 206

8.2.1 入出力安定性 206

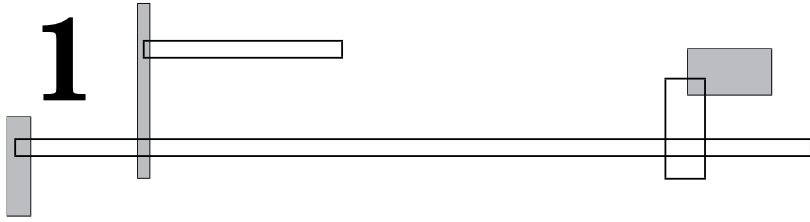
8.2.2 Bellman-Gronwall の補題と swapping の補題 210

8.2.3 有界性の証明 (厳密な解析) (定理 3.4 の証明) 215

引用・参考文献 219

演習問題の解答 223

索引 233



適応制御とは

本章では、まず適応制御のあらましについて述べ、ついで適応制御の代表的な二つの形態であるモデル規範形適応制御とセルフチューニングコントロールについて簡単に説明する。その後、適応制御として最初に定式化された MIT 方式に基づくモデル規範形適応制御の手法を、簡単な制御対象に対して適用する。

1.1 未知の制御対象の制御

状態空間法に基づくいわゆる現代制御理論においては、制御対象の特性は事前に既知であることが要求される。しかし、システム同定が不完全な場合や、環境条件、動作条件の変動により制御対象の特性が大きく変化する場合には、制御対象を表現するモデルの中に、未知パラメータや変動パラメータが含まれる。このような制御対象に対して、システムパラメータが固定されていて既知であることを前提とする現代制御理論（状態空間法）は、そのままでは適用できない。

これに対し、未知パラメータ、変動パラメータが存在する領域を特定できて、さらにその領域が比較的小さい場合に、起こりうる変動のすべてを考慮して、固定された制御装置で一定の仕様を満足する制御系を構成しようとする考え方がある。これが、ポスト現代制御理論とされるロバスト制御の方針である。一方、

より積極的な対応として、対象の未知パラメータや変動パラメータに応じて制御装置の特性を自動調整し、制御系の性能をつねに良好な状態に保とうとする考え方も古くからある。そのような方針のもとで生まれたのが、**適応制御**^{1)~10)}†である。

別の見方をすると、制御対象に一般に不確定な成分が含まれる場合に、その不確定な部分を、パラメトリックモデルで表現される構造的な不確定性と、パラメトリックモデルでは表現されない（ノンパラメトリックな）非構造的な不確定性（未知の外乱、非線形要素、寄生要素など）とに区分して捉え、非構造的な不確定性と一部の構造的な不確定性に対して、その不確定性の範囲を（比較的小さく）特定して、原則として固定された制御装置で一定の制御仕様を達成するのが、ロバスト制御の考え方である。これに対し、同じく不確定性を構造的・非構造的に区分したとき、適切な自由度を有する可調整制御装置と、安定論から導出されるパラメータ適応則を用いて、主として構造的な不確定性に能動的に対処して所望の性能を発揮するのが、適応制御の考え方である。

本書では、この不確定性に対する能動的制御法としての適応制御の基礎事項を中心に述べる。特にこれまで多く研究されてきたモデル規範形適応制御系に関して、理想的な条件下での安定論の確立と現実的な不確定性のもとのロバスト適応制御や離散時間形式の適応制御、非線形制御とも関連の深いバックステッピング法、逆最適性に基づく適応制御系の設計と解析に至るまでの一連の話題について、わかりやすく説明する。

1.2 適応制御の概要

1.2.1 適応システムと適応制御

通常のフィードバック制御自身も、あるいはフィードバックゲインを時間的に変化させながら対応させるゲインスケジューリング制御も、外界の変動にある程度まで対応（適応）するという意味で、擬似的な適応システム（または適

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

応制御)と見なすことができる。

それでは、そのような擬似的な適応システム(フィードバック制御)と厳密な意味での適応システム(適応制御)は、根本的にどこが異なるのだろうか。

工学における**適応システム**は、適応という視点から構築された物理システムであるが、その一種である適応制御は、実用的な視点からは、異なる時間スケールで動作する2種類の状態変数の(特殊な)非線形フィードバック系と見なすことができる。二つの時間スケールの中で、一方のフィードバックは通常の状態フィードバック(または出力フィードバック)に対応し、もう一方のフィードバックは制御パラメータの更新に対応する。いずれのフィードバックにおいても、閉ループ系の現在の制御性能と理想状態の差異をもとにフィードバック系が構成される。このような観点から適応システムと適応制御を定義すると、通常の定数フィードバック(ロバスト制御もこの形式)が適応システムでないのは、一方だけの状態フィードバックになっているためであり、他方、ゲインスケジューリング制御が適応制御とは異なるのは、スケジューリングパラメータの更新にあたって現在の制御性能の理想状態からの差異をフィードバックしていない(フィードフォワード的なパラメータの更新)ためである。

適応制御が必要になるのは、環境条件や動作条件の変化に応じてプラントの特性が変動するために、事前に特性変動の値を正確に把握するのが困難な状況においてであり、特に、航空機の動特性が高度や速度などの飛行条件で変動することや、電動機の動特性が負荷条件で変化することなどが、適応制御の研究の発端となっている。その際、特性変動が比較的小さいときは、普通のフィードバック制御系の外乱抑制効果(ロバスト制御の一形式)で対処可能であるのに対し、特性変動が大きい場合、制御性能の低下だけでなく不安定化といった現象が見られ、通常のフィードバック制御では対処できない。そのような問題を解決するために、プロセスの特性変動に応じて制御系の特性を自動調整する、あるいはプラントの変動をもたらした環境条件・動作条件の変化に制御装置を適応させることにより、制御系の性能をつねに良好に保つ適応制御の手法が必要になるのである。

適応制御の研究は、1959年初頭において、高度と速度による飛行特性の変化に対応する航空機のオートパイロットを開発する目的で始まった。当初考えられたのは、動作条件に応じて複数のプロセスモデルを準備し、モデルの変更に伴って制御器のパラメータを切り換える方式であった。その後、制御性能のフィードバックを含まないゲインスケジューリング的な発想に基づく制御を経て、フィードバックループと可調整パラメータを持つ制御器を含む適応制御へと発展していった。制御性能のフィードバックに基づく実時間のパラメータ推定と、推定値に基づく制御器の実時間調整に、適応制御の大きな特徴がある。

1.2.2 モデル規範形適応制御

モデル規範形適応制御 (model reference adaptive control; **MRAC**) (あるいはモデル規範形適応制御系 (model reference adaptive control system; **MRACS**)) は、制御対象の望ましい特性を規範モデルの形で与えて、規範モデルの応答 (理想の応答) に現実の応答が追従するように制御器のパラメータを調整する適応制御の一種である (図 1.1)。

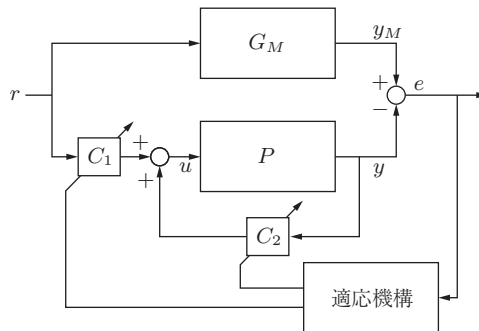


図 1.1 モデル規範形適応制御系

図 1.1 では、規範モデル G_M の参照入力 r に対する出力 y_M の応答と、制御対象 P の出力 y の応答が一致するように ($e = y_M - y$ が 0 に収束するように)、制御装置 (C_1 と C_2) を適応的に調整して (適応機構) 目的を達成するモ

デル規範形適応制御系の構成が示されている。

このような適応制御系の研究は、航空機のオートパイロットへの適用を目的とした **MIT 方式** (MIT rule)¹¹⁾ が発端となって始められ、その後、安定論を基礎とした適応制御系の構成に関する研究が多く行われた。モデル規範形適応制御はプロセスの入出力特性を規範モデルのそれ(望ましい入出力特性)に一致させることを制御目的とする点で、モデル追従制御を適応的に達成する手法と見なすことができ、状態フィードバックによる極の移動と極零相殺による零点の移動が、制御の主要部分(二つのうちの一方のフィードバック)を占める。また、この特性から、モデル規範形適応制御は最小位相系に限定された制御手法である(詳細は3.2節を参照)。さらにモデル規範形適応制御は、制御器のパラメータを直接に更新する手法(直接法)と、制御対象のシステムパラメータを同定してそれに基づいて制御器のパラメータを調整する手法(間接法)の2種類に分類することができる。

本書では、まず、簡単な制御対象について、MIT方式に基づくモデル規範形適応制御と安定論に基づくモデル規範形適応制御を、1章と2章で対峙させて紹介し、3章以降で一般的な形式やロバスト化、離散時間形式などについて説明する。

1.2.3 セルフチューニングコントロール

セルフチューニングコントロール¹²⁾は、おもに確率システムを対象として研究が進められてきた適応制御の一手法である。プロセス変数の推定と推定値を用いた制御器の設計計算を行う部分から構成され、これまで述べてきた適応制御と同様に、二つのフィードバックループを含む。内側のループは通常のフィードバック制御であり、外側のループは逐次的なパラメータの推定機構と制御パラメータの算出部分である。セルフチューニングコントロールでは、さまざまなパラメータ推定機構と制御機構の組合せが可能であり、目的に応じて多種多様な制御系の構成が実現される。これに対して、モデル規範形適応制御では、確定的なモデル追従制御問題を取り扱うことが多い。しかし、制御構造は同じ

| | |
|----------------------------|--------|
| 【い】 | |
| インターレース型 | 124 |
| 【お】 | |
| 重み付き最小 2 乗推定 | 129 |
| 【か】 | |
| 拡張誤差 | 57 |
| 確率系の最適予測器 | 133 |
| 確率場における離散時間 モデル規範形適応制御系 | 140 |
| 関数空間 \mathcal{L}^p | 15 |
| 関数空間 \mathcal{L}^∞ | 16 |
| 間接法 | 63 |
| 感度関数 | 7 |
| 【き】 | |
| 逆最適性 | 183 |
| 強正実関数 | 17 |
| 切換型 σ -修正法 | 82, 94 |
| 【け】 | |
| 厳密にプロパー | 17 |

| | |
|---------------------|-------------|
| 【さ】 | |
| 最小分散制御 | 110, 136 |
| 最大傾斜法 | 7 |
| 【し】 | |
| 射影法 | 85, 96 |
| 準大域的 | 106 |
| 状態変数フィルタ | 39 |
| 【せ】 | |
| 正実関数 | 17 |
| 正実システム | 167 |
| セルフチューニング コントロール | 5, 110, 131 |
| 【ち】 | |
| 逐次型最小 2 乗法 | 110, 125 |
| 直接法 | 63 |
| 【て】 | |
| 定数型 σ -修正法 | 79, 92 |
| 適応システム | 3 |
| 適応制御 | 2 |
| — のロバスト化 | 76 |

| | |
|--------------|---------|
| 【は】 | |
| バックステッピング法 | 141 |
| 【ふ】 | |
| 不感帯法 | 87, 100 |
| プロパー | 17 |
| 【も】 | |
| モデル規範形適応制御 | 4, 35 |
| モデル規範形適応制御系 | 4 |
| モデル追従制御 | 36 |
| 【ゆ】 | |
| 有理関数 | 16 |
| 【り】 | |
| リアプノフ法 | 22, 35 |
| 離散時間形式の適応制御系 | 110 |
| 【ろ】 | |
| ロバスト制御 | 1 |

| | |
|-----------------|-----|
| 【A】 | |
| augmented error | 57 |
| 【B】 | |
| backstepping | 141 |

| | |
|-------------------------------|---------|
| Barbalat の補題 | 16, 203 |
| Bellman-Gronwallの補題 | 210 |
| 【C】 | |
| Certainty Equivalence の 原理 | 53 |

| | |
|-----------------|-----|
| 【D】 | |
| d ステップ予測器 | 112 |
| Diophantine 方程式 | 113 |

| | | |
|---|---|---|
| <p>【H】</p> <p>Hamilton-Jacobi 方程式 183</p> <p>【I】</p> <p>interlace type 124</p> <p>【K】</p> <p>Kalman-Yakubovichの補題 18</p> | <p>Key Technical Lemma 123</p> <p>【M】</p> <p>MIT 方式 5</p> <p>MRAC 4, 35</p> <p>MRACS 4</p> <p>【S】</p> <p>STC 110, 131</p> | <p>strictly passive 169</p> <p>strict-feedback form 174</p> <p>swapping の補題 210</p> <p>~~~~~</p> <p>【ギリシャ文字】</p> <p>κ-補償 172</p> |
|---|---|---|

— 著者略歴 —

1979年 東京大学工学部計数工学科卒業
1981年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（計数工学専攻）
1984年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（計数工学専攻）
工学博士
1984年 東京大学助手
1985年 千葉工業大学助手
1987年 統計数理研究所助教授
2008年 統計数理研究所教授
2015年 総合研究大学院大学複合科学研究科統計科学専攻長（併任）
現在に至る

適 応 制 御

Adaptive Control

© Yoshihiko Miyasato 2018

2018年3月26日 初版第1刷発行

検印省略

著 者 ^{みや}宮 ^{さと}里 ^{よし}義 ^{ひこ}彦
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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03310-6 C3355 Printed in Japan

(新宅)G



 <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

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。