

は し が き

1950年代後半に始まった現代制御理論も、この10年間で大学や現場ですっかり定着し、いろいろな産業分野で利用され、また成果をあげてきている。特に近年のマイクロプロセッサ技術の発展は著しく、このマイクロプロセッサ技術の急速な進歩が現代制御理論の実用化に拍車をかけたのは言うまでもない。また、今後の制御においてマイクロプロセッサのようなデジタル計算機のはたす役割は、ますます大きなものになって行くものと思われる。

本書は、連続時間の制御対象に対してマイクロプロセッサのようなデジタル計算機を使った場合の制御系の解析法と設計法について述べたものである。間欠動作をする機器を制御装置に使うという意味でのサンプル値制御は、古くから研究されてきているが、サンプル値制御の時代は離散化に対して積極的ではなかったように思われる。これに対し、デジタル制御ではデジタル計算機を使えば複雑な制御則も簡単に実現できることから、離散化を積極的に行いデジタル計算機を使おうとする点が異なるといえよう。また、デジタル制御系では制御対象は連続時間系であるから、制御効果はサンプリング周期に依存し、またサンプル点上のみならずサンプル点間の応答も考慮する必要がある。これらの点が、最初から離散時間系を扱う離散時間制御と異なる点である。

しかし、従来の教科書はサンプル値制御と離散時間制御を併記したような内容のものが多く、現代制御理論を勉強してきたものにとっては、再び、ブロック線図の統合の方法から始めなくてはならず、ためらいもあった。また、連続時間系と離散時間系との関係が必ずしも明快でなく、デジタル制御の理解を妨げてきたきらいがあった。そこで、本書では状態方程式を基礎にしたデジタル制御系の新しい教育法を試み、デジタル制御系の解析法ならびにディジ

タル制御系の設計法にかかわるあらゆる問題点について、豊富な例題を交えながら平易に解説した。

本書を執筆するにあたっては、筆者らが千葉大学、東京工業大学などで教えてきた講義ノートをもとに、なるべく普遍的に、しかも、デジタル制御に必要な不可欠な内容を記したつもりである。教科書であるので誤った記述などには気を使ったが、万一筆者らの思い違いなどで間違った箇所などがあれば忌憚のない御意見を頂きたい。

本書がデジタル制御を勉強される技術者や学生などのために少しでもお役にたてば幸いである。

なお、分担は以下のとおりである。

美多：2章，3章，7章，8.2節

原：1章，4章，5章，6章，9章，付録

近藤：6章，8.1節，9章

最後に、本書の執筆に当たって御援助頂いた東京工業大学古田勝久先生に感謝いたします。また、例題や演習問題のチェックなどお手伝い頂いた千葉大学千田有一，三上裕史君，東京工業大学陳友社，成学慶君ならびに、本書を書くに当たり終始お世話を頂いたコロナ社の皆様に感謝いたします。

1987年12月

著 者

目 次



ディジタル制御系の構成と解析・設計の基本的考え方

- 1.1 連続時間制御系の解析・設計手順 3
- 1.2 デジタル制御系の解析・設計手順 7



ディジタル制御とディジタル制御系の表現

- 2.1 連続時間制御対象の表現 17
 - 2.1.1 状態方程式と伝達関数 17
 - 2.1.2 連続時間系の最小実現 20
 - 2.1.3 状態方程式の解 21
- 2.2 連続時間制御対象の離散時間系としてのモデル 24
 - 2.2.1 デジタル制御系とサンプル点上の動特性 24
 - 2.2.2 サンプル点間での動特性 28
- 2.3 z 変換による解析 29
 - 2.3.1 z 変換, 逆 z 変換とその応用 29
 - 2.3.2 連続時間信号のサンプル値の z 変換と拡張 z 変換 34
- 2.4 パルス伝達関数と拡張パルス伝達関数 37
 - 2.4.1 パルス伝達関数 37
 - 2.4.2 拡張パルス伝達関数 40
- 演習問題 42



ディジタル制御系の解析

- 3.1 離散時間系の安定性と安定判別 43

3.2	可制御性, 可観測性とその条件	48
3.3	連続時間系と離散時間系の関係	53
3.3.1	安定性, 可制御・可観測性の関係	53
3.3.2	連続時間系の零点と離散時間系の零点の関係	58
3.4	離散時間系から連続時間系への逆変換	61
3.5	エリアシングとサンプリング定理	64
	演習問題	68



デジタルレギュレータの設計

4.1	状態フィードバックとオブザーバを用いた設計	70
4.1.1	状態フィードバックによる安定化	70
4.1.2	オブザーバの設計	74
4.1.3	オブザーバを併合したレギュレータ	80
4.2	有限整定制御	82
4.3	最適レギュレータの設計	86
	演習問題	92



デジタルサーボ系の設計

5.1	サーボ系と内部モデル原理	94
5.2	サーボ系の設計法	99
5.3	最適サーボ系の設計	105
5.4	繰返し制御系の設計	108
	演習問題	111



デジタル再設計

6.1	デジタル再設計とは	112
-----	-----------------	-----

6.2	補償器の開ループ伝達特性に基づく再設計	115
6.3	時間応答に基づく再設計	118
6.3.1	閉ループ応答に基づく再設計	119
6.3.2	2次形式評価関数に基づく再設計	125
	演習問題	129



演算時間遅れを考慮した最適デジタル制御とその応用

7.1	演算時間遅れを考慮した最適レギュレータの設計	131
7.1.1	1サンプル遅れの最適デジタルレギュレータ	131
7.1.2	Lサンプル遅れの最適デジタルレギュレータ	137
7.2	最適出力フィードバック制御	139
7.2.1	最適直列補償器の設計	139
7.2.2	最適出力フィードバック制御	142
	演習問題	145



量子化誤差の影響とロバスト安定性

8.1	デジタル制御系における量子化誤差の影響	147
8.1.1	量子化誤差	147
8.1.2	量子化誤差に伴う出力誤差の評価	149
8.1.3	A/D・D/A変換における量子化誤差の影響	152
8.1.4	補償器の演算誤差の影響	156
8.2	デジタル制御系のロバスト安定性	160
8.2.1	最適フィードバック制御系のゲイン余有	160
8.2.2	ナイキストの安定判別法と最適系の安定余有	162
8.2.3	安定余有とサンプリング周期	166
8.2.4	制御則の演算誤差に対するロバスト安定性	169
	演習問題	171



9.1 制御対象のモデリング	173
9.2 制御対象の解析	175
9.2.1 連続時間系としての解析	175
9.2.2 離散時間系としての解析	177
9.3 デジタルレギュレータの設計	177
9.4 デジタルサーボ系の設計	184
演習問題	187

付 録

連続時間系と離散時間系の対応表（多入力多出力系）

演習問題解答

参 考 文 献

索 引



ディジタル制御系の構成と解析・設計 の基本的考え方

近年、マイクロプロセッサなどの急速な発達により、現代制御理論がさまざまな産業分野に利用されるようになってきている。また、それとともにそれを実現するために従来のアナログ素子で構成された補償器に代わり、ディジタル補償器（マイクロコンピュータやミニコンピュータなど）が使われるようになり、ディジタル制御（計算機制御）が重要な役割をはたしてきている。しかし、連続時間系の制御対象をディジタル補償器で制御するディジタル制御の場合には、連続時間制御（連続時間系の制御対象

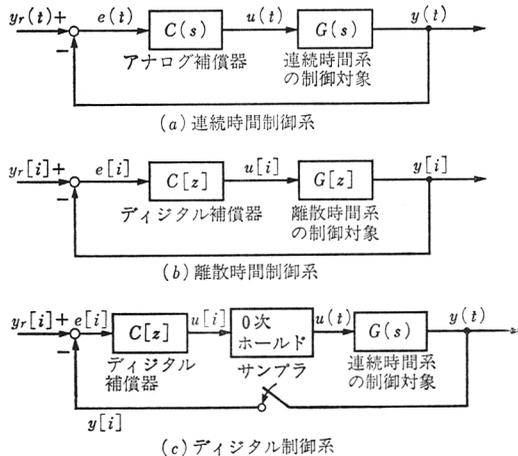


図 1.1 典型的なフィードバック制御系の構成

をアナログ補償器で制御する場合)や離散時間制御(離散時間系の制御対象をデジタル補償器で制御する場合)と異なり、連続量と離散量が混在する系となる(図 1.1 参照)。したがって、以下のようなさまざまな問題が生ずる。

- i) デジタル制御系の構成をどのようにしたらよいか。
- ii) サンプリング周期をどのように定めたらよいか。
- iii) 連続時間の制御則をそのまま適用してよいだらうか。あるいは、どのようにデジタル制御則を決定したらよいか。
- iv) サンプリングによるエリアスの問題、演算時間遅れの問題、量子化誤差の問題をどのように取り扱ったらよいか。

これらの問題に対して本書では、現代制御理論の立場からデジタル制御系をどのように解析・設計し、また構成していけばよいかについて述べる。

まず本章では、2章以降の各章の位置づけと役割とをはっきりさせるために、直流サーボモータの回転角制御の例を用いて、デジタル制御系の解析・設計手順と構成法について検討することにする。

いま、制御対象を連続時間系とし、実現する補償器を離散時間系とすると、デジタル制御系の解析・設計手順は図 1.2 のようになる。もちろん、解析や設計の結果が十分満足のいくものでなければ、これらの繰返しとなることはいうまでもない。「連続時間モデルの作成」→「連続時間系の解析」→「連続時間制御系の設計」がよく知られた連続時間制御系の解析・

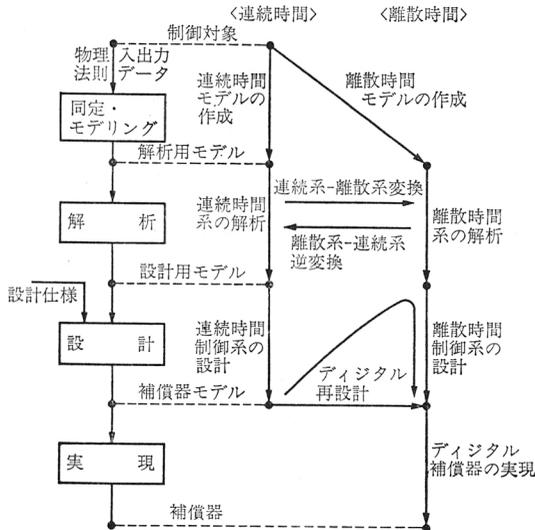


図 1.2 デジタル制御系の解析・設計手順

設計手順である。デジタル制御系の解析・設計手順を正しく認識するためには、この連続時間制御系の解析・設計手順を理解する必要があるので、1.1節でそれについて述べる。一方、デジタル制御系の設計では、最終的にはデジタル補償器を設計し実現しなければならない。したがって、同定・モデリング、解析、設計のいずれかの段階でサンプリング周期を定め、離散時間制御系として取り扱っていく必要がある。このときに現れるさまざまな問題の取り扱いを示すのが本書の大きな役割である。1.2節では、どのような問題が生じるか、またそれをどのように解決すればよいかについて問題点を明確にする。

1.1 連続時間制御系の解析・設計手順

図 1.2 において、「連続時間モデルの作成」→「連続時間系の解析」→「連続時間制御系の設計」が連続時間制御系の解析・設計手順である。連続時間モデル作成のステップでは、制御対象の挙動を支配する物理法則や入出力データから解析・設計のための数式モデル（状態方程式や伝達関数）を作成する。「連続時間系の解析」では、得られた数式モデルに基づいて制御対象の安定性、極・零点、可制御性・可観測性を調べ、その制御対象の性質を正しく認識するとともに、制御系設計に必要な数式モデルを構築すること（例えば、低次元化など）が目的となる。一方、「連続時間制御系の設計」では、与えられた設計仕様を満たすように補償器を設計することが目的となる。この場合、一般に設計仕様を反映する設計パラメータ（例えば、古典理論では位相余有、最適レギュレータでは2次形式評価関数の重み行列など）を指定する必要がある、これが設計の大きなポイントとなる。これら連続時間系の手続きについては、数多くの良書が出版されている

〔1〕～〔11〕ので、本書では必要に応じて述べるにとどめるが、以下の簡単な例題を通してこの流れを理解していただきたい。

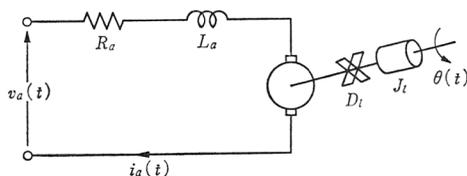


図 1.3 直流サーボモータ

図 1.3 に示す定励磁制御の直流サーボモータを用いた回転角制御を考えてみよう。この図において、 $v_a(t)$ 、 $i_a(t)$ は制御用電圧、電機子電流をそれぞれ表している。また、 L_a 、 R_a 、 D_l 、 J_l は、それぞれ電機子回路のインダクタンスと抵抗、負荷の粘性摩擦係数と慣性モーメントである。このとき、つぎの二つの関係式が成立する。

電機子回路におけるキルヒホッフの電圧則：

$$v_a(t) = L_a \dot{i}_a(t) + R_a i_a(t) + K_m \dot{\theta}(t) \quad (1.1a)$$

発生トルクと消費トルクとのつりあい：

$$K_m i_a(t) = J_l \ddot{\theta}(t) + D_l \dot{\theta}(t) \quad (1.1b)$$

ここで、 K_m は界磁電流に比例するモータ定数である。これらを 1 階常微分方程式の形で表し、行列表現すると、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, & 1, & 0 \\ 0, & -D_l/J_l, & K_m/J_l \\ 0, & -K_m/L_a, & -R_a/L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix} v_a \quad (1.2a)$$

となる。また、角度 $\theta(t)$ を出力と考えると

$$\theta = [1, 0, 0] \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} \quad (1.2b)$$

の形で表現できる。このように連続時間線形動的システムの挙動は、一般に

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_c u(t) \quad (1.3a)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{c}_c \mathbf{x}(t) \quad (1.3b)$$

で記述される。ここで、 $\mathbf{x}(t)$ は状態ベクトル、 $u(t)$ は制御入力、 $\mathbf{y}(t)$ は出力（制御量）である。先の例では、 $\mathbf{x}(t)^T = [\theta(t), \dot{\theta}(t), i_a(t)]$ 、 $u(t) = v_a(t)$ 、 $\mathbf{y}(t) = \theta(t)$ で、

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0, & 1, & 0 \\ 0, & -D_l/J_l, & K_m/J_l \\ 0, & -K_m/L_a, & -R_a/L_a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix} \\ \mathbf{c}_c = [1, 0, 0]$$

である。1 階の線形連立常微分方程式 (1.3a) は状態方程式、線形方程式

(1.3b) は出力方程式と呼ばれ (ただし簡単のため, 式 (1.3a) と式 (1.3b) とをあわせて状態方程式と呼ぶことがしばしばある), この二つの方程式をあわせて連続時間系の状態空間表現となっている. 一方, 連続時間系のもう一つの表現に伝達関数がある. 状態空間表現がシステムの内部の挙動を記述しているのに対し, 伝達関数はシステムの入出力の関係を表現するものである. これは, 式 (1.3) を初期値 $\mathbf{0}$ のもとでラプラス変換することによって得られ, 以下のように与えられる.

$$G(s) = Y(s)/U(s) = \mathbf{c}_c(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_c)^{-1}\mathbf{b}_c \quad (1.4)$$

ここで, $U(s), Y(s)$ はそれぞれ $u(t), y(t)$ のラプラス変換を表している. 直流サーボモータの場合, 簡単な計算により,

$$\begin{aligned} G(s) &= \theta(s)/V_a(s) \\ &= \frac{K_m}{s[J_i L_a s^2 + (D_i L_a + J_i R_a)s + (D_i R_a + K_m^2)]} \end{aligned} \quad (1.5)$$

となる. 一方, 式 (1.3) の微分方程式を初期値 $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ のもとで解くと, その解は

$$y(t) = \mathbf{c}_c e^{\mathbf{A}_c t} \mathbf{x}_0 + \mathbf{c}_c \int_0^t e^{\mathbf{A}_c(t-\tau)} \mathbf{b}_c u(\tau) d\tau \quad (1.6)$$

で与えられ, 入力データ $u(t)$ と出力データ $y(t)$ の直接的な関係式が得られる. ここで, 入出力データ $u(t)$ と $y(t)$ とから状態方程式のパラメータ (式 (1.3) の $\mathbf{A}_c, \mathbf{b}_c, \mathbf{c}_c$) あるいは伝達関数式 (1.4) を決定するのが, 同定である. 同定には, この例のように制御対象のモデルの構造を仮定する場合と, 仮定しない場合とがある^{[13], [14]}.

以下では, パラメータが, $L_a = 1.0, R_a = 1.1, J_i = 1.0, D_i = 0.0, K_m = 1.0$ と同定されたものとして話を進める. すなわち, 状態方程式として

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, & 1, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \\ 0, & -1, & -1.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_a \quad (1.7a)$$

$$\theta = [1, 0, 0] \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} \quad (1.7b)$$

また、伝達関数として

$$G(s) = \theta(s)/V_a(s) = \frac{1}{s(0.1s^2 + 1.1s + 1)} \quad (1.8)$$

が得られたとしておく。

つぎに、得られた数式モデルに基づく解析，すなわち「連続時間系の解析」の手順について考えてみよう。式 (1.8) の伝達関数の分母多項式を因数分解すると $s(1+s)(1+0.1s)$ となり，極は 0 と -1 と -10 にあり，零点はないことがわかる。このように極を調べることにより安定性の検討ができる。なお，安定判別は分母多項式にラウス・フルビッツの判別法を適用しても可能である。一方，状態方程式に基づいてもこれらの解析は可能で，例えば行列 \mathbf{A}_c の固有値を調べることによって安定性や極の位置がわかる。状態方程式に基づく解析にはこのほか，可制御性・可観測性のチェックなどがある。では，この数式モデルを設計に直接使用するのは妥当であろうか。それは必ずしも正しくはない。その一つの理由は，設計時に必要となる計算量を考えると，設計に使用するモデルの次元はできる限り小さい方が望ましいからである。このような観点からモデルの低次元化が重要な解析の一つとなっている。例えば，この例題の制御対象では，二つの極 -1 と -10 は非常に離れており，システム全体の挙動を考える場合には速いモードに対応する極 -10 は無視してもさしつかえないと思われる。物理的には，機械的な動きに比べ非常に速い応答をする電気的な過渡現象を無視することに対応している。このとき，低次元モデルは

$$\hat{G}(s) = \frac{1}{s(s+1)} \quad (1.9)$$

と書き表される。図 1.4 に $G(s)$ と $\hat{G}(s)$ の周波数特性およびインパルス応答を示す。 $\hat{G}(s)$ が $G(s)$ のよい低次元モデルになっていることが理解できると思う。低次元化の手法には，状態方程式表現に基づくものや伝達関数表現に基づくものそれぞれ数多く提案されている。

最後に，連続時間制御系の設計について簡単に述べておこう。連続時間制御系の設計法は大きく分けて，伝達関数モデルに基づく設計法と，状態空間モデルに基づく設計法の二つがある。前者の代表的なものとしては，位相余有やカ

索引

【A】
安定行列 stable matrix 44
安定多項式 stable polynomial 45
安定余有 stability margin 162
A/D 変換器 A/D converter 147

【B】
べき零行列 nilpotent matrix 82
ベクトル軌跡 vector locus 165
ビット数 bit number 148
BIBO 安定 bounded input and bounded output stability 45

【D】
伝達関数 transfer function 5, 18
デラックのデルタ関数 Dirac delta function 34
デジタル再設計 digital redesign 112
デジタル制御 digital control 1, 17
デジタル制御系 digital control system 1, 24
同定 identification 5, 61
D/A 変換器 D/A converter 147

【E】
エンコーダ encoder 147

円条件 circle criterion 166
演算誤差 computation error 156, 169
演算時間 computation time 132
——遅れ computation time delay 131, 168
エイラス alias 66

【F】
ファデーブの公式 Faddeev formula 58

【G】
ゲイン余有 gain margin 162, 166
厳密にプロパー strictly proper 18
ゴピナスの設計法 Gopinath's method 79
逆応答 undershoot 58
逆z変換 inverse z transform 30
行列指数関数 matrix exponential function 21

【H】
半正定行列 semi-positive definite matrix 47
平衡型実現 balanced type realization 159
偏角の定理 principle of arguments 164
偏差 error 102
偏差系 error system 105
非最小位相 non-minimum phase 58
保全性 integrity 141

浮動小数点表現 floating point representation 149
不可制御 uncontrollable 50
不可制御な極 uncontrollable pole 53

【I】
インパルス応答 impulse response 20, 34
位相余有 phase margin 166
1 段階法 one-step method 123
1 型最適サーボ系 type-1 optimal servo system 105
1 型の制御系 type-1 control system 98
1 型の制御対象 type-1 controlled object 98
1 型の(ロバスト)サーボ系 type-1 robust servo system 99
1 サンプル遅れ最適レギュレータ one sample delay optimal regulator 132
1 次ホールド first order hold 25
一巡伝達関数 open-loop transfer function 98, 163
インパルス不変方式 impulse invariant method 115

【J】
ジュリーの判別法 Jury criterion 45

【K】
可観測 observable 49
——行列 observability

matrix 50
 確率時系列 stochastic time sequence 150
 白色—— 150
 隠れた振動 hidden oscillation 54
 拡張パルス伝達関数 modified pulse transfer function 40
 拡張 z 変換 modified z transform 36
 還送差(帰還差) return difference 163
 可制御 controllable 48
 ——行列 controllability matrix 49
 ——正準系 controllable canonical system 72, 156
 ——正準形式 controllable canonical form 21, 71
 可到達 reachable 48
 ケイリー・ハミルトンの定理 Cayley-Hamilton Theorem 48
 後退差分 backwards difference 115
 固定小数点表現 fixed point representation 149
 固有ベクトル eigenvector 44
 固有値 eigenvalue 44
 繰返し制御系 repetitive control system 109
 クロネッカのデルタ Kronecker delta function 30
 強安定 strongly stable 140
 極 pole
 連続時間系の—— 19
 離散時間系の—— 38
 極限零点 limiting zero 59
 極-零点消去 pole-zero cancellation 52

【L】

L サンプル遅れ最適レギュレータ L sample delay optimal regulator 137

【M】

モード mode 52
 モデリング modeling 8

【N】

内部安定性 internal stability 94
 内部モデル原理 internal model principle 97
 ナイキスト角周波数 Nyquist angular frequency 66
 ナイキストの安定判別法 Nyquist stability criterion 164
 2次形式評価関数 quadratic type performance index 86, 125

【O】

オブザーバ observer
 同一次元—— 76
 最小次元—— 78
 ——を併合したレギュレータ regulator with observer 80
 折り返し角周波数 holding angular frequency 66

【P】

パルス伝達関数 pulse transfer function 38
 プロパー proper 18
 p. i. p 条件 parity interlacing property 61, 69, 141

【R】

ラウス・ヒルビッツの判別法 Routh-Hurwitz criterion 47
 レギュレータ regulator 70
 0次ホールド zero order hold 25
 連続型のリカッチ方程式

continuous-time Riccati equation 125
 連続時間系 continuous-time system 18
 連続時間制御系 continuous-time control system 1
 リアプノフ方程式 Lyapunov equation 47
 離散形リカッチ方程式 discrete-time Riccati equation 87
 離散時間系 discrete-time system 27, 37
 離散時間制御系 discrete-time control system 1
 ロバスト安定性 robust stability 95, 160
 ロバスト性 robustness 95
 量子化 quantization 148
 ——誤差 149
 ——レベル 148

【S】

サーボ系 servo system 94
 サーボ機構 servomechanism 94
 差分方程式 difference equation 33
 最小実現 minimal realization 20, 52
 最終値の定理 final value theorem 32
 最適レギュレータ optimal regulator 70, 86
 最適出力フィードバック制御 optimal output feedback control 142
 最適直列補償器 optimal series compensator 140
 サンプリング角周波数 sampling angular frequency 66
 サンプリング周期 sampling period 24
 サンプリング定理 sampling theorem 68
 サンプル点間の変数 inter-sample variable 28

サンプル点間応答 inter-sample response 28, 142
 サンプル値の z 変換 z transform of sampled data 34
 正定行列 positive definite matrix 47
 整合 z 変換 matched z transformation 115
 設計パラメータ design parameter 3, 113
 シルベスターの判定法 Sylvester criterion 47
 信号発生器 signal generator 34
 システム行列 system matrix
 連続時間系の—— 19
 離散時間系の—— 38
 システムタイプ system type 97
 出力方程式 output equation 5, 17, 27
 出力レギュレーション output regulation 94
 数式モデル mathematical model 3
 双 1 次変換 bilinear transformation 46, 115
 初期値の定理 initial value theorem 32
 周波数帯域制限波 frequency bandlimited

signal 68
 周波数伝達関数 frequency transfer function 69
 主帯域 principle strip 54

【T】

多段解法 multi-step method 123
 対角変換行列 diagonalization matrix 44
 対角正準系 diagonal canonical system 51, 156
 対角正準形式 diagonal canonical form 21, 51
 単純構造 simple structure 54
 定常ロバスト性 steady-state robustness 95
 等価変換 equivalent transformation 51
 倒立振り inverted pendulum 173
 2-Delay 制御 2-Delay control 144
 直列補償器 series compensator 140

【Y】

有限語長 finite word length 148

有限整定制御 finite time settling control 70
 最小時間状態整定制御 83
 有限整定オブザーバ 83
 有限整定サーボ系 104
 有限出力整定制御 83
 有限状態整定制御 82

【Z】

座標変換 coordinate transformation 44, 51
 漸近安定 asymptotically stable 44
 零点 zero
 連続時間系の—— 19
 離散時間系の—— 38
 拡張パルス伝達関数の—— 61
 状態変数ベクトル state variable vector 18
 状態変数線図 state variable diagram 27
 状態方程式 state equation
 連続時間系の—— 4, 17
 離散時間系の—— 27
 状態フィードバック state feedback 70, 71
 状態空間表現 state space representation 5
 状態遷移行列 state transition matrix 27
 z 変換 z transform 30

— 著者略歴 —

み た つとむ
美 多 勉

- 1975 年 東京工業大学大学院博士課程（電気工学専攻）修了
工学博士
1975 年 千葉大学講師
1979 年 千葉大学助教授
1990 年 千葉大学教授
1995 年 東京工業大学教授
2003 年 逝去

はら しん じ
原 辰 次

- 1976 年 東京工業大学大学院修士課程（制御工学専攻）修了
工学博士
1984 年 東京工業大学助教授
1992 年 東京工業大学教授
2002 年 東京大学教授，現在に至る

こん どう りょう
近 藤 良

- 1986 年 東京工業大学大学院博士課程（制御工学専攻）修了
工学博士
1986 年 東京工業大学助手
1990 年 茨城大学講師
1991 年 茨城大学助教授，現在に至る

基礎デジタル制御

Introduction to Digital Control

© Mita, Hara, Kondo 1988

1988 年 1 月 20 日 初版第 1 刷発行

2006 年 11 月 20 日 初版第 13 刷発行

検印省略

著 者 美 多 勉
原 辰 次
近 藤 良

発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛来辰巳

印 刷 所 新日本印刷株式会社

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 4-339-00132-5

(新日本印刷，愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替いたします