

MATLABによる システムプログラミング

— プロセス・ロボット・非線形システム制御から
DCS 構築まで —

鄧 明聡
姜 長安 共著
脇谷 伸

コロナ社

まえがき

本書は、機械系、電気系、プロセス系そしてメカトロニクス系などの研究開発分野における MATLAB/Simulink を用いたシステム分析とモデル化、各種制御器設計、システムダイナミクス環境の構築、シミュレーションおよび実験方法についての解説書である。特に、制御システムの制御器設計に関する MATLAB/Simulink でのプログラミング技術については詳細に解説しており、MATLAB の基礎コマンドや Simulink の基礎ブロックなどのシステムプログラミング入門基礎から制御工学における各分野とその応用例とを結び付け、実際のシステム構成に対する実装プログラミングまでのプログラムソースコードを載せるなど、わかりやすいよう工夫した。したがって、本書は MATLAB/Simulink と制御工学の入門書として位置付けることができ、システムプログラミングの勉強と研究をはじめた学部生や大学院生、実務に携わっているシステム開発部のエンジニアの方に適切なものとなっている。

システム制御理論は、非常に数学的色彩が強い学問であるが、制御系設計は工学応用のコアとなる奥深い技術である。本書では、著者らが日ごろ行っている学部や大学院の講義や実験、そして卒業論文、修士論文および博士論文の研究にかかわる内容に限定して述べた。特に分散制御システム (DCS) 装置は、プロセス産業で大規模生産システムなどによく使われるが、本書では大学実験室レベルでの研究実験について記述した。

本書の構成は以下の通りである。1 章ではシステム、MATLAB および Simulink の概念について述べ、2 章は、本書で使われる MATLAB のコマンド、関数、Simulink の使い方、電気回路シミュレーションの説明にあてる。3 章では MATLAB/Simulink を用いたラプラス変換による伝達関数表現、状態空間表現について言及し、4 章は水温制御実験装置を例にとり、MATLAB/Simulink による

PID 制御器を用いたプロセス制御系のシミュレーションと実験について概説する。5 章は独立駆動型移動ロボットを対象として、2 輪, 4 (3) 輪移動ロボットのモデリング, 移動軌道生成について述べ, さらに MATLAB でのプログラミングについて説明する。6 章は座標変換と同次変換, 順運動学と逆運動学について述べ, さらにラグランジュ表現によるロボットアームのモデリングについて概説し, 最後に, MATLAB によるプログラミングについて説明する。7 章は非線形システムによる表現方法としてのオペレータ表現について紹介し, ついでスマートアクチュエータを制御対象として非線形モデルの作成, オペレータ理論にもとづく制御系設計法についても説明し, 最後に MATLAB によるプログラミングについて説明する。8 章は DCS 装置によるオペレータ理論を用いた場合の熱交換プロセス実験装置のモデル化, 温度制御シミュレーションとその実験について述べる。本書で扱う MATLAB の m ファイルは, コロナ社ホームページの本書詳細ページよりダウンロードが可能なので, 自習用としてぜひ活用していただきたい。なお, ページにアップしていない 7 章と 8 章分については, スキルアップのためにも読者自身でソースコードを入力してしてほしい。

各章の主たる執筆担当者は, 鄧 (1, 2, 8 章), 脇谷 (2~4 章), 姜 (5~7 章) である。最後に制御理論に関して議論していただいている岡山大学井上昭名誉教授に謝意を表す。また, 本書のシミュレーションおよび実験などご協力いただいた東京農工大学鄧研究室の諸君に感謝したい。最後に, 本書の発行に際してお世話になったコロナ社に謝意を表す。

2016 年 2 月

鄧 明聡

目 次

1. MATLAB/Simulink とは

1.1 システムとは	1
1.2 MATLABとは	2
1.3 Simulink とは	3

2. MATLABの基礎コマンド

2.1 MATLABによるプログラミング	4
2.2 MATLABで使う特別な記号の意味	7
2.2.1 予 約 変 数	7
2.2.2 コロン演算子 (:)	7
2.2.3 シングルクォーテーション (')	9
2.2.4 バックスラッシュ演算子 (\, ¥)	10
2.2.5 要素単位の演算子	11
2.2.6 継 続 記 号	12
2.2.7 本書でよく使用する関数	13
2.2.8 コマンドウィンドウによる実行例	14
2.3 Simulinkの起動	15
2.4 Simulinkによるシミュレーション	19
2.4.1 信号の増幅	19
2.4.2 電気回路 (RLC回路)のシミュレーション	24

3. システムの表現

3.1 伝達関数表現	29
3.1.1 ラプラス変換	29
3.1.2 1次遅れ系	33
3.1.3 2次遅れ系	36
3.2 状態空間表現	40

4. プロセスシステムの制御

4.1 制御系の構成	50
4.2 ステップ応答試験とモデリング	51
4.3 PID制御系の設計	57
4.3.1 PID制御則	57
4.3.2 PIDパラメータの調整法	57

5. 移動ロボットのシミュレーション

5.1 移動ロボットのモデル化	64
5.2 移動軌道の生成	68
5.3 シミュレーションとコード	70

6. ロボットアームのシミュレーション

6.1 座標変換と同次変換	78
6.1.1 並進変換	78

6.1.2 回転変換	79
6.1.3 同次変換	81
6.2 順運動学と逆運動学	82
6.2.1 順運動学	82
6.2.2 逆運動学	83
6.3 ラグランジュ表現によるモデリング	88
6.4 シミュレーションとコード	91

7. 非線形システム制御のシミュレーション

7.1 オペレータ表現	109
7.1.1 n -線形オペレータ	109
7.1.2 非線形 Lipschitz オペレータ	110
7.1.3 一般化 Lipschitz オペレータ	111
7.1.4 ロバスト右既約分解	112
7.2 スマートアクチュエータの非線形モデリング	113
7.3 オペレータにもとづく制御方法	114
7.4 シミュレーションとコード	117

8. DCS によるシステム環境の構築

8.1 制御によるシステムの構成	124
8.1.1 熱交換プロセス	124
8.1.2 DCS 装置	127
8.2 熱交換プロセスのモデル化	129
8.2.1 問題設定	130
8.2.2 熱交換プロセスのモデリング	130
8.3 非線形制御系設定	132

8.3.1	プロセスの右既約分解	132
8.3.2	PI（比例積分）コントローラ的设计	133
8.4	シミュレーション	134
8.4.1	シミュレーションの m ファイル	134
8.4.2	シミュレーション結果	139
8.5	実機実験	141
8.5.1	DCS 装置による制御システムの実現	141
8.5.2	実験結果の取得方法	156
	引用・参考文献	161
	索引	163

1 章 MATLAB/Simulink とは

本章では、システムの定義について説明し、MATLAB、Simulink についての概説とこれらの特徴を紹介する。

1.1 システムとは

単にものが集まっただけでは、システムとはいわない。システムとは、①もの（構成物）の集まりである、②構成物の間に相互作用、関係がある、③集まりに目的がある、④外から操作することができる、という四つの要素をもつものをいう^{1)†}。つまり、システムにおけるものの集まりでは、ものどうしがたがいに影響し合っているため、ものの機能の変化は、ほかのものに対しても変化をもたらす。この定義を MATLAB での数理的な扱いに置き換えると、②の構成物間の関係は、微分方程式系、連立方程式系、グラフなどで表される。また、③は MATLAB 上ではシステムの目的に該当し、その目的を達成するための④の操作系、コントローラを開発するためには、①～③を考慮する必要がある。扱う①、③によって、例えば②は下記のように分類される。

1. 「線形システム」と「非線形システム」… 重ね合わせの原理が成立するか否か。
2. 「時変システム」と「時不変システム」… 特性が時間的に変化するか否か。
3. 「連続時間システム」と「離散時間システム」… 時間的に連続な動作をするか否か。

[†] 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

本書は、産業現場を考慮し、おもに機械系、電気系、プロセス系などの、さまざまな研究開発分野に関するシステムダイナミクス環境の構築に注目する。そして、MATLAB/Simulink を用いたシステム分析とモデル化、各種制御器設計、システムダイナミクス環境の構築に関するシミュレーションおよび実験方法について解説する。具体的には MATLAB /Simulink を用いたシステムプログラミングの基礎から実際のシステム構成に対するプログラミングの実装プロセスについて、特に上述の各分野の応用例と結び付け、システム制御器設計に関する MATLAB /Simulink でのプログラミング技術を解説する。

1.2 MATLAB とは

MATLAB は、matrix laboratory の略であり、LINPACK と EISPACK により開発された行列計算ライブラリに簡単にアクセスできるように記述されたものである。MATLAB の特徴は、次元の設定を必要としない配列を基本データ要素とする対話型システムである。特に、行列やベクトルで定式化できる問題について、C や Fortran のような非対話型言語よりわずかな時間で解くことができる。すなわち、MATLAB はさまざまな数値計算、データ解析などを簡潔に記述、実行できるソフトウェアであり、C 言語などのほかの言語とは異なり、直感的なプログラミングが可能である。また、テクニカルコンピューティング用の高性能な言語の一種であり、プログラミングの際には、m ファイルと呼ばれるシミュレーションを行うためのテキスト形式のファイルを編集する。問題や解答が、なじみ深い数学的な記法で表現されるような分野において、MATLAB を使用して以下のようなことが実現できる²⁾。

- 数学, 計算
- アルゴリズムの開発
- モデリング, シミュレーション, プロトタイプング
- データ解析, 故障診断, 可視化
- 工学的なグラフィックス

● グラフィカルユーザインタフェースの構築を含んだアプリケーション開発
MATLAB システムは、下記のように大きく分類して五つの部分から構成されている。

- MATLAB 言語
- MATLAB 作業環境
- Handle Graphics
- MATLAB 数学関数ライブラリ
- MATLAB アプリケーションプログラムインタフェース (API)

ほかにも、オンライン Function Reference を含むオンライン Help 機能がある。

1.3 Simulink とは

Simulink は、MATLAB のアドオンプロダクトの一つで、GUI ベースのダイナミクスのシミュレーションソフトウェアとして普及し、発展してきたものである。Simulink Coder, xPC target, Stateflow などのアドオンプロダクトで、Simulink からの自動 C コード生成ができる。その結果、Simulink から自動生成された C コードを実機のマイコンなどで動かすことにより、シミュレーションと実機実装の境界をなくすことが可能となる。Simulink の特徴は、m ファイルのようなテキストベースでシミュレーションを行う代わりに、ブロックの組み合わせによる直感的なシミュレーションを行うことができる点である。Simulink を使用する際には MATLAB のコマンドウィンドウから起動し、ブロック線図を描くため Simulink Library Browser にあるさまざまなブロックをドラッグ&ドロップし、それらを組み合わせることでブロック線図を作成していく。また、Mux/Demux ブロックによって、多入出力システムを扱うことが可能であり、To Workspace/From Workspace を用いて MATLAB と Simulink 間のデータのやり取りも可能となる。現在では、MATLAB/Simulink のエンジニアリング系のさまざまなツールボックスが発展し、研究機関、大学はもとより会社などの生産現場でも必要不可欠なソフトウェアの一つとなっている。

2章 MATLABの基礎コマンド

本章では、本書で使われる MATLAB のコマンド、予約変数や関数を紹介する。さらに、電気工学でよく使用される電気回路を例に、Simulink の使い方について説明する。

2.1 MATLAB によるプログラミング

MATLAB の起動画面を図 2.1 に示す。



図 2.1 MATLAB 起動画面

MATLAB の基本操作は画面中央のコマンドウィンドウを用いて行う。もし、画面レイアウトを大きく変えてしまった場合は、図 2.2 のように「ホーム」→

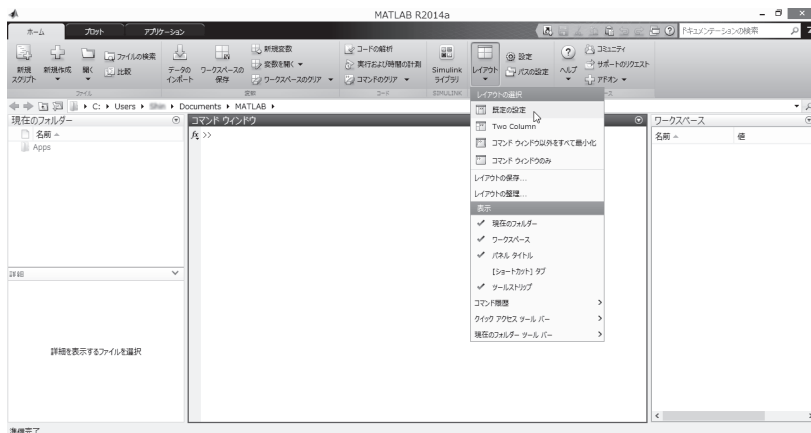


図 2.2 デフォルトウィンドウに変更

「レイアウト」→「既定の設定」の順で選択すれば、もとのデフォルト画面に戻ることができる。

まずスカラーとベクトルの乗算を行ってみよう。

```
>> A=[1 2 3]
A =
     1     2     3
>> 3*A
ans =
     3     6     9
```

そして、正弦関数を例とし、その計算および時間変化を考えた場合の計算を行ってみよう。

```
>> sin(pi/4)
ans =
     0.7071
>> t=0:0.01:1;
>> y=sin(2*pi*t);
>> plot(t,y);%1周期分の正弦波
```

以上のように生成した正弦波の結果は図 2.3 に示される。

索 引

<p>【あ】</p> <p>アナログ信号 146</p> <p>アラームブロック 142</p> <p>安定状態 142</p> <p>安定性 130</p> <p>【い】</p> <p>入口の温度差 157</p> <p>【お】</p> <p>オペレータ 109</p> <p>オペレータ理論 130</p> <p>温度制御 130</p> <p>【か】</p> <p>回路素子 28</p> <p>可視化 2</p> <p>【き】</p> <p>機械系 2</p> <p>機能ブロック 141</p> <p>逆行列 10</p> <p>逆双曲線余弦 15</p> <p>逆余弦 15</p> <p>逆ラプラス変換 29</p> <p>境界条件 130</p> <p>行列転置 9</p> <p>虚数単位 7</p> <p>キルヒホッフの第2法則 24</p> <p>【く】</p> <p>グラフィックス 2</p>	<p>【け】</p> <p>計算ブロック 141</p> <p>継続記号 12</p> <p>減衰比 37</p> <p>【こ】</p> <p>高温流体 124</p> <p>恒等写像 132</p> <p>向流 127</p> <p>故障診断 2</p> <p>固有角周波数 37</p> <p>固有値 9</p> <p>固有ベクトル 9</p> <p>コロン演算子 7</p> <p>【さ】</p> <p>最小要素 13</p> <p>最大要素 13</p> <p>作業用ウィンドウ 15</p> <p>差分 14</p> <p>産業現場 2</p> <p>【し】</p> <p>次元 2</p> <p>システム 1</p> <p>システムゲイン 33</p> <p>システムダイナミクス環境 2</p> <p>システム分析 2</p> <p>四則演算 151</p> <p>実機実験 141</p> <p>時定数 33</p> <p>自動制御 151</p> <p>時不変システム 1</p>	<p>時変システム 1</p> <p>周波数 21</p> <p>出力ブロック 142</p> <p>出力方程式 40</p> <p>状態方程式 40</p> <p>初期条件 130</p> <p>初期電圧 24</p> <p>新規プロジェクト 142</p> <p>信号の増幅 19</p> <p>【す】</p> <p>数学演算 17</p> <p>数値積分 13</p> <p>スパイラル型熱交換器 125</p> <p>【せ】</p> <p>制御演算 148</p> <p>制御器設計 2</p> <p>制御システム 159</p> <p>正弦関数 5</p> <p>正弦波 5</p> <p>正則 10</p> <p>静電容量 24</p> <p>積分ゲイン 140</p> <p>線形システム 1</p> <p>線形微分方程式 29</p> <p>【そ】</p> <p>総括伝熱係数 130</p> <p>双曲線余弦 15</p> <p>測温抵抗体 125</p> <p>【た】</p> <p>大規模スケール 124</p> <p>対話型システム 2</p>
---	---	--

多入出力システム	3			無効な数値	7
単位ステップ関数	30			むだ時間	53
タンク	125				
			【は】		
			バックスラッシュ演算子	10	
			【ひ】		
【つ】			ヒステリシス	113	
追従制御器	133		非線形システム	1	
追従性能	130		非線形フィードバック 制御システム	134	
			非線形モデル化	130	
【て】			ピッチ角	80	
デジタル信号	147		微分ブロック	151	
出口温度	132		非ホロノミックシステム	64	
データ解析	2		ヒューマンインタフェース ステーション	128	
電気系	2		比例ゲイン	140	
電磁式流量センサ	125		比例積分	133	
電磁石ポンプ	125				
伝達関数	33		【ふ】		
転置演算子	9		ファラデーの電磁誘導の 法則	126	
伝熱係数	127		フィードバック信号	160	
			フィールドコントロール ステーション	128	
【と】			複雑なシステムの表現	17	
同次変換	81		浮動小数点の相対精度	7	
特性実験	150		フレキシブルアーム	114	
度単位の引数の余弦	15		プロセスエラー	142	
度で出力される逆余弦	15		プロセス系	2	
			ブロック線図	3	
【に】			分散制御システム	128	
入力端子	25		分析	1	
入力ブロック	141				
ニュートン・オイラー法	88		【へ】		
			ベクトル間隔	8	
【ね】			変数 sin	6	
熱交換システム	125				
熱交換媒体	125		【み】		
熱交換プロセス	124		右既約分解	112	
熱収支量	130		密度関数	114	
熱伝達性	127				
ネットワーク	128		【む】		
			無限大	7	
【の】					
ノルム	110				
ノルム空間	110				
			【は】		
			目標温度	139	
			文字列	9	
			モデル化	2	
			【も】		
			ユニモジュラオペレータ	112	
			【ゆ】		
			【よ】		
			要素単位の演算子	11	
			ヨー角	80	
			余弦	15	
			横ベクトル	7	
			予備電源	128	
			予約変数	4	
			【ら】		
			ラグランジュ法	88	
			ラジアン単位の余弦	15	
			ラプラス変換	29	
			【り】		
			リアルタイム	152	
			離散時間システム	1	
			離散状態	17	
			流出温度	125	
			流動特性	127	
			流入温度	125	
			流量コントローラの設計	147	
			流量制御バルブ	126	
			流量弁	125	
			流路	127	
			隣接要素	14	
			【れ】		
			連続時間システム	1	
			【ろ】		
			ロール角	80	

[B]		[H]		[S]	
Bezout 等式	132	Handle Graphics 変数	14	Scope ブロック	21
[C]		help コマンド	14	set 関数	14
C 言語	2	[I]		Simulink	3
clear コマンド	6	integral 関数	13	——の起動	15
Commonly Used Blocks	17	inv 関数	10	sind 関数	15
Continuous	18	I/O モジュール	144	Sine Wave ブロック	21
Control Window	152	[L]		Sinks	18
[D]		Lipschitz オペレータ	111	Sources	19
DCS 装置	128	lookfor コマンド	15	Step ブロック	25
delete コマンド	6	[M]		Sum ブロック	25
diag 関数	9	m ファイル	134	System View	144
diff 関数	13	Math Operation	17	[T]	
D-H 法	82	ブロック	17	To Workspace ブロック	21
Discrete ブロック	17	MATLAB	2	Trend Window	153
DSET ブロック	151	max 関数	13	[U]	
[E]		[P]		uicontrol 関数	14
eig 関数	9	PID ブロック	142	User-Defined Functions	19
[F]		plot 関数	6	[V]	
FCS のダウンロード	156	Prandtl-Ishlinskii	113	V-ネット	129
Function Block	147	モデル	113	[R]	
[G]		PVI ブロック	149	RLC 回路	24
Gain ブロック	21	[R]		[数字]	
get 関数	14	reshape 関数	7	0 次ホールド	52
GUI ベース	3	rimote input output	129	1 次遅れ+むだ時間	
		RIO	129	システム	53

—— 著者略歴 ——

鄧 明聡 (とう めいそう)

- 1997年 熊本大学大学院自然科学研究科博士
後期課程修了 (システム科学専攻)
博士 (学術)
1997年 熊本大学助手
2000年 英国エクスター大学リサーチフェロー
2001年 NTT コミュニケーション科学基礎研
究所研究員
2002年 岡山大学助手
2005年 岡山大学助教授
2007年 岡山大学准教授
2010年 東京農工大学教授
現在に至る

協谷 伸 (わきたに しん)

- 2013年 広島大学大学院工学研究科博士後期
課程修了 (システムサイバネティク
ス専攻)
博士 (工学)
2013年 東京農工大学助教
現在に至る

姜 長安 (じゃん ちゃんあん)

- 2009年 岡山大学大学院自然科学研究科博士
後期課程修了 (産業創成工学専攻)
博士 (学術)
2009年 岡山大学戦略的プログラム支援ユニッ
ト特別助教
2010年 株式会社エスシーエー JST 研究員
2011年 香川大学研究員
2012年 理化学研究所研究員
2015年 立命館大学助教
現在に至る

MATLABによるシステムプログラミング

— プロセス・ロボット・非線形システム制御から DCS 構築まで —

System Programming by MATLAB

— From Control of Process, Robot and Nonlinear System to DCS Construction —

© Mingcong Deng, Chang'an Jiang, Shin Wakitani 2016

2016 年 4 月 18 日 初版第 1 刷発行

★

検印省略

著 者 鄧 明 聡
姜 長 安
脇 谷 伸

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 978-4-339-03219-2 (新井) (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