MATLAB による
動的システムシミュレーション入門

2001 年度前期 (制御機器)

島根大学総合理工学部
電子制御システム工学科

吉田和信

Copyright ©2001 Kazunobu Yoshida. All rights reserved.

目 次

第 1 章 Matlab 入門 **1**
1.1 Matlab の起動と実行 1
1.2 行列の入出力 1
1.3 行列の和・差・積・転置・べき乗 2
1.4 行列関数 4
1.5 単位行列・零行列・対角行列 6
1.6 条件判定・繰り返し 7
1.6.1 if, else, elseif 7
1.6.2 switch 9
1.6.3 while 9
1.6.4 for 10
1.7 種々の行列の作成法 12
1.7.1 行列要素の指定 12
1.7.2 行列のサイズ 13
1.7.3 行列の結合と削除 13
1.8 数学関数 18
1.9 多項式に関する関数 21
1.9.1 多項式の表現，零点，特性方程式 22
1.9.2 多項式曲線のあてはめ 24
1.10 ユーザ定義関数の書き方 24
1.11 数学関数に関する関数 26
1.12 ファイルに対する入出力 28

第 2 章 シミュレーションの基礎 **31**
2.1 オイラー法 31
2.2 ルンゲクッタ法 33
2.3 伝達関数から状態方程式を作る方法 35
2.3.1 1 次系 35
2.3.2 2 次系 35
2.3.3 分母と分子の次数が等しい場合 37
2.4 位相面図の描き方 38
2.5 非線形制御の例：可変長振子系の振動制御問題 42

2.6 制御系設計用関数 47
2.6.1 極配置法 47
2.6.2 オブザーバ 48
2.6.3 LQG 制御 52
2.7 伝達関数に基づく解析法 56
2.7.1 システムの伝達関数表現 56
2.7.2 伝達関数の結合 57
2.7.3 極の計算 59
2.7.4 過渡応答 61
2.7.5 周波数応答 61

第1章　Matlab入門

Matlab は，科学・工学分野のさまざまな数値計算，データ解析，シミュレーション，視覚化のための統合環境を提供するソフトウェアである．
Matlab の特長は以下のとおりである．

- 行列計算および各種の関数計算機能が充実している．
- プログラミングを効率的に行うことができる．
- 計算が高精度かつ高速である．

では，Matlab によるプログラミングを学習しよう．

1.1　Matlabの起動と実行

[スタート・プログラム・Matlab・Matlab] をクリックして Matlab を起動する．Matlab Command Window が開く．Command Window では，コマンドを 1 行ごと入力して実行する．通常のプログラムは M ファイルとして作り，ファイル名を拡張子 m を付けて「ファイル名.m」として保存する．それから，Command Window で「ファイル名」(拡張子は付けない) を入力することにより実行する．

1.2　行列の入出力

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

を入力して Command Window に出力しよう．Command Window で入力するには

```
A = [1 2 3;4 5 6;7 8 9];
```

とする．行列要素の入力方法に注意されたい．行ごとに入力し，‘;’ で次の行となる．また，Matlab では配列を定義する必要がなく，必要な数だけ自動的に確保される．行末の ‘;’ は結果を出力しないという命令である．結果を出力するには，行末の ‘;’ を取るか，または，単に出力したい変数名を書き，[Enter] キーを押す．

```
A
A =
     1     2     3
     4     5     6
     7     8     9
```

次に，これを M ファイルで実行してみよう．まず，1 番左のアイコン (New file) をクリックして Matlab Editor/Debugger Window を開く．プログラムは以下のようである．%より右はコメントなので実際に入力する必要はない．

file1.m

```
A = input('Enter matrix A ')
```

このファイルを例えば `file1.m` として保存しよう．そして，Command Window に戻りつぎのように入力する

```
file1
Enter matrix A [1 2 3;4 5 6;7 8 9]
A =
     1     2     3
     4     5     6
     7     8     9
```

A がスカラーのとき，'`[ ]`' を省略できる．行列をプログラムの中に書く場合

```
A=[1 2 3;4 5 6;7 8 9];
```

とすればよい．

演習

1. 次の行列を入力してみよう．

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.3　行列の和・差・積・転置・べき乗

$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ 行列の和・差は，単に

```
X = A ± B
```

また，積は

```
X = A*B
```

と書く．もちろん，$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ の次元は，各演算が定義できるように整合性を持つとするが，一方がスカラーの場合は例外で行列 A，スカラー t に対して

```
X = A*t
```

という計算ができる．この場合，A のすべての要素に t が掛けられる．

$\boldsymbol{A}$ の転置行列は

```
X = A'
```

で求まる．また，$\boldsymbol{A}$ の k 乗 (k は任意の実数でよい) は

```
X = A^k
```

で計算される．

例題 **1.1** $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ を入力して，$\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}$ を計算するプログラムを作成せよ．また，つぎの行列について，具体的に計算してみよ．

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 2 & 3\\ 4 & 5 & 6\\ 7 & 8 & 9\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}1 & -1 & 1\\ 2 & 2 & -1\\ -1 & 2 & 1\end{bmatrix}$$

(解答例)

```
A = input('Enter matrix A ')
B = input('Enter matrix B ')
X = A + B
Y = A - B
```

(実行例)

```
Enter matrix A [1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]
A =
     1     2     3
     4     5     6
     7     8     9
Enter matrix B [1 -1 1; 2 2 -1; -1 2 1]
B =
     1    -1     1
     2     2    -1
```

```
    -1     2     1

X =
     2     1     4
     6     7     5
     6    10    10

Y =
     0     3     2
     2     3     7
     8     6     8
```

演習

1. $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ を入力して，$\boldsymbol{AB}$ を計算するプログラムを作成せよ．そして，つぎの場合を計算してみよ．

(1) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}$ (答) $\boldsymbol{AB} = 10$

(2) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & -2 \\ 3 & -3 \\ 4 & 4 \end{bmatrix}$ (答) $\boldsymbol{AB} = \begin{bmatrix} 30 & 4 \\ 70 & 4 \end{bmatrix}$

(3) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$ (答) $\boldsymbol{AB} = \begin{bmatrix} 6 \\ 5 \\ 3 \end{bmatrix}$

2. 次の $\boldsymbol{A}$, k に対する $\boldsymbol{A}^k$ を計算してみよ．

(1) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$, $k = 5$ (答) $\begin{bmatrix} -38 & 41 \\ -41 & -38 \end{bmatrix}$

(2) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$, $k = -2$ (答) $\begin{bmatrix} 0.12 & -0.16 \\ 0.16 & 0.12 \end{bmatrix}$

1.4 行列関数

正則行列 $\boldsymbol{A}$ の逆行列は，単に

```
X = inv(A)
```

で求まる．Matlab には，このような便利な関数が多数用意されている．よく使用される関数を表 1.1 に示す．関数の使用法の詳細については，必要に応じて，Help Window で調べる．ちなみに，線形方程式

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}$$

の解は

```
x = A\b
```

で計算できる．

表 1.1: 代表的な行列関数

関数	意味
norm	行列またはベクトルノルム
rank	行列のランク（階数）
det	行列式
inv	逆行列
eig	固有値と固有ベクトル
expm	行列指数関数

演習

1. 次の行列について，逆行列と行列式を計算せよ（逆行列 $\boldsymbol{X}$ の検算には $\boldsymbol{X}\boldsymbol{A} = \boldsymbol{I}$ が利用できる）．

$$(1)\quad \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 3 & 2 \\ -1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$(\text{答})\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & -0.8 & 0.2 \\ 0.5 & -0.5 & 0.5 & 0 \\ -0.1 & 0.3 & -0.1 & 0.4 \\ -0.1 & 0.3 & -0.1 & -0.6 \end{bmatrix}, \quad |\boldsymbol{A}| = 10$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{答})\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad |\boldsymbol{A}| = -1$$

2. 次の行列のランクを求めよ．

(1) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ (答)2　(2) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ (答)2

(3) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$ (答)2

(4) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 16 & 2 & 3 & 13 \\ 5 & 11 & 10 & 8 \\ 9 & 7 & 6 & 12 \\ 4 & 14 & 15 & 1 \end{bmatrix}$ (答)3

(5) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 3 & 6 & 10 \\ 1 & 4 & 10 & 20 \end{bmatrix}$ (答)4

3. 次の $\boldsymbol{A}$ について，$\boldsymbol{e}^A$ を計算せよ．

(1) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ (答) $\boldsymbol{e}^A = \begin{bmatrix} 0.6597 & 0.5335 \\ -0.5335 & 0.1262 \end{bmatrix}$

(2) $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$ (答) $\boldsymbol{e}^A = \begin{bmatrix} 0.3679 & 0.3679 & 0.1839 \\ 0 & 0.3679 & 0.3679 \\ 0 & 0 & 0.3679 \end{bmatrix}$

1.5　単位行列・零行列・対角行列

n 次単位行列 $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{I}(n \times n)$ を作る場合

```
X = eye(n,n)
```

また，零行列 $\boldsymbol{0}(n \times m)$ の場合

```
zeros(n,m)
```

とする．同様に，すべての要素が 1 の $n \times m$ 行列は

```
ones(n,m)
```

である．

対角行列

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

の場合

```
v=[1 9 4 4 2];
D=diag(v,0)
```

と書く．

1.6 条件判定・繰り返し

1.6.1 if, else, elseif

if の使い方を例題によって説明しよう．

例題 **1.2** a, b を入力して，$b \neq 0$ ならば

$$y = a/b \tag{1.1}$$

を出力するプログラムを作成せよ．

(解答例)

```
a = input('Enter a ');
b = input('Enter b ');
if b ~= 0
   y = a/b
end
```

例題 **1.3** x を入力して

$$y = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad x \geq 0 \\ -1 & \text{if} \quad x < 0 \end{cases} \tag{1.2}$$

を出力するプログラムを作成せよ．

(解答例)

```
x = input('Enter x ');
if x >= 0
```

```
   y = 1;
else
   y = -1;
end
y
```

例題 **1.4** x を入力して

$$y = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad x > 0 \\ 0 & \text{if} \quad x = 0 \\ -1 & \text{if} \quad x < 0 \end{cases} \tag{1.3}$$

を出力するプログラムを作成せよ．

(解答例)

```
x = input('Enter x ');
if x > 0
   y = 1;
elseif x<0
   y = -1;
else
   y = 0;
end
y
```

if ループは何重にもできる．また，if の中で elseif を何回でも使える．if や while で使われる関係演算子を表 1.2 に示す．

表 1.2: 関係演算子

演算子	意味
<	$<$
<=	$\leq$
>	$>$
>=	$\geq$
==	$=$
~=	$\neq$

1.6.2 switch

例題 **1.5** n を入力し

$n = -1$	ならば	`minus one`
$n = 0$	ならば	`zero`
$n = 1$	ならば	`one`
その他の場合		`other value`

を出力するプログラムを作成せよ．

(解答例)

```
n = input('Enter n ');
switch n
case -1
   disp('minus one');
case 0
   disp('zero');
case 1
   disp('one');
otherwise
   disp('other value');
end
```

`switch` は次のような使い方もできる．

```
n = input('Enter n ');
switch n
case 1
   disp('1');
case {2,3,4}
   disp('2 or 3 or 4');
case 5
   disp('5');
otherwise
   disp('other value');
end
```

1.6.3 while

`while` は次の構文で使う．

```
while 条件
   statements
end
```

while は条件が成立する限り，*statements* を実行する．while ループは break でいつでも中断できる．

例題 **1.6** 与えられた正数 a を $\epsilon = 0.001$ よりも小さくなるまで 2 で割り続けるプログラムを作成せよ．

(解答例)

```
eps = 0.001;
a = input('Enter a ');
while a >= eps
   a = a*0.5
end
```

1.6.4 for

for は次の構文を持つ．

for *index* = *start* : *increment* : *end*
    statements
end

index を増分 *increment* で変えながら，*statements* を *end* まで実行する．増分は負でもよい．増分を省略すると $increment = 1$ となる．

例題 **1.7** n は正整数とする．1 から n までの和を求めるプログラムを作成せよ．

(解答例)

```
n = input('Enter n ');
s = 0;
for i = 1:n
   s = s + i;
end
s
```

for も break によっていつでも中断できる．

C 言語の goto に相当する文は Matlab にはないが，本節で述べた構文を組み合わせることによって，任意のプログラムを記述できる．

演習

1. 実数 x と正整数 n が与えられたとき

   $$y = 1 + x + x^2 + \cdots + x^n$$

   を計算するプログラムを作成せよ．
   (ヒント) 次のプログラムが使える．

   ```
   a = 1;
   y = 1;
   for i = 1:n
     a = a*x;
     y = y + a;
   end
   ```

2. 実数 $x(|x| < 1)$ と正数 ϵ が与えられたとき

   $$y = 1 + x + x^2 + \cdots$$

   を計算するプログラムを作成せよ．ただし，終了基準は

   $$|x^k| < \epsilon$$

   とする ($|x|$ は `abs(x)` で計算できる)．

3. 正整数 n が与えられたとき，n の階乗

   $$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots n$$

   を計算するプログラムを作成せよ．
   (ヒント) 次のプログラムが使える．

   ```
   y = 1;
   for i = 1:n
     y = y*i;
   end
   ```

   または

   ```
   x = 1:n;
   y = prod(x)          % x の要素の積を計算する関数
   ```

   でもよい．

4. 正整数 $n, r(n \geq r)$ が与えられたとき，組み合わせの数

   $$_nC_r = \frac{n(n-1)(n-2)\cdots(n-r+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots r}$$

   を計算するプログラムを作成せよ．

5. 実数 x に対して，次の級数を計算するプログラムを作成せよ．ただし，ϵ を与えた正数とするとき，新たに加える項の絶対値が ϵ より小さくなるまで計算するものとする．

   (1)　$y = 1 + x + x^2/2! + x^3/3! + \cdots$　（$x = 1$ のとき $y \to 2.7183$）

   (2)　$y = 1 - x^2/2! + x^4/4! - + \cdots$　（$x = 1$ のとき $y \to 0.5403$）

   (3)　$y = x - x^3/3! + x^5/5! - + \cdots$　（$x = 1$ のとき $y \to 0.8415$）

6. 次の級数を計算するプログラムを作成せよ．ただし，ϵ を与えた正数とするとき，新たに加える項の絶対値が ϵ より小さくなるまで計算するものとする．

   (1)　$y = \dfrac{1}{1\cdot 2} + \dfrac{1}{2\cdot 3} + \dfrac{1}{3\cdot 4} + \cdots \quad (= 1)$

   (2)　$y = \dfrac{1\cdot 2}{1\cdot 3} + \dfrac{1\cdot 2\cdot 3}{1\cdot 3\cdot 5} + \dfrac{1\cdot 2\cdot 3\cdot 4}{1\cdot 3\cdot 5\cdot 7} + \cdots \quad \left(= \dfrac{\pi}{2}\right)$

   （Matlab では π を `pi` で表す．）

1.7　種々の行列の作成法

1.7.1　行列要素の指定

行列の要素は

```
x(i)      A(i,j)
```

などと指定する．よって，n を正整数とすると

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \end{bmatrix}$$

を生成するプログラムは

```
x = [];
for i = 1:n
  x(i) = i;
end
```

と書ける．また

```
x = 1:n
```

と書くこともできる．後者の方が Matlab らしい書き方で，前者に比べ計算速度も速い．

今度は n 次 Jordan 細胞 $\boldsymbol{J}_n(\lambda)$ を作ってみよう．Jordan 細胞は例えば

$$\boldsymbol{J}_3(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & 1 & 0 \\ 0 & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{J}_4(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

という規則的な形をしている．

```
J = [];
n = input('Enter n ');
lambda = input('Enter lambda ');
J = eye(n,n)*lambda;
for i = 1:n-1
  J(i,i+1) = 1;
end
J
```

1.7.2 行列のサイズ

いま，プログラム中で $\boldsymbol{A}$ 行列が与えられていて，このサイズ (行と列の数) を知りたいとき

```
d = size(A)
```

とする．すると，$\boldsymbol{A}$ が 3×4 行列の場合，答えが

```
d =
    3    4
```

となる．すなわち，d(1)=3 d(2)=4 という意味である．
$\boldsymbol{A}$ と同じサイズの零行列 $\boldsymbol{Z}$ を作る場合

```
Z = zeros(size(A))
```

とする．同様に，$\boldsymbol{A}$ とサイズが同じで，要素がすべて 1 の行列 $\boldsymbol{S}$ は

```
S = ones(size(A))
```

で作れる．

1.7.3 行列の結合と削除

$\boldsymbol{A}$ に $\boldsymbol{B}$ を追加して新しい行列 $\boldsymbol{C}$ を作る場合以下のようにする．

$$\boldsymbol{C} = \left[\begin{array}{cc} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \end{array} \right]$$

の場合

```
C = [A B]
```

また

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{B} \end{bmatrix}$$

の場合

```
C = [A;B]
```

と書く．
　$\boldsymbol{A}$ の第 i 列を削除した行列 $\boldsymbol{X}$ を作る場合

```
X = A;
X(:,i) = []
```

同様に，$\boldsymbol{A}$ の第 i 行を削除した行列 $\boldsymbol{X}$ を作る場合

```
X = A;
X(i,:) = []
```

とする．また，$\boldsymbol{A}$ の第 i 列から第 j 列までを削除した行列 $\boldsymbol{X}$ を作る場合

```
X = A;
X(:,i:j) = []
```

とする．

例題 **1.8** 動的システム

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) \tag{1.4}$$

ただし

$$\boldsymbol{A}(n \times n)\ ,\ \boldsymbol{B}(n \times r)$$

の可制御性行列は次式で定義される．

$$\boldsymbol{U}_c := [\ \boldsymbol{B} \quad \boldsymbol{A}\boldsymbol{B} \quad \cdots \quad \boldsymbol{A}^{n-1}\boldsymbol{B}\ ] \tag{1.5}$$

この行列を作るプログラムを作成せよ．そして，次の $(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$ に対する可制御性行列を計算してみよ．

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(解答例)

```
n = input('Enter n ');
A = input('Enter A ');
B = input('Enter B ');
Uc = B;
X = B;
for i = 1:n-1
   X = A*X;
   Uc = [Uc X];
end
Uc
```

(実行例)

```
Enter n 3
Enter A [0 1 0; 0 0 1; 1 0 0]
Enter B [1;0;1]
Uc =
     1     0     1
     0     1     1
     1     1     0
```

演習

1. 次の行列を任意の正整数 n に対して作るプログラムを書いてみよう .

$$\boldsymbol{R}_1 = 1 \quad \boldsymbol{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{R}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix} \quad \cdots$$

2. $\boldsymbol{v} = [\ 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1\ ]$ とする .

   `diag(v,1), diag(v,-1), diag(v,2), diag(v,-2)`

   がどのような行列になるか調べてみよう .

3. 任意の正整数 n について , 対角行列

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 2 & & \boldsymbol{0} \\ & & \ddots & \\ \boldsymbol{0} & & & n \end{bmatrix}$$

   を作るプログラムを作成せよ .
   (ヒント)

```
n = input('Enter n ');
v = 1:n
D = diag(v,0)
```

4. 動的システム

$$\left.\begin{array}{rcl} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &=& \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) &=& \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) \end{array}\right\} \tag{1.6}$$

ただし

$$\boldsymbol{A}(n\times n)\text{，}\ \boldsymbol{C}(m\times n)$$

の可観測性行列

$$\boldsymbol{U}_o := \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} \\ \boldsymbol{C}\boldsymbol{A} \\ \vdots \\ \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}^{n-1} \end{bmatrix} \tag{1.7}$$

を作るプログラムを作成せよ．そして，次の $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{C})$ に対する可観測性行列を計算してみよ．

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{答})\boldsymbol{U}_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5. 動的システム

$$\left.\begin{array}{rcl} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &=& \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) &=& \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) \end{array}\right\} \tag{1.8}$$

の次数を n とするとき，可制御性条件および可観測性条件は

$$\operatorname{rank}\boldsymbol{U}_c = n,\quad \operatorname{rank}\boldsymbol{U}_o = n \tag{1.9}$$

である．可制御性・可観測性を判定するプログラムを作成せよ．そして，次のシステムの可制御性・可観測性を判定してみよ．

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(答)$\operatorname{rank}\boldsymbol{U}_c = 3,\quad \operatorname{rank}\boldsymbol{U}_o = 4$　したがって，不可制御・可観測である．

6. $\boldsymbol{A}(n \times n)$, $\boldsymbol{x}(n \times 1)$ とする．差分方程式

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k), \quad \boldsymbol{x}(0) = \boldsymbol{x}_0, \quad k = 0, 1, \ldots$$

の解を $k = 0, 1, \ldots, t_f$ について求めるプログラムを作成せよ．そして，次の $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{x}_0$, t_f について実行してみよ．

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0.8 & 1 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{x}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad t_f = 20$$

（ヒント）

```
x = input('Enter x ');
tf = input('Enter tf ');
A = [0.8 1; 0 0.8]
y = [];
for i = 1:tf+1
   y(:,i) = x;
   x = A*x;
end
y
```

7. 差分方程式

$$y(k+2) + a_1 y(k+1) + a_0 y(k) = 0, \quad y(0) = y_0, \quad y(1) = y_1, \quad k = 0, 1, \ldots$$

の解 $y(k)$, $k = 0, 1, \ldots, t_f$ を求めるプログラムを作成せよ．そして，次のデータについて実行してみよ．

$$a_0 = 0.25, \quad a_1 = -1, \quad y(0) = 1, \quad y(1) = 1, \quad t_f = 20$$

8. n を正整数とする．フィボナッチ数列

1, 1, 2, 3, 5, 8, ...

（第 1 項 = 第 2 項 = 1 とし，第 i 項を第 $i-2$,$i-1$ 項の和により求める）

を第 n 項まで作るプログラムを作成せよ．

9. 実数 x と正整数 n が与えられたとき，ベクトル

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & \ldots & x^n \end{bmatrix}$$

を作るプログラムを作成せよ．

10. [0, 1] の範囲で n 個の乱数 (実数)

$$x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$$

を発生させ，この内の最大値と最小値を求めよ．そして，小さい順に並べ替えよ．
(ヒント)

```
n = input('Enter n ');
x = rand(1,n)          % 1 × n の乱数を発生させる関数
xmax = max(x)          % 最大値を求める関数
xmin = min(x)          % 最小値を求める関数
y = sort(x)            % 小さい順に並べ替える関数
```

11. [0, 1] の範囲で n 個の乱数 (実数)

$$x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$$

を発生させ，大きい順に並べ替えよ．
(ヒント) 大きい順に並べ替える関数は用意されていないので，やはり sort を利用する．

1.8　数学関数

sin, cos などの数学関数が一通り用意されている．また，このような関数はベクトル計算もできる．例えば，$\sin(t)$ を種々の t に対して計算する場合

```
y = [];
i = 0;
for t = 0:0.01:10
    i = i + 1;
    y(i) = sin(t);
end
```

の代わりに

```
t = 0:0.01:10;
y = sin(t);
```

とできる．後者の方が Matlab に適した書き方で，計算速度も前者より速い．ちなみに，後者のプログラムで得た t，y をグラフ表示するには

```
plot(t,y)
grid on
```

とする (図 1.1)．代表的な関数を表 1.3 に示す．

表 1.3: 代表的数学関数

数学関数	意味
sin	sin
cos	cos
tan	tan
asin	arcsin
acos	arccos
atan	arctan
atan2	4 象限逆正接
sinh	sinh
cosh	cosh
tanh	tanh
exp	exp
log	ln
log10	$\log_{10}$
sqrt	平方根
abs	絶対値
real	複素数の実部
imag	複素数の虚数部
sign	符号関数

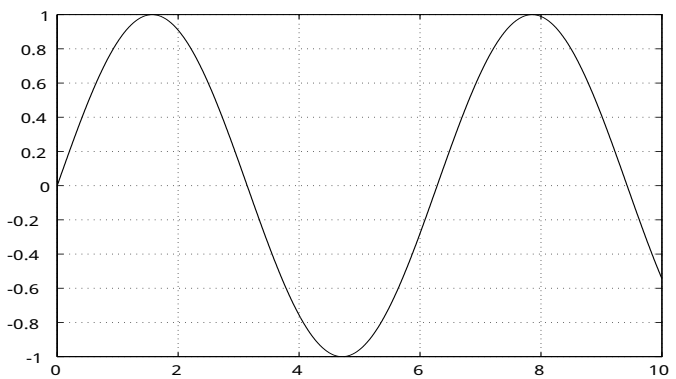

図 1.1: $y = \sin t$ のグラフ

例題 1.9 関数

$$y(t) = e^{-0.5t} \cos 5t \tag{1.10}$$

のグラフを描け．ただし，t の範囲を $[0, 10]$，プロット点の刻み幅を 0.1 とする．

（解答例）

```
t = 0:0.1:10;
y = exp(-0.5*t).*cos(5*t);
plot(t,y)
grid on
```

.* は要素毎の掛け算を表す．グラフを図 1.2 に示す．

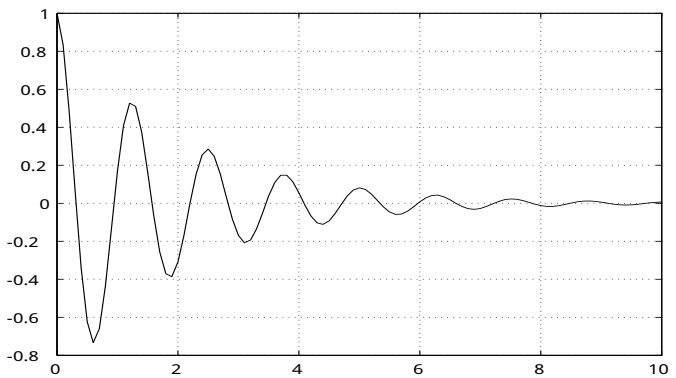

図 1.2: $y = e^{-0.5t} \cos 5t$ のグラフ

例題 **1.10** 図 1.3 に示す関数は

$$f(x) = \frac{4k}{\pi}\left(\sin x + \frac{1}{3}\sin 3x + \frac{1}{5}\sin 5x + \cdots\right) \tag{1.11}$$

とフーリエ級数展開される．この級数を第 n 項まで計算した結果をグラフ表示せよ．ただし，グラフ表示の範囲を $[-10, 10]$，プロット点の刻み幅を 0.02 とする．

（解答例）

```
k = input('Enter k ');
n = input('Enter n ');
x = -10:0.02:10;
y = zeros(size(x));
a = 1;
for i = 1:n
   y = y + sin(a*x)/a;
   a = a + 2;
end
```

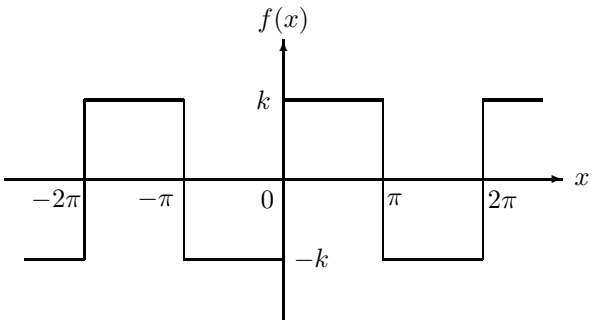

図 1.3: 矩形波関数

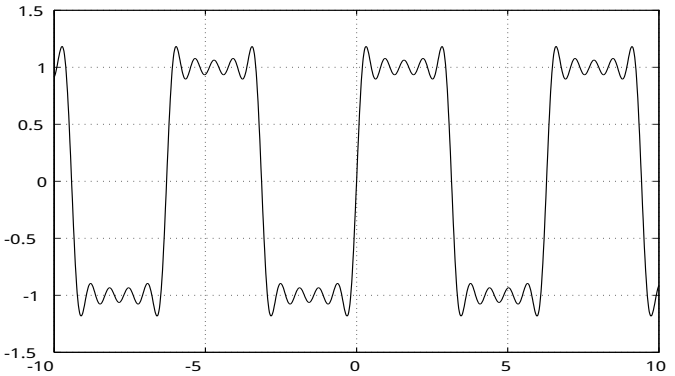

図 1.4: 例題 1.10 $k = 1$, $n = 5$ の場合

```
y = y*4*k/pi;
plot(x,y)
grid on
```

演習

1. 図 1.5 に示す関数は

$$f(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi}\left(\cos x + \frac{1}{3^2}\cos 3x + \frac{1}{5^2}\cos 5x + \cdots\right) \tag{1.12}$$

とフーリエ級数展開される．この級数を第 n 項まで計算した結果をグラフ表示せよ．ただし，グラフ表示の範囲を $[-10, 10]$，プロット点の刻み幅を 0.02 とする．

1.9 多項式に関する関数

多項式に関する代表的な関数を表 1.4 に示す．

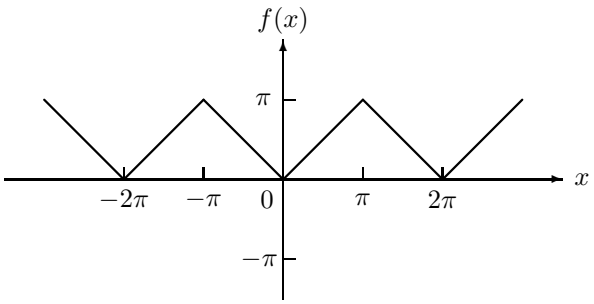

図 1.5: 三角波関数

表 1.4: 多項式に関する関数

関数	説明
roots	根を求める
poly	指定根を与える多項式
poly	正方行列に対する特性多項式
polyval	多項式の値
polyvalm	行列多項式の値
polyfit	多項式によるデータの最小二乗内挿
conv	多項式の掛け算
deconv	多項式の割り算

1.9.1 多項式の表現，零点，特性方程式

Matlab では，多項式を降べき順に係数を並べたベクトルとして表現する．すなわち，多項式

$$p(x) = -x^4 + 20x^2 - 20x + 5 \tag{1.13}$$

は

```
p = [-1 0 20 -20 5]
```

で表される．

この多項式の零点 (多項式 $= 0$ の根) は roots を用いて次のように求められる．

```
r = roots(p)
r =
   -4.9261
    3.8986
```

```
    0.5736
    0.4539
```

逆に，零点から多項式の係数を求めるには

```
p1 = poly(r)
p1 =
    1.0000   -0.0000  -20.0000   20.0000   -5.0000
```

とする．poly は，正方行列 $\boldsymbol{A}$ に対する特性多項式を求めるときにも使用できる．例えば

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

の場合

```
A = [0 1 0; -1 0 0; 0 -1 2];
p2 = poly(A)
p2 =
     1    -2     1    -2
```

と計算できる．すなわち，特性多項式は

$$p_2(x) = |x\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}| = x^3 - 2x^2 + x - 2$$

である．
$p(x)$ の $x = 1$ における値は，polyval を用いて

```
y = polyval(p,1)
y =
     4
```

と計算できる．

例題 1.11 polyval 関数を使って $p(x) = -x^4 + 20x^2 - 20x + 5$ のグラフを描いてみよう．ただし，x の範囲を $[-5, 5]$，プロット点の刻み幅を 0.02 とせよ．

(解答例)

```
p = [ -1 0 20 -20 5];
x = -5:0.02:5;
y = polyval(p,x);
plot(x,y)
grid on
```

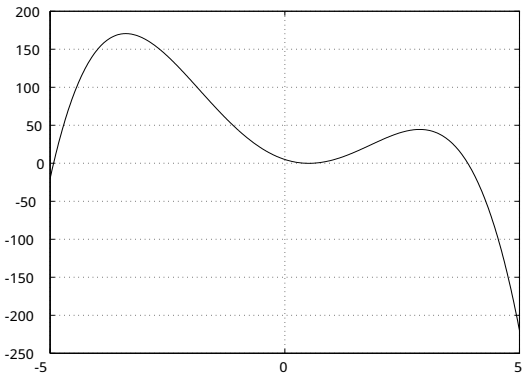

図 1.6: $p(x) = -x^4 + 20x^2 - 20x + 5$ のグラフ

1.9.2 多項式曲線のあてはめ

polyfit は，平面上の与えられたデータ点の集合を n 次多項式曲線で最小二乗近似する関数である．次のデータを考えよう．

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 4 & 10 & 18 & 27 & 41 & 59 & 79 & 93 & 101 \end{bmatrix}$$

このデータを n 次多項式曲線で近似するプログラムは次のように書ける．

```
n = input('Enter n ');
x = 0:10;
y = [0 3 4 10 18 27 41 59 79 93 101];
p = polyfit(x,y,n)
x1 = 0:0.1:10;
y1 = polyval(p,x1);
plot(x,y,'o',x1,y1)    % (x,y) データを o で表示し
                       % (x1,y1) データを線で結ぶ
grid on
```

$n = 3$ とした場合の実行例を図 1.7 に示す．

1.10 ユーザ定義関数の書き方

ユーザ定義関数の書き方を例題で見てみよう．

例題 **1.12** n 個のデータ $x_1, x_2, \cdots, x_n$ の平均 $\bar{x}$ と分散 σ^2 は次式で求められる．

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1.14}$$

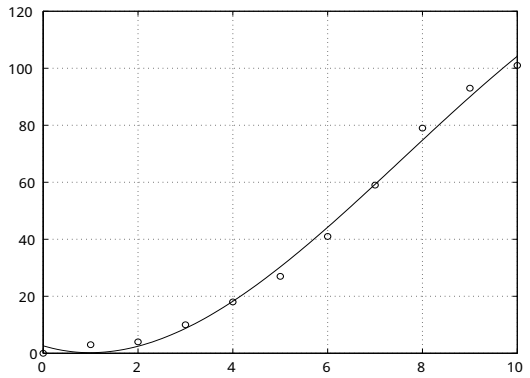

図 1.7: データ点に対する多項式曲線のあてはめ

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \tag{1.15}$$

ベクトル $\boldsymbol{x}$ を

$$\boldsymbol{x} := \left[\begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \end{array}\right]$$

と定義する．$\boldsymbol{x}$ を入力して，$\bar{x}$, σ^2 を出力する関数を作成せよ．

(解答例)

ファイル名：heikin.m

```
function [a, b] = heikin(x)
% 平均と分散を求める関数．a:平均　b:分散
n = length(x);  % x の要素数
a = sum(x)/n;   % sum(x):x の要素の総和
b = sum((x-a).^2)/n;
```

この関数を呼ぶプログラムの例を次に示す．

```
x = input('Enter x ');
[mean,sigma2] = heikin(x)
```

引数 (複数の場合コンマで区切る) を関数に渡し，戻り値 (複数の場合コンマで区切る) を関数から得る．引数と戻り値以外の関数中の変数はメインプログラムや他の関数プログラムに対して独立している．もちろん，引数や戻り値は行列でもよい．

関数名は英字で始め，他に数字やアンダーバーの記号が使える．関数名として認識されるのは，最初の 31 文字である．ファイル名は

関数名.m

とする．

1.11 数学関数に関する関数

関数に関する計算を行う関数でよく使われるものを表 1.5 に示す．

表 1.5: 数学関数に関する関数

関数	説明
fmin	1 変数関数の最小点を求める
fmins	多変数関数の最小点を求める
fzero	1 変数関数の零点を求める
fplot	関数をグラフ表示する

関数

$$f_1(x) = -x^4 + 20x^2 - 20x + 5 \tag{1.16}$$

の区間 $[-2, 2]$ での最小点を fmin を使って求めてみよう (図 1.6 参照) ．まず，関数を次のファイルで定義しておく．

ファイル名：func_1.m

```
function y = func_1(x)
y = -x^4 + 20*x^2 - 20*x + 5;
```

そして，fmin を次のように実行する．

```
x1 = fmin('func_1',-2,2)
x1 =
    0.5135
```

最小値を求める場合，さらに

```
y1 = func_1(x1)
y1 =
   -0.0659
```

とすればよい．最大値を求める場合，関数の最大値を計算する関数は用意されていないので，関数にマイナスを付けてから fmin を用いる．

また，fzero を使って，関数 $f(x)$ の区間 $[a_1, a_2]$ の零点 ($f(x) = 0$ となる x) を求めることができる．ただし，条件

$$f(a_1)f(a_2) < 0 \tag{1.17}$$

を満たす必要がある．例として，$f_1(x)$ の区間 $[2, 5]$ における零点を求めると

```
z1 = fzero('func_1',[2,5])
z1 =
    3.8986
```

となる．z1 が零点であることは

```
y = func_1(z1)
y =
     0
```

によって確認できる．

例題 1.13 関数

$$f_2(x) = e^{-0.5x}\cos 5x - 0.4e^{-0.3x} \tag{1.18}$$

の零点をすべて求めよ．参考のため，この関数のグラフを図 1.8 に示す．

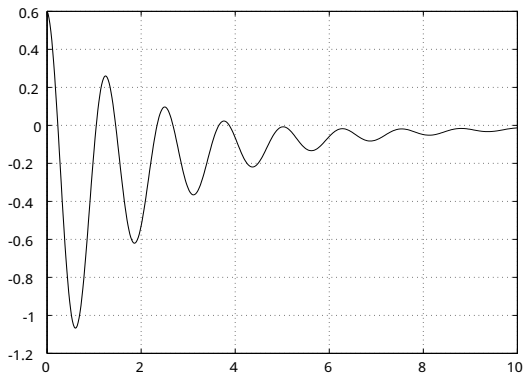

図 1.8: $f_2(x)$ のグラフ

(解答例) 関数ファイルを定義しておく．

ファイル名：func_2.m

```
function y = func_2(x)
y = exp(-0.5*x).*cos(5*x) - 0.4*exp(-0.3*x);
```

図 1.8 を参照して，区間 $[0, 10]$ で 0.1 刻みで関数の符号の変化を調べ，符号の変化した小区間にて fzero を実行していく．

```
t = 0:0.1:10;
y = func_2(t);
n = length(y);
```

```
k = 0;
for i = 1:n-1
   if y(i)*y(i+1) < 0
      k = k + 1;
      z(k) = fzero('func_2',[t(i) t(i+1)]);
   end
end
z
```

実行結果は次のとおりである．

```
z =
    0.2278    1.0456    1.4578    2.3376    2.6770    3.6517
    3.8738
```

さらに，これらが零点かどうかを確認すると

```
y = func_2(z)
y =
  1.0e-015 *
         0         0    0.2220    0.0833   -0.0833    0.1665
         0
```

となり，各点で関数値がほぼ零であることがわかる．

fplot を使えば，1 変数関数のグラフを容易に描くことができる．例えば，$f_1(x)$ を x の区間 $[-5, 5]$ で描く場合

```
fplot('func_1',[-5 5])
grid on
```

とする (図 1.6 参照) ．

演習

1. 次の関数の零点をすべて求めよ．

$$f(x) = \sin\left(\frac{1}{|x| + 0.05}\right)$$

(ヒント) fplot を使っていろいろな区間で $f(x)$ のグラフを観察してみよ．全部で 12 個の零点が存在する．

1.12 ファイルに対する入出力

数値などのファイルへの出力には fprintf，ファイルからの入力には fscanf 関数を使う．引数の書き方は C 言語に従う．ベクトルを扱えるところが C 言語と大きく違う点である．以下に例を示す．

```
x = 0:.1:1;
y = [x; exp(x)];
fid = fopen('C:\Matlab\exp.txt','w');
fprintf(fid,'%6.2f %12.8f \n',y);
fclose(fid)
```

次のデータ (ファイル名を exp.dat とする)

```
0.0   1.000000000
.10   1.10517092
...
1.0   2.71828183
```

を変数名 a で読み込む場合

```
fid = fopen('C:\Matlab\exp.dat');
a = fscanf(fid,'%f %f',[2 inf]) % It has two rows now.
a = a';
fclose(fid)
```

読み込み専用ファイルでオープンするには fopen で'r' を指定してもよいが , これはデフォルト (標準設定) なので省略することもできる . [2 inf] は ,「2 次元配列でファイルの最後まで読み込め」というオプションである .

第2章　シミュレーションの基礎

本章では，オイラー法またはルンゲクッタ法を用いて常微分方程式を解くプログラムの作り方を紹介する．Matlab には ode45 などの常微分方程式ソルバが用意されているが，制御則などをプログラムする際のフレキシビリティに欠ける．また，本章で説明するような基本的なプログラミングを知っておけば，制御系を計算機制御する際の計算機制御用プログラムを作るときにも役立つ．

2.1　オイラー法

次の連立一階常微分方程式（状態方程式）を考える．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t), \quad \boldsymbol{x}(0) = \boldsymbol{x}_0 \tag{2.1}$$

初期状態 $\boldsymbol{x}_0$ からの (2.1) 式の解（状態軌道）を求める問題を初期値問題という．

オイラー法とは，(2.1) 式を差分近似，すなわち，無限小 dt を有限の小さな正数 Δt で置き換えて，$\boldsymbol{x}(t)$, $\boldsymbol{u}(t)$ から Δt のちの状態 $\boldsymbol{x}(t+\Delta t)$ を

$$\boldsymbol{x}(t+\Delta t) \simeq \boldsymbol{x}(t) + (\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t))\Delta t \tag{2.2}$$

と近似計算する方法である．すなわち，オイラー法による近似は，$\boldsymbol{x}(t+\Delta t)$ を t のまわりでテイラー級数展開して，Δt の 1 次項までを考慮することに相当する．オイラー法はプログラムが容易であるが，刻み幅 Δt をある程度小さく与える必要がある．(2.1) 式をオイラー法を用いて解くプログラムの例を以下に示す．

例題 **2.1** 初期値問題 (2.1) をオイラー法で解くプログラムを作成せよ．そして，次の問題を解いてみよう．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \quad \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad u(t) = 1, \quad t \geq 0$$

ただし，刻み幅を $\Delta t = 0.05$，終了時刻を $t_f = 20$ とする．

（解答例）

ファイル名：ex2_1.m

```
A = [0 1; -1 -1];
```

```
B = [0;1];
u = 1;
dt = 0.05;
tf = 20;
x = [0;0];
xx = [];
i=0;
for t = 0:dt:tf
   i = i+1;
   xx(:,i) = x;
   dx = A*x + B*u;
   x = x + dx*dt;
end
t = 0:dt:tf;
plot(t,xx)
grid on
```

シミュレーション結果は plot によりグラフ表示される．

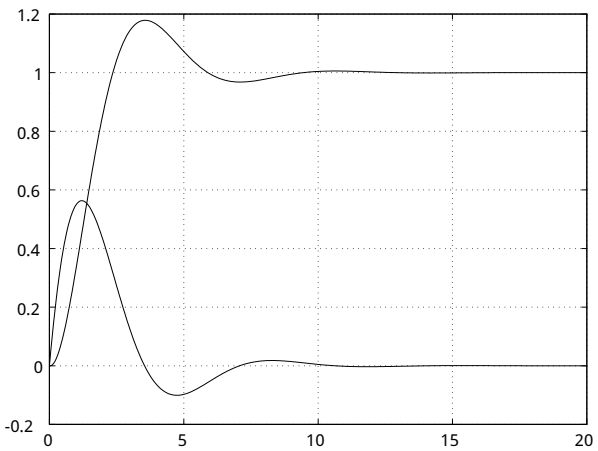

図 2.1: シミュレーション結果

演習

1. 次の初期値問題をオイラー法で解いてみよ．ただし，終了時刻を $t_f = 15$ とする．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t), \quad \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2. 次の初期値問題をオイラー法で解いてみよ．ただし，終了時刻を $t_f = 20$ とする．刻み幅を種々変えてみよ．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t), \quad \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.2 ルンゲクッタ法

以下で示す（4 次）ルンゲクッタ法は，$\boldsymbol{x}(t + \Delta t)$ を t のまわりでテイラー級数展開して，Δt の 4 次までの項を残したことに相当する近似法を用いる方法である．

一般的な連立一階微分方程式

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t)) \tag{2.3}$$

に対するルンゲクッタ法はつぎのように与えられる．

$$\boldsymbol{x}(t + \Delta t) \simeq \boldsymbol{x}(t) + \frac{\boldsymbol{d}_1 + 2\boldsymbol{d}_2 + 2\boldsymbol{d}_3 + \boldsymbol{d}_4}{6} \tag{2.4}$$

ただし

$$\left.\begin{array}{rcl} \boldsymbol{d}_1 &=& \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t))\Delta t \\ \boldsymbol{d}_2 &=& \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{d}_1/2)\Delta t \\ \boldsymbol{d}_3 &=& \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{d}_2/2)\Delta t \\ \boldsymbol{d}_4 &=& \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{d}_3)\Delta t \end{array}\right\} \tag{2.5}$$

ルンゲクッタ法はオイラー法に比べ格段に精度が良く，刻み幅をオイラー法よりも大きくとることができる．通常，シミュレーションでは，ルンゲクッタ法が使われる．

例題 **2.2** 初期値問題 (2.1) をルンゲクッタ法で解くプログラムを作成せよ．そして，次の問題を解いてみよ．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \quad \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad u(t) = 1, \quad t \geq 0$$

ただし，刻み幅を $\Delta t = 0.05$，終了時刻を $t_f = 20$ とする．

（解答例）

ファイル名：`ex2_2.m`

```
A = [0 1; -1 -1];
B = [0; 1];
u = 1;
dt = 0.05;
tf = 20;
x = [0 0]';
xx = [];
i=0;
for t=0:dt:tf
   i=i+1;
   xx(:,i)=x;
   xt = x;
   for j=1:4
      f = A*x + B*u;
      d(:,j) = f*dt;
      x = xt + d(:,j)*0.5;
      if j==3
         x = xt + d(:,j);
      end
   end
   x = xt + (d(:,1) + d(:,2)*2 + d(:,3)*2 + d(:,4))/6;
end
t=0:dt:tf;
figure(1)
plot(t,xx)
grid on
```

シミュレーション結果は図 2.1 とほぼ同じである．

演習

1. 次の初期値問題をルンゲクッタ法で解け．ただし，終了時刻を $t_f = 15$ とする．また，オイラー法の結果と比較してみよ．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t), \quad \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2. 次の初期値問題をルンゲクッタ法で解け．ただし，終了時刻を $t_f = 20$ とする．刻み幅を種々変えてみよ．また，オイラー法の結果と比較してみよ．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t), \quad \boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.3 伝達関数から状態方程式を作る方法

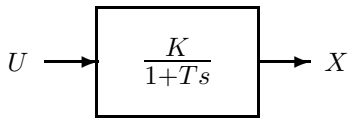

図 2.2: 1 次系の伝達関数

2.3.1 1 次系

伝達関数に対応する状態方程式を求めることを実現というが，まず，1 次系の伝達関数 (図 2.2) から実現の方法を説明しよう．ブロック線図から

$$\frac{X}{U} = \frac{K}{1+Ts} \tag{2.6}$$

これを変形すると

$$sX = \frac{1}{T}(KU - X) \tag{2.7}$$

となる．この表現を時間領域での表現に直すと，(2.6) 式に対する状態方程式

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{T}(Ku(t) - x(t)) \tag{2.8}$$

を得る．

2.3.2 2 次系

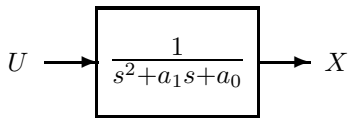

図 2.3: 2 次系の伝達関数

図 2.3 に示す分子が 1 の伝達関数の実現を考える．ブロック線図から

$$\frac{X}{U} = \frac{1}{s^2 + a_1 s + a_0} \tag{2.9}$$

これを変形して

$$s^2 X = -a_0 X - a_1 s X + U \tag{2.10}$$

を得る．これを時間領域で表現すると

$$\ddot{x}(t) = -a_0 x(t) - a_1 \dot{x}(t) + u(t) \tag{2.11}$$

となる．さらに，状態方程式で表すため，状態を

$$x_1 := x, \quad x_2 := \dot{x} \tag{2.12}$$

と定義すると，(2.11) 式から

$$\left.\begin{array}{rcl} \dot{x}_1(t) & = & x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) & = & -a_0 x_1(t) - a_1 x_2(t) + u(t) \end{array}\right\} \tag{2.13}$$

また

$$\boldsymbol{x} := \left[\begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \end{array}\right] \tag{2.14}$$

を定義して，ベクトル表現すれば

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \left[\begin{array}{cc} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{array}\right] \boldsymbol{x}(t) + \left[\begin{array}{c} 0 \\ 1 \end{array}\right] u(t) \tag{2.15}$$

となる．

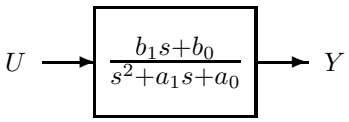

図 2.4: 一般的な 2 次系の伝達関数

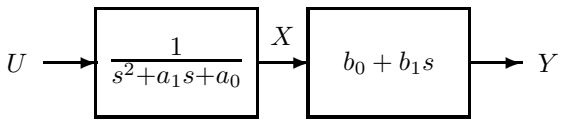

図 2.5: 一般的な 2 次系の伝達関数

上の議論を基にして，図 2.4 の一般的な 2 次系の実現を考えよう．このブロック線図は，図 2.5 のように等価変換できる．図 2.5 から

$$Y = (b_0 + b_1 s)X \tag{2.16}$$

すなわち

$$y(t) = b_0 x(t) + b_1 \dot{x}(t) \tag{2.17}$$

また，X/U の実現は (2.15) 式として求まっているので，結局，図 2.4 の伝達関数の実現は

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \tag{2.18}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} b_0 & b_1 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) \tag{2.19}$$

となる．n 次系の伝達関数に対しても同様な方法によって状態方程式を得ることができる．

2.3.3 分母と分子の次数が等しい場合

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \tag{2.20}$$

において，$D(s)$ と $N(s)$ の次数が等しい場合，割り算を実行して

$$G(s) = d + \frac{N'(s)}{D(s)} \tag{2.21}$$

と表す (図 2.6) . d は定数であり，$N'(s)$ の次数は $D(s)$ の次数よりも小さくなる．よっ

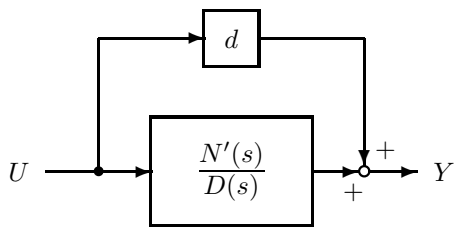

図 2.6: 分母と分子が同じ次数の伝達関数

て，$N'(s)/D(s)$ の実現を

$$\left.\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{b}u(t) \\ y'(t) &= \boldsymbol{c}\boldsymbol{x}(t) \end{aligned}\right\} \tag{2.22}$$

とすると，$G(s)$ の実現は

$$\left.\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{b}u(t) \\ y(t) &= \boldsymbol{c}\boldsymbol{x}(t) + du(t) \end{aligned}\right\} \tag{2.23}$$

となる．

演習

1. 次の伝達関数の実現を求めよ．

$$(1)\quad G(s)=\frac{s}{s^2+1} \qquad (2)\quad G(s)=\frac{1+T_1 s}{1+T_2 s}$$

$$(3)\quad G(s)=\frac{s^2+1}{s^3+2s^2+2s+1} \qquad (4)\quad G(s)=\frac{1}{(1+Ts)^2}$$

2. ルンゲクッタ法を用いて 1. の伝達関数のステップ応答をそれぞれ求めよ．ステップ応答を求めるには

$$\boldsymbol{x}(0)=\mathbf{0},\quad u=1$$

とする．ただし，$T_1=5$, $T_2=1$, $T=1$ とする．

2.4　位相面図の描き方

2 次系の状態軌道を状態平面 (x_1, x_2) に描いたものを位相面図という．位相面図は，2 次系の挙動を調べるためによく用いられ，特に，非線形系の解析に威力を発揮する．

例題 **2.3** 例題 2.2 に対する位相面図を求めるプログラムを作成せよ．

(解答例)

ファイル名：ex2_3.m

```
A = [0 1; -1 -1];
B = [0; 1];
u = 1;
dt = 0.05;
tf = 20;
x = [0 0]';
xx = [];
i = 0;
for t = 0:dt:tf
   i = i+1;
   xx(:,i) = x;
   xt = x;
   for j = 1:4
      f = A*x + B*u;
      d(:,j) = f*dt;
      x = xt + d(:,j)*0.5;
      if j == 3
         x = xt + d(:,j);
```

```
        end
    end
    x = xt + (d(:,1) + d(:,2)*2 + d(:,3)*2 + d(:,4))/6;
end
plot(xx(1,:),xx(2,:))
grid on
```

グラフ表示結果を図 2.7 に示す．

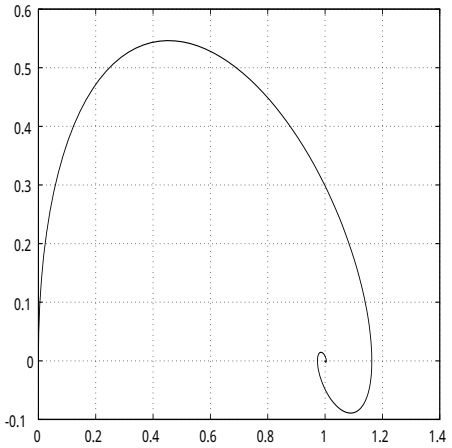

図 2.7: 位相面図 (例題 2.3)

例題 **2.4** 振子長 l の単振子系の運動方程式は，安定平衡点からの振れ角を θ とすると

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\sin\theta = 0 \tag{2.24}$$

と表される．ルンゲクッタ法を用いて，振子系の自由振動の位相面図を描け．ただし，$l = 1\mathrm{m}$, $g = 9.8\mathrm{m/s^2}$ とし，初期状態を

$$\theta(0) = 2.5\mathrm{rad}, \quad \dot{\theta}(t) = 0$$

とする．また，シミュレーションの終了時刻を $5\mathrm{s}$ とする．

(解答) まず，(2.24) 式を状態方程式に直す．

$$x_1 := \theta, \quad x_2 := \dot{\theta} \tag{2.25}$$

と用いると，(2.24) 式は

$$\left.\begin{array}{rcl} \dot{x}_1 &=& x_2 \\ \dot{x}_2 &=& -(g/l)\sin x_1 \end{array}\right\} \tag{2.26}$$

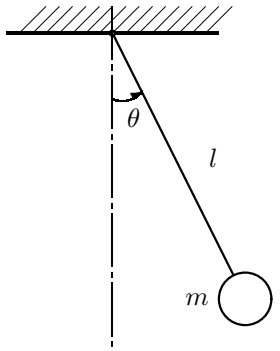

図 2.8: 単振子

すなわち

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \quad u(t) = -\frac{g}{l} \sin x_1(t) \tag{2.27}$$

となる．シミュレーションプログラムは次のとおりである．

ファイル名：ex2_4.m

```
A = [0 1; 0 0];
B = [0; 1];
dt = 0.05;
tf = 4;
x = [2.5 0]';
l = 1;
g = 9.8;
a1 = g/l;
xx = [];
i = 0;
for t = 0:dt:tf
   i = i+1;
   xx(:,i) = x;
   xt = x;
   for j = 1:4
      u = -a1*sin(x(1));
      f = A*x + B*u;
      d(:,j) = f*dt;
      x = xt + d(:,j)*0.5;
```

```
      if j == 3
         x = xt + d(:,j);
      end
   end
   x = xt + (d(:,1) + d(:,2)*2 + d(:,3)*2 + d(:,4))/6;
end
plot(xx(1,:),xx(2,:))
axis([-pi pi -10 10])   % axis([xmin xmax ymin ymax])
grid on
```

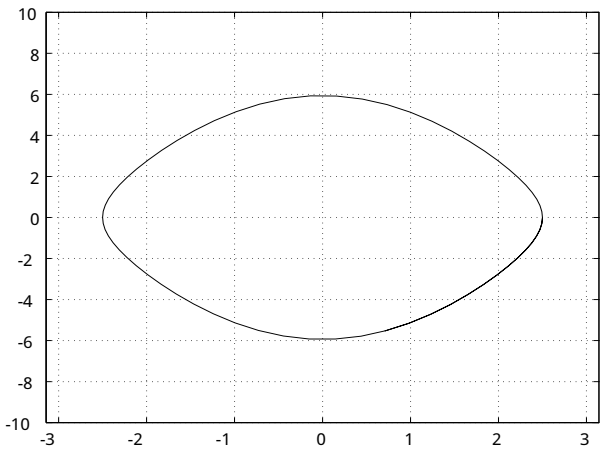

図 2.9: 位相面図 (例題 2.4)

例題 2.4 に対するシミュレーション結果を図 2.9 に示す．

演習

1. 例題 2.4 において，初期状態を種々変えてシミュレーションしてみよ．
2. 例題 2.4 において，ルンゲクッタ法の計算精度を調べるため，終了時刻を大きくして，軌跡を重ねて描いてみよ．また，刻み幅を種々変えて同じ実験を行ってみよ．
3. 例題 2.4 のプログラムを修正して時間応答を求めよ．
4. ファンデアポール方程式

$$\ddot{x}(t) - \epsilon(1 - x(t)^2)\dot{x}(t) + x(t) = 0, \quad x(0) = 0.1, \quad \dot{x}(0) = 0 \tag{2.28}$$

の位相面図を描け．ただし，$\epsilon = 1$ とする．

2.5　非線形制御の例：可変長振子系の振動制御問題

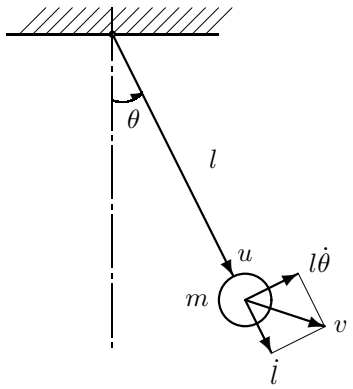

図 2.10: 可変長振子系

可変長振子系 (図 2.10) の運動方程式は，ラグランジュの方法により，つぎのように求められる．

ラグランジュ関数 L は，運動エネルギ T とポテンシャルエネルギ U を用いて

$$L = T - U \tag{2.29}$$

と計算される．この系に対する T および U は

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{l}^2 + l^2\dot{\theta}^2) \tag{2.30}$$

$$U = -mgl\cos\theta \tag{2.31}$$

である．よって

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \tag{2.32}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}}\right) - \frac{\partial L}{\partial l} = u \tag{2.33}$$

から，つぎの運動方程式を得る．

$$ml^2\ddot{\theta} + 2ml\dot{l}\dot{\theta} + mgl\sin\theta = 0 \tag{2.34}$$

$$m\ddot{l} - ml\dot{\theta}^2 - mg\cos\theta = u \tag{2.35}$$

ただし，θ は振子の振れ角，l は支点から重りまでの距離，m は重りの質量，g は重力加速度，u は重りの駆動力である．振子の棒の質量は無視している．l はつぎの制限を受けるものとする．

$$0 < l_0 \le l \le l_1 \tag{2.36}$$

設計を容易にするため，(2.35) 式をつぎのように線形化する．

$$\ddot{l} = \mu \tag{2.37}$$

μ は新しい入力である．この線形化を行う u は次式で与えられる．

$$u = m\mu - ml\dot{\theta}^2 - mg\cos\theta \tag{2.38}$$

問題は，(2.36) 式の制限のもとで，振子系の振動を速やかに減衰させる l の制御則を求めることである．

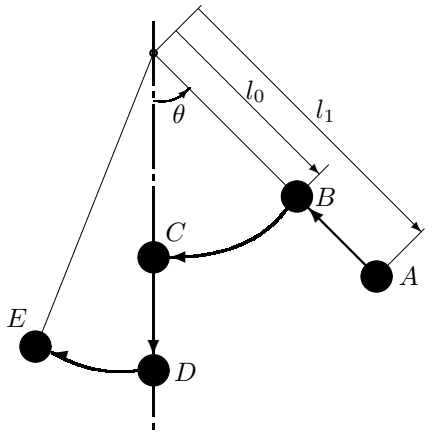

図 2.11: 最適制御

振子振動の減衰を最大にする最適制御は，図 2.11 に示すように，振子長を $\dot{\theta} = 0$ のとき l_1 から l_0 へ，$\theta = 0$ のとき l_0 から l_1 へ瞬間的に移動する制御である．実際には，このように重りを瞬間的に移動する制御の実現は不可能であるが，これを近似的に行う制御系をシミュレーションしてみよう．

いま，r を l の目標値とする．r から l までの伝達関数が

$$G(s) = \frac{1}{(1+Ts)^2} \tag{2.39}$$

となるように，l のサーボ系を次のように構成する．

$$\mu = k_1(r-l) - k_2\dot{l} \tag{2.40}$$

ただし

$$k_1 = \frac{1}{T^2}, \quad k_2 = \frac{2}{T}, \quad ,T > 0 \tag{2.41}$$

である．r は l_0 または l_1 の値をとるものとし，次式に従って切り換える．

$$r = \begin{cases} l_0 & \text{if} \quad \theta\dot{\theta} < 0 \\ l_1 & \text{if} \quad \theta\dot{\theta} > 0 \end{cases} \tag{2.42}$$

以上で得られた制御系の微分方程式を状態方程式表現すると，(2.34) 式から

$$\ddot{\theta} = -(g\sin\theta + 2\dot{l}\dot{\theta})/l \tag{2.43}$$

また，(2.40) 式を (2.37) 式へ代入して

$$\ddot{l} = -k_1 l - k_2\dot{l} + k_1 r \tag{2.44}$$

を得る．状態を

$$\boldsymbol{x} := \left[\begin{array}{cccc} \theta & \dot{\theta} & l & \dot{l} \end{array}\right]^T \tag{2.45}$$

と定義して，(2.43)，(2.44) 式を状態方程式で表すと次式を得る．

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \tag{2.46}$$

ただし

$$\boldsymbol{A} = \left[\begin{array}{cccc} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k_1 & -k_2 \end{array}\right], \quad \boldsymbol{B} = \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{array}\right] \tag{2.47}$$

$$\boldsymbol{u} = \left[\begin{array}{c} -(g\sin\theta + 2\dot{l}\dot{\theta})/l \\ k_1 r \end{array}\right] \tag{2.48}$$

例題 2.5 上述の考え方に従って，可変長振子系の振動制御シミュレーションプログラムを作成せよ（状態変数の時間応答をグラフ表示するようにせよ）．そして，つぎの条件でシミュレーションしてみよ．

$l_0 = 0.8\text{m}, \quad l_1 = 1.2\text{m}, \quad , \quad g = 9.8\text{m/s}^2,$

$\boldsymbol{x}(0) = \left[\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 1 & 0 \end{array}\right]^T$

刻み幅 $= 0.01\text{s}$, 終了時刻 $= 10\text{s}$

$T = 0.1, \quad 0.05, \quad 0.01$

（解答例）

```
T = input('Enter T: ');
k1 = 1/T^2; k2 = 2/T;
l0 = 0.8; l1 = 1.2;
g = 9.8;
A = [0 1 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 1; 0 0 -k1 -k2];
```

```
B = [0 0; 1 0; 0 0; 0 1];
dt = 0.01;
tf = 10;
x = [1 0 1 0]';
xx = [];
i = 0;
for t = 0:dt:tf
   i = i+1;
   xx(:,i) = x;
   xt = x;
   for j = 1:4
      if x(1)*x(2) < 0
         r = l0;
      else
         r = l1;
      end
      u = [(-g*sin(x(1)) - 2*x(4)*x(2))/x(3); k1*r];
      f = A*x + B*u;
      d(:,j) = f*dt;
      x = xt + d(:,j)*0.5;
      if j == 3
         x = xt + d(:,j);
      end
   end
   x = xt + (d(:,1) + d(:,2)*2 + d(:,3)*2 + d(:,4))/6;
end
t = 0:dt:tf;
plot(t,xx(1,:),t,xx(3,:))
grid on
```

演習

1. 例題 2.5 のシミュレーションプログラムについて，位相面図を出力させるプログラムに変更せよ．そして，可変長振子系が安定化制御された場合の位相面軌道を観察せよ．

2. 振子の振り付け（不安定化）は，l を安定化の逆のパターンで変化させることによって行われる．不安定化のプログラムを作成せよ．そして，小さな初期角度，例えば

$$\boldsymbol{x}(0) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

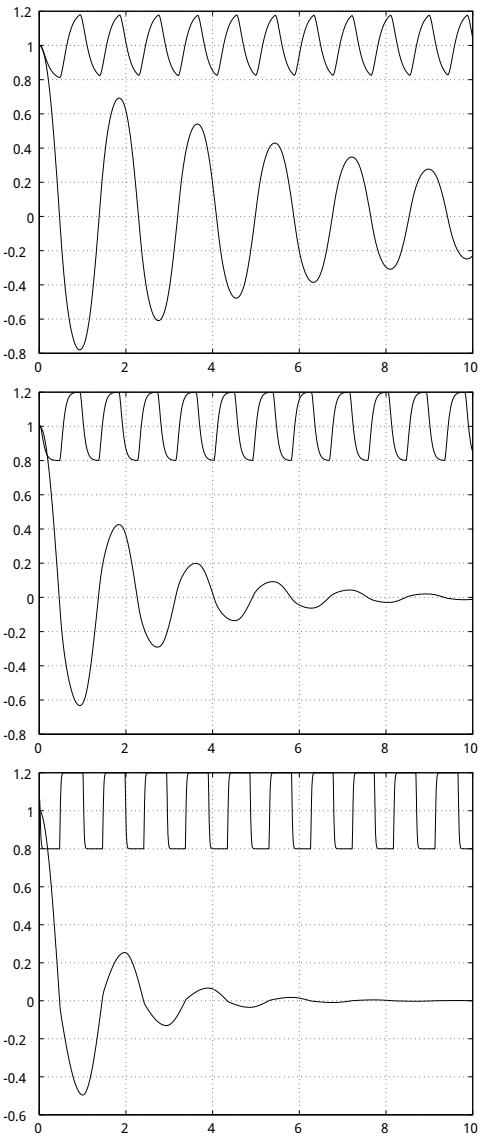

図 2.12: シミュレーション結果 (上から $T = 0.1,\ 0.05,\ 0.01$)

を与えてシミュレーションしてみよ．時間応答，位相面軌道をそれぞれ表示するプログラムを作成せよ．

2.6 制御系設計用関数

2.6.1 極配置法

制御対象

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) \tag{2.49}$$

に対して制御則

$$\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t) \tag{2.50}$$

が与えられたとすると，閉ループ系は

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = (\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\boldsymbol{x}(t) \tag{2.51}$$

となる．この閉ループ系をレギュレータという場合がある．$(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$ が可制御ならば，閉ループ系のシステム行列 $\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$ の固有値を実軸に対して対称な任意の位置に配置できる．$\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$ の固有値をレギュレータ極という．

表 2.1: 極配置関数

関数	説明
acker	一入力系用極配置関数
place	多入力系用極配置関数

Matlab の極配置関数 (指定極を実現するフィードバックゲイン $\boldsymbol{K}$ を求める関数) として，acker と place がある．acker は，一入力系用で，Ackerman のアルゴリズムを用いている．place は，多入力系用で，Kautsky と Nichols が考案したアルゴリズムを使っている．一般に，多入力系では，同じ極配置を実現するフィードバックゲインが多数存在するが，place は，この自由度を使って，$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ のパラメータ変化に対する閉ループ系の感度を最小化するフィードバックゲインを計算する．

レギュレータ極を制御対象の極から大きく離れて指定すると，フィードバックゲインの要素が大きくなり，制御系の感度を上げることになるので，そのような極端な極配置は行わないようにする．place を一入力系に用いることもできるが，一入力系には acker を用いることが推奨されている．

例題 **2.6**

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

について，レギュレータ極を $-1 \pm j$ に配置するフィードバックゲインを求めよ．

(解答)

ファイル名：ex2_6.m

```
A = [0 1; 0 0];
B = [0; 1];
P = [-1+i -1-i];
K = acker(A,B,P)
```

このプログラムを実行すると結果が

```
K =
    2    2
```

と表示される．このフィードバックゲインが指定極を実現しているかどうかは eig によって確認できる．

```
eig(A-B*K)
ans =
  -1.0000 + 1.0000i
  -1.0000 - 1.0000i
```

place の使い方も同様である．

2.6.2　オブザーバ

一般に制御対象は次式で記述される．

$$\left.\begin{array}{rcl} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &=& \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) &=& \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(t) \end{array}\right\} \tag{2.52}$$

$\boldsymbol{y}(t)$ は出力であり，観測される変数である．上述の状態フィードバック制御 $\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$ では，$\boldsymbol{x}(t)$ が必要であるが，実際には，$\boldsymbol{u}(t)$ と $\boldsymbol{y}(t)$ を利用して推定した状態 $\boldsymbol{\xi}(t)$ を $\boldsymbol{x}(t)$ の代わりに用いることになる．$\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{y}(t)$ から $\boldsymbol{\xi}(t)$ を得る機構をオブザーバという．

オブザーバは次式で構成される．

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{L}(\boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{C}\boldsymbol{\xi}(t) - \boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(t)) \tag{2.53}$$

誤差ベクトルを

$$\boldsymbol{e}(t) := \boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{\xi}(t) \tag{2.54}$$

と定義すると，(2.52)，(2.53) 式から

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t) = (\boldsymbol{A} - \boldsymbol{L}\boldsymbol{C})\boldsymbol{e}(t) \tag{2.55}$$

を得る．$(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{A})$ が可観測ならば，$\boldsymbol{L}$ を選んで $(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{LC})$ の固有値を実軸に対して対称な任意の位置に配置できる．$(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{LC})$ の固有値をオブザーバ極という．

$(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{LC})$ の固有値は，$(\boldsymbol{A}^T - \boldsymbol{C}^T\boldsymbol{L}^T)$ の固有値に等しいので，$(\boldsymbol{A}^T - \boldsymbol{C}^T\boldsymbol{L}^T)$ に対して acker または place を使って（$\boldsymbol{A} \to \boldsymbol{A}^T$, $\boldsymbol{B} \to \boldsymbol{C}^T$ と置き換える）指定の極を実現する $\boldsymbol{L}$ を求めることができる．オブザーバ極はレギュレータ極より左に配置するのがよいとされる．

例題 **2.7**

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

について，$(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{LC})$ の固有値を $(-2, -3)$ に配置する $\boldsymbol{L}$ を求めよ．

（解答）

ファイル名：ex2_7.m

```
A = [0 1; 0 0];
C = [1 0];
P = [-2 -3];
L = acker(A',C',P);
L = L'
```

このプログラムを実行すると結果が

```
L =
    5
    6
```

と表示される．オブザーバ極は

```
eig(A-L*C)
ans =
    -3
    -2
```

と確認される．

(2.52)，(2.53) 式において，$\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{\xi}$ とおくとレギュレータ・オブザーバ併合系の状態方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{x}}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\xi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & -\boldsymbol{BK} \\ \boldsymbol{LC} & \boldsymbol{A} - \boldsymbol{LC} - \boldsymbol{BK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{\xi} \end{bmatrix} \tag{2.56}$$

を得る．また，この式に座標変換

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{I} & -\boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{e} \end{bmatrix} \tag{2.57}$$

を施すと

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{x}}(t) \\ \dot{\boldsymbol{e}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}-\boldsymbol{BK} & \boldsymbol{BK} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A}-\boldsymbol{LC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) \\ \boldsymbol{e}(t) \end{bmatrix} \tag{2.58}$$

となる．よって，レギュレータ極とオブザーバ極は独立に設定できることがわかる．

例題 **2.8** システム

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t)$$

に対して

レギュレータ極　：　$(-1 \pm j)$

オブザーバ極　：　$(-2,\ -3)$

と設計したレギュレータ・オブザーバ併合系の時間応答をシミュレーションするプログラムを作成せよ．ただし，初期状態は

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(0) \\ \boldsymbol{\xi}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

とする．

(解答)

ファイル名：ex2_8.m

```
n = 2;
A = [0 1; 0 0];
B = [0; 1];
C = [1 0];
D = 0;
Pr = [-1+i -1-i];
Po = [-2 -3];
K = acker(A,B,Pr);
L = acker(A',C',Po);
L = L';
A1 = [A -B*K;L*C A-L*C-B*K];
dt = 0.01;
```

```
tf = 10;
x = [1 0 0 0]';
xx = [];
k = 0;
for t = 0:dt:tf
   k = k+1;
   xx(:,k) = x;
   xt = x;
   for j = 1:4
      f = A1*x;
      d(:,j) = f*dt;
      x = xt + d(:,j)*0.5;
      if j == 3
         x = xt + d(:,j);
      end
   end
   x = xt + (d(:,1) + d(:,2)*2 + d(:,3)*2 + d(:,4))/6;
end
t = 0:dt:tf;
plot(t,xx)
grid on
```

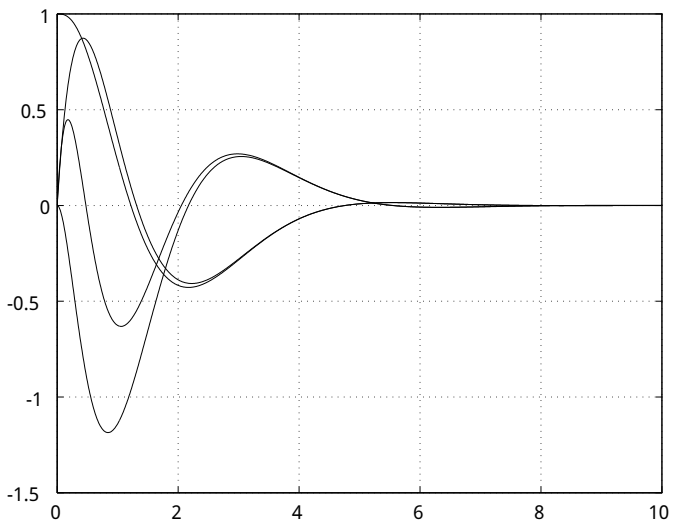

図 2.13: 時間応答 (例題 2.8)

演習

1. システム

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t)$$

に対して

$$\begin{aligned} \text{レギュレータ極} &: (-1 \pm j, -1) \\ \text{オブザーバ極} &: (-2, -3, -4) \end{aligned}$$

と設計したレギュレータ・オブザーバ併合系の時間応答をシミュレーションするプログラムを作成せよ．ただし，初期状態は

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(0) \\ \boldsymbol{\xi}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

とする．

2.6.3　LQG 制御

制御対象の入出力にノイズが混入する場合，2 次形式評価関数に基づいてレギュレータ・オブザーバ併合系の最適設計を行う方法を紹介しよう．

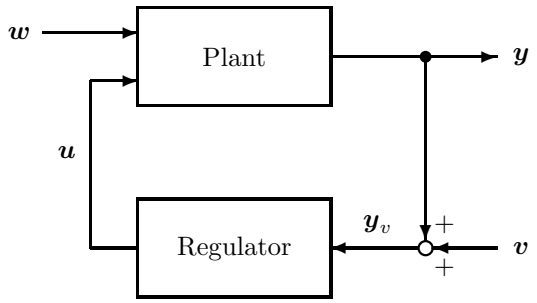

図 2.14: LQG レギュレータ

図 2.14 において，$\boldsymbol{v}$, $\boldsymbol{w}$ は白色雑音である．制御系の状態方程式は以下のとおりである．

$$\left.\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{G}\boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{y}_v(t) &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{H}\boldsymbol{w}(t) + \boldsymbol{v}(t) \end{aligned}\right\} \tag{2.59}$$

この制御系は，最適レギュレータとカルマンフィルタを併合した系であり，LQG レギュレータと呼ばれる．構造はレギュレータ・オブザーバ併合系と同じであるが，レギュレータゲインとオブザーバゲインの計算法が異なり，それぞれ，LQ 最適ゲイン，カルマンゲインを用いることになる．

a. LQ 最適ゲイン

二次形式評価関数

$$J(\boldsymbol{u}) = \int_0^\infty (\boldsymbol{x}^T \boldsymbol{Q}\boldsymbol{x} + 2\boldsymbol{x}^T \boldsymbol{N}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{u}^T \boldsymbol{R}\boldsymbol{u})dt \tag{2.60}$$

を最小化する制御は

$$\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t) \tag{2.61}$$

で与えられる．LQ(linear quadratic) 最適ゲイン $\boldsymbol{K}$ は，リカッチ方程式と呼ばれる行列代数方程式の解から得られる．$\boldsymbol{K}$ は `lqr` によって次のように計算できる．

```
[K,S,Er] = lqr(A,B,Q,R,N)
```

ただし，S はリカッチ方程式の解，Er は $(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K})$ の固有値である．

b. カルマンゲイン

白色雑音 $\boldsymbol{w}$, $\boldsymbol{v}$ の平均値は $\boldsymbol{0}$ でつぎの共分散行列を持つとする．

$$E(\boldsymbol{w}(t)\boldsymbol{w}(\tau)^T) = \boldsymbol{Q}_n\delta(t-\tau), \quad E(\boldsymbol{v}(t)\boldsymbol{v}(\tau)^T) = \boldsymbol{R}_n\delta(t-\tau),$$
$$E(\boldsymbol{w}(t)\boldsymbol{v}(\tau)^T) = \boldsymbol{N}_n\delta(t-\tau) \tag{2.62}$$

状態の推定を $\hat{\boldsymbol{x}}(t)$ で表すと，カルマンフィルタは

$$\lim_{t\to\infty} E\left((\boldsymbol{x}(t) - \hat{\boldsymbol{x}}(t))(\boldsymbol{x}(t) - \hat{\boldsymbol{x}}(t))^T\right) \tag{2.63}$$

という基準によって設計される．すなわち，カルマンフィルタは状態推定誤差の共分散を最小にする最適フィルタであり，次式で与えられる．

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) = \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{L}(\boldsymbol{y}_v(t) - \boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}}(t) - \boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(t)) \tag{2.64}$$

$\boldsymbol{L}$は，あるリカッチ方程式解 (LQ 最適ゲインのリカッチ方程式とは異なる) から得られる．制御は，$\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t)$ を用いることになるので，これを (2.64) 式に代入すると LQG レギュレータの状態方程式

$$\left.\begin{array}{rcl} \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) & = & \{\boldsymbol{A} - \boldsymbol{L}\boldsymbol{C} - (\boldsymbol{B} - \boldsymbol{L}\boldsymbol{D})\boldsymbol{K}\}\hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{L}\boldsymbol{y}_v(t) \\ \boldsymbol{u}(t) & = & -\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(t) \end{array}\right\} \tag{2.65}$$

が得られる．$\boldsymbol{L}$ は `lqr` によって次のように計算できる．

```
[L,P,Eo] = lqr(A',C',G*Qn*G',Rn,Nn)
L = L'
```

ただし，P はリカッチ方程式の解，Eo は $(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{LC})$ の固有値である．

上述のように，LQG 制御は，システムと出力に白色雑音が混入する場合に，二次形式評価関数の観点から最適となるように設計されたものである．制御系の構造は，レギュレータ・オブザーバ併合系と同じであるが，レギュレータゲインとオブザーバゲインをリカッチ方程式解から構成するという点に特徴がある．LQG 制御系は，白色雑音に対して好ましい特性を持つだけでなく，制御対象のパラメータ変化に対しても良好なロバスト性を持つことが知られているので，白色雑音を想定しない場合の制御系設計においてもしばしば利用される．

例題 **2.9** システム

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\begin{bmatrix}0&1\\0&0\end{bmatrix}\boldsymbol{x}(t)+\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}u(t)$$

$$y(t)=\begin{bmatrix}1&0\end{bmatrix}\boldsymbol{x}(t)$$

に対して，LQ 最適ゲインとカルマンゲインを利用して，レギュレータ・オブザーバ併合系を設計し，制御系の時間応答をシミュレーションするプログラムを作成せよ．つぎのデータを使ってシミュレーションしてみよ．

$$\text{LQ 最適ゲイン}\quad:\quad \boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix},\quad R=1,\quad N=\boldsymbol{0}$$

$$\text{カルマンゲイン}\quad:\quad \boldsymbol{Q}_n=\begin{bmatrix}10&0\\0&10\end{bmatrix},\quad R_n=1,\quad N_n=\boldsymbol{0},\quad \boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}(0)\\\hat{\boldsymbol{x}}(0)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\end{bmatrix}^T$$

(解答)

ファイル名：ex2_9.m

```
n = 2;
% System matrices
A = [0 1; 0 0];
B = [0; 1];
C = [1 0];
D = 0;
G = eye(n);
% Weighting matrices for optimal regulator
Q = eye(n);
R = 1;
% Weighting matrices for Kalman estimator
```

```
Qn = eye(n)*10;
Rn = 1;
[K,S,Er] = lqr(A,B,Q,R);
[L,P,Ee] = lqr(A',C',G*Qn*G',Rn);
L = L';
A1 = [A -B*K;L*C A-L*C-B*K];
dt = 0.01;
tf = 10;
x = zeros(2*n,1);
x(1) = 1;
xx = [];
k = 0;
for t = 0:dt:tf
   k = k+1;
   xx(:,k) = x;
   xt = x;
   for j = 1:4
      f = A1*x;
      d(:,j) = f*dt;
      x = xt + d(:,j)*0.5;
      if j == 3
         x = xt + d(:,j);
      end
   end
   x = xt + (d(:,1) + d(:,2)*2 + d(:,3)*2 + d(:,4))/6;
end
t = 0:dt:tf;
plot(t,xx)
grid on
```

演習

1. システム

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t)$$

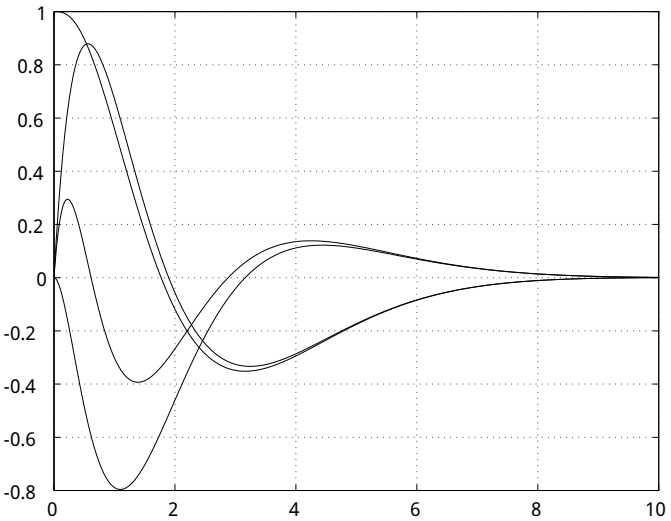

図 2.15: 時間応答 (例題 2.9)

に対して，LQ 最適ゲインとカルマンゲインを利用して，レギュレータ・オブザーバ併合系を設計し，時間応答をシミュレーションするプログラムを作成せよ．ただし，つぎのデータを用いるものとする．

$$\text{LQ 最適ゲイン} \quad : \quad \boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 1, \quad N = \mathbf{0}$$

$$\text{カルマンゲイン} \quad : \quad \boldsymbol{Q}_n = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad R_n = 1, \quad N_n = \mathbf{0},$$

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(0) \\ \hat{\boldsymbol{x}}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

2.7　伝達関数に基づく解析法

2.7.1　システムの伝達関数表現

伝達関数

$$G(s) = \frac{5s^2 + 6s + 7}{s^3 + 2s^2 + 3s + 4}$$

を入力するには tf 関数を用いる．

```
sys = tf([5 6 7],[1 2 3 4])
```

一般に，伝達関数の分母の係数を降べき順に並べた 1 次元配列を den，分子の係数を降べき順に並べた 1 次元配列を num とすると，伝達関数は

```
sys = tf(num,den)
```

で設定できる．

演習

1. 次の伝達関数を入力するプログラムを書け．

$$(1)\quad s \qquad (2)\quad \frac{1}{s} \qquad (3)\quad \frac{1}{s^2} \qquad (4)\quad \frac{1}{s^2+1}$$

$$(5)\quad \frac{2s^2+5s}{s^3+2s+1} \qquad (6)\quad \frac{s^3-2s+2}{s^4+s^3+2s^2+s+1}$$

2.7.2 伝達関数の結合

表 2.2: 伝達関数の結合を求める関数

関数	説明
series	直列結合
parallel	並列結合
feedback	フィードバック結合

伝達関数の結合を求めるため，表 2.2 の関数が用意されている．使用例を以下に示す．sys は，U から Y までの伝達関数を表す．

1. 直列結合 (図 2.16)

```
sys = series(sys1,sys2)
```

2. 並列結合 (図 2.17)

```
sys = parallel(sys1,sys2)
```

3. フィードバック結合 (負のフィードバック)(図 2.18)

```
sys = feedback(sys1,sys2)
```

4. フィードバック結合 (正のフィードバック)(図 2.19)

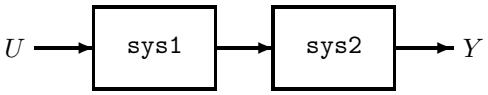

図 2.16: 直列結合

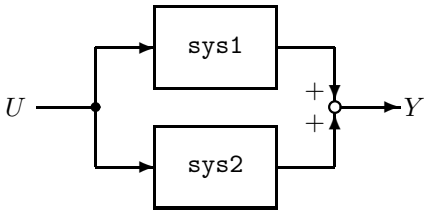

図 2.17: 並列結合

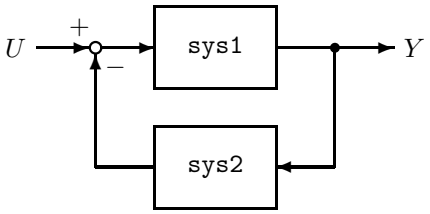

図 2.18: フィードバック結合 (負のフィードバック)

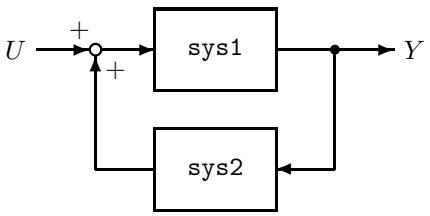

図 2.19: フィードバック結合 (正のフィードバック)

```
sys = feedback(sys1,sys2,+1)
```

演習

1. 図 2.20 のブロック線図について , U から Y までの伝達関数を求めよ . ただし

$$G_1 = \frac{1}{s+1}, \quad G_2 = 5, \quad G_3 = \frac{1}{s^2+2s+1}, \quad G_4 = 2s+3$$

とする．

（答）

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 10s^2 + 28s + 24}$$

2. 図 2.21 のブロック線図について，U から Y までの伝達関数を求めよ．ただし

$$G_1 = \frac{2}{s}, \quad G_2 = s + 1, \quad G_3 = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}, \quad G_4 = \frac{1}{0.1s + 1}$$

とする．

（答）

$$G(s) = \frac{0.1s^3 + 1.1s^2 + 1.2s + 2}{0.1s^4 + 1.2s^3 + 3.2s^2 + 3s + 2}$$

3. 図 2.22 のブロック線図について，U から Y までの伝達関数を求めよ．ただし

$$G_1 = \frac{1}{0.1s + 1}, \quad G_2 = \frac{1}{s(s + 1)}, \quad G_3 = \frac{1}{0.2s + 1}, \quad G_4 = \frac{2}{s^2 + 4s + 2}$$

とする．

（答）

$$G(s) = \frac{4}{0.04s^6 + 0.8s^5 + 5.24s^4 + 14.68s^3 + 24s^2 + 25.2s + 12}$$

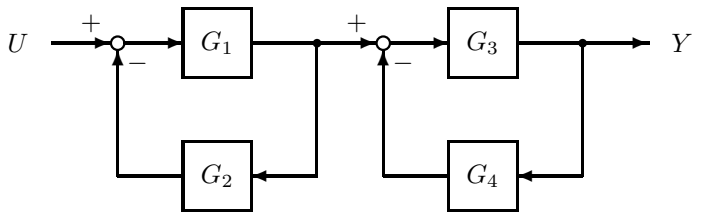

図 2.20: 問題 1 のブロック線図

2.7.3 極の計算

pole 関数によって伝達関数の極を計算できる．使用例は次のとおりである．

```
p = pole(sys)
```

ここで，sys は伝達関数を表す．

演習

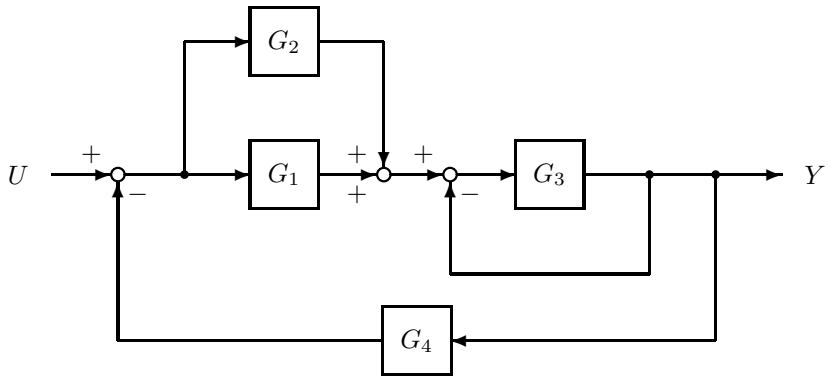

図 2.21: 問題 2 のブロック線図

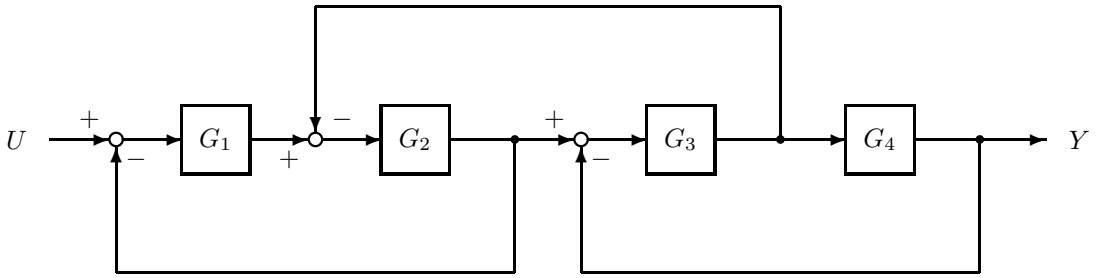

図 2.22: 問題 3 のブロック線図

1. 2.7.2 項の演習問題における伝達関数の極を計算せよ．
   （答）(1)　$\{-6, -2, -2\}$　(2)　$\{-8.6815, -2.3862, -0.4662 \pm j0.8649\}$
   (3)　$\{-10.1098, -5.9110, -0.5057 \pm j1.4574, -1.7883, -1.1796\}$

2. システムの特性方程式を

$$s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 = 0$$

   とする．ラウスの方法によってシステムの安定判別を行うプログラムを作成せよ．

3. 同様に，フルビッツの方法によってシステムの安定判別を行うプログラムを作成せよ．

表 2.3: 過渡応答を計算する関数

関数	説明
impulse	インパルス応答
step	ステップ応答

2.7.4 過渡応答

これらの関数は，例えば，次のように使用する．

```
sys=tf(1,[1 1]);
impulse(sys)      % 時間範囲と計算点数は，自動的に選択される．
tf=10;
impulse(sys,tf)  % tf で指定した時間までのインパルス応答をプロットする．
```

step 関数の使い方も同様である．

例題 **2.10** 次の伝達関数を持つシステムのインパルス応答を求めよ．

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 0.4s + 1}$$

(解答)

```
sys = tf(1,[1 0.4 1]);
impulse(sys)
```

インパルス応答を図 2.23 に示す．

演習

1. 2.7.2 項の演習問題における伝達関数のインパルス応答とステップ応答を求めよ．終了時刻 tf は応答の概形が把握できるように選定せよ．

2.7.5 周波数応答

これらの関数の使用方法は次のようである．

```
sys=tf(1,[1 0.4 1]);
figure(1)
nyquist(sys)       % 図 2.24
figure(2)
bode(sys)          % 図 2.25
```

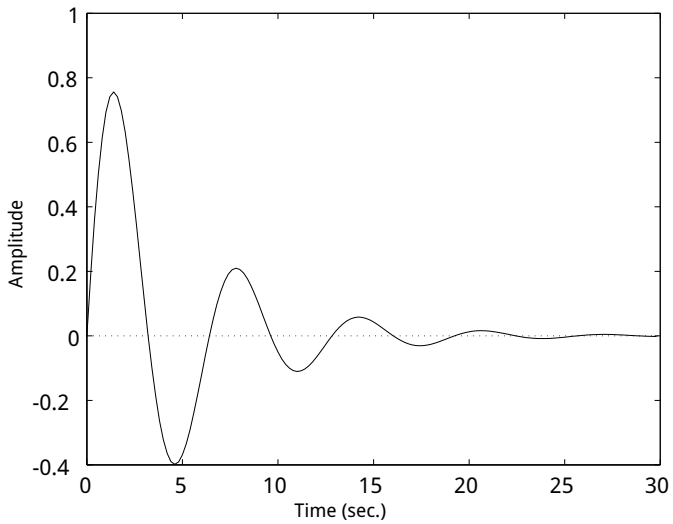

図 2.23: インパルス応答

表 2.4: 周波数応答を計算する関数

関数	説明
nyquist	ナイキスト線図
bode	ボード線図
margin	位相余裕とゲイン余裕 (ボード線図)

```
figure(3)
margin(sys)          % 図 2.26
```

nyquist 関数と bode 関数では，指定した周波数ベクトルに対して周波数応答を求めることもできる．

```
w=0:0.1:1;
nyquist(sys,w)
```

演習

1. 2.7.2 項の演習問題における伝達関数のナイキスト線図とボード線図を求めよ．

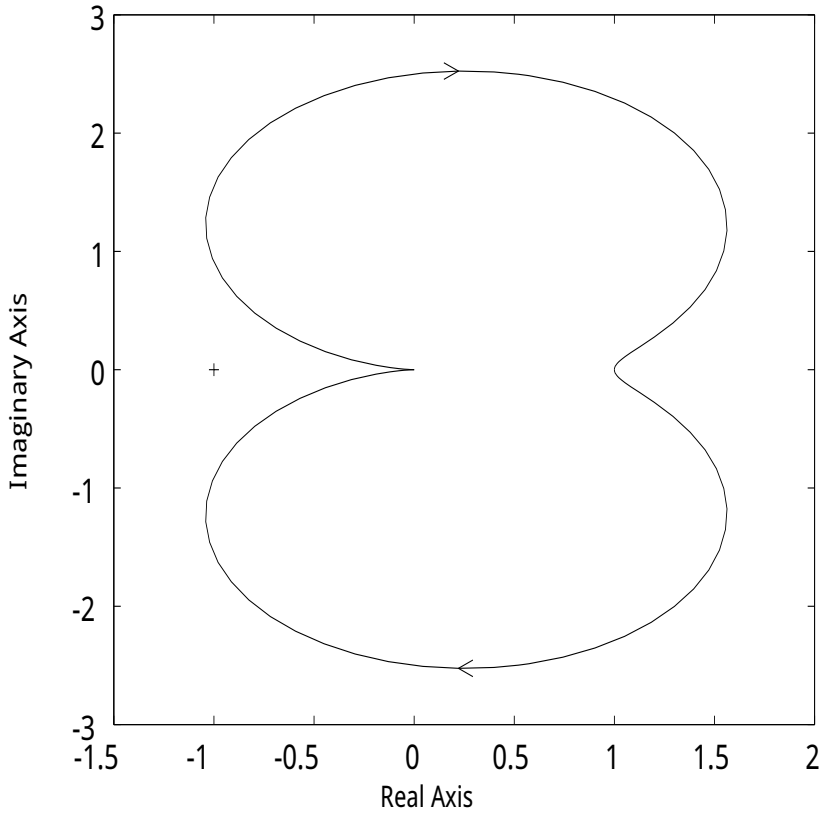

図 2.24: ナイキスト線図

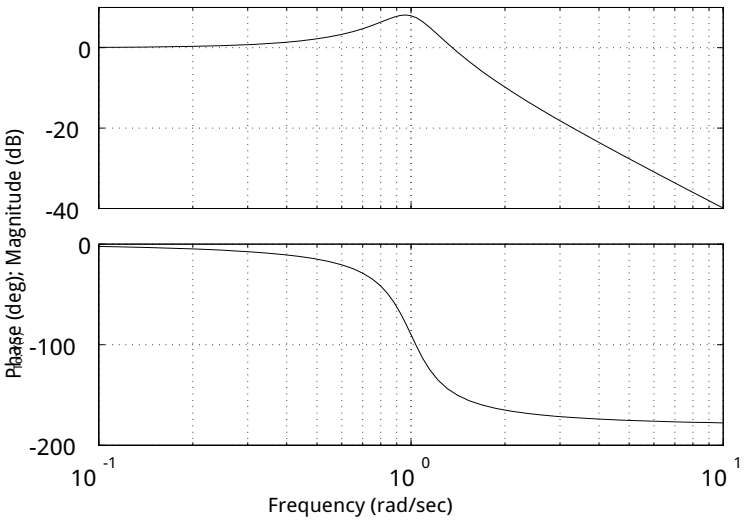

図 2.25: ボード線図

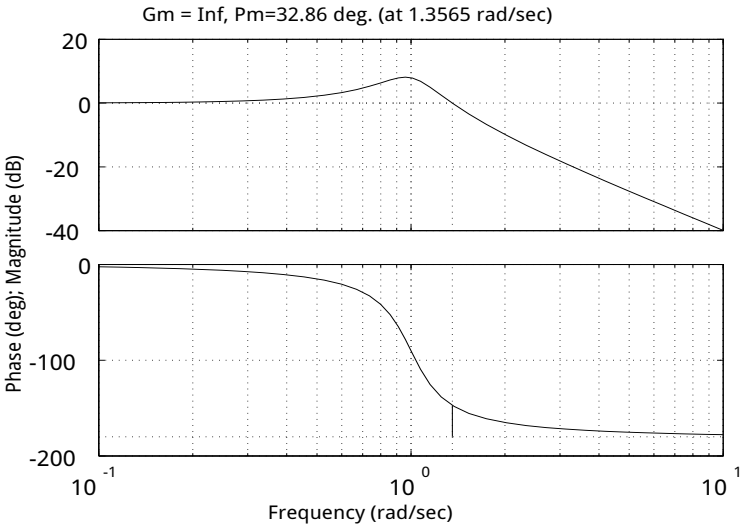

図 2.26: ボード線図上で表された位相余裕とゲイン余裕

関連図書

[1] The MATH WORKS Inc.: *Using Matlab*, The MATH WORKS Inc., 1997.

[2] The MATH WORKS Inc.: *Control System Toolbox User's Guide*, The MATH WORKS Inc., 1996.

[3] 佐久間元敬他：線形代数教科書，共立出版，1978.

[4] 志賀浩二：数学 30 講シリーズ 1 微分積分 30 講，朝倉書店，1988．

[5] 伊理正夫他：別冊・数学セミナー 現代応用数学の基礎 1，日本評論社，1987.

[6] 吉田和信他：可変長振子系の最適減衰特性計算法，第 38 回計測自動制御学会学術講演会，pp.215-216, 1999.

[7] 加藤寛一郎：最適制御入門 レギュレータとカルマンフィルタ，東京大学出版会，1987.

[8] 日高照晃他：機械力学–振動の基礎から制御まで–，朝倉書店，2000.

[9] 奥山佳史他：制御工学–古典から現代まで–，朝倉書店，2001.

Matlab による動的システムシミュレーション入門

2001 年 4 月 1 日　第 2 版

ⓒ吉田和信