

KMAP による工作機械の制御 (3) - モータ速度コマンド

2017 (H29). 12. 1 片柳亮二

【問題】 図 1 は、モータ部、ボールねじ部、被駆動体からなるシステムである。このシステムについて、モータの回転速度フィードバックを行い、PI 制御器により安定化を図る速度コマンド制御系を設計せよ。

ただし、データは次の値とする。

$$\begin{aligned}
 R &= 1.0 (\Omega = \text{V}/\text{A}), & L &= 0.01 (\text{V} \cdot \text{s}/\text{A}), & K_r &= 1.0 (\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}), \\
 K_E &= 1.0 (\text{V} \cdot \text{s}/\text{rad}), & J_m &= 0.02 (\text{kg} \cdot \text{m}^2), & M_t &= 500 (\text{kg}), \\
 k_t &= 1.0 \times 10^8 (\text{N}/\text{m}), & c_t &= 1.0 \times 10^4 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}), & Q &= 0.003 (\text{m}/\text{rad})
 \end{aligned}$$

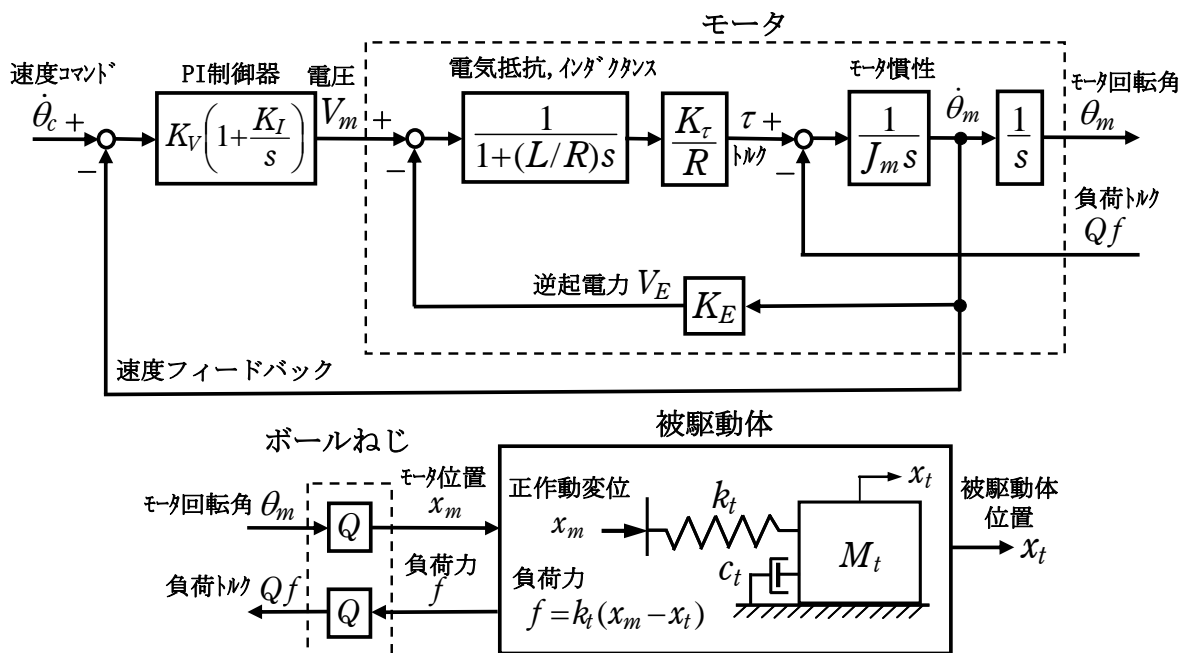


図 1 速度コマンドから被駆動体位置までのブロック図

【解】

まず、 $K_V=1$, $K_I=0$ (比例制御のみ) の場合を KMAP で解析する。

KMAP (バージョン 114 以降) を起動して、

- ① 「KMAP**解析内容選択画面」 ⇒ “5” キーイン
- ② 「データファイル利用方法」 ⇒ “3” をキーイン
- ③ 「3:機械システム制御の実際の例題」 ⇒ “4” キーイン

例題のインプットデータ ⇒ EIGE.MEC.PR5.3-1.DAT

- ④ 「新しいファイル名入力してください」と表示されるので、以下、次のようにキーイン

0 0 1

これで解析計算が実行されて、フィードバックゲインおよび安定解析結果が次のように表示される。

```

***** (フィードバック前の極チェック) *****
***** POLES *****
POLES ( 6), EIVMAX= 0.100D+03
  N      REAL      IMAG
  1     -0.10000000D+03    0.00000000D+00
  2      0.00000000D+00    0.00000000D+00
  3      0.00000000D+00    0.00000000D+00
  4      0.00000000D+00    0.00000000D+00
  5      0.00000000D+00    0.00000000D+00
  6      0.00000000D+00    0.00000000D+00
*****
(以下の解析結果はインプットデータの制御則による)
***** POLES AND ZEROS *****
POLES ( 6), EIVMAX= 0.4968D+03
  N      REAL      IMAG
  1     -0.51576163D+02   -0.76213635D+02 [ 0.5605E+00, 0.9203E+02]
  2     -0.51576163D+02    0.76213635D+02   周期 P(sec)= 0.8244E-01
  3     -0.84238382D+01   -0.49671173D+03 [ 0.1696E-01, 0.4968E+03]
  4     -0.84238382D+01    0.49671173D+03   周期 P(sec)= 0.1265E-01
  5      0.00000000D+00    0.00000000D+00
  6      0.00000000D+00    0.00000000D+00
ZEROS ( 1), II/JJ= 4/ 1, G= 0.3000D+07
  N      REAL      IMAG
  1      0.00000000D+00    0.00000000D+00
***** POLES AND ZEROS *****
POLES ( 6), EIVMAX= 0.4958D+03
  N      REAL      IMAG
  1     -0.51711010D+02   -0.41946811D+02 [ 0.7766E+00, 0.6659E+02]
  2     -0.51711010D+02    0.41946811D+02   周期 P(sec)= 0.1498E+00
  3     -0.82889910D+01   -0.49576527D+03 [ 0.1672E-01, 0.4958E+03]
  4     -0.82889910D+01    0.49576527D+03   周期 P(sec)= 0.1267E-01
  5      0.00000000D+00    0.00000000D+00
  6      0.00000000D+00    0.00000000D+00
ZEROS ( 4), II/JJ= 1/ 4, G=-0.5000D+04
  N      REAL      IMAG
  1     -0.10000000D+02   -0.44710178D+03 [ 0.2236E-01, 0.4472E+03]
  2     -0.10000000D+02    0.44710178D+03
  3      0.00000000D+00    0.00000000D+00
  4      0.00000000D+00    0.00000000D+00

```

```

-----
          周波数              ゲイン余裕              位相余裕
-----
ゲイン余裕最小値=900.00000 (dB),   位相余裕最小値=900.00000 (deg)
-----

```

この画面を消すと、次の「解析結果の表示」の画面になる。

```

$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$< 解析結果の表示 >$$$$$$$$$$$$ (KMAP***)$$$$$$$$$$$$
$$ 0 : 表示終了 (次の解析 または 終了へ) $$
$$ 1 : 安定解析図 (f 特, 根軌跡) (Excel を立ち上げてください) $$
$$ (極・零点配置, 根軌跡, 周波数特性などの図が表示できます) $$
$$ (極・零点の数値データは“9”(安定解析結果)で確認できます) $$
$$ 6 : ナイスト線図 (Excel を立ち上げてください) $$
$$ 7 : シミュレーション図 (KMAP (Simu)) (Excel を立ち上げてください) $$
$$ (Z191~Z200 に定義した値をタイムヒストリー図に表示できます) $$
$$ 9 : 釣り合い飛行時のデータおよび安定解析結果 (TES13. DAT) $$
$$ 10 : その他の Excel 図, 101 : KMAP 線図 (1), 102 : KMAP 線図 (2) $$
$$ 14 : 取り扱い説明書 (pdf 資料), (15:インプットデータ表示), (16:Ap, B2 行列表示) $$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$

```

ここで、「1」および[7]とキーインすると、根軌跡およびステップ応答が次のように Excel で表示することができる。

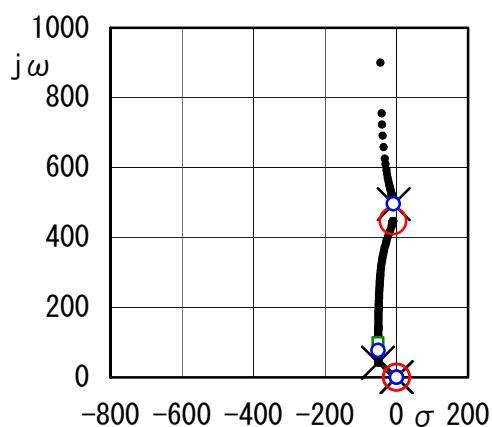


図 2 根軌跡 ($K_V=1, K_I=0$)
(電圧ラインのゲイン変化)

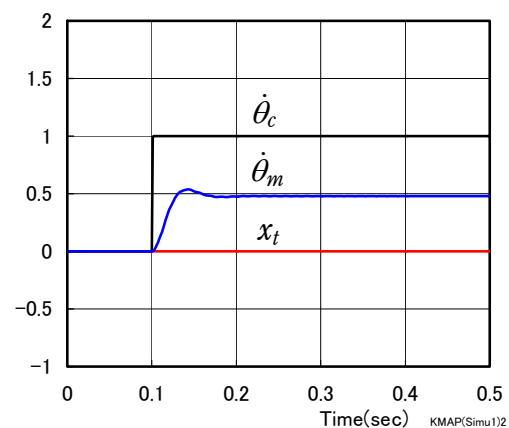


図 3 ステップ応答 ($K_V=1, K_I=0$)
(EIGE. MEC. PRB5. 3-1. DAT)

図 2 は、図 1 の制御系の電圧ラインのゲインを変化させた場合の根軌跡である。ゲイン 1 倍 (青い○印) では安定であるが、約 500 (rad/s) の固有振動モードが生じている。速度コマンド $\dot{\theta}_c$ を入力とするステップ応答を図 3 に示すが、 $\dot{\theta}_c$ ステップ入力に対して $\dot{\theta}_m$ の応答は大きな定常偏差を持つことがわかる。

次に、制御器に積分を考慮してみる。いま、 $K_V=1, K_I=50$ とした場合を KMAP で解析する。

KMAP (バージョン 114 以降) を起動して、

- ① 「KMAP***解析内容選択画面」 ⇒ “5” キーイン
- ② 「データファイル利用方法」 ⇒ “3” をキーイン
- ③ 「3:機械システム制御の実際の例題」 ⇒ “5” キーイン

例題のインプットデータ ⇒ EIGE. MEC. PRB5. 3-1B. DAT

④「新しいファイル名入力してください」と表示されるので、以下、次のようにキーイン

0 0 1

これで解析計算が実行されて、フィードバックゲインおよび安定解析結果が次のように表示される。

```
***** (フィードバック前の極チェック) *****
***** POLES *****
POLES ( 6), EIVMAX= 0.100D+03
  N      REAL      IMAG
  1  -0.10000000D+03  0.00000000D+00
  2   0.00000000D+00  0.00000000D+00
  3   0.00000000D+00  0.00000000D+00
  4   0.00000000D+00  0.00000000D+00
  5   0.00000000D+00  0.00000000D+00
  6   0.00000000D+00  0.00000000D+00
*****
(以下の解析結果はインプットデータの制御則による)
***** POLES AND ZEROS *****
POLES ( 6), EIVMAX= 0.4968D+03
  N      REAL      IMAG
  1  -0.35221175D+02 -0.70117661D+02 [ 0.4489E+00, 0.7847E+02]
  2  -0.35221175D+02  0.70117661D+02  周期 P(sec)= 0.8961E-01
  3  -0.32903897D+02  0.00000000D+00
  4  -0.83268772D+01 -0.49672398D+03 [ 0.1676E-01, 0.4968E+03]
  5  -0.83268772D+01  0.49672398D+03  周期 P(sec)= 0.1265E-01
  6   0.00000000D+00  0.00000000D+00
ZEROS ( 1), II/JJ= 4/ 1, G= 0.3000D+07
  N      REAL      IMAG
  1  -0.50000000D+02  0.00000000D+00
***** POLES AND ZEROS *****
POLES ( 6), EIVMAX= 0.4958D+03
  N      REAL      IMAG
  1  -0.51711010D+02 -0.41946811D+02 [ 0.7766E+00, 0.6659E+02]
  2  -0.51711010D+02  0.41946811D+02  周期 P(sec)= 0.1498E+00
  3  -0.82889910D+01 -0.49576527D+03 [ 0.1672E-01, 0.4958E+03]
  4  -0.82889910D+01  0.49576527D+03  周期 P(sec)= 0.1267E-01
  5   0.00000000D+00  0.00000000D+00
  6   0.00000000D+00  0.00000000D+00
ZEROS ( 4), II/JJ= 1/ 4, G=-0.5000D+04
  N      REAL      IMAG
  1  -0.50000000D+02  0.00000000D+00
  2  -0.10000000D+02 -0.44710178D+03 [ 0.2236E-01, 0.4472E+03]
  3  -0.10000000D+02  0.44710178D+03
  4   0.00000000D+00  0.00000000D+00
```

```
-----
      周波数          ゲイン余裕          位相余裕
      52.50000 (rad/s)          (1) 64.18358 (deg)
```

```
-----
ゲイン余裕最小値=900.00000 (dB),  位相余裕最小値= 64.18358 (deg)
-----
```

この画面を消すと、次の「解析結果の表示」の画面になる。

このケースのインプットデータは次のようである。
 (同様な問題では、例題ファイルをコピー利用して、数値を変更して解析を行っていくとミスを防ぐことができる)

```
##### (インプットデータ) #####
EIGE. MEC. PRB5. 3-1B. DAT
NXP          = 0
tmax (s)     = 4.000
1. NU1-----> 4
  T , U1          0.0000    0.0000
                  0.1000    0.0000
                  0.1010    1.0000
                  60.0000    1.0000
3. NU3-----> 2
  T , U3          0.0000    0.0000
                  60.0000    0.0000
5. NU5-----> 2
  T , U5          0.0000    0.0000
                  60.0000    0.0000
*****10*****20*****30*****40*****50*****60*****70*****
<積分数, IRIG, TDEBUG 時間, 補間関数> 7 0 0.0 0
  <Control System Data>      Hi *---GAIN---NCAL*N01*N02*N03*NGO*LNO
1  Z6=U1*G;                  H 0 0.1000E+01 52 6 1 0 0 0
2  H1=G; (R)                  H 0 0.1000E+01 11 1 0 0 0 0
3  H2=G; (L)                  H 0 0.1000E-01 11 2 0 0 0 0
4  H3=H2/H1; (L/R)           H 0 0.1000E-01 24 3 2 1 0 0
5  H4=G; (Ktau)              H 0 0.1000E+01 11 4 0 0 0 0
6  H5=H4/H1; (Ktau/R)        H 0 0.1000E+01 24 5 4 1 0 0
7  H6=G; (KE)                 H 0 0.1000E+01 11 6 0 0 0 0
8  H7=G; (Jm)                 H 0 0.2000E-01 11 7 0 0 0 0
9  H8=G; (kt)                 H 0 0.1000E+09 11 8 0 0 0 0
10 H9=G; (Dm)                 H 0 0.0000E+00 11 9 0 0 0 0
11 H10=G; (Q)                 H 0 0.3000E-02 11 10 0 0 0 0
12 H11=G; (ct)                H 0 0.1000E+05 11 11 0 0 0 0
13 H12=G; (Mt)                H 0 0.5000E+03 11 12 0 0 0 0
14 //
15 Z27=Z6-Z12; (THmdotc-THmdot) H 0 0.1000E+01 36 27 6 12 0 0
16 Z28=Z27*G; (*KV)           H 0 0.1000E+01 53 28 27 0 0 0
17 Z29={1/S, t}>=G} Z28X7;    H 0 0.0000E+00 110 29 28 7 0 0
18 Z30=Z29*G; (*KI)           H 0 0.5000E+02 53 30 29 0 0 0
19 Z31=Z28+Z30; (Vm)          H 0 0.5000E+02 35 31 28 30 0 0
20 Z10={RGAIN(De)} Z31; (root locus) H 0 0.5000E+02 301 10 31 0 0 0
21 //
22 Z7=Z10-Z15; (Vm-VE)         H 0 0.5000E+02 36 7 10 15 0 0
23 Z8={1/(1+HS)} Z7X2;         H 3 0.5000E+02 115 8 7 2 0 0
24 Z9=Z8*H5; (tau)            H 0 0.5000E+02 74 9 8 5 0 0
25 Z11=Z26/H7; (/Jm)           H 0 0.5000E+02 75 11 26 7 0 0
26 Z12={1/S, t}>=G} Z11X3; (THmdot) H 0 0.0000E+00 110 12 11 3 0 0
27 Z13={1/S, t}>=G} Z12X6; (THm) H 0 0.0000E+00 110 13 12 6 0 0
28 Z14=Z12*H9; (Dm*THmdot)    H 0 0.0000E+00 74 14 12 9 0 0
29 Z15=Z12*H6; (VE)           H 0 0.0000E+00 74 15 12 6 0 0
30 Z16=Z9-Z14; (tau-Dm*THmdot) H 0 0.0000E+00 36 16 9 14 0 0
31 Z25=Z23*H10; (Q*f)          H 0 0.0000E+00 74 25 23 10 0 0
32 Z26=Z16-Z25; (tau-Dm*THmdot-Q*f) H 0 0.0000E+00 36 26 16 25 0 0
33 //
34 H13=H8*H10; (kt*Q)          H 0 0.0000E+00 23 13 8 10 0 0
35 Z17=Z13*H13; (kt*xm)        H 0 0.0000E+00 74 17 13 13 0 0
36 Z18=Z24/H12; (/Mt)          H 0 0.0000E+00 75 18 24 12 0 0
```

```

37 Z19={1/S, t>=G} Z18X5; (xtdot)      H 0  0.0000E+00 110  19  18  5  0  0
38 Z20={1/S, t>=G} Z19X4; (xt)        H 0  0.0000E+00 110  20  19  4  0  0
39 Z21=Z19*H11; (ct*xtdot)            H 0                                74  21  19  11  0  0
40 Z22=Z20*H8; (kt*xt)                H 0                                74  22  20  8  0  0
41 Z23=Z17-Z22; (kt*xm-kt*xt)         H 0                                36  23  17  22  0  0
42 Z24=Z23-Z21; (Mt*xt2dot)          H 0                                36  24  23  21  0  0
43 Z99=Z20*G; (xt)                    H 0  0.1000E+01  53  99  20  0  0  0
44 //-----
45 R6=Z99;                              H 0                                101  6  99  0  0  0
46 //シミュレーション用出力 (Z191~Z200)
47 Z191=Z99*G;                          H 0  0.1000E+01  53 191  99  0  0  0
48 Z192=Z6*G;                           H 0  0.1000E+01  53 192   6  0  0  0
49 Z193=Z12*G;                          H 0  0.1000E+01  53 193  12  0  0  0
50 //(最後に次の END 文が必要)
51 {Pitch Data END};                     H 0                                899 888 887 886  0  0
52 //*-----
53 //*(注 1)状態方程式使用の場合
54 //* Z1, Z3, Z5      : 制御入力設定済
55 //* Z6~(NXP 個)   : 状態変数設定済
56 //* Ri は安定解析の出力で下記注意
57 //* R6~(NXP 個)  : 状態変数に対応
58 //* R(6+NXP)~Rn: 出力変数の追加
59 //* 解析出力キーは i=4~(R 設定数)
60 //*
61 //*(注 2)状態方程式使用しない場合
62 //* Zi は全て通常の Z 変数
63 //* R6~出力変数を設定
64 //* 解析出力キーは i=4~(R 設定数)
65 //\$-----
----- (縦系ゲイン最適化 - 探索範囲) -----
探索ゲイン数= 0
重み係数= 0.0000E+00 影響範囲(rad/s)= 0.0000E+00
***** (ゲイン最適化 - 重み関数 W(s)) *****
極の数= 0
零点数= 0
ゲイン= 0.0000E+00 -----
66 {Control Data END};                     H 0                                999  0  0  0  0  0
----- (DATA END) -----

```

このインプットデータの制御則部は、「解析結果の表示」画面で「101」とキーインすると、次の KMAP 線図で確認できる。

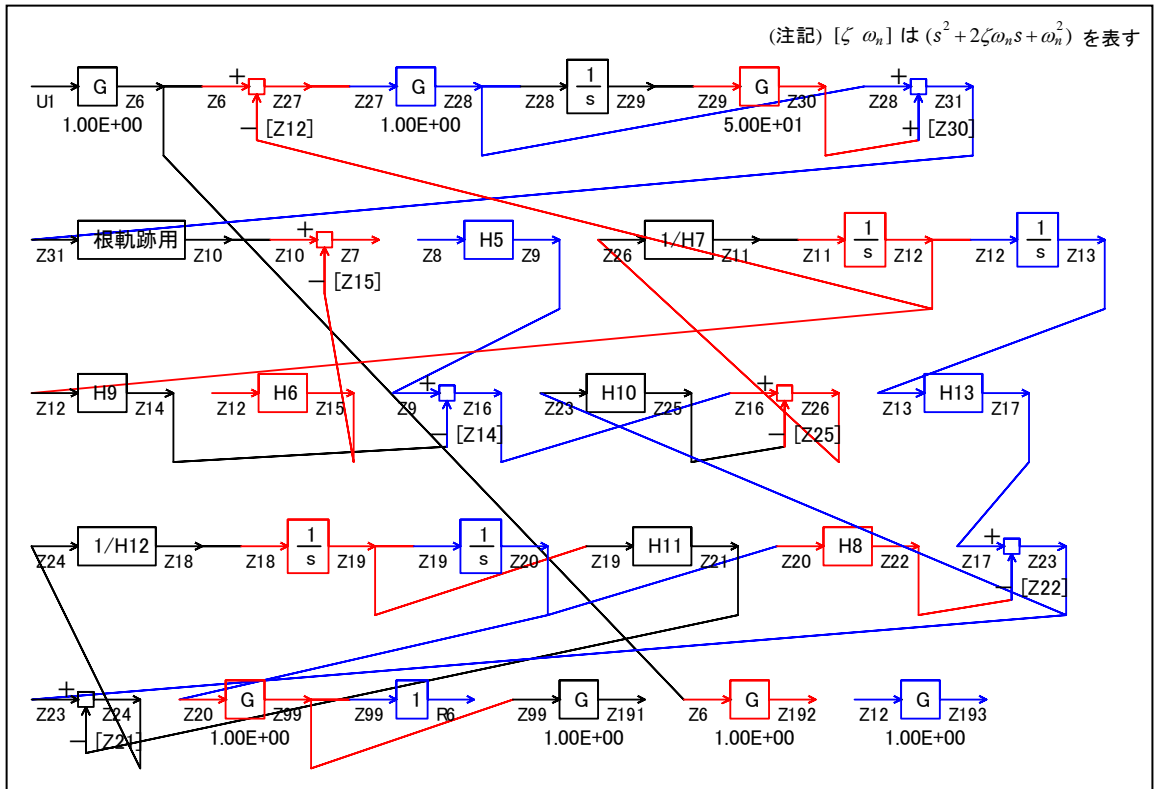


図 6 KMAP 線図

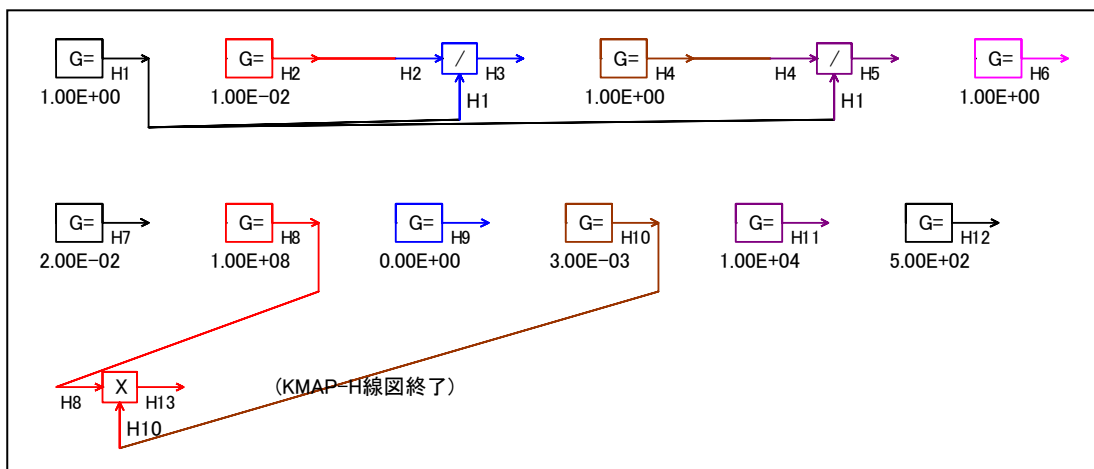


図 7 KMAP-H 線図

図 6 の KMAP 線図は、入力データの制御則部をそのデータ順に図にしたもので、信号の流れにミスがないか確認するのに便利である。

また、図 7 の KMAP-H 線図は、計算に用いられる中間変数 H についての信号の流れを図にしたものである。

(参考図書)

- 1) 片柳亮二：初学者のためのKMAP入門，産業図書，2012.
- 2) 片柳亮二：機械システム制御の実際－航空機，ロボット，工作機械，自動車，船および水中ビークル，産業図書，2013.
- 3) <http://r-katayanagi.air-nifty.com/>

以上