

KMAP による自動車の制御 (3) - 外力を受けた場合の制御

2017 (H29). 12. 2 片柳亮二

【問題】横外力を受けた場合の自動車の運動を，ドライバーが横変位を感じて進路を一定に保つ運転を行った場合を解析せよ．また，良好な特性となるように制御則を設計せよ．ただし，自動車のデータは前資料「KMAP による自動車の制御 (2)」と同じで次とする⁴⁾．

$$\begin{aligned}
 m &= 1100 \text{ (kg)}, & I_z &= 1600 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2), & K_1 &= 32000 \text{ (N/rad)}, \\
 K_2 &= 45000 \text{ (N/rad)}, & l_1 &= 1.15 \text{ (m)}, & l_2 &= 1.35 \text{ (m)} \\
 V &= 100 \text{ km/h}, & F_0 &= 500 \text{ N (横外力)}, & l_0 &= 0.5 \text{ (m) (外力作用点)}
 \end{aligned}$$

【解】

前資料「KMAP による自動車の制御 (2) - 外力を受けた場合の自動車の運動」と同様に，図 1 に示す自動車の 2 輪車モデルを用いる．

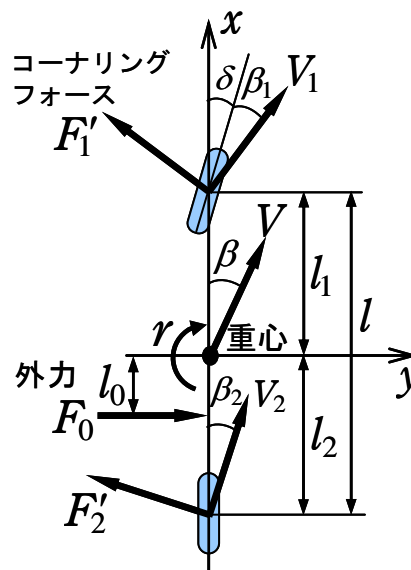


図 1 外力が作用した場合の運動モデル¹⁾

横風時のドライバーによる制御は図 2 のように仮定する．まず，制御則 C1 がいない場合を解析する．

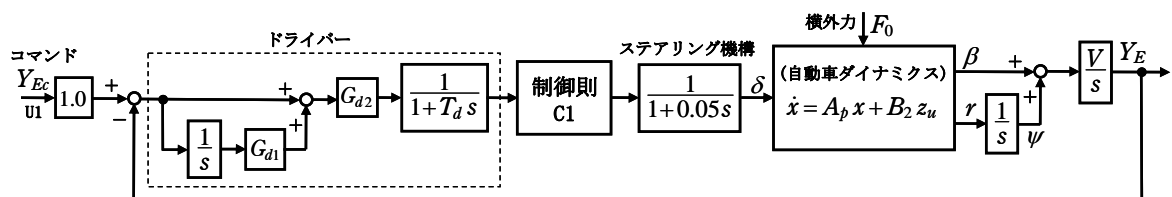


図 2 横風時のドライバーによる制御¹⁾

ここで， $G_{d1}=0.5$ ， $G_{d2}=0.1$ ， $T_d=0.1$ とする．

自動車のダイナミクスは、「KMAPによる自動車の制御(2)」と同様に次式である。

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_1+K_2}{mV} & -1-\frac{K_1l_1-K_2l_2}{mV^2} \\ -\frac{K_1l_1-K_2l_2}{I_z} & -\frac{K_1l_1^2+K_2l_2^2}{I_zV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_1}{mV} & \frac{57.3}{mV} \\ \frac{K_1l_1}{I_z} & -\frac{57.3l_0}{I_z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta \\ F_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(ハンドル操作時の運動方程式) (β, r, δ は deg 系, F_0 は N)

ここで, β は重心の横滑り角, r はヨー角速度, δ は前輪タイヤの実舵角, K_1 および K_2 はコーナリングパワーである。

まず, 自動車のダイナミクスを KMAP で解析しよう。

KMAP(バージョン 115 以降)を起動して,

- ① 「KMAP***解析内容選択画面」⇒ “4” キーイン
- ② 「データファイル利用方法」⇒ “3” をキーイン
- ③ 「例題ファイルデータの取得」⇒例として, “3” をキーイン
- ④ 「3:機械システム制御の実際の例題」⇒ “53” キーイン

例題のインプットデータ ⇒ EIGE.PRB6.2-4DY.DAT

- ⑤ 「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 4

これで解析計算が実行されて, 安定解析結果が次のように表示される。下記は, β/δ の極・零点である。

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 4), EIVMAX= 0.4646D+01
N      REAL      IMAG
1      -0.26566154D+01  -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
2      -0.26566154D+01   0.38115386D+01  周期 P(sec)= 0.1648E+01
3       0.00000000D+00   0.00000000D+00
4       0.00000000D+00   0.00000000D+00
ZEROS( 3), II/JJ= 4/ 1, G= 0.1046D+01
N      REAL      IMAG
1       0.00000000D+00   0.00000000D+00
2       0.00000000D+00   0.00000000D+00
3       0.18564918D+02   0.00000000D+00
```

下記は， r/δ の極・零点である．

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 4), EIVMAX= 0.4646D+01
  N      REAL      IMAG
  1  -0.26566154D+01  -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
  2  -0.26566154D+01   0.38115386D+01   周期 P(sec)= 0.1648E+01
  3   0.00000000D+00   0.00000000D+00
  4   0.00000000D+00   0.00000000D+00
ZEROS( 3), II/JJ= 5/ 1, G= 0.2300D+02
  N      REAL      IMAG
  1  -0.31990218D+01   0.00000000D+00
  2   0.00000000D+00   0.00000000D+00
  3   0.00000000D+00   0.00000000D+00
```

下記は， ψ/δ の極・零点である．

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 4), EIVMAX= 0.4646D+01
  N      REAL      IMAG
  1  -0.26566154D+01  -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
  2  -0.26566154D+01   0.38115386D+01   周期 P(sec)= 0.1648E+01
  3   0.00000000D+00   0.00000000D+00
  4   0.00000000D+00   0.00000000D+00
ZEROS( 2), II/JJ= 6/ 1, G= 0.2300D+02
  N      REAL      IMAG
  1  -0.31990218D+01   0.00000000D+00
  2   0.00000000D+00   0.00000000D+00
```

下記は， $(\psi + \beta)/\delta$ の極・零点である．

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 4), EIVMAX= 0.4646D+01
  N      REAL      IMAG
  1  -0.26566154D+01  -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
  2  -0.26566154D+01   0.38115386D+01   周期 P(sec)= 0.1648E+01
  3   0.00000000D+00   0.00000000D+00
  4   0.00000000D+00   0.00000000D+00
ZEROS( 3), II/JJ= 7/ 1, G= 0.1046D+01
  N      REAL      IMAG
  1  -0.17072282D+01  -0.82096206D+01 [ 0.2036E+00, 0.8385E+01]
  2  -0.17072282D+01   0.82096206D+01
  3   0.00000000D+00   0.00000000D+00
```

下記は、 Y_E/δ の極・零点である。

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 4), EIVMAX= 0.4646D+01
  N      REAL      IMAG
  1  -0.26566154D+01  -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
  2  -0.26566154D+01   0.38115386D+01  周期 P(sec)= 0.1648E+01
  3   0.00000000D+00   0.00000000D+00
  4   0.00000000D+00   0.00000000D+00
ZEROS( 2), II/JJ= 8/ 1, G= 0.5076D+00
  N      REAL      IMAG
  1  -0.17072282D+01  -0.82096206D+01 [ 0.2036E+00, 0.8385E+01]
  2  -0.17072282D+01   0.82096206D+01
```

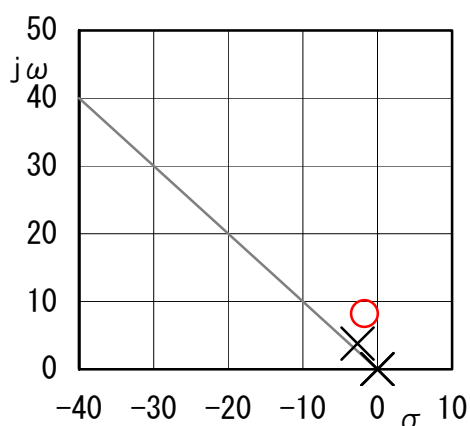


図3 Y_E/δ の極・零点

次に、図2の横風時のドライバーによる制御系において、制御則 $C1=1$ の場合を KMAP で解析しよう。

KMAP(バージョン 115 以降)を起動して、

- ① 「KMAP***解析内容選択画面」⇒ “4” キーイン
- ② 「データファイル利用方法」⇒ “3” をキーイン
- ③ 「例題ファイルデータの取得」⇒例として、“3” をキーイン
- ④ 「3:機械システム制御の実際の例題」⇒ “54” キーイン

例題のインプットデータ ⇒ EIGE.PRB6.2-4 改.DAT

- ⑤ 「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 8

これで解析計算が実行されて、安定解析結果が次のように表示される。
下記は、 Y_E/Y_{Ec} の極・零点である。

```
***** (フィードバック前の極チェック) *****
***** POLES *****
POLES( 9), EIVMAX= 0.200D+02
  N      REAL      IMAG
```

```

1  -0.20000000D+02    0.00000000D+00
2  -0.99999999D+01    0.00000000D+00
3  -0.26566154D+01   -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
4  -0.26566154D+01    0.38115386D+01   周期 P(sec)= 0.1648E+01
5   0.00000000D+00    0.00000000D+00
6   0.00000000D+00    0.00000000D+00
7   0.00000000D+00    0.00000000D+00
8   0.00000000D+00    0.00000000D+00
9   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( 9), EIVMAX= 0.2000D+02
  N      REAL          IMAG
  1  -0.19996842D+02    0.00000000D+00
  2  -0.10019118D+02    0.00000000D+00
  3  -0.26744219D+01   -0.38232215D+01 [ 0.5732E+00, 0.4666E+01]
  4  -0.26744219D+01    0.38232215D+01   周期 P(sec)= 0.1643E+01
  5  -0.32104475D+00    0.00000000D+00
  6   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  7   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  8   0.18630908D+00   -0.46924879D+00 [-0.3690E+00, 0.5049E+00]
  9   0.18630908D+00    0.46924879D+00   周期 P(sec)= 0.1339E+02
ZEROS( 5), II/JJ= 8/ 1, G= 0.1015D+02
  N      REAL          IMAG
  1  -0.17072282D+01    0.82096206D+01
  2  -0.17072282D+01   -0.82096206D+01 [ 0.2036E+00, 0.8385E+01]
  3  -0.50000000D+00    0.00000000D+00
  4   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  5   0.00000000D+00    0.00000000D+00
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 9), EIVMAX= 0.2000D+02
  N      REAL          IMAG
  1  -0.20000000D+02    0.00000000D+00
  2  -0.99999999D+01    0.00000000D+00
  3  -0.26566154D+01   -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
  4  -0.26566154D+01    0.38115386D+01   周期 P(sec)= 0.1648E+01
  5   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  6   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  7   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  8   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  9   0.00000000D+00    0.00000000D+00
ZEROS( 5), II/JJ= 1/ 4, G=-0.1015D+02
  N      REAL          IMAG
  1  -0.17072282D+01   -0.82096206D+01 [ 0.2036E+00, 0.8385E+01]
  2  -0.17072282D+01    0.82096206D+01
  3  -0.50000000D+00    0.00000000D+00
  4   0.00000000D+00    0.00000000D+00
  5   0.00000000D+00    0.00000000D+00

```

 ★★ この制御系は不安定です（極が右半面にあります）★★

この画面を消すと、「解析結果の表示」の画面になるが、画面を上スクロールすると、次のAP, B2 行列およびスタティックマージンが次のように表示されている。

```

.....AP..... NI= 2 NJ= 2
-0.2518D+01 -0.9718D+00
0.1497D+02 -0.2795D+01

```

```

.....B2..... NI= 2 NJ= 2
0.1046D+01 0.1874D-02
0.2300D+02 -0.1791D-01

```

```
{P}H34; 0.1244E+00 (スタティックマージン)
```

次の「解析結果の表示」に戻す.

```

$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$< 解析結果の表示 >$$$$$$$$$$$$$$$ (KMAP***)$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$$ 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」、「7」および「10」とキーイン/Enterすると、根軌跡、極・零点、横外力の応答および走行軌跡が次のように Excel で表示することができる。(ただし、目盛りは適宜修正して使用)

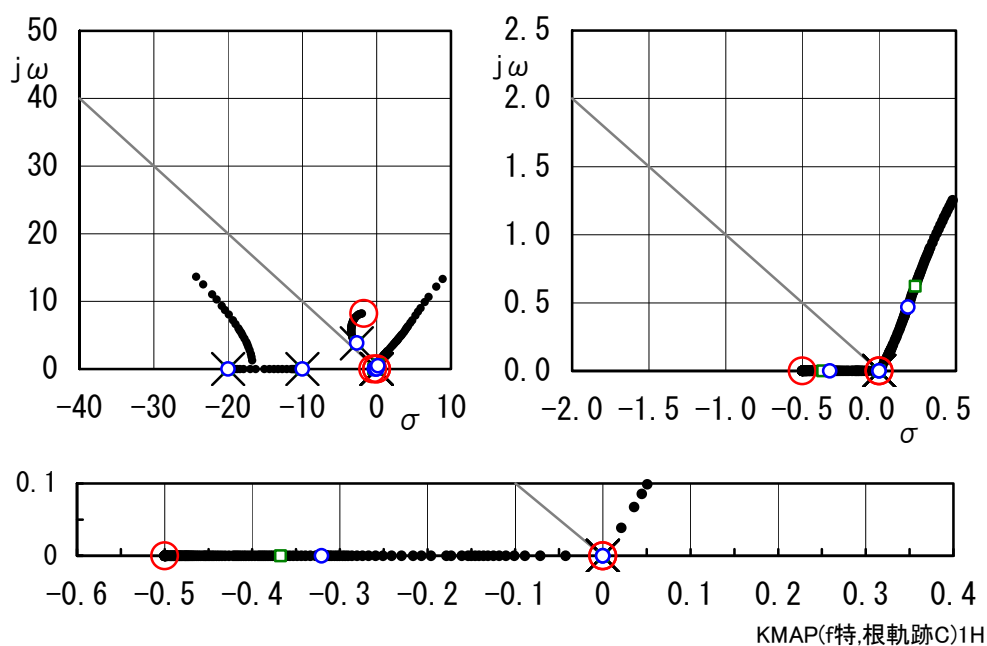


図 4 根軌跡 (制御則 $C1=1$) ($V=100\text{km/h}$)
(EIGE. PRB6. 2-4 改 2. DAT)

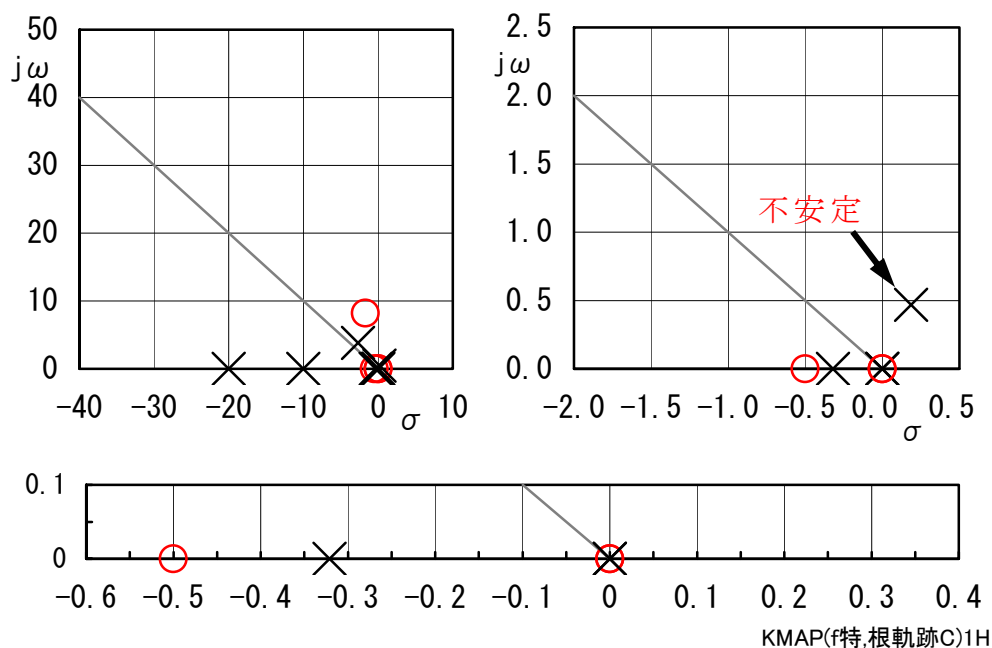


図5 Y_E/Y_{EC} の極・零点 (制御則 $C1=1$)

図4は、制御則 $C1=1$ の場合の根軌跡である。ループゲインを上げていくと、直ちに不安定化していく。不安定な特性根が生じるのは、一巡伝達関数が原点に3つの極を持つためである。これは図2のブロック図に $1/s$ (積分関数) が3つあることによる。従って、ドライバーのハンドル操作ゲインを増していくと、直ちに特性根が右半面に移動し不安定となる。図5に Y_E/δ の極・零点を示すが、不安定な振動根が生じていることがわかる。図6および図7は、シミュレーション結果であるが、運動が発散していくことが確認できる。

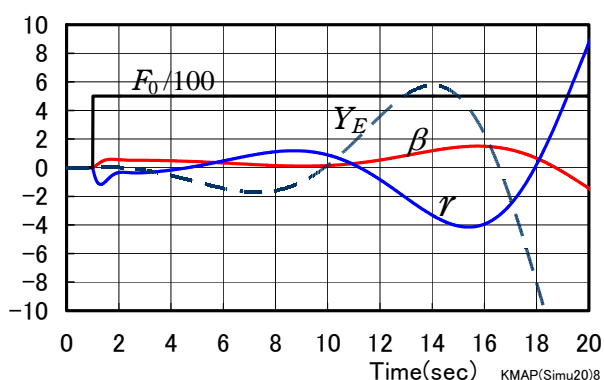


図6 横風時のドライバー制御

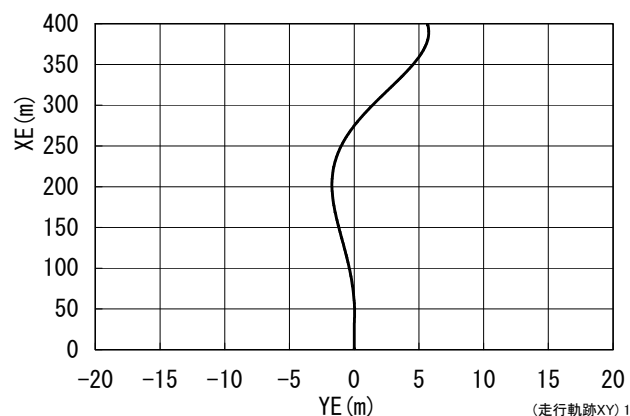


図7 走行軌跡

「解析結果の表示」で15とキーインすると、このケースのインプットデータが表示される。

(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. PRB6. 2-4 改. DAT (横風時のドライバー制御)

NXP = 2
tmax(s) = 40.000

1. NU1-----> 2

T, U1 0.0000 0.0000
60.0000 0.0000

3. NU3-----> 4

T, U3 0.0000 0.0000
1.0000 0.0000
1.0010 500.0000
60.0000 500.0000

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> 13 0 0.0 0

<Control System Data>

Hi *---GAIN---NCAL*N01*N02*N03*NGO*LNO

```

1 //AP, B2 行列データ設定
2 H1=G; (m) H 0 0.1100E+04 11 1 0 0 0 0
3 H2=G; (Iz) H 0 0.1600E+04 11 2 0 0 0 0
4 H3=G; (K1) H 0 0.3200E+05 11 3 0 0 0 0
5 H4=G; (K2) H 0 0.4500E+05 11 4 0 0 0 0
6 H5=G; (L1) H 0 0.1150E+01 11 5 0 0 0 0
7 H6=G; (L2) H 0 0.1350E+01 11 6 0 0 0 0
8 //
9 H7=H3+H4; (K1+K2) H 0 21 7 3 4 0 0
10 H8=H3*H5; (K1*L1) H 0 23 8 3 5 0 0
11 H9=H4*H6; (K2*L2) H 0 23 9 4 6 0 0
12 H10=H8*H5; (K1*L1**2) H 0 23 10 8 5 0 0
13 H11=H9*H6; (K2*L2**2) H 0 23 11 9 6 0 0
14 H12=G; (V) H 0 0.2780E+02 11 12 0 0 0 0
15 H13=H1*H12; (mV) H 0 23 13 1 12 0 0
16 H14=H13*H12; (mV**2) H 0 23 14 13 12 0 0
17 H15=H2*H12; (IzV) H 0 23 15 2 12 0 0
18 //
19 H16=H7/H13; ((K1+K2)/(mV)) H 0 24 16 7 13 0 0
20 H17=H16*G; (AP11) H 0 -0.1000E+01 17 17 16 0 0 0
21 H18=H8-H9; (K1L1-K2L2) H 0 22 18 8 9 0 0
22 H19=H18/H14; (K1L1-K2L2)/mV**2) H 0 24 19 18 14 0 0
23 H20=G; (-1) H 0 -0.1000E+01 11 20 0 0 0 0
24 H21=H20-H19; (AP12) H 0 22 21 20 19 0 0
25 H22=H18/H2; ((K1L1-K2L2)/Iz) H 0 24 22 18 2 0 0
26 H23=H22*G; (AP21) H 0 -0.1000E+01 17 23 22 0 0 0
27 H24=H10+H11; (K1L1**2+K2L2**2) H 0 21 24 10 11 0 0
28 H25=H24/H15; (H24/IzV) H 0 24 25 24 15 0 0
29 H26=H25*G; (AP22) H 0 -0.1000E+01 17 26 25 0 0 0
30 //
31 H27=H3/H13; (B2-11=K1/mV) H 0 24 27 3 13 0 0
32 H28=G; (57.3) H 0 0.5730E+02 11 28 0 0 0 0
33 H29=H28/H13; (B2-12=57.3/mV) H 0 24 29 28 13 0 0
34 H30=H8/H2; (B2-21=K1L1/Iz) H 0 24 30 8 2 0 0
35 H31=G; (L0) H 0 0.5000E+00 11 31 0 0 0 0
36 H32=H31*G; (B2-22=-57.3*L0) H 0 -0.5730E+02 17 32 31 0 0 0
37 H36=H32/H2; (B2-22=-57.3*L0/Iz) H 0 24 36 32 2 0 0
38 //
39 AP(I1, J1)H17; H 0 621 1 1 17 0 0
40 AP(I1, J2)H21; H 0 621 1 2 21 0 0
41 AP(I2, J1)H23; H 0 621 2 1 23 0 0
42 AP(I2, J2)H26; H 0 621 2 2 26 0 0
43 //(コントロール入力)=(Z1, Z3, Z5)

```



```

44 B2 (I1, J1) H27; H 0 623 1 1 27 0 0
45 B2 (I1, J2) H29; H 0 623 1 2 29 0 0
46 B2 (I2, J1) H30; H 0 623 2 1 30 0 0
47 B2 (I2, J2) H36; H 0 623 2 2 36 0 0
48 {Print (AP, B2, CP)} I2, J2, K1; H 0 671 2 2 1 0 0
49 //
50 Z20=U1*G; (YEc) H 0 0.1000E+01 52 20 1 0 0 0
51 Z24=Z9*H12; (V*(PSI+BETA)) H 0 74 24 9 12 0 0
52 Z25=Z24*G; (YEdot) (Control Law) H 0 0.1745E-01 53 25 24 0 0 0
53 Z26={1/S, t>=G} Z25X4; (YE) (Control) H 0 0.0000E+00 110 26 25 4 0 0
54 Z16=Z20-Z26; (YEc-YE) H 0 36 16 20 26 0 0
55 Z21={1/S, t>=G} Z16X9; H 0 0.0000E+00 110 21 16 9 0 0
56 Z22=Z21*G; (*Gd1) H 0 0.5000E+00 53 22 21 0 0 0
57 Z23=Z16+Z22; H 0 35 23 16 22 0 0
58 Z17=Z23*G; (*Gd2) H 0 0.1000E+00 53 17 23 0 0 0
59 Z18={1/(1+GS)} Z17X7; (Td) H 0 0.1000E+00 111 18 17 7 0 0
60 Z19={1/(1+GS)} Z18X13; H 0 0.5000E-01 111 19 18 13 0 0
61 Z1={RGAIN (De)} Z19; H 0 301 1 19 0 0 0
62 Z3=U3*G; (F0 (N)) H 0 0.1000E+01 52 3 3 0 0 0
63 //
64 //----- (Staic Margin)
65 H31=H9-H8; (K2L2-K1L1) H 0 22 31 9 8 0 0
66 H32=H31/H7; (H31/(K1+K2)) H 0 24 32 31 7 0 0
67 H33=H5+H6; (L=L1+L2) H 0 21 33 5 6 0 0
68 H34=H32/H33; (S. M. ) H 0 24 34 32 33 0 0
69 {P} H34; H 0 601 34 0 0 0 0
70 //----- (XE, YE)
71 Z8={1/S, t>=G} Z7X8; (PSI) H 0 0.0000E+00 110 8 7 8 0 0
72 Z9=Z8+Z6; (PSI+Beta) H 0 35 9 8 6 0 0
73 H35=Z9; (PSI+Beta) H 0 12 35 9 0 0 0
74 H36=FCOSD [H35]; (cos (PSI+Beta)) H 0 19 36 35 0 0 0
75 H37=FSIND [H35]; (sin (PSI+Beta)) H 0 18 37 35 0 0 0
76 Z10=H36; (cos (PSI+Beta)) H 0 54 10 36 0 0 0
77 Z11=H37; (sin (PSI+Beta)) H 0 54 11 37 0 0 0
78 Z12=Z10*H12; (XEdot) H 0 74 12 10 12 0 0
79 Z13=Z11*H12; (YEdot) H 0 74 13 11 12 0 0
80 Z14={1/S, t>=G} Z12X5; (XE) H 0 0.0000E+00 110 14 12 5 0 0
81 Z15={1/S, t>=G} Z13X6; (YE) H 0 0.0000E+00 110 15 13 6 0 0
82 //-----
83 //安定解析出力に追加する場合
84 //は, 下記に R(6+NXP) ~ を設定.
85 R8=Z8; (PSI) H 0 101 8 8 0 0 0
86 R9=Z9; (PSI+BETA) H 0 101 9 9 0 0 0
87 R10=Z26; (YE) H 0 101 10 26 0 0 0
88 //シミュレーション用出力 (Z191~Z200)
89 //(このデータが TES6. DAT に入る)
90 Z191=Z6*G; (x1=Beta) H 0 0.1000E+01 53 191 6 0 0 0
91 Z192=Z7*G; (x2=r) H 0 0.1000E+01 53 192 7 0 0 0
92 Z193=Z3*G; (F0) H 0 0.1000E-01 53 193 3 0 0 0
93 Z194=Z15*G; (YE) H 0 0.1000E+01 53 194 15 0 0 0
94 Z195=Z14*G; (XE) H 0 0.1000E+01 53 195 14 0 0 0
95 Z196=Z15*G; (YE) H 0 0.1000E+01 53 196 15 0 0 0
96 //(最後に次の END 文が必要)
97 {Pitch Data END}; H 0 899 888 887 886 0 0
98 //*-----
99 //*(注 1)状態方程式使用の場合
100 //* Z1, Z3, Z5 : 制御入力設定済
101 //* Z6~(NXP 個) : 状態変数設定済
102 //* Ri は安定解析の出力で下記注意
103 //* R6~(NXP 個) : 状態変数に対応
104 //* R(6+NXP)~Rn: 出力変数の追加

```

```

105  /* 解析出力キーは i=4~(R 設定数)
106  /*
107  /*(注 2)状態方程式使用しない場合
108  /* Zi は全て通常の Z 変数
109  /* R6~出力変数を設定
110  /* 解析出力キーは i=4~(R 設定数)
111  /*$-----
----- (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
零点の数= 0
ゲイン= 0.0000E+00 -----
初期値 X( 1)= 0.0000E+00
X( 2)= 0.0000E+00
112 {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」および「102」とキーインすると、次の KMAP 線図で確認できる。

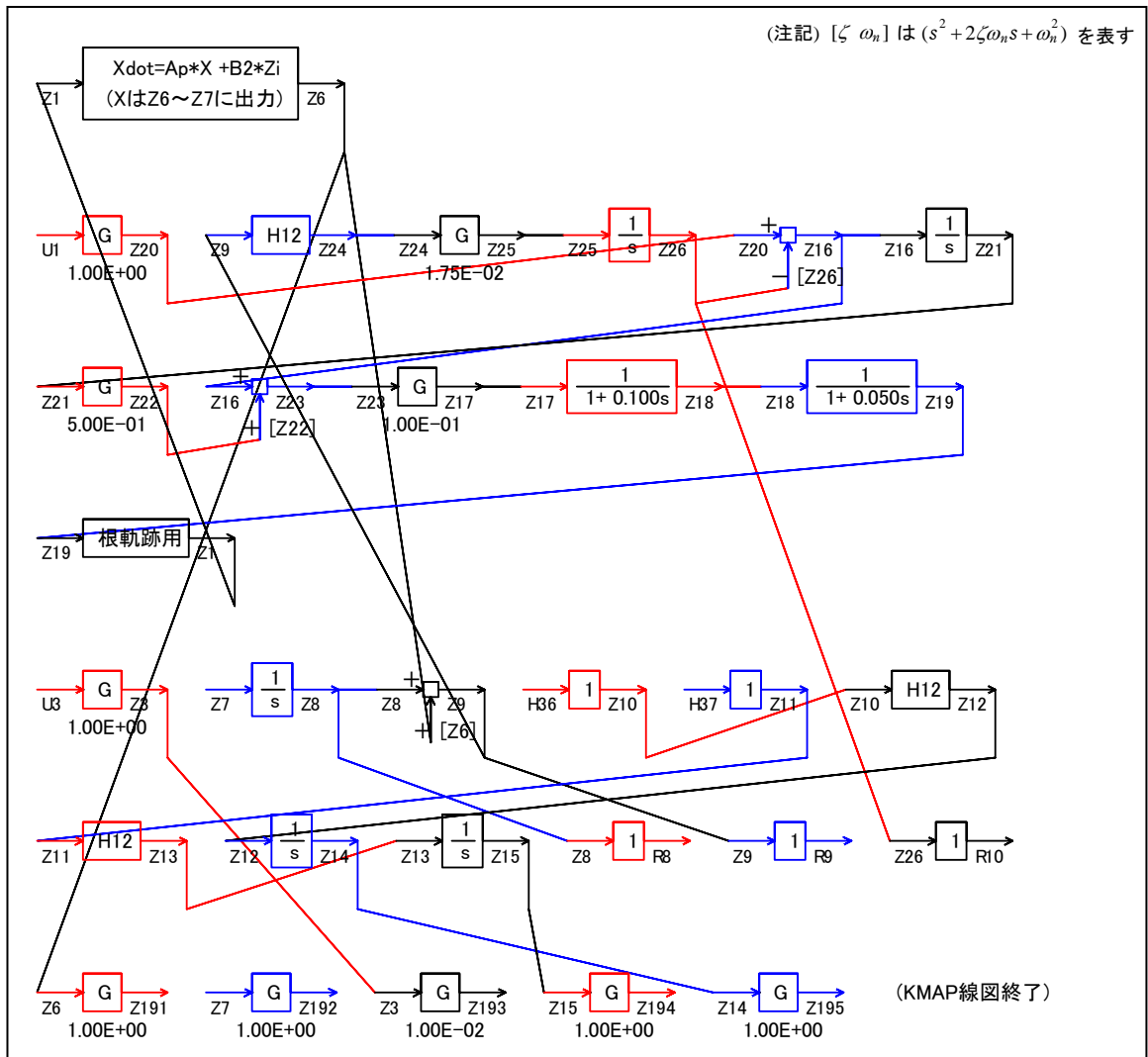


図 8 KMAP 線図

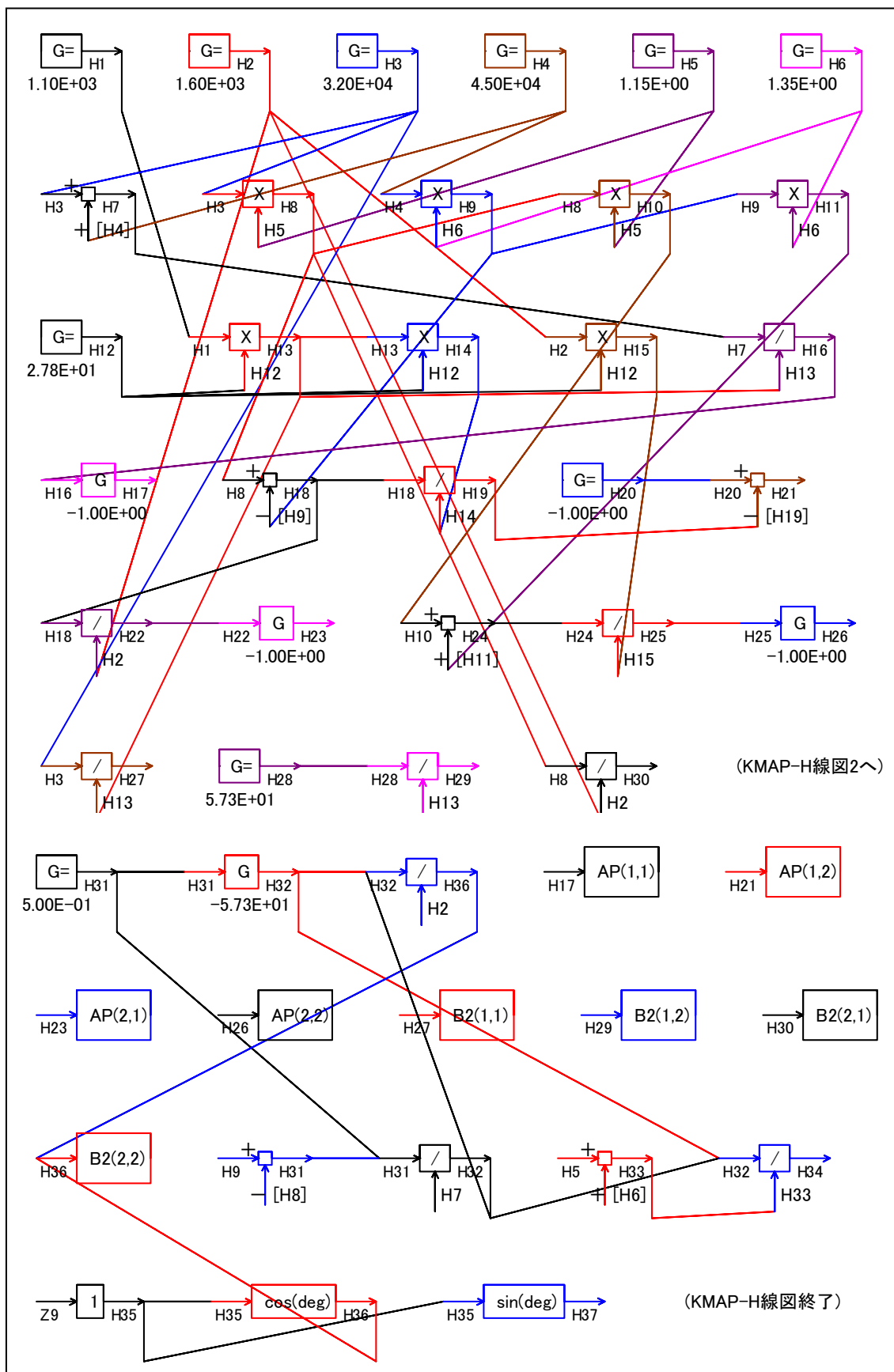


図 9 KMAP-H 線図

図8のKMAP線図は、インプット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9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。

次に、図6および図7のような走行不安定を改善するため、図2のブロック図内の制御則C1として次のようなリードラグフィルタを追加してみる。

$$\frac{1+5s}{1+0.5s} \cdot \frac{1+1s}{1+0.1s} \quad (2)$$

KMAPで解析しよう。

KMAP(バージョン115以降)を起動して、

- ① 「KMAP***解析内容選択画面」⇒“4”キーイン
- ② 「データファイル利用方法」⇒“3”をキーイン
- ③ 「例題ファイルデータの取得」⇒例として、“3”をキーイン
- ④ 「3:機械システム制御の実際の例題」⇒“55”キーイン

例題のインプットデータ ⇒ EIGE.PRB6.2-4A改.DAT

- ⑤ 「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 8

これで解析計算が実行されて、安定解析結果が次のように表示される。下記は、 Y_E/Y_{EC} の極・零点である。

```
***** (フィードバック前の極チェック) *****
***** POLES *****
POLES(11), EIVMAX= 0.200D+02
  N      REAL      IMAG
  1  -0.20000000D+02  0.00000000D+00
  2  -0.99999999D+01  0.00000000D+00
  3  -0.99999999D+01  0.00000000D+00
  4  -0.26566154D+01 -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
  5  -0.26566154D+01  0.38115386D+01   周期 P(sec)= 0.1648E+01
  6  -0.20000000D+01  0.00000000D+00
  7   0.00000000D+00  0.00000000D+00
  8   0.00000000D+00  0.00000000D+00
  9   0.00000000D+00  0.00000000D+00
 10   0.00000000D+00  0.00000000D+00
 11   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(11), EIVMAX= 0.1917D+02
  N      REAL      IMAG
```

```

1  -0.19166382D+02  0.00000000D+00
2  -0.14407066D+02  0.00000000D+00
3  -0.51303568D+01  -0.37944409D+01 [ 0.8040E+00, 0.6381E+01]
4  -0.51303568D+01  0.37944409D+01  周期 P(sec)= 0.1656E+01
5  -0.12558746D+01  -0.25104222D+01 [ 0.4474E+00, 0.2807E+01]
6  -0.12558746D+01  0.25104222D+01  周期 P(sec)= 0.2503E+01
7  -0.39454643D+00  -0.54446449D+00 [ 0.5868E+00, 0.6724E+00]
8  -0.39454643D+00  0.54446449D+00  周期 P(sec)= 0.1154E+02
9  -0.17822614D+00  0.00000000D+00
10  0.00000000D+00  0.00000000D+00
11  0.00000000D+00  0.00000000D+00
ZEROS( 7), II/JJ= 8/ 1, G= 0.1015D+04
N      REAL      IMAG
1  -0.17072282D+01  -0.82096206D+01 [ 0.2036E+00, 0.8385E+01]
2  -0.17072282D+01  0.82096206D+01
3  -0.10000000D+01  0.00000000D+00
4  -0.50000000D+00  0.00000000D+00
5  -0.20000000D+00  0.00000000D+00
6  0.00000000D+00  0.00000000D+00
7  0.00000000D+00  0.00000000D+00
***** POLES AND ZEROS *****
POLES(11), EIVMAX= 0.2000D+02
N      REAL      IMAG
1  -0.20000000D+02  0.00000000D+00
2  -0.10000000D+02  0.00000000D+00
3  -0.99999996D+01  0.00000000D+00
4  -0.26566154D+01  -0.38115386D+01 [ 0.5718E+00, 0.4646E+01]
5  -0.26566154D+01  0.38115386D+01  周期 P(sec)= 0.1648E+01
6  -0.20000000D+01  0.00000000D+00
7  0.00000000D+00  0.00000000D+00
8  0.00000000D+00  0.00000000D+00
9  0.00000000D+00  0.00000000D+00
10  0.00000000D+00  0.00000000D+00
11  0.00000000D+00  0.00000000D+00
ZEROS( 7), II/JJ= 1/ 4, G=-0.1015D+04
N      REAL      IMAG
1  -0.17072282D+01  -0.82096206D+01 [ 0.2036E+00, 0.8385E+01]
2  -0.17072282D+01  0.82096206D+01
3  -0.10000000D+01  0.00000000D+00
4  -0.50000000D+00  0.00000000D+00
5  -0.20000000D+00  0.00000000D+00
6  0.00000000D+00  0.00000000D+00
7  0.00000000D+00  0.00000000D+00

```

```

-----
      周波数          ゲイン余裕          位相余裕
0.31500 (rad/s)    (1) 15.69615 (dB)
1.20000 (rad/s)                                (1) 45.87125 (deg)
3.30000 (rad/s)    (2) 8.56177 (dB)
-----

```

```

ゲイン余裕最小値= 8.56177 (dB),   位相余裕最小値= 45.87125 (deg)
-----

```

この画面を消すと、「解析結果の表示」の画面になるが、画面を上をスクロールすると、次の AP, B2 行列およびスタティックマージンが次のように表示されている。

```

.....AP..... NI= 2 NJ= 2
-0.2518D+01 -0.9718D+00
 0.1497D+02 -0.2795D+01

.....B2..... NI= 2 NJ= 2
 0.1046D+01 0.1874D-02
 0.2300D+02 -0.1791D-01

{P}H34;      0.1244E+00 (スタティックマージン)

```

次の「解析結果の表示」に戻す.

```

$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$< 解析結果の表示 >$$$$$$$$$$$$$$$ (KMAP***)$$$$$$$$$$$$$$$$
$$ 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」、「7」および「10」とキーイン/Enterすると、根軌跡、極・零点、横外力の応答および走行軌跡が次のように Excel で表示することができる。(ただし、目盛りは適宜修正して使用)

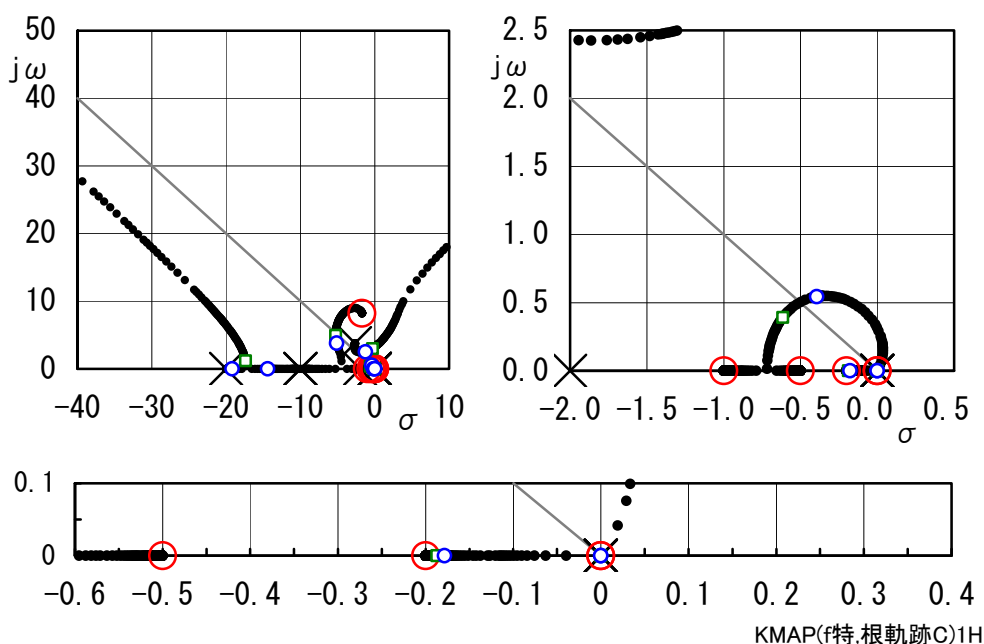


図 10 根軌跡 (制御則 C1 がある場合) (V=100km/h)
(EIGE. PRB6. 2-4A 改. DAT)

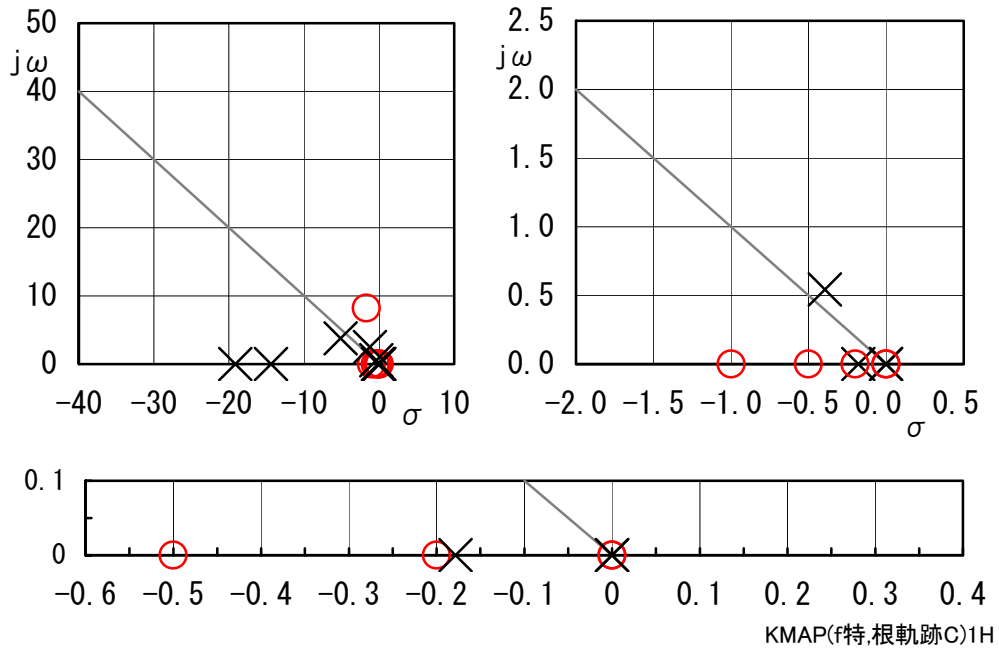


図 11 Y_E/Y_{E_C} の極・零点 (制御則 C1 がある場合)

図 10 は、根軌跡である。制御則 C1 の追加で $s=-2, -10$ に極、 $s=-0.2, -1$ に零点が加わったことにより安定化する。図 11 に極・零点を示すが、安定になっていることが確認できる。

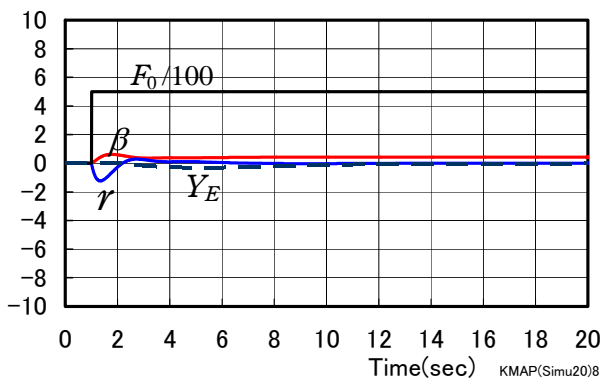


図 12 横風時のドライバー制御 (制御則 C1 がある場合)

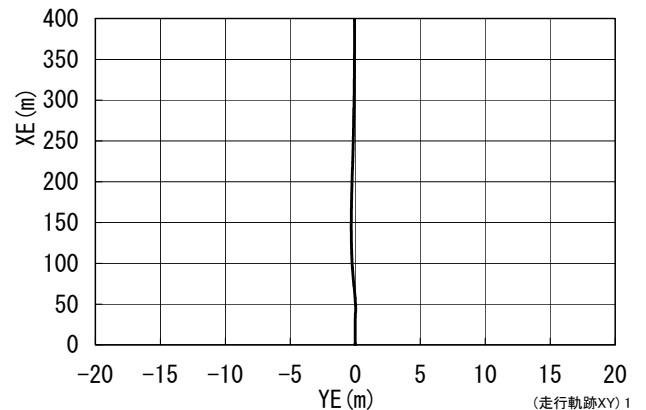


図 13 走行軌跡 (制御則 C1 がある場合)

図 12 に横風時のドライバー制御のシミュレーション結果を、また図 13 に走行軌跡を示す。制御則 C1 を挿入することで、500N 相当の横風があってもドライバーのハンドル操作によって横変位を 0 にできていることが確認できる。

「解析結果の表示」で 15 とキーインすると、このケースのインプットデータが表示される。

(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.PRB6.2-4A改.DAT (横風時のドライバー制御)

NXP = 2
tmax(s) = 40.000

1. NU1-----> 2

T, U1 0.0000 0.0000
60.0000 0.0000

3. NU3-----> 4

T, U3 0.0000 0.0000
1.0000 0.0000
1.0010 500.0000
60.0000 500.0000

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> 12 0 0.0 0

<Control System Data>

Hi *---GAIN---NCAL*N01*N02*N03*NGO*LNO

1	//AP, B2 行列データ設定								
2	H1=G; (m)	H 0	0.1100E+04	11	1	0	0	0	0
3	H2=G; (Iz)	H 0	0.1600E+04	11	2	0	0	0	0
4	H3=G; (K1)	H 0	0.3200E+05	11	3	0	0	0	0
5	H4=G; (K2)	H 0	0.4500E+05	11	4	0	0	0	0
6	H5=G; (L1)	H 0	0.1150E+01	11	5	0	0	0	0
7	H6=G; (L2)	H 0	0.1350E+01	11	6	0	0	0	0
8	//								
9	H7=H3+H4; (K1+K2)	H 0		21	7	3	4	0	0
10	H8=H3*H5; (K1*L1)	H 0		23	8	3	5	0	0
11	H9=H4*H6; (K2*L2)	H 0		23	9	4	6	0	0
12	H10=H8*H5; (K1*L1**2)	H 0		23	10	8	5	0	0
13	H11=H9*H6; (K2*L2**2)	H 0		23	11	9	6	0	0
14	H12=G; (V)	H 0	0.2780E+02	11	12	0	0	0	0
15	H13=H1*H12; (mV)	H 0		23	13	1	12	0	0
16	H14=H13*H12; (mV**2)	H 0		23	14	13	12	0	0
17	H15=H2*H12; (IzV)	H 0		23	15	2	12	0	0
18	//								
19	H16=H7/H13; ((K1+K2)/(mV))	H 0		24	16	7	13	0	0
20	H17=H16*G; (AP11)	H 0	-0.1000E+01	17	17	16	0	0	0
21	H18=H8-H9; (K1L1-K2L2)	H 0		22	18	8	9	0	0
22	H19=H18/H14; (K1L1-K2L2)/mV**2)	H 0		24	19	18	14	0	0
23	H20=G; (-1)	H 0	-0.1000E+01	11	20	0	0	0	0
24	H21=H20-H19; (AP12)	H 0		22	21	20	19	0	0
25	H22=H18/H2; ((K1L1-K2L2)/Iz)	H 0		24	22	18	2	0	0
26	H23=H22*G; (AP21)	H 0	-0.1000E+01	17	23	22	0	0	0
27	H24=H10+H11; (K1L1**2+K2L2**2)	H 0		21	24	10	11	0	0
28	H25=H24/H15; (H24/IzV)	H 0		24	25	24	15	0	0
29	H26=H25*G; (AP22)	H 0	-0.1000E+01	17	26	25	0	0	0
30	//								
31	H27=H3/H13; (B2-11=K1/mV)	H 0		24	27	3	13	0	0
32	H28=G; (57.3)	H 0	0.5730E+02	11	28	0	0	0	0
33	H29=H28/H13; (B2-12=57.3/mV)	H 0		24	29	28	13	0	0
34	H30=H8/H2; (B2-21=K1L1/Iz)	H 0		24	30	8	2	0	0
35	H31=G; (L0)	H 0	0.5000E+00	11	31	0	0	0	0
36	H32=H31*G; (B2-22=-57.3*L0)	H 0	-0.5730E+02	17	32	31	0	0	0
37	H36=H32/H2; (B2-22=-57.3*L0/Iz)	H 0		24	36	32	2	0	0
38	//								
39	AP(I1, J1)H17;	H 0		621	1	1	17	0	0
40	AP(I1, J2)H21;	H 0		621	1	2	21	0	0


```

41 AP (I2, J1) H23; H 0 621 2 1 23 0 0
42 AP (I2, J2) H26; H 0 621 2 2 26 0 0
43 // (コントロール入力) = (Z1, Z3, Z5)
44 B2 (I1, J1) H27; H 0 623 1 1 27 0 0
45 B2 (I1, J2) H29; H 0 623 1 2 29 0 0
46 B2 (I2, J1) H30; H 0 623 2 1 30 0 0
47 B2 (I2, J2) H36; H 0 623 2 2 36 0 0
48 {Print (AP, B2, CP)} I2, J2, K1; H 0 671 2 2 1 0 0
49 //
50 Z20=U1*G; (YEc) H 0 0.1000E+01 52 20 1 0 0 0
51 Z24=Z9*H12; (V*(PSI+BETA)) H 0 74 24 9 12 0 0
52 Z25=Z24*G; (YEdot) (Control Law) H 0 0.1745E-01 53 25 24 0 0 0
53 Z26={1/S, t>=G} Z25X4; (YE) (Control) H 0 0.0000E+00 110 26 25 4 0 0
54 Z16=Z20-Z26; (YEc-YE) H 0 36 16 20 26 0 0
55 Z21={1/S, t>=G} Z16X9; H 0 0.0000E+00 110 21 16 9 0 0
56 Z22=Z21*G; (*Gd1) H 0 0.5000E+00 53 22 21 0 0 0
57 Z23=Z16+Z22; H 0 35 23 16 22 0 0
58 Z17=Z23*G; (*Gd2) H 0 0.1000E+00 53 17 23 0 0 0
59 Z18={1/(1+GS)} Z17X7; (Td) H 0 0.1000E+00 111 18 17 7 0 0
60 Z27={(1+G2S)/(1+G1S)} Z18X10; H 0 0.5000E+00 113 27 18 10 0 0
61 H 0 0.5000E+01 113 0 0 0 0 0
62 Z28={(1+G2S)/(1+G1S)} Z27X11; H 0 0.1000E+00 113 28 27 11 0 0
63 H 0 0.1000E+01 113 0 0 0 0 0
64 Z19={1/(1+GS)} Z28X12; H 0 0.5000E-01 111 19 28 12 0 0
65 Z1={RGAIN (De)} Z19; H 0 301 1 19 0 0 0
66 Z3=U3*G; (FO (N)) H 0 0.1000E+01 52 3 3 0 0 0
67 //
68 //----- (Staic Margin)
69 H31=H9-H8; (K2L2-K1L1) H 0 22 31 9 8 0 0
70 H32=H31/H7; (H31/(K1+K2)) H 0 24 32 31 7 0 0
71 H33=H5+H6; (L=L1+L2) H 0 21 33 5 6 0 0
72 H34=H32/H33; (S. M.) H 0 24 34 32 33 0 0
73 {P} H34; H 0 601 34 0 0 0 0
74 //----- (XE, YE)
75 Z8={1/S, t>=G} Z7X8; (PSI) H 0 0.0000E+00 110 8 7 8 0 0
76 Z9=Z8+Z6; (PSI+Beta) H 0 35 9 8 6 0 0
77 H35=Z9; (PSI+Beta) H 0 12 35 9 0 0 0
78 H36=FCOSD[H35]; (cos (PSI+Beta)) H 0 19 36 35 0 0 0
79 H37=FSIND[H35]; (sin (PSI+Beta)) H 0 18 37 35 0 0 0
80 Z10=H36; (cos (PSI+Beta)) H 0 54 10 36 0 0 0
81 Z11=H37; (sin (PSI+Beta)) H 0 54 11 37 0 0 0
82 Z12=Z10*H12; (XEdot) H 0 74 12 10 12 0 0
83 Z13=Z11*H12; (YEdot) H 0 74 13 11 12 0 0
84 Z14={1/S, t>=G} Z12X5; (XE) H 0 0.0000E+00 110 14 12 5 0 0
85 Z15={1/S, t>=G} Z13X6; (YE) H 0 0.0000E+00 110 15 13 6 0 0
86 //-----
87 //安定解析出力に追加する場合
88 //は, 下記に R(6+NXP) ~ を設定.
89 R8=Z8; (PSI) H 0 101 8 8 0 0 0
90 R9=Z9; (PSI+BETA) H 0 101 9 9 0 0 0
91 R10=Z26; (YE) H 0 101 10 26 0 0 0
92 //シミュレーション用出力 (Z191~Z200)
93 //(このデータが TES6. DAT に入る)
94 Z191=Z6*G; (x1=Beta) H 0 0.1000E+01 53 191 6 0 0 0
95 Z192=Z7*G; (x2=r) H 0 0.1000E+01 53 192 7 0 0 0
96 Z193=Z3*G; (FO) H 0 0.1000E-01 53 193 3 0 0 0
97 Z194=Z15*G; (YE) H 0 0.1000E+01 53 194 15 0 0 0
98 Z195=Z14*G; (XE) H 0 0.1000E+01 53 195 14 0 0 0
99 Z196=Z15*G; (YE) H 0 0.1000E+01 53 196 15 0 0 0
100 //(最後に次の END 文が必要)
101 {Pitch Data END}; H 0 899 888 887 886 0 0

```

```

102  /*-----
103  /*(注1)状態方程式使用の場合
104  /* Z1, Z3, Z5      : 制御入力設定済
105  /* Z6~(NXP個)    : 状態変数設定済
106  /* Riは安定解析の出力で下記注意
107  /* R6~(NXP個)    : 状態変数に対応
108  /* R(6+NXP)~Rn: 出力変数の追加
109  /* 解析出力キーは i=4~(R設定数)
110  /*
111  /*(注2)状態方程式使用しない場合
112  /* Ziは全て通常のZ変数
113  /* R6~出力変数を設定
114  /* 解析出力キーは i=4~(R設定数)
115  /*$-----
----- (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 -----
          初期値 X( 1)= 0.0000E+00
                   X( 2)= 0.0000E+00
116  {Control Data END};          H 0          999  0  0  0  0  0
----- (DATA END) -----

```

(参考図書)

- 1) 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.
- 2) 片柳亮二：初学者のためのKMAP入門，産業図書，2012.
- 3) 片柳亮二：航空機の飛行力学と制御，森北出版，2007.
- 4) 景山克三，景山一郎：自動車力学，理工図書，1984.
- 5) カヤバ工業(株)：自動車の操舵系と操安性，山海堂，1996.
- 6) 安部正人：自動車の運動と制御，東京電機大学出版局，2008.
- 7) 片柳亮二：(KMAP 解説資料)
KMAPによる自動車の制御(1)－ハンドル操作時の運動，2017.
- 8) 片柳亮二：(KMAP 解説資料)
KMAPによる自動車の制御(2)－外力を受けた場合の運動，2017.
- 9) <http://r-katayanagi.air-nifty.com/>

以上