

KMAP によるロボットの制御(1)

2017(H29). 11. 30 片柳亮二

【問題】 図1に示す2リンクマニピュレータのダイナミクスは、図2のように表される²⁾。ここで、 m_1, m_2 はリンクの質量、 J_1, J_2 はリンクの重心まわりの慣性モーメント、 τ_1, τ_2 は入力トルク、 B_1, B_2 は粘性摩擦係数、 D_2, D_1 は動摩擦の影響である。

いま、リンク1の慣性モーメント J_{01} を無限大に大きくした場合に、入力トルク τ_2 を与えた場合の運動を解析せよ。ただし、ロボットのデータは以下とする³⁾。なお、マニピュレータは水平の設置されているものとし、重力の影響はないものとする。

$$J_{01}=10^5(\text{kgm}^2), \quad J_{02}=0.0758(\text{kgm}^2), \quad R=0.0414(\text{kgm}),$$

$$B_1=3.40(\text{Nms}), \quad B_2=0.468(\text{Nms}), \quad D_1=7.22(\text{Nm}), \quad D_2=3.24(\text{Nm})$$

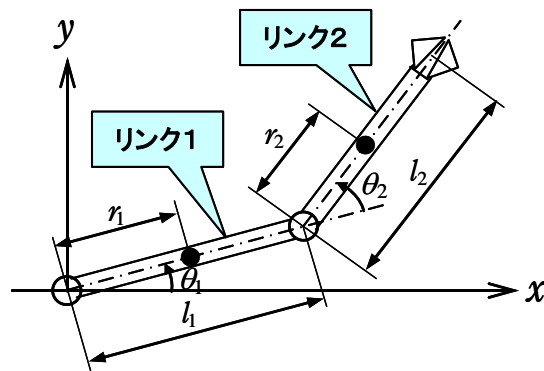


図1 2リンクマニピュレータ

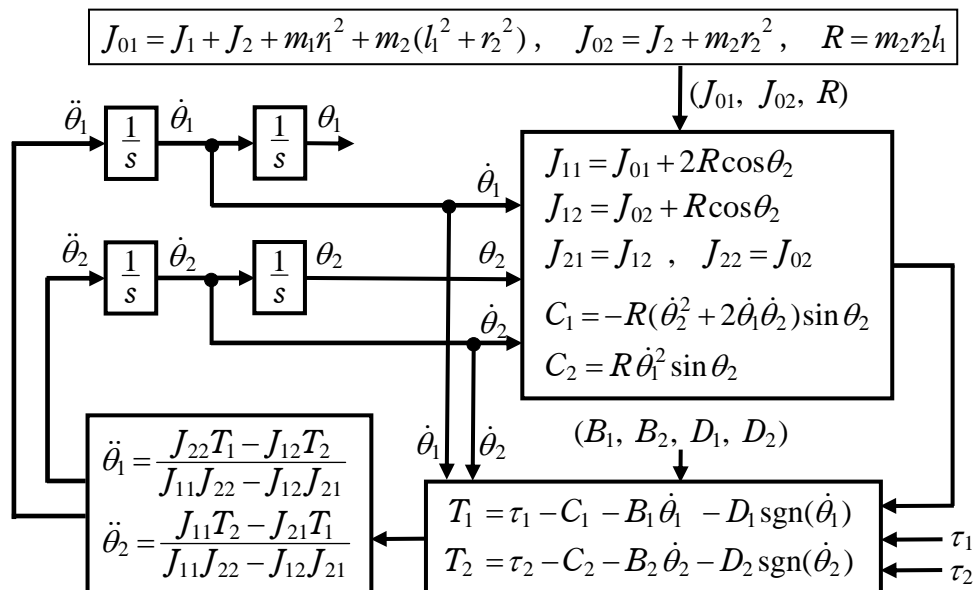


図2 2リンクマニピュレータのダイナミクス

【解】

J_{01} を無限大(J_{11} も無限大)にすると, リンク 1 は固定される. このときの運動計算ブロック図は図 3 のようになる.

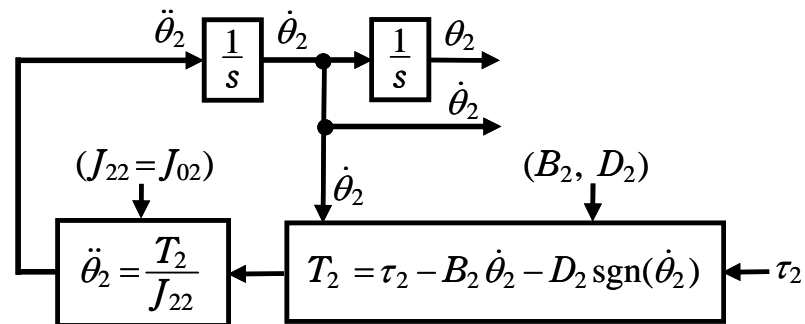


図 3 慣性モーメント J_{01} を無限大とした場合

図 3 の計算する前に, 動摩擦項 $D_2 \text{sgn}(\dot{\theta}_2)$ をなくした場合について考える. このときは, 次のような線形の伝達関数で表される.

$$\frac{\theta_2}{\tau_2} = \frac{1}{B_2} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1 + (J_{22}/B_2)s} \quad (1)$$

従って, τ_2 の単位ステップ応答に対して, 1 秒間あたり $1/B_2=2.14$ の割合で積分される値に時定数 $J_{22}/B_2=0.16$ (秒) の 1 次遅れで追従する応答となる. 実際に $J_{01}=10^5$ (kgm²) として KMAP で計算してみよう.

KMAP (バージョン 114 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」 ⇒ “34” キーイン

例題のインプットデータ ⇒ EIGE.PR4.2-2A.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

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.

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 6), EIVMAX= 0.2000D+01
N      REAL      IMAG
1      -0.2000000D+01    0.0000000D+00
2      -0.2000000D+01    0.0000000D+00
3       0.0000000D+00    0.0000000D+00
4       0.0000000D+00    0.0000000D+00
5       0.0000000D+00    0.0000000D+00
```

```

6      0.00000000D+00      0.00000000D+00
ZEROS( 3), II/JJ= 4/ 1, G= 0.2000D-04
N      REAL      IMAG
1      -0.20000000D+01      0.00000000D+00
2      0.00000000D+00      0.00000000D+00
3      0.00000000D+00      0.00000000D+00
    
```

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」とキーイン/Enterすると、極・零点およびボード線図が次のように Excel で表示することができる。

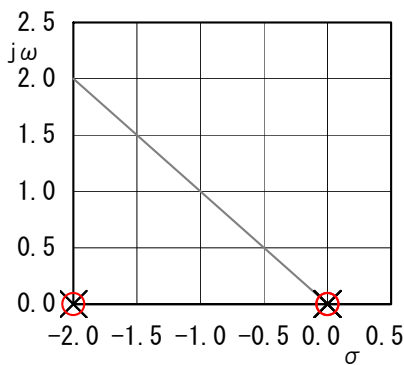


図 4 θ_2/τ_2 の極・零点 (EIGE. PRB4. 2-2A. DAT)

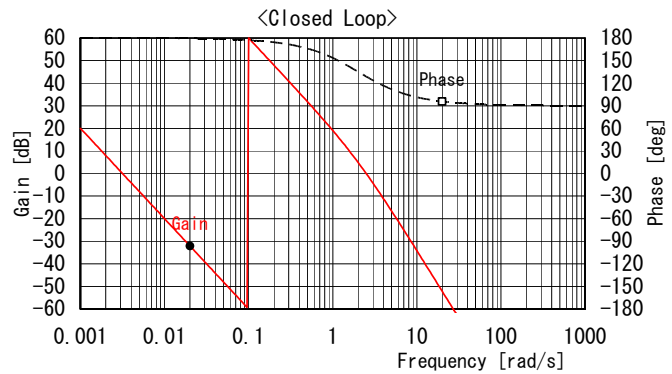


図 5 θ_2/τ_2 のボード線図

次に、「解析結果の表示」画面で「7」とキーインすると、シミュレーション図を次のように Excel 表示させることができる。

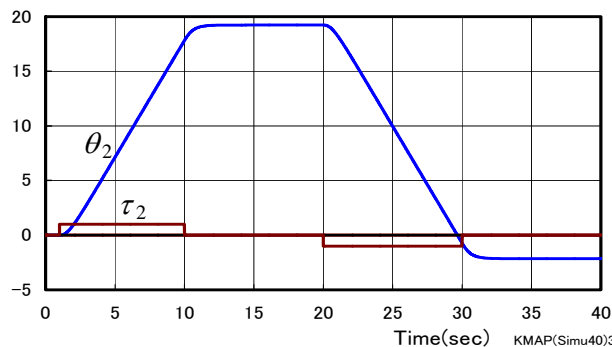


図 6 $J_{01}=10^5$ (kgm²), $D_2=0$ とした場合 (EIGE. PRB4. 2-2A. DAT)

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. PRB4. 2-2A. DAT (J01=10**5, D2=0)
NXP          = 0
tmax(s)      = 40.000
1. NU1-----> 2
  T , U1          0.0000    0.0000
                  60.0000    0.0000
3. NU3----->10
  T , U3          0.0000    0.0000      (←時刻に対すると  $\tau_2$  の値)
                  1.0000    0.0000
                  1.0100    1.0000
                  10.0000   1.0000
                  10.0100   0.0000
                  20.0000   0.0000
                  20.0100  -1.0000
                  30.0000  -1.0000
                  30.0100   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> 8 0 0.0 0
  <Control System Data>      Hi *---GAIN---NCAL*N01*N02*N03*NGO*LNO
  1 Z6=U1*G; (tau1)          H 0 0.1000E+01 52 6 1 0 0 0
  2 Z26={1/(1+GS)}Z6X8;      H 0 0.5000E+00 111 26 6 8 0 0
  3 Z7=U3*G; (tau2)          H 0 0.1000E+01 52 7 3 0 0 0
  4 Z27={1/(1+GS)}Z7X6;      H 0 0.5000E+00 111 27 7 6 0 0
  5 Z9={1/S, t>=G}Z8X5; (TH1dot) H 0 0.0000E+00 110 9 8 5 0 0
  6 Z10={1/S, t>=G}Z9X3; (TH1) H 0 0.0000E+00 110 10 9 3 0 0
  7 Z12={1/S, t>=G}Z11X2; (TH2dot) H 0 0.0000E+00 110 12 11 2 0 0
  8 Z13={1/S, t>=G}Z12X4; (TH2) H 0 0.0000E+00 110 13 12 4 0 0
  9 //
 10 H1=Z13; (TH2)            H 0 0.0000E+00 12 1 13 0 0 0
 11 H10=FSINR[H1]; (sinTH2)   H 0 0.0000E+00 58 10 1 0 0 0
 12 H11=FCOSR[H1]; (cosTH2)   H 0 0.0000E+00 59 11 1 0 0 0
 13 //
 14 H2=Z9; (TH1dot)           H 0 0.0000E+00 12 2 9 0 0 0
 15 H3=Z12; (TH2dot)          H 0 0.0000E+00 12 3 12 0 0 0
 16 H12=H2*H3; (TH1dot*TH2dot) H 0 0.0000E+00 23 12 2 3 0 0
 17 H13=H2*H2; (TH1dot**2)    H 0 0.0000E+00 23 13 2 2 0 0
 18 H14=H3*H3; (TH2dot**2)    H 0 0.0000E+00 23 14 3 3 0 0
 19 //
 20 H17=G; (J01)              H 0 0.1000E+06 11 17 0 0 0 0
 21 H18=G; (J02)              H 0 0.7580E-01 11 18 0 0 0 0
 22 H19=G; (R)                H 0 0.4140E-01 11 19 0 0 0 0
 23 H20=H19*H11; (RcosTH2)    H 0 0.0000E+00 23 20 19 11 0 0
 24 H21=H20*G; (2RcosTH2)     H 0 0.2000E+01 17 21 20 0 0 0
 25 H22=H17+H21; (J11)        H 0 0.0000E+00 21 22 17 21 0 0
 26 H23=H18+H20; (J12)        H 0 0.0000E+00 21 23 18 20 0 0
 27 H24=H23*G; (J21)          H 0 0.1000E+01 17 24 23 0 0 0
 28 H25=H18*G; (J22)          H 0 0.1000E+01 17 25 18 0 0 0
 29 //
 30 H26=H12*G; (2TH1dotTH2dot) H 0 0.2000E+01 17 26 12 0 0 0
```

```

31 H27=H14+H26; (TH2dot**2+2TH1dotTHH 0 21 27 14 26 0 0
32 H28=H19*H27; (R*H27) H 0 23 28 19 27 0 0
33 H29=H28*G; (-R*H28) H 0 -0.1000E+01 17 29 28 0 0 0
34 H30=H29*H10; (C1) H 0 23 30 29 10 0 0
35 H31=H19*H13; (R*TH1dot**2) H 0 23 31 19 13 0 0
36 H32=H31*H10; (C2) H 0 23 32 31 10 0 0
37 H60=H30*G; (-C1) H 0 -0.1000E+01 17 60 30 0 0 0
38 H61=H32*G; (-C2) H 0 -0.1000E+01 17 61 32 0 0 0
39 //
40 H33=G; (B1) H 0 0.3400E+01 11 33 0 0 0 0
41 H34=G; (B2) H 0 0.4680E+00 11 34 0 0 0 0
42 H35=G; (D1) H 0 0.7220E+01 11 35 0 0 0 0
43 H36=G; (D2) H 0 0.0000E+00 11 36 0 0 0 0
44 H39=H33*H2; (B1*TH1dot) H 0 23 39 33 2 0 0
45 H40=H34*H3; (B2*TH2dot) H 0 23 40 34 3 0 0
46 H15=FSIGN[H35, H2]; (D1sgnTH1dot) H 0 16 15 35 2 0 0
47 H16=FSIGN[H36, H3]; (D2sgnTH2dot) H 0 16 16 36 3 0 0
48 H45=H60-H39; (-C1-B1TH1dot) H 0 22 45 60 39 0 0
49 H46=H61-H40; (-C2-B2TH2dot) H 0 22 46 61 40 0 0
50 H47=H45-H15; (-C1-B1TH1dot-D1sgnTH 0 22 47 45 15 0 0
51 H48=H46-H16; (-C2-B2TH2dot-D2sgnTH 0 22 48 46 16 0 0
52 Z15=H47; (-C1-B1TH1dot-D1sgnTH1doH 0 54 15 47 0 0 0
53 Z16=H48; (-C2-B2TH2dot-D2sgnTH2doH 0 54 16 48 0 0 0
54 Z17=Z26+Z15; (T1) H 0 35 17 26 15 0 0
55 Z18=Z27+Z16; (T2) H 0 35 18 27 16 0 0
56 //
57 H49=H22*H25; (J11J22) H 0 23 49 22 25 0 0
58 H50=H23*H24; (J12J21) H 0 23 50 23 24 0 0
59 H51=H49-H50; (J11J22-J12J21) H 0 22 51 49 50 0 0
60 Z19=Z17*H25; (J22T1) H 0 74 19 17 25 0 0
61 Z20=Z18*H23; (J12T2) H 0 74 20 18 23 0 0
62 Z21=Z19-Z20; (J22T1-J12T2) H 0 36 21 19 20 0 0
63 Z22=Z18*H22; (J11T2) H 0 74 22 18 22 0 0
64 Z23=Z17*H24; (J21T1) H 0 74 23 17 24 0 0
65 Z24=Z22-Z23; (J11T2-J21T1) H 0 36 24 22 23 0 0
66 Z8=Z21/H51; (TH1, 2dot) (rad) H 0 75 8 21 51 0 0
67 Z11=Z24/H51; (TH2, 2dot) (rad) H 0 75 11 24 51 0 0
68 //
69 //Z14={RGAIN(De)}Z6;
70 Z99=Z10*G; (TH1) H 0 0.1000E+01 53 99 10 0 0 0
71 //-----
72 R6=Z99; H 0 101 6 99 0 0 0
73 //シミュレーション用出力 (Z191~Z200)
74 Z191=Z99*G; (TH1) H 0 0.1000E+01 53 191 99 0 0 0
75 Z192=Z13*G; (TH2) H 0 0.1000E+01 53 192 13 0 0 0
76 Z193=Z6*G; (tau1) H 0 0.1000E+01 53 193 6 0 0 0
77 Z194=Z7*G; (tau2) H 0 0.1000E+01 53 194 7 0 0 0
78 //
79 //(最後に次の END 文が必要)
80 {Pitch Data END}; H 0 899 888 887 886 0 0
81 //*-----
82 /**(注 1)状態方程式使用の場合
83 /** Z1, Z3, Z5 : 制御入力設定済
84 /** Z6~(NXP 個) : 状態変数設定済
85 /** Ri は安定解析の出力で下記注意
86 /** R6~(NXP 個) : 状態変数に対応
87 /** R(6+NXP)~Rn: 出力変数の追加
88 /** 解析出力キーは i=4~(R 設定数)
89 /**
90 /**(注 2)状態方程式使用しない場合
91 /** Zi は全て通常の Z 変数

```

```

92  /* R6～出力変数を設定
93  /* 解析出力キーインは i=4～(R 設定数)
94  /*$-----
----- (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 -----
95  {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。

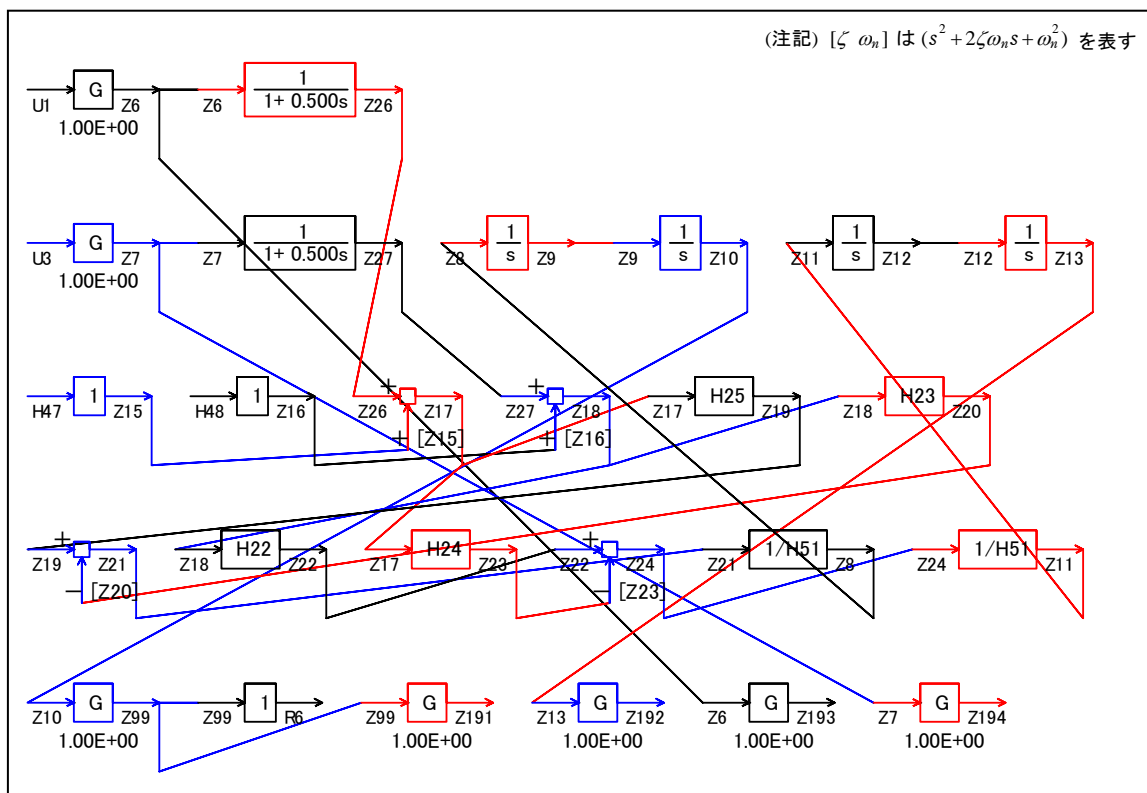


図 7 KMAP 線図

図 7 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 8 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。

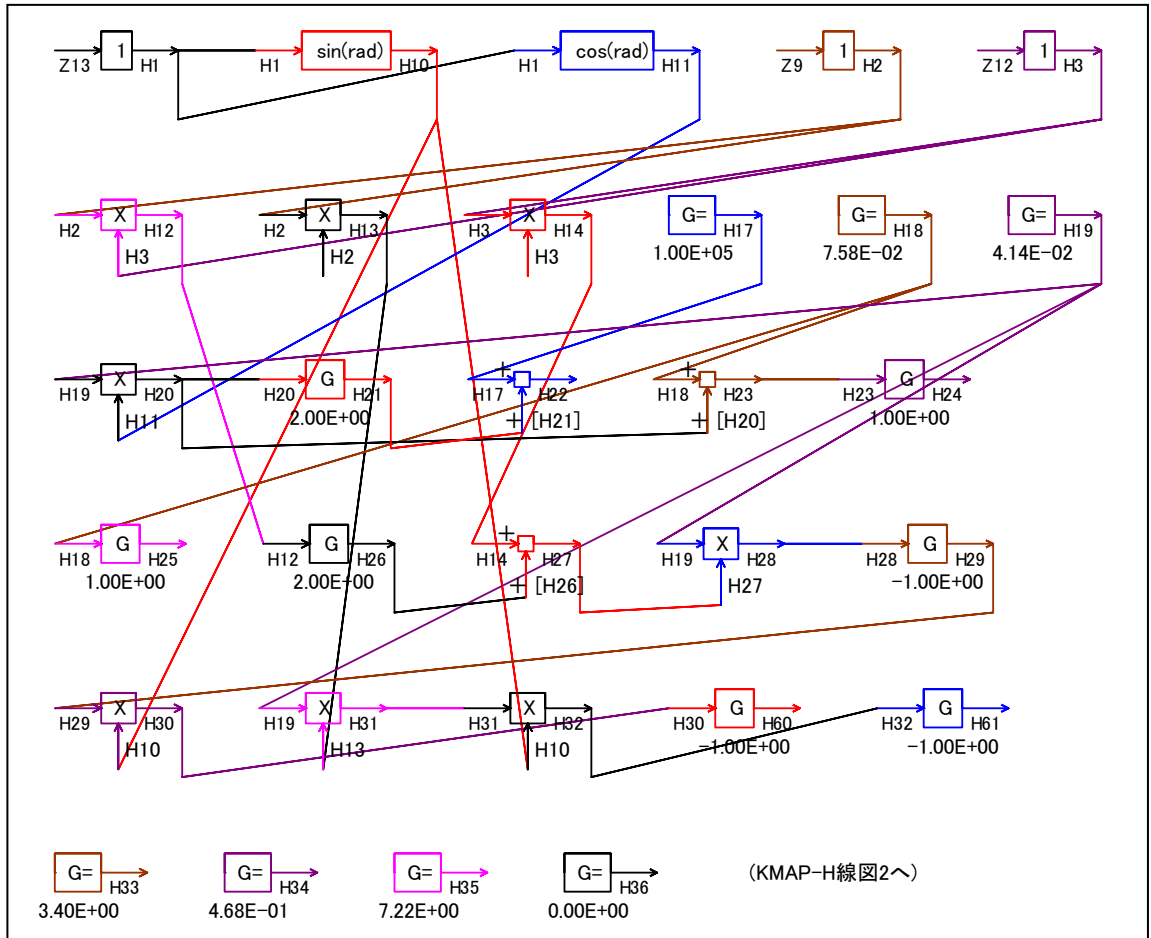


図 8 KMAP-H 線図

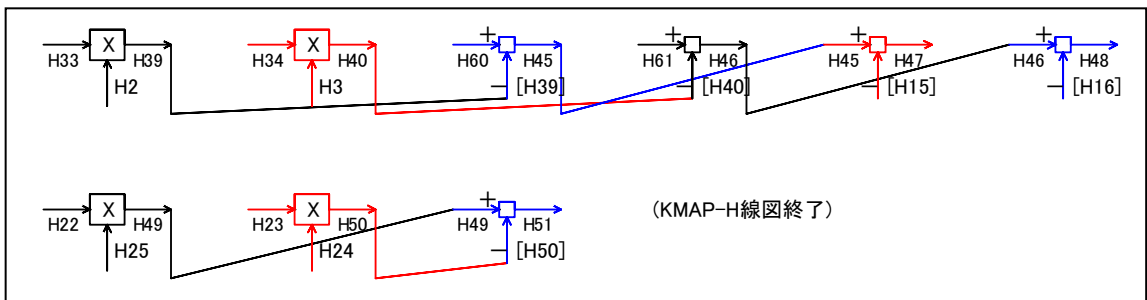


図 9 KMAP-H 線図 2

次に、動摩擦項 $D_2 \text{sgn}(\dot{\theta}_2)$ を考慮した場合について考えよう。粘性摩擦項 $B_2 \dot{\theta}_2$ は $\dot{\theta}_2$ の大きさに比例して大きくなるのに対して、動摩擦項は常に一定の大きさとなる。従って、図 6 に示した動摩擦項がない場合の運動に対して、回転が始まると動摩擦項がその回転を妨げる方向に働く。その結果、回転角の量がかなり抑えられた運動となる。この場合の計算を $J_{01}=10^5(\text{kgm}^2)$ として KMAP で計算してみよう。

KMAP (バージョン 114 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」 ⇒ ここでは例として、“3” をキーイン
- ④ 「3:機械システム制御の実際の例題」 ⇒ “35” キーイン
例題のインプットデータ ⇒ EIGE. PRB4. 2-2B. 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

これで解析計算が実行されて、「解析結果の表示」画面となるので、「7」とキーインすると、シミュレーション図を次のように Excel 表示させることができる。

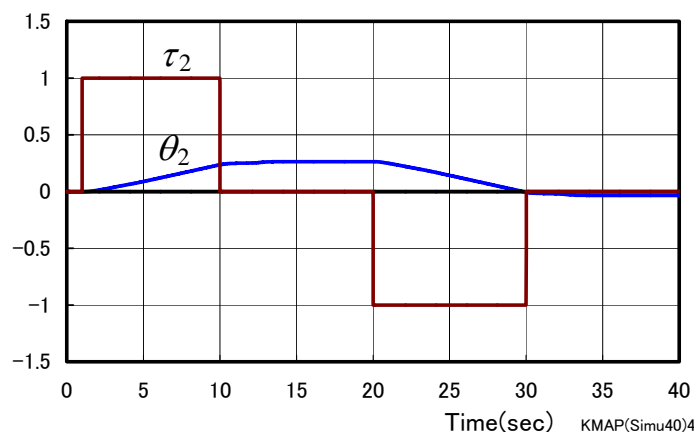


図 10 $J_{01}=10^5(\text{kgm}^2)$, $D_2=3.24(\text{Nm})$ とした場合
(EIGE. PRB4. 2-2B. DAT)

このケースのインプットデータは、 $D_2=0$ のケースに D_2 の値をいれただけであるが、この動摩擦項は非線形であるので、シミュレーション計算のみを示す。

(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) 計測自動制御学会編：ロボット制御の実際，コロナ社，1997.

以上