

安全な飛行制御系とは(2)

－根軌跡で極の動きを確認しておけば安心

KMAP (ケーマップ) 研究会

代表 片柳亮二(*)

1. フィードバック制御系の安定化領域を広げる工夫

安全な飛行制御系とは(1)で説明したように、フィードバック制御系はゲインを高くしていくと必ず不安定となることを説明した。このような性質を持つフィードバック制御系を安全に利用していくには、ゲインを高くしていった時の根軌跡が、安定がよく応答も速くなるような極位置を通るように制御系を構成することが重要となる(図1)。根軌跡がどのように動くのかは一巡伝達関数の極・零点配置によって決まるので、制御系が伝達関数の基本要素で表されていると極と零点が明確となるため、根の動きが把握し易くなる。根軌跡は安全な制御系を設計するための基本中の基本。“古典制御”とレッテルを貼って確認を怠ると危険である。後で後悔しないように根の動きを十分確認しておくことが重要である。

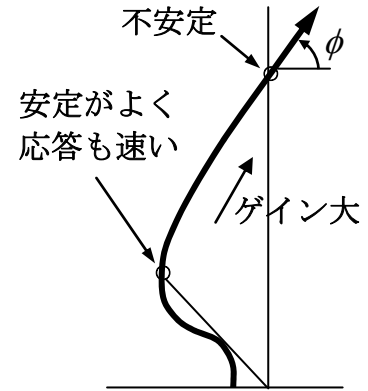


図1 根軌跡の安定化

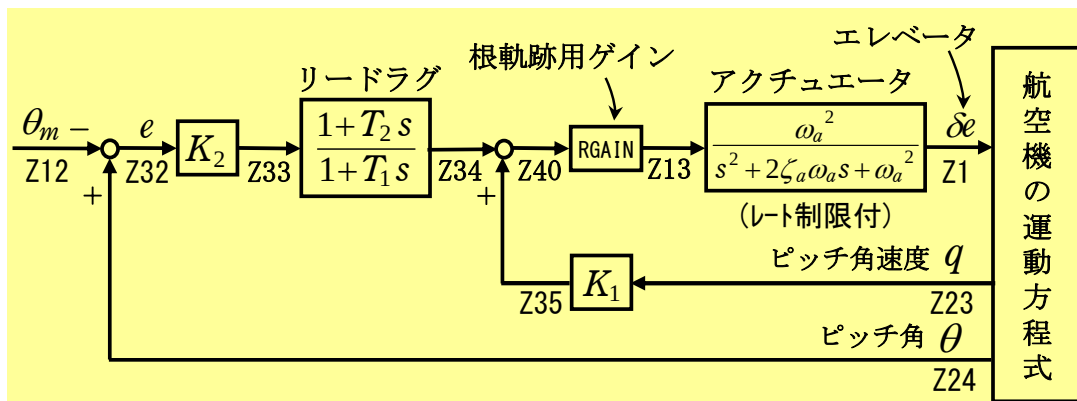


図2 ピッチ角制御系

図2に示すピッチ角制御系を例として検討してみよう。これは、安定化のためのピッチ角速度 q とピッチ角コマンド用のピッチ角 θ をリードラグ伝達関数を通してエレベータアクチュエータにフィードバックする非常にシンプルな制御系である。このような制御系を解析するには、KMAP(ケーマップ)研究会で開発している制御系設計解析ソフトウェアKMAPを用いると便利である。次項で実際にピッチ角制御系を設計してみよう。

(*)T-2CCV 研究機(日本初のコンピュータ制御の飛行機)およびF-2 支援戦闘機の飛行制御系の設計を担当。40年以上に亘り三菱重工および大学にて飛行制御の設計と研究を実施。現在もKMAP研究会にて活動をしている

(<http://r-katayanagi.air-nifty.com/>, E-mail:qyq00437@nifty.com)

2. KMAPによるピッチ角制御系の設計

図 2 のピッチ角制御系は，KMAPを用いると簡単に解析することができる．まず，KMAPを立ち上げると次のように表示される．

```
##### < KMAP * * * 解析内容選択 > #####
##                                     (20**.*.*) ##
## ● 従来型のキーイン方式による各種KMAP解析 ##
##   1 : 「一般」(下記以外) ⇒ 航空機の運動・制御系解析, スピン運動 ##
##   2 : 「CDES」          ⇒ 航空機(含む機体形状データ)の解析 ##
##   3 : 「CDES.WAT」       ⇒ 水中ビークルの運動・制御系解析 ##
##   4 : 「EIGE」          ⇒ 基礎的な制御, 振動, 最適化, ##
##                           ロボットの制御, 自動車の制御, 船の制御 ##
##   5 : 「EIGE.MEC」       ⇒ 工作機械の制御解析 ##
##   6 : 「HAYA」          ⇒ キーインなしで航空機シミュレーション ##
##   7 : シミュレーションデータの保存と加工 ##
## ----- ##
##   11: 有限要素法(FEM)による構造物の弾性解析 (参考図書⑥ 参照) ##
##   12: 差分法(FDM)による流体, 熱の流れの解析 (参考図書⑥ 参照) ##
##   13: 飛行機の翼理論, 2次元ポテンシャル流厳密解 (参考図書⑮ 参照) ##
## ===== ##
## ● 飛行機(CDES)の自動化解析(新規) ##
##   23: 解析スタート ⇒ 保存リストをコピーしてデータ新規作成 ##
## ===== ##
##           (20:自動化解析の説明, 30: 取り扱い説明書(pdf 資料)) ##
##           (86:参考図書, 87:KMAP 変更内容の履歴, 88:注意事項の表示) ##
## ----- ##
##           9 : 終了 ##
#####
● 上記の番号を選択 -->
```

ここで，23，13，99，44 とキーインすると，次の大型旅客機のデータが呼び出される．

表 1 機体の主要諸元

機体重量(着陸)	161 (tf)
主翼面積	428 (m ²)
翼面荷重	376 (kgf/m ²)
平均翼弦	7.95 (m)
スパン	60.9 (m)
胴体長	63.7 (m)
水平尾翼面翼	100 (m ²)
主翼水平尾翼間距離	28.1 (m)
水平尾翼容積比	0.827 (—)
全機空力中心	49.0 (%MAC)
重心	25.0 (%MAC)

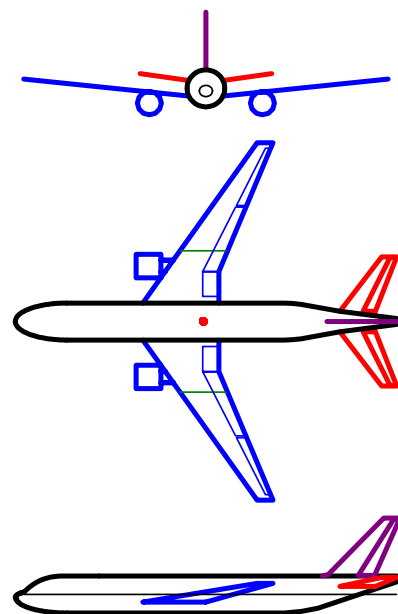


図 3 大型旅客機の 3 面図

次に、制御則メニューが表示されるので、102 とキーインすると、ピッチ角制御則が呼び出される。この制御則の内容を確認するには1をキーインする。このとき、制御則のインプットデータが次のように表示される。

16	#####<縦系制御則>#####								
17	//(次の Z21~Z24 は変更不要)								
18	Z21={u(m/s)};	H 0	201	21	0	0	0	0	0
19	Z22={ALP(deg)};	H 0	205	22	0	0	0	0	0
20	Z23={q(deg/s)};	H 0	203	23	0	0	0	0	0
21	Z24={THE(deg)};	H 0	204	24	0	0	0	0	0
22	*****								
23	//000<<De 系,ここから記述>>....								
24	Z29=U1*G; (THEC)	H 0	0.1000E+01	52	29	1	0	0	0
25	Z30={t=G} Z24;	H 0	0.0000E+00	82	30	24	0	0	0
26	Z12=Z30+Z29;	H 0		35	12	30	29	0	0
27	Z32=-Z12+Z24;	H 0		38	32	12	24	0	0
28	Z33=Z32*G;	H 0	0.4523E+01	53	33	32	0	0	0
29	Z34={ (1+G2S) / (1+G1S) } Z33;	H 0	0.8899E+01	113	34	33	12	0	0
30		H 0	0.3058E+01	113	0	0	0	0	0
31	Z35=Z23*G;	H 0	0.1035E+01	53	35	23	0	0	0
32	Z40=Z35+Z34;	H 0		35	40	35	34	0	0
33	Z40={G1<=, <=G2} ;	H 0	-0.2000E+02	85	40	0	0	0	0
34		H 0	0.2000E+02	85	0	0	0	0	0
35	//(開ルーフ°, 根軌跡用ゲイン) (De)								
36	Z13={RGAIN(De)} Z40;	H 0	301	13	40	0	0	0	0
37	//(アクチュエータ, 2 次遅れ)								
38	Z1={G2^2/[G1G2]G3} Z13;	H 0	0.7000E+00	124	1	13	19	0	0
39		H 0	0.3000E+02	124	0	0	20	0	0
40		H 0	0.1000E+04	124	0	0	0	0	0
41	Z1={G1<=, <=G2} ; (De)	H 0	-0.2000E+02	85	1	0	0	0	0
42		H 0	0.2000E+02	85	0	0	0	0	0
43	//(Z1 が舵角 De に接続される)								

ここで、29~30 行目はリードラグ伝達関数である。この関数は関数メニューで 113 をキーインすることで呼び出すことができる。また、38~40 行目のアクチュエータ模擬のレート制限付き 2 次遅れ伝達関数である。関数メニュー 124 とキーインすることで呼び出すことができる。

制御則の修正等がなければ、9(修正完了)とキーインすると、

●ゲイン最適化を実行しますか？
⇒ =0(実行しない), =1(実行する)

と表示されるので、1, 0, 0, 1, 0, 0 とキーインすると次のように表示される。

***** (ゲイン最適化 - 探索範囲) *****

探索ゲイン数 = 4

(1) 28 行目 0.1000E+00 ~ 0.1000E+02

(2) 29 行目 0.1000E+00 ~ 0.1000E+02

(3) 30 行目 0.1000E+00 ~ 0.1000E+02

(4) 31 行目 0.1000E+00 ~ 0.1000E+02

重み係数 = 0.0000E+00 影響範囲 (rad/s) = 0.0000E+00

この探索範囲のデータを修正しますか?

⇒ 個数修正=1, データ行修正=2, 探索範囲修正=3, 重み係数修正=4, 終了=98

ここで、探索ゲインが 28, 29, 30, 31 行目とあるのは、この 4 つの行にゲイン K_2 , 時定数 T_1 , T_2 , ゲイン K_1 に対してゲイン最適化することを示している。

次に、98, 0, 0, 7, 1, 7 とキーインすると、ゲイン最適化の計算が実行され、計算が終了すると＜解析結果の表示＞がでる。図 4 は、ゲイン最適化の探索状況である。

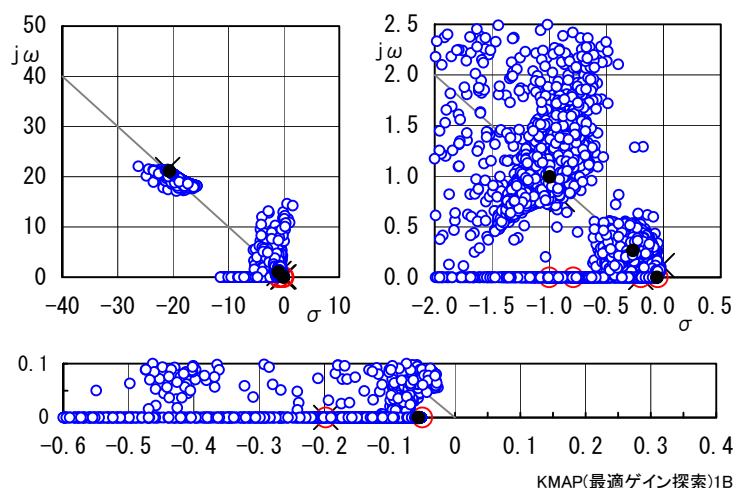


図 4 ゲイン最適化の探索状況

ここで、9 とキーインすると、100 万回のゲイン最適化の結果が次のように表示される。

~~~~~ ( 最適ゲイン探索結果 ) ~~~~~

& ( 1 ) 28 行目 0.4523E+01 &

& ( 2 ) 29 行目 0.8899E+01 &

& ( 3 ) 30 行目 0.3058E+01 &

& ( 4 ) 31 行目 0.1035E+01 &

~~~~~

次に、＜解析結果の表示＞で 1 とキーインすると、安定解析図が次のように表示される。図 5 は根軌跡である。制御則がシンプルであるため、一巡伝達関数の極・零点の位置と制御則の伝達関数との関係が対応が簡単であり、ゲインを高くしても極が悪い動きをしないかどうか見極めるのが容易である。なお、軌跡上の小さな丸印はノミナルゲイン(1 倍)の場合、小さな口印はゲイン 2 倍の場合である。ゲインが 2 倍になっても十分安定であることがわかる。

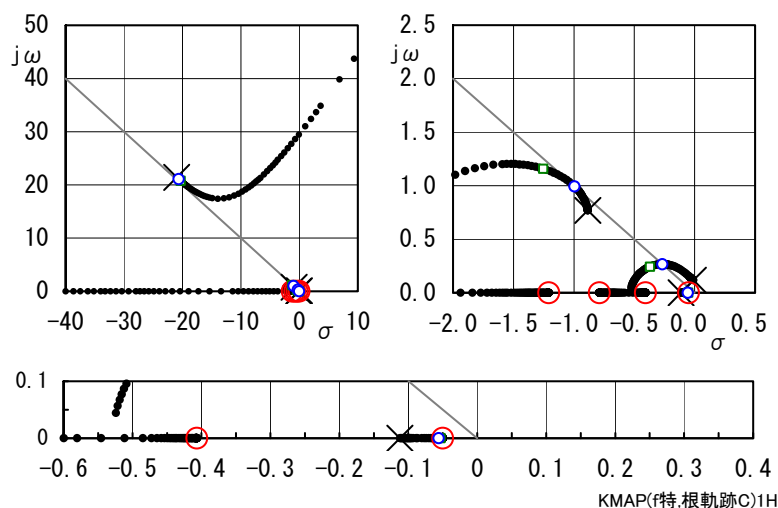


図 5 根軌跡

(CDES. 安全な飛行制御系の例題 1. Y180428. DAT)

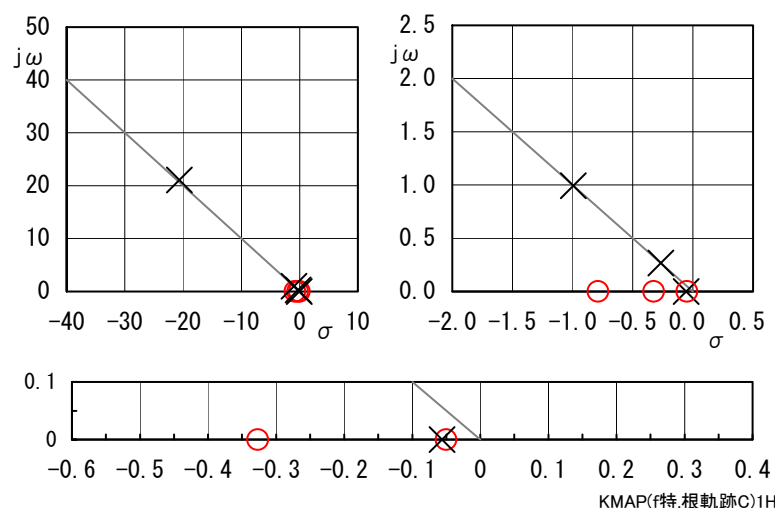
図 6 θ/δ の極・零点

図 6 は、ノミナルゲインにおける θ/δ の極・零点である。左 45° ライン上に振動極が 3 つ並んでいることがわかる。この左 45° ライン上にある振動極はほとんど振動が現れなくなる極であり、非常に安定であることを示している。しかし、ここで問題点が 1 つある。それは、ピッチ角コマンドのシミュレーションの結果である。

<解析結果の表示>で 2 とキーインすると、図 7 に示すピッチ角コマンドのシミュレーション図を表示することができる。これからわかるように、ピッチ角 θ の応答がコマンド(破線)に対して追従がよくないことである。それは、図 6 に示した極・零点において、原点に近い振動極が追従性を悪くしているからである。もちろん極は十分安定な位置にあるので安定性は問題はない。次にこの追従性改善について検討する。

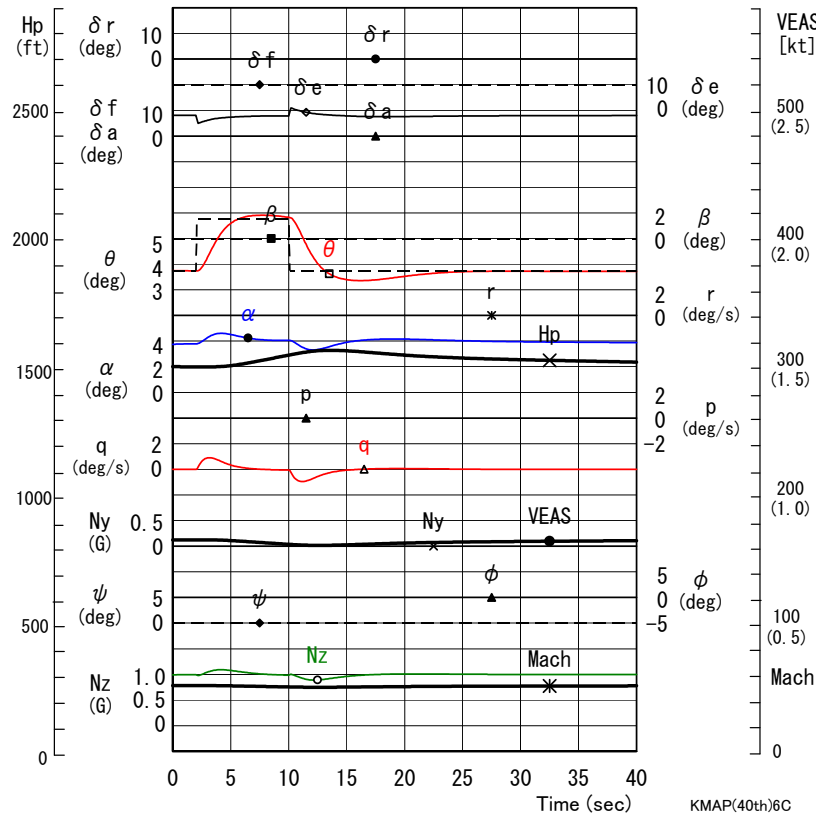


図 7 ピッチ角コマンドのシミュレーション

3. ピッチ角コマンドシミュレーションの追従性改善

2 項で述べたように、コマンド追従性の改善には極・零点配置を改善する必要がある。もちろん図 6 に示す極は安定性は申し分ない性能を示している。問題はコマンドに対する追従性であるので、これには安定性に影響のないフィードフォワードラインにノッチフィルタ (2 次/2 次) を追加して、原点付近の極と零点を打ち消すことを考える。

```
***** POLES AND ZEROS *****
POLES( 7), EIVMAX= 0.2952D+02
  N      REAL      IMAG
  1  -0.20662610D+02 -0.21089402D+02 [ 0.6998E+00, 0.2952E+02]
  2  -0.20662610D+02  0.21089402D+02  周期 P(sec)= 0.2979E+00
  3  -0.99466373D+00 -0.99430006D+00 [ 0.7072E+00, 0.1406E+01]
  4  -0.99466373D+00  0.99430006D+00  周期 P(sec)= 0.6319E+01
  5  -0.26644487D+00 -0.26677188D+00 [ 0.7067E+00, 0.3770E+00]
  6  -0.26644487D+00  0.26677188D+00  周期 P(sec)= 0.2355E+02
  7  -0.55988197D-01  0.00000000D+00
ZEROS( 3), II/JJ= 7/ 1, G= 0.9078D+03
  N      REAL      IMAG
  1  -0.78941888D+00  0.00000000D+00
  2  -0.32701111D+00  0.00000000D+00
  3  -0.50220938D-01  0.00000000D+00
```

上記は、図 6 の θ/δ の極・零点のデジタル値である。いま、極の 5 番と 6 番、それに零点の 1 番と 2 番を極と零点を逆にして次のノッチフィルタをつくる。

$$\frac{0.2581}{0.14213} \times \frac{s^2 + 2 \times 0.7067s + (0.3770)^2}{(s + 0.7894)(s + 0.3270)} = 1.8159 \times \frac{[0.7067, 0.3770]}{[1.0986, 0.5081]} \quad (1)$$

ここで, $[\zeta, \omega]$ は s の 2 次式において, 減衰比 ζ と固有角振動数 ω を表現している. このノッチフィルタを追加したブロック図は図 8 のようになる.

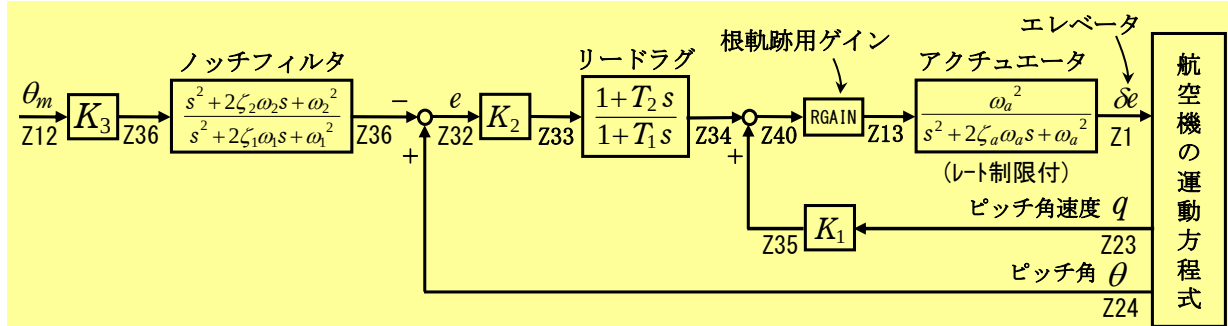


図 8 フィードフォワードにノッチフィルタを追加したピッチ角制御系

図 8 の制御系はフィードバックループは図 2 と同じであるので, 根軌跡は図 5 と同じである. 図 9 は極・零点であるが, フィードフォワードループに追加したノッチフィルタにより原点に近い振動極と零点が相殺されていることがわかる. その結果, ピッチ角コマンドに対するピッチ角の応答は, 固有角振動数 30(rad/s) のアクチュエータによる振動極と, 固有角振動数 1.5(rad/s) 付近の振動極の応答特性となる. このように応答性に悪影響を与える極・零点をフィードフォワードで相殺することでコマンドに対する追従性を良好化することができる. ただし, 相殺される極は本例題のように十分安定にしておく必要がある.

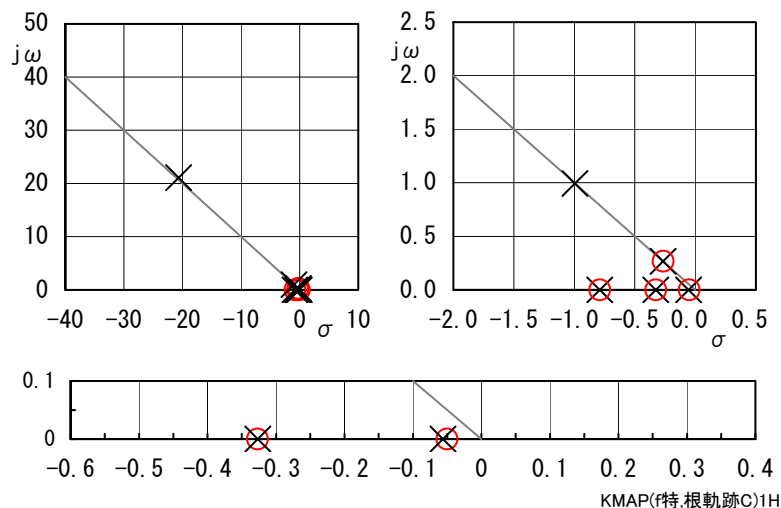


図 9 θ/δ_e の極・零点 (ノッチフィルタ追加)

(CDES. 安全な飛行制御系の例題 2. Y180428. DAT)

図 10 は, ノッチフィルタを追加した場合のピッチ角コマンドのシミュレーション結果である. 原点近くの極・零点の影響が取り除かれたので, コマンドに対してピッチ角がよく追従していることがわかる.

4. KMAP線図について

(注記) $[\zeta \ \omega_h]$ は $(s^2 + 2\zeta\omega_h s + \omega_h^2)$ を表す

Block diagram showing the control system for the ship's heading. The system includes blocks for gain, integration, and feedback, with signals labeled Z1 through Z40. The final output is the heading error signal (δ) .

以上