

安全な飛行制御系とは(1)

－飛行制御則をシンプルな構成にすること

KMAP (ケーマップ) 研究会

代表 片柳亮二(*)

1. フライ・バイ・ワイヤ操縦装置

近年の飛行機の操縦装置は、フライ・バイ・ワイヤ(FBW)といわれるコンピュータ制御の方式となっている。これは、機体の運動情報を用いて飛行機の運動を良好にする目的で、フィードバック制御を採用している(図1)。

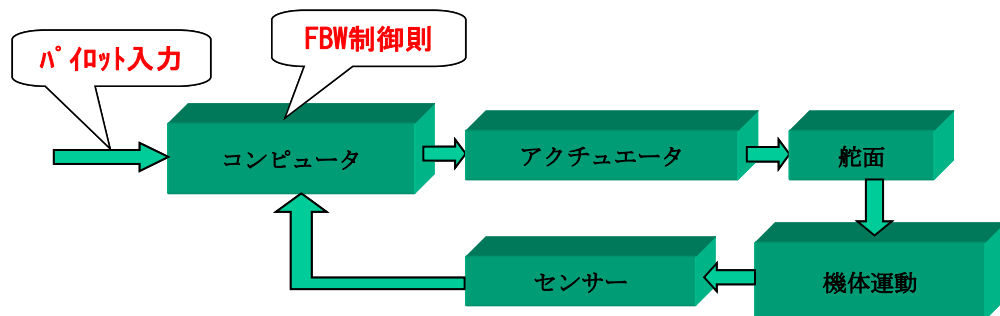


図1 フライ・バイ・ワイヤ操縦装置

このフライ・バイ・ワイヤ方式は、飛行機の運動性能を大幅に向上させる可能性がある反面、安全性に十分に配慮した設計が必要となる。それは、コンピュータ内のソフトウェアで作られている**制御則**(舵面を動かす法則)に不具合があると、安全性に大きな影響を及ぼすからである。もし、フライ・バイ・ワイヤが舵面にフル舵角の異常信号を出したとすると、高速時の飛行機には40Gを超える荷重がかかり、一瞬で機体が破壊される可能性がある。フィードバック制御に頼ったシステムであるフライ・バイ・ワイヤの制御則は、とにかく安全性を最優先して設計する必要がある。

2. 安全な制御系にするにはどうしたらよいのか

安全な制御系にするにはどうしたらよいのであろうか。それは、とにかく制御則をシンプルに構成することである。それには、制御則をだれがみてもわかり易いことが必要である。具体的には、表1に示す**伝達関数の基本要素**で制御則を構成することで、制御則内の情報の流れが理解しやすくなる。

一般的に伝達関数は、(1)式のように、表1の伝達関数の基本要素のかけ算で表すことができる。すなわち、基本伝達関数の極は、実数(1次)または複素数(2次)のどちらかであり、3次以上の極は存在しない。

(*)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則の設計を担当。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研究会にて活動を続けている

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

表 1 伝達関数の基本要素

基本要素	伝達関数
積分	$\frac{1}{s}$
1 次遅れ形 (1次遅れフィルタ)	$\frac{1}{1+Ts}$
ハイパスフィルタ	$\frac{Ts}{1+Ts}$
リードラグフィルタ	$\frac{1+T_2s}{1+T_1s}$
2次遅れ形 (2次遅れフィルタ)	$\frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$
1 次/2次形	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$
2次/2次形 (ノッチフィルタ)	$\frac{s^2 + 2\zeta_2\omega_2 s + \omega_2^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1 s + \omega_1^2}$

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n} = K \times \frac{1}{s} \times \frac{1}{1+T_1 s} \times \frac{T_2 s}{1+T_2 s} \times \frac{1+T_3 s}{1+T_3 s} \times \dots$$

$$\times \frac{\omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2} \times \frac{s}{s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2} \times \frac{s^2 + 2\zeta_3' \omega_3' s + \omega_3'^2}{s^2 + 2\zeta_3 \omega_3 s + \omega_3^2} \times \dots \quad (1)$$

図 2 は, (1) 式をブロック図で表したものである. KMAP (ケーマップ[®]) 研究会では, 安全な飛行制御則を簡単に設計することを目的とした制御系設計解析ソフトウェア KMAP を開発している. KMAP には, 表 1 に示した伝達関数の基本要素がメニュー化されており, 関数番号にて呼び出し, それに入出力用の Z 番号を付けることで制御則を構成していく方法を採用している (この方法を Z 接続法と呼んでいる).

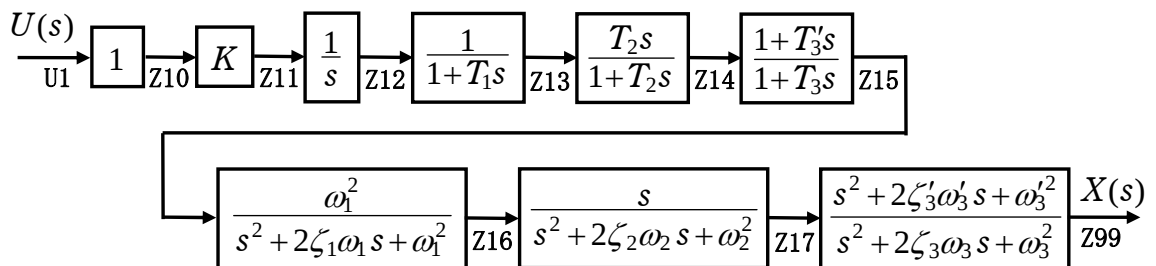


図 2 基本要素で表したブロック図

図 3 は, 制御対象も伝達関数で表した例であるが, フィードバックがある場合も, その Z 変数を引き算するだけで簡単にフィードバック制御系を構成できる.

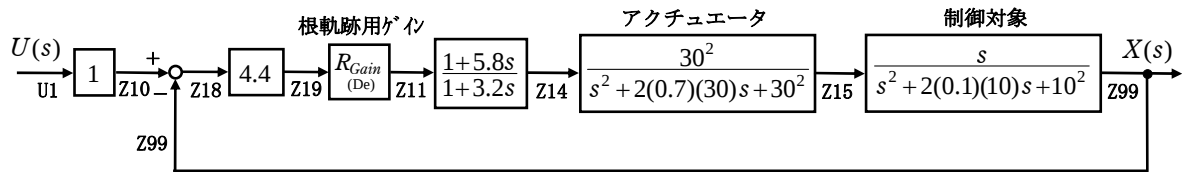


図 3 フィードバックがある場合の制御系のブロック図

3. 制御則をシンプルにするとよい理由

安全な制御系にするためには、制御則をシンプルにすることが重要である。その理由の 1 つは、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になるという次の事実である。

フィードバック制御系の一巡伝達関数(図 3 の例では全てかけたもの)の分母の次数 n ，分子の次数 m とすると，ゲイン ∞ のときの角度 ϕ は $\phi = \pi / (n - m)$ で表される。

ここで、伝達関数の次数とは分母分子の s の次数のことである。図 3 の例では、分母の次数 n は 5，分子の次数 m は 2 であるから次数差は 3 である。従って、ゲインを高くしていくと $\phi = 60^\circ$ となるため、図 4 に示すように必ず制御系の極が右反面に入り込み不安定となる。

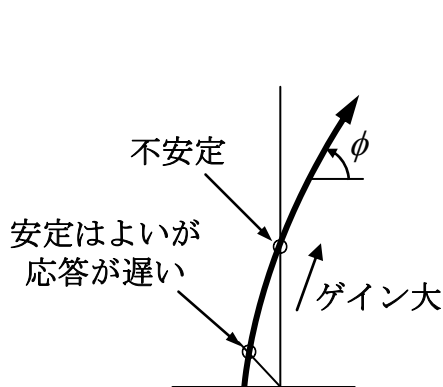


図 4 漸近線の角度 ϕ

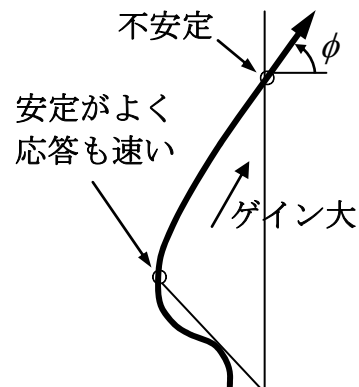


図 5 根軌跡の安定化

それでは、必ず不安定となってしまうフィードバック制御系は、どのように設計すればよいのだろうか。それは、図 5 に示すように、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則を構成することが重要となる。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、制御則が伝達関数の基本要素で表されていると制御則が作り出す極と零点の配置が明確となるため、根軌跡の推定が容易となる。

具体的なやり方を次回説明する予定である。

以上