

KMAPによる多目的飛行制御設計の実用的手法の例題 —Z 接続法ゲイン最適化と最適レギュレータとの結果比較

2017(H29). 10. 15

KMAP(ケーマップ)研究会 片柳亮二

多目的飛行制御設計の方法としては、 H_∞ 制御、LMIによる制御など各種方法が研究されているが、ここで提案する“Z 接続法ゲイン最適化多目的飛行制御設計”による方法は、多くの問題に柔軟に対応でき、簡単で実用的な方法である。Z 接続法ゲイン最適化の方法は、制御系を構成する各ブロック要素の入出力情報をZ変数でつなぐことで制御系を構成して、そのフィードバックゲインを100万の組み合わせの中から最適値を探索する方法である。これは、CFDが繰り返し演算によりナビエ・ストークスの方程式を満足するように解を求めていくのに似ており、繰り返し計算により多目的飛行制御系の極・零点配置を満足するように解を求めていく方法である。この方法では、ゲインだけでなくフィルタの時定数など複雑な制御系も容易に解析することができる。ここでは、ロール角制御の設計を最適レギュレータによる状態フィードバック制御系を設計した後、同じ状態フィードバック制御系をZ接続法ゲイン最適化多目的飛行制御法によって設計し、両者の結果を比較する。

1. 最適レギュレータによるロール角制御

1.1 アクチュエータを省略した場合

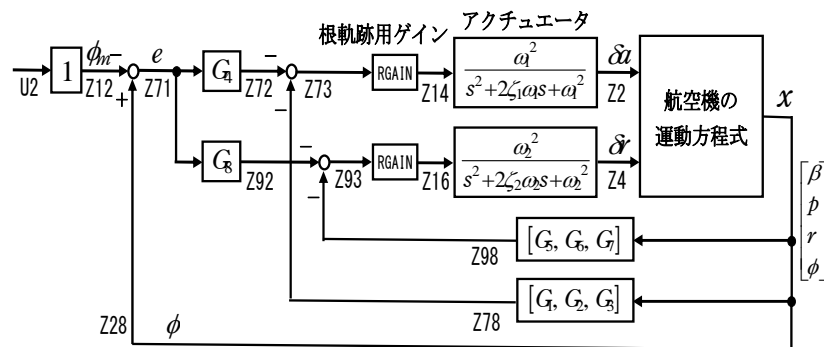


図 1.1 ロール角制御系のブロック図

図 1.1 に示したロール角制御系において、アクチュエータを省略して、最適レギュレータによりフィードバックゲインを求める。

求まったフィードバックゲインを用いたロール角制御系の性能は次のようになる。

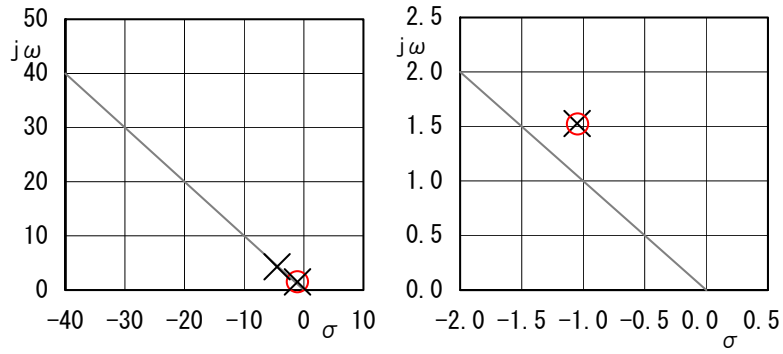


図 1.2 $\phi / U2$ の極・零点 (アクチュエータなし)

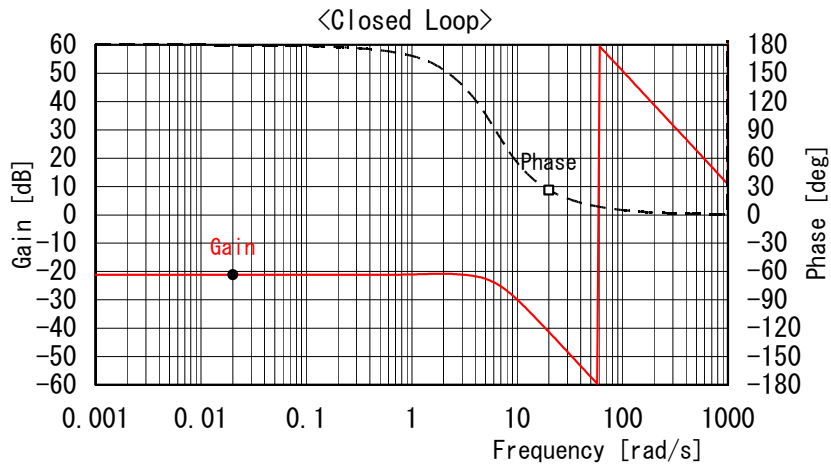


図 1.3 ϕ / vg の外乱応答 (アクチュエータなし)

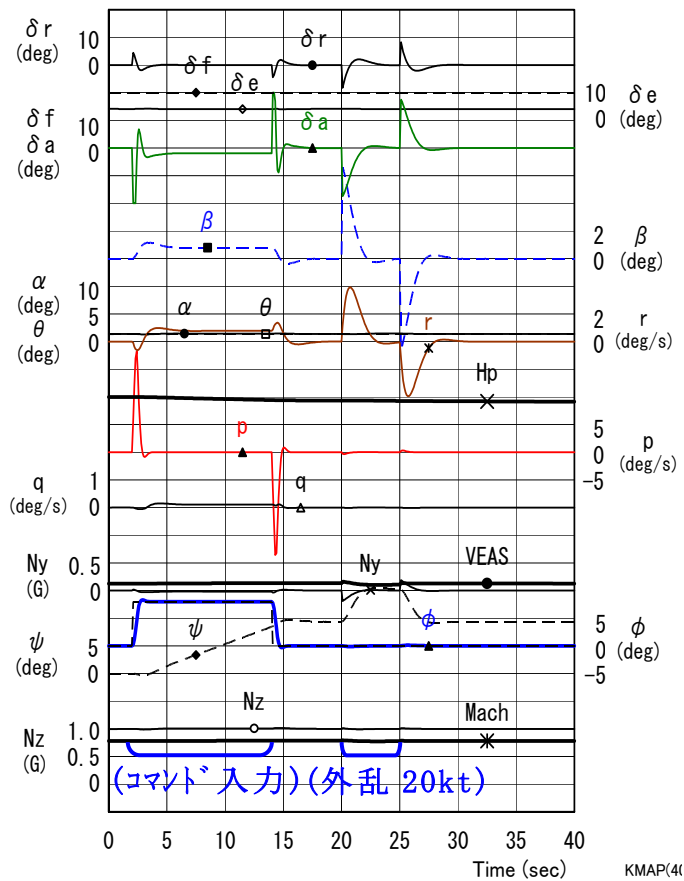


図 1.4 シミュレーション (アクチュエータなし)

1.2 アクチュエータと時間遅れを考慮した場合

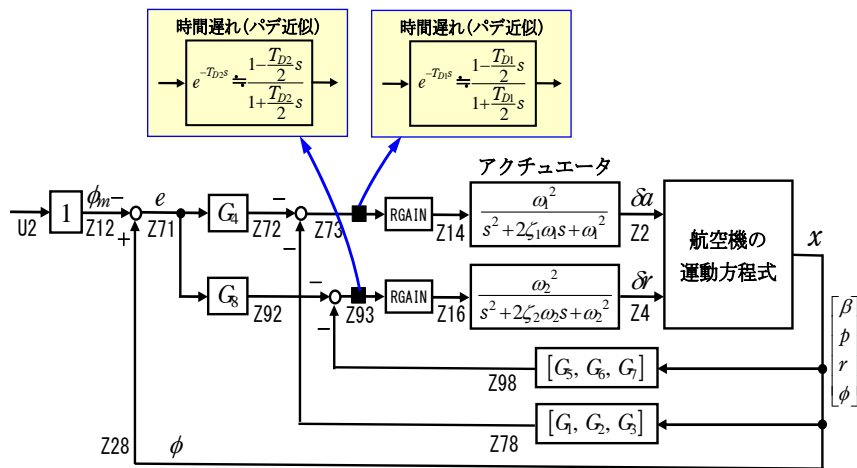


図 1.5 時間遅れを追加したロール角制御系

図 1.5 に示すように，アクチュエータを考慮し，さらにエルロンおよびラダーに 100ms の時間遅れを追加した場合のロール角制御系の性能は次のようになる．

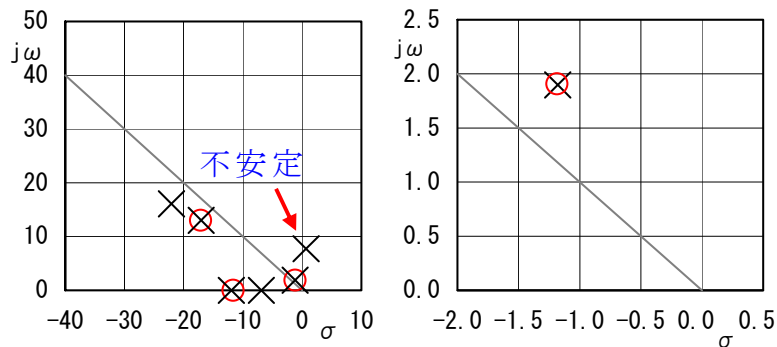


図 1.6 $\phi/U2$ の極・零点

(アクチュエータ有り，エルロンとラダーに 100ms の時間遅れ)

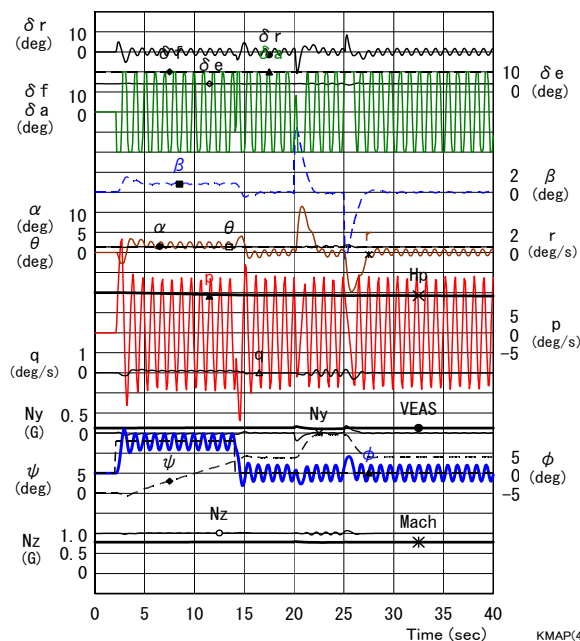


図 1.7 シミュレーション

2. Z 接続法ゲイン最適化多目的飛行制御設計

設計目的は次とする。

設計目的①：アクチュエータを考慮する

設計目的②：エルロンおよびラダーに 100ms の時間遅れを考慮する

設計目的③：振動極を極力左 45° のライン上に配置して安定化する

設計目的④：外乱からバンク角応答の H_{∞} ノルムを -10dB 以下にする

Z 接続法ゲイン最適化により，設計目的①～④を満足するフィードバックゲインを求める。得られた制御系の性能次のようである。

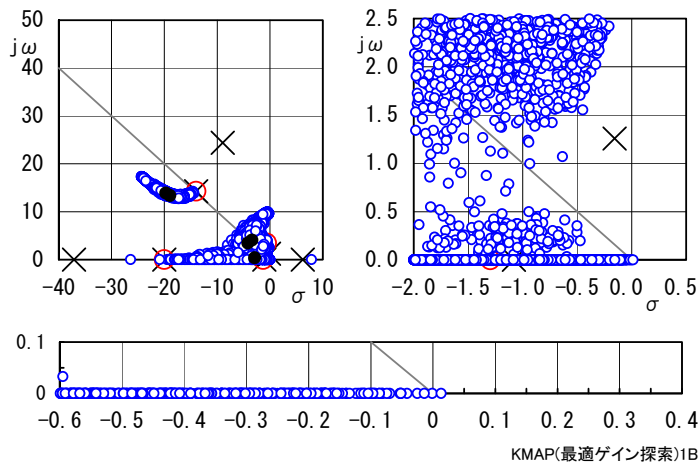


図 2.1 最適ゲイン探索結果

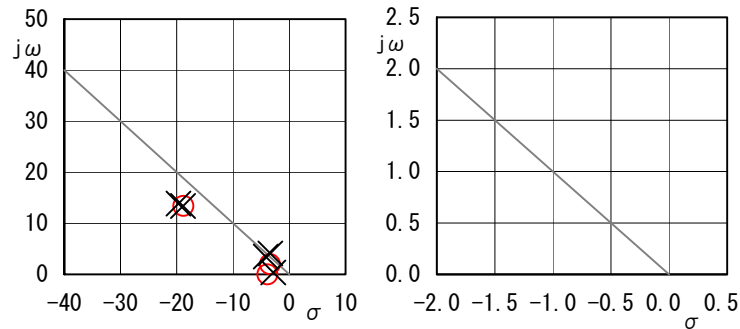


図 2.2 $\phi/U2$ の極・零点

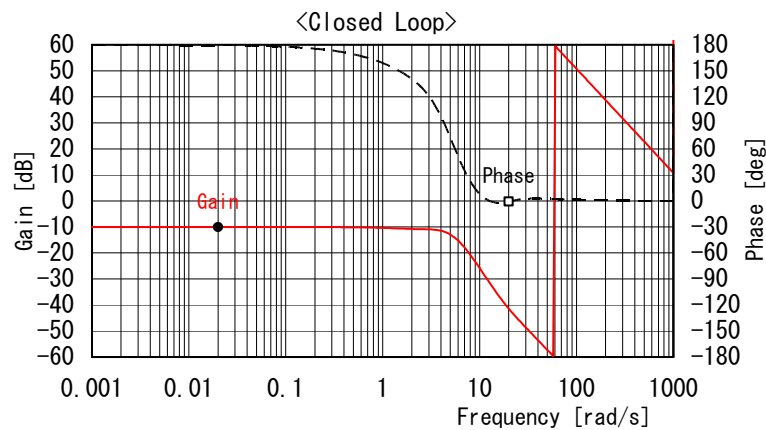


図 2.3 ϕ/vg の外乱応答

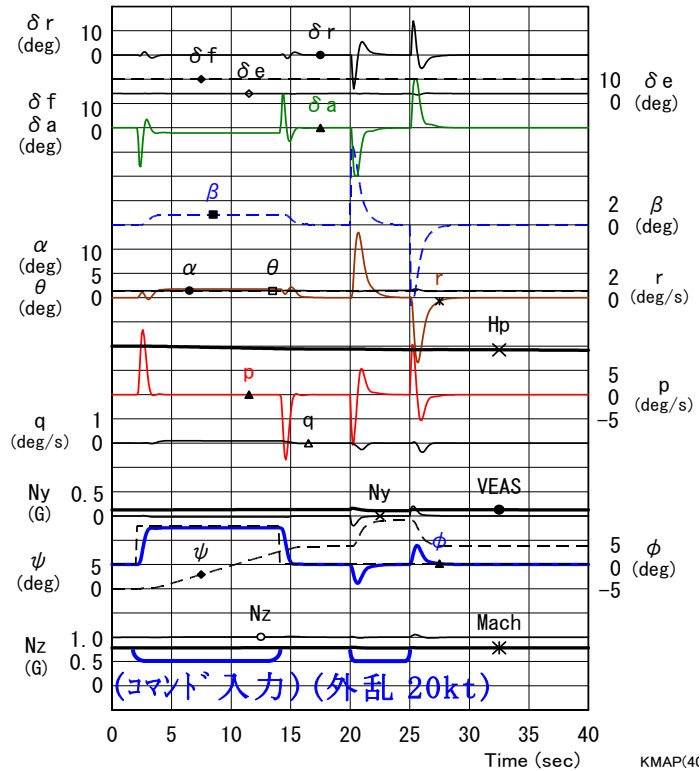


図 2.4 シミュレーション

3. Z 接続法と最適レギュレータとの結果比較

表 5.1 Z 接続法と最適レギュレータとの結果比較

		極減衰比 最小値	エルロン系 安定余裕	ラダー系 安定余裕	外乱 ϕ/vg
最適 レギュ レータ	・アクチュエータなし ・時間遅れなし	$\zeta=0.566$	ゲイン: ∞ 位相: 69°	ゲイン: ∞ 位相: 77°	-21dB
	・アクチュエータ有り ・時間遅れなし	$\zeta=0.487$	ゲイン:9dB 位相: 34°	ゲイン:24dB 位相: 67°	-20dB
	・アクチュエータ有り ・時間遅れ有り	不安定			
Z 接続 法	(*1)外乱低下 要求を追加 (-10dB)	$\zeta=0.702$	ゲイン:12dB 位相: 90°	ゲイン:10dB 位相: 58°	-2dB
		$\zeta=0.638$	ゲイン:8dB 位相: 44°	ゲイン:11dB 位相: 48°	(*1) -10dB

近年の航空機の操縦装置はフライ・バイ・ワイヤ飛行制御系であり、舵角作動範囲全てを制御系が動かすことから、飛行特性の高性能化とともに、制御系の安全性を十分に考慮した設計が重要である。特に設計時に想定しなかった時間遅れなどの影響によって、制御系の安定が急激に損なわれないように余裕のある制御性能を持つことが必要がある。

ここでは、状態フィードバックにより良好な安定性と操縦性を有する制御系

を設計できる最適レギュレータを用いて、ロール角制御系を設計し、ここで提案する Z 接続法ゲイン最適化多目的飛行制御設計による結果と比較した。航空機のダイナミクスのみを考慮した最適レギュレータの結果は当然ながら良好な特性となるが、この制御系にアクチュエータを考慮し、さらに入力端に時間遅れを追加すると制御性能は崩れて不安定となった。

一方、Z 接続法ゲイン最適化多目的飛行制御設計においては、アクチュエータと時間遅れを考慮した状態で、良好な制御系を得ることができる。この方法は、難しい理論は必要なく、設計目的を満足するフィードバックゲインを直接的に求めていく方法であるため、実用的な方法と考えられる。

参考文献

- 1) 片柳亮二：例題で学ぶ航空制御工学，技報堂出版，2014.
- 2) 片柳亮二：Z 接続法ゲイン最適化による飛行制御系設計，日本航空宇宙学会，第 51 回飛行機シンポジウム，2013 年 11 月.
- 3) 片柳亮二：Z 接続法ゲイン最適化による内部モデル制御を用いたピッチ角制御系，日本航空宇宙学会，第 51 回飛行機シンポジウム，2013 年 11 月.
- 4) ホームページ <http://r-katayanagi.air-nifty.com/>

以上