手動操縦特性改善法の一考察

○水倉幸夫, 江間徹郎, 畑中浩之 (防衛大学校 航空宇宙工学教室)

On a Method to Improve Manual Control Characteristics

Yukio Mizukura, Tetuo Ema and Hiroyuki Hatanaka (National Defense Academy, Dept. Aerospace Eng.)

1. はじめに

近年の航空機にはパイロットのワークロードを軽減させるため、安定増強装置を搭載している。しかしながら、複雑な制御システムの採用により、系の伝達関数が高次化して、等価むだ時間を生じさせる結果となり、航空機の操縦性とパイロットのワークロードに大きな影響をもたらす。本研究では人間の補償特性に基づく補償器を設計し、その補償を代行させることにより、操縦性を向上し、ワークロードを軽減する方法を操縦実験により考察する。

2. 操縦実験と補償器の効果

2. 1 実験方法

図1のブロック図に示す固定ベースのシミュレータで、制御対象として航空機のロール運動の操縦実験を行う。指令信号 ϕ_c はランダム信号を用い、被験者は前方約1mに位置するCRT上に表示されるバンク角エラーを零にする補償動作で、サイドスティックを左右に動かした。航空機のロール運動には、

$$Y_c(s) = \frac{K}{s(T_R s + 1)} e^{-\sigma} \quad (1)$$

を用いた。ここで、機体パラメータ K, T_R, τ には表1に示す値を組み合わせ、計9つの条件で実験を行った。被験者は2名で、1条件1回60秒の試行を各10回行った。また、人間の伝達関数には、次式を仮定し、シミュレーションに用いた。

$$Y_p(s) = K_p \frac{(T_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)} e^{-\tau s} \quad (2)$$

ここで K_p はパイロットゲイン、 T_1, T_2 はそれ

ぞれ位相進み・遅れの補償時定数であり、人間固有のむだ時間は $\tau_p = 0.2s$ とした。

2. 2 操縦実験の評価

操縦エラー e の評価関数は次式とし、操縦の難易性及び正確さを評価する。

$$J = \frac{1}{n} \sum \frac{\int e^2 dt}{\int \phi_c^2 dt} \quad (n: \text{試行回数}) \quad (3)$$

また、系の良否は閉ループ系共振ピーク値 P で評価した。これが3dBを越えると、PIO傾向が現れ、安定性が低下するとされている。

$$P = |\phi/\phi_c|_{\max} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

パイロットのワークロードは、位相補償角

$$\angle PC = \angle |(T_1 j\omega + 1)/(T_2 j\omega + 1)|_{\omega=\omega_{BW}} \quad (5)$$

で評価した。ここで ω_{BW} は閉ループの位相が -90° の周波数をいう。

2. 3 補償器を用いた実験

人間の補償を代行させる補償器は人間の伝達関数と同じ形式とした。

$$F(s) = K_F \frac{(T_{F1} s + 1)}{(T_{F2} s + 1)} \quad (6)$$

$\tau = 0.2s$ に対する、補償器を用いない実験で得た K_p の平均値を用いて、シミュレーションを行い、 J と P の結果をそれぞれ図2,3に示す。図2から J は、 $T_{F1}/T_{F2}=11$ で平均値は最小となるが、図3で11とすると条件によっては、 P が3dBを大きく超える場合がある。従って J, P の両方の基準を満足させるためには $T_{F1}/T_{F2}=7$ が適切と考える。

補償器のゲインは T_{F1}, T_{F2} と K_p, T_1, T_2 の平均値を用いたシミュレーションから $K_F=0.3$ が

J を最小とした。従って、

$$F(s) = 0.3 \frac{0.7s+1}{0.1s+1} \quad (7)$$

この補償器を人間と航空機の間に入挿して、操縦実験を行った。

2. 4 補償器の効果

補償器の効果をそれぞれ図 4,5 に示す。補償器を用いることにより $J, P, \angle PC$ が小さくなり、操縦性が改善されているのが分かる。

3. まとめ

航空機の横の手動操縦において、飛行条件によっては、操縦が難しく、ワークロードも大きい。人間の補償特性を代行するような補償器を挿入することにより、操縦性が改善されることを示した。

参考文献

1) P. Wei: AIAA 85-1902, pp357-364, 1985 他

図 1 操縦実験のブロック図

図 2 J と T_{F1}/T_{F2} の関係

図 3 P と T_{F1}/T_{F2} の関係

図 4 補償器による J への効果

図 5 補償器による P & $\angle PC$ への効果