11811 航空機の縦の運動を加工した外部視界映像の飛行性への影響

Influence on Flying Qualities of Longitudinal Movement Modified in Outside View of Airplane

○石上 大貴 (東海大学) 田中 将典 (マツダ株式会社)
正 小林 修 (東海大学)

Daiki ISHIGAMI, Tokai University, Kitakaname-1117, Hiratsuka, Kanagawa
Masanori TANAKA, Mazda Motor Corporation
Osamu KOBAYASHI, Tokai University

Pilot controls an airplane as watching outside view through its cockpit window. Although, for example, in a ground cockpit for an unmanned air vehicle and a windowless cockpit which is researched by NASA in USA, pilot controls the airplane, watching the displays. This study investigates using a fixed flight simulator how the virtual cues, which are obtained by modifying the real movement of outside view, have influences on pilot's handling qualities and task performance. This experimental result shows that task performance doesn't change so much but handling qualities are improved by the pertinent modification of virtual cues.

Key Words: Airplane, Flying Qualities, Human Pilot, Visual Cue

1. はじめに

航空機を操縦する際、人間パイロットはコックピットの窓から見える景色や計器類を見て得る視覚情報 (ビジュアルキュー)、加速度などから体に感じる体感情報 (モーションキュー) に基づいて操縦している。特に姿勢制御においては視覚情報からの影響が強いと考えられている。

しかしながら無人機を操縦する際に用いられる地上コックピットや機体に搭載されているウィンドレスコックピット¹⁾では、機首に設置したカメラから撮影した外部視界の映像やCG処理した映像をディスプレイに映し出した映像で操縦する。この場合、映像の情報がカメラからディスプレイに流れる過程においてそれらに加工を施すことが可能となる。

これらディスプレイに映し出される外部視界映像の動きを変えてパイロットに与えることにより操縦がしやすくなるか、また実際の空間において航空機のタスク性能にどのような影響を及ぼすかを調べるのが本研究の目的である。

航空機の縦運動では短周期モードと長周期モードが発生する。これらのモードはともにエレベータ操舵に伴って起きる振動モードである。短周期モードは、周期が数秒程度と短く、減衰が大きい強いピッチレートが生じ飛行性に強い影響を与える。長周期モードは、減衰率が小さく周期が長い収束しにくい振動モードである。ともにその如何によっては操縦性の悪化をもたらすことが知られている。

今回はこれら2つの振動を一方ずつ消去した映像をパイロットに見せることにより、飛行性にどのような影響を与えるかを検討を行ったので報告する。外部視界映像の加工の効果を調べるために、実験は東海大学所有の大型三面スクリーンを備えた固定座席型フライトシミュレータを使用しパイロットにはピッチ角補償操舵を行ってもらった。

2. 航空機モデル

本研究では航空機モデルとして縦方向3自由度運動モデルを利用した。安定軸を採用し、初期トリム状態を水平飛行とした。また今回スロットルは使用しない。

エレベータ操舵によって進行方向の速度変化 u 、上下方向の速度変化 w およびピッチレート q が発生する。このとき航空機の運動方程式は次式で表わされる。

$$\dot{u} = X_u u + X_\alpha \alpha + X_{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + X_q q - g\theta + X_{\delta e} \delta e \quad (1)$$

$$U_0 \dot{\alpha} = Z_u u + Z_\alpha \alpha + Z_{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} - (Z_q - U_0) q + Z_{\delta e} \delta e \quad (2)$$

$$\dot{q} = M_u u + M_\alpha \alpha + M_{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + M_q q + M_{\delta e} \delta e \quad (3)$$

ただし $\alpha = w/U_0$, $\dot{\alpha} = \dot{w}/U_0$, $\theta = q$

ここで g は重力加速度、 U_0 は飛行速度 U の初期値であり、 X_u, Z_u, M_u 等はそれぞれの添え字の変数による速度、迎え角、ピッチングモーメント等に関する有次元空力微係数である。

3. 外部視界映像の加工方法

3-1. 外部視界の見え方

コックピットの窓から見る外部視界は地球に固定した地面固定座標系と、機体に固定した機体座標系のなす角であるオイラー角 (Φ, Θ, Ψ) および航空機の位置 (X, Y, Z) によって決まる。今回の実験では航空機の飛行高度が高く、実験時間による高度変化が少ないので航空機の位置移動による見え方の違いは無視できる。よって外部視界の動きはオイラー角のみによって決定される。機体の角速度とオイラー角の関係は次のように表わされる。

$$\dot{\Phi} = p + q \sin\Phi \tan\Theta + r \cos\Phi \tan\Theta \quad (4-a)$$

$$\dot{\Theta} = q \cos\Phi - r \sin\Phi \quad (4-b)$$

$$\dot{\Psi} = q \sin\Phi / \cos\Theta + r \cos\Phi / \cos\Theta \quad (4-c)$$

ただし本研究においては縦運動のみ考慮し、横方向は考慮しない。よって Φ, Ψ はゼロとなり縦方向のオイラー角は (4-b) 式を積分したのになり次式で表わされる。

$$\Theta = \int q \quad (5)$$

3-2. ピッチ軸回りの回転運動に対する加工

振動を打ち消す加工として2次進み加工を説明する。2次進み加工は実際の航空機のピッチ姿勢角 Θ に ($aq + b\dot{q}$) を付け加える。 a, b は定数である。このときパイロットが画面上で見る航空機のピッチ姿勢角を Θ^{v1} とおくと

$$\Theta^{v1}(t) = \Theta(t) + (aq(t) + b\dot{q}(t)) \quad (6)$$

上式の (t) は時間領域の変数であることを示している。この式をラプラス変換する。(5) 式より

$$\Theta^{v1}(s) = \Theta(s) + as\Theta(s) + bs^2\Theta(s) = (1 + as + bs^2)\Theta(s) \quad (7)$$

上式の (s) は s 領域の変数であることを示している。これにより Θ に $(1 + as + bs^2)$ という2次の進み加工を施したことになる。

ここでエレベータ舵角入力 δe に対する画面上のピッチ姿勢角 Θ^{v1} の伝達関数を示す。

$$\frac{\Theta^{v1}(s)}{\delta e(s)} = \frac{b(A s^2 + B s + C) \{1/b + a/b s + s^2\}}{U_0(s^2 + 2\zeta_{sp}\omega_{nsp}s + \omega_{nsp}^2)_{sp} (s^2 + 2\zeta_{lp}\omega_{nlp}s + \omega_{nlp}^2)_{lp}} \quad (8)$$

ここで A, B, C は航空機の特性によって決まる定数である。また添え字 sp は短周期モード、添え字 lp は長周期モードを表す。 ζ, ω_n は各添え字に対応する減衰率と固有振動数である。

このとき分子の定数 a, b の値を適切な値に設定することにより分母の短周期モードと長周期モードをそれぞれ消すことが可能となる。(8)式より短周期モードを消去した場合、

$$\frac{\Theta^{V1}(s)}{\delta_e(s)} = \frac{b(A s^2 + B s + C)}{U_0(s^2 + 2\zeta_{ip}\omega_{nip}s + \omega_{nip}^2)}_{ip} \quad (9-a)$$

同様に長周期モードを消去した場合、

$$\frac{\Theta^{V1}(s)}{\delta_e(s)} = \frac{b(A s^2 + B s + C)}{U_0(s^2 + 2\zeta_{sp}\omega_{nsp}s + \omega_{nsp}^2)}_{sp} \quad (9-b)$$

と表すことができる。

しかしこの加工だけではエレベータ操舵に対して急激なピッチ角が発生する。これはパイロットが見ている画面上で外部視界が大きく動いてしまい違和感のあるものになる。画面の違和感を防ぐためさらに1次遅れ加工を付け加えた。1次遅れを挿入したあとのピッチ姿勢角を Θ^{V2} とおいて

$$\Theta^{V2}(s) = \left(\frac{1}{cs + 1} \right) \Theta^{V1}(s) \quad (10)$$

と表わされる。式中の c (sec) は1次遅れの時定数であり、任意値である。この加工により急激なピッチ角の発生を抑えることができる。この Θ^{V2} をパイロットに見せ、実験を行った時の飛行性への影響を調べた。

4. 実験概要

固定座席型フライトシミュレータにおいてパイロットが見る画面上にピッチ角コマンドとピッチ角 Θ^{V2} との誤差を表す赤いバーと機体の中心線を表す黄緑のバーを表示する。コマンドバーが動いたときにパイロットはそのコマンドバーの誤差を0にするように補償操舵を行う。

実験ケースは加工をしない機体と、短周期モードを消す加工については2次進み加工のみ場合と1次遅れの時定数 c を0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0(sec)まで変化させていった場合、長周期モードを消す加工については2次進み加工のみと1次遅れの時定数 c を1, 10, 20, 30 (sec)まで変化させていった場合の計11ケースを行った。操縦のしやすさについての評価方法はCooper-Harperのレーティング・スケールを用いた。

5. 実験結果

5-1. 短周期モードを消す加工

5-1-1. 時歴データ

例として加工していない機体、2次進み加工後に1次遅れ加工($c = 0.75$ (sec))をした機体の時歴データを Fig.1 に示す。20(sec)から30(sec)の間についてエレベータ操舵 δ_e に注目すると画面を加工した機体では加工していないほうに比べパイロットの繰り返し操舵が少ない。画面上で振動が起らないため振動に対する操舵をする必要がないと考えられる。

5-1-2. 評価および誤差

Fig.2 に操舵量 δ_e とコマンドと実際の航空機の姿勢角 Θ との誤差量 Θ_e (タスク性能) の2乗平均平方根(RMS)およびパイロットレーティングを示す。Basic は加工を何もしていない機体、 $c=0$ (sec)は2次進み加工のみ、他の c 値は1次遅れ加工を施した時定数の機体を表している。2次進み加工のみの場合画面上で急激なピッチ角が発生したためパイロットレーティングは悪化したが、他の場合では加工していない航空機に比べパイロットレーティングの向上が見られた。これはみている画面上で振動モードがなくなりパイロットが操縦しやすくなったことが理由と考えられる。

5-2. 長周期モードを消す加工

Fig.3 に長周期モードを消すために2次進み加工をした機

体、2次進み加工後に1次遅れ加工($c=20$ (sec))をした機体の時歴データを示す。上図でエレベータ操舵をするとパイロットが見ている画面上では急激なピッチ角が発生している。これは(9-b)式において長周期モードの振動を消すために必要な定数 b の値が大きすぎるためである。これではパイロットが操縦できないため1次遅れ加工において大きな時定数を用いた。下図より1次遅れ加工をすることでパイロットが見ている画面上では操縦可能となったが実際の航空機の姿勢角はコマンドに追従しなくなってしまった。このことにより長周期モードを打ち消す加工については飛行性を改善できないという結果となった。

6. まとめ及び今後の展望

本研究では外部視界の動きの加工が飛行性にどのような影響を与えるかを検討した。航空機の縦方向の運動の際エレベータ操舵によって発生する振動を消す加工において短周期モードを消す場合には、時定数の取り方によってパイロットの操縦のしやすさに関して向上が見られた。また長周期モードを消す加工の場合にはタスク性能が悪化するため飛行性改善に有効でないという結果が得られた。

今後は振動を消す以外の画面の加工方法や、可動式フライトシミュレータを用いて画面加工時の視覚情報と体感情報の違いが飛行性に与える影響について検討する予定である。

Fig.1 Time History of Flight

Fig.2 Quantity of elevator control, Θ error and Pilot Rating

Fig.3 Time History of Flight

参考文献

- 1) NASA Langley Search Center: NASA News "WINDOWLESS COCKPIT FLIGHT CONCEPT TESTED", (Feb.1996)
http://oea.larc.nasa.gov/news_rels/1996/Feb96/96_12.html
- 2) 加藤寛一郎、大屋昭男、柄沢研治「航空機力学入門」東京大学出版、pp.111-122(2004)