

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

フライト・シミュレータにおけるモーション・キューの 客観的評価手法についての研究 その2

萩原 敏正, 船引 浩平, 若色 薫

2011年6月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

略語.....	2
1. はじめに.....	2
2. 実験の目的.....	3
3. 実験方法.....	3
4. 実験結果.....	4
5. 考察.....	6
6. おわりに.....	7
参考文献.....	7

フライト・シミュレータにおけるモーション・キューの 客観的評価手法についての研究 その2*

萩原 敏正^{*1}, 船引 浩平^{*1}, 若色 薫^{*1}

Objective evaluation method for motion cueing fidelity Part 2*

Toshimasa HAGIWARA^{*1}, Kohei FUNABIKI^{*1} and Kaoru WAKAIRO^{*1}

ABSTRACT

The relationship between motion system setup improvement and the phase margin fluctuation was confirmed through the previous study. The phase margin of the flight simulator during a high gain tracking task was measured while varying the gain and filtering parameters of the motion cueing algorithm. In addition, pilot comment at the same motion system setup as the phase margin measurement was verified with the tendency of the phase margin fluctuation. As a result, it supported the adequacy of the method to use the phase margin for evaluating motion cueing fidelity objectively.

In this study, the phase margin of actual aircraft was measured at the same task with the flight simulator, and finally it was compared with the phase margin of the flight simulator. Through a series of these investigations, the handling quality of JAXA flight simulator was evaluated objectively, and adequate motion system setup was revealed.

Keywords : Flight Simulator, Motion System, Setup, Evaluation, Handling Quality, Phase Margin

概要

本研究では、実機とシミュレータで同じ操縦タスクを行うことにより、実機とシミュレータでのモーション・キューの影響を比較した。その前段階として、Pilot-in-the-loop における位相余有に着目し、モーション・システムの設定の向上がパイロット・モデルの位相進みなどの予測要素に影響し、閉ループの位相余有を増加させることを検証した。モーション・システムの設定を変更しつつ位相余有を測定し、また、同様の設定において離着陸タスクを実施してパイロット・コメントを収集した結果、位相余有の増減とパイロット・コメントの良否がほぼ一致する傾向が確認された。このことより、位相余有がモーション・システムの可否を反映する客観的な指標となるという仮定の裏付けを得た。次いで実験用航空機を使用してシミュレータの位相余有測定と同様のタスクを実施して実機の位相余有を測定し、シミュレータがどの程度実機に近い操縦性を有しているかを確認し、また、モーション・システムの設定の最適値を求めた。

* 平成 23 年 1 月 19 日 受付 (Received 19 January, 2011)

*1 研究開発本部 飛行技術研究センター 飛行シミュレーションセクション
(Flight Simulation Section, Flight Research Center, Aerospace Research and Development Directorate)

略語

JAXA Japan Aerospace Exploration Agency

PFD Primary Flight Display

1. はじめに

フライト・シミュレータにおいてパイロットに動揺感覚を与えるモーション・システムの役割は重要である。パイロットが実機と同等のモーション・キューをモーション・システムから与えられることが望ましいが、これまでモーション・システムに要求される性能について基準は示されていなかった。そこで宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、保有するフライト・シミュレータとイン・フライト・シミュレータを用いて、同等の機体性能を持つシミュレータと実機の操縦性能を比較することで、モーション・システムの性能要求を調べた。

文献 1 と本書における一連の研究では次の二つの仮定に基づいてモーション・システムを客観的に評価する手法の検証とその手法によるモーション・システムの設定の最適値の妥当性を調べた。

第一に、図 1 に示すパイロットを含む閉ループにおいて、位相余有が操縦性と関連していることが知られている²⁾ので、特定のタスクのもとでの実機とシミュレータの総合的な操縦性を比較する際に、位相余有が客観的な指標となると仮定した。すなわち、動揺感覚伝達系の閉ループにおいて、モーション・システムが生成するモーション・キューがパイロット・

モデルの位相進みなどの予測要素に影響して、モーション・システムの設定変更により操縦性が改善すると Pilot-in-the-loop の位相余有が増加するという仮定である。

第二に、図 1 に示されるシミュレータの Pilot-in-the-loop と図 2 に示される実機の閉ループの比較において、シミュレータのフライト・ダイナミクスやビジュアル、その他音響などのキューが実機と同等であるとの仮定のもとで、シミュレータにおいて実機と同等の位相余有が達成できれば、シミュレータを操縦するパイロットには実機と比較して必要十分なモーション・キューが呈示されたと仮定した。

なお、文献 1 では、図 3 に示すモーション駆動アルゴリズムのゲイン(計算上の加速度・角速度の値と実際にシミュレータでパイロットに体感させる値の比率)とフィルタの折角周波数を変化させて位相余有を測定した。シミュレータのモーション・システムの設定を変更しつつ位相余有を測定し、また、同じ設定における離着陸タスクによるパイロット・コメントを収集して位相余有の増減とパイロット・コメントの良否がほぼ一致する傾向が確認された。このことより、位相余有がモーション・システムの可否を反映する客観的な指標であるという第一の仮定は妥当であることがわかった。

本研究では、第一および第二の仮定に基づいた位相余有を用いた評価手法により実機とシミュレータを比較し、また、モーション・システムの設定の最適値を求める。

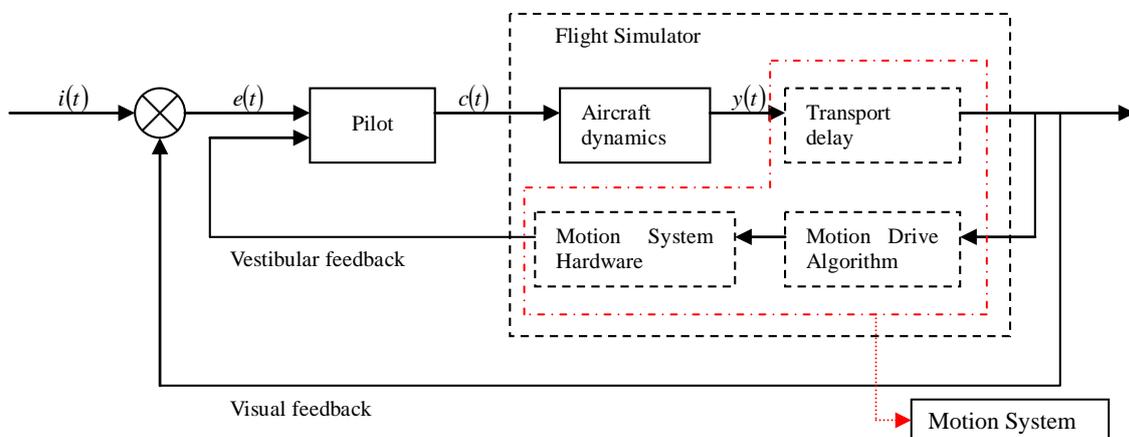


図 1 シミュレータの Pilot-in-the-loop における情報伝達

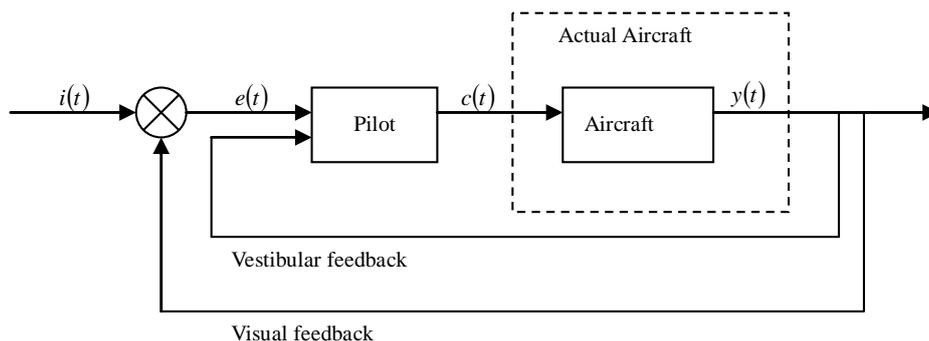


図 2 実機の Pilot-in-the-loop における情報伝達

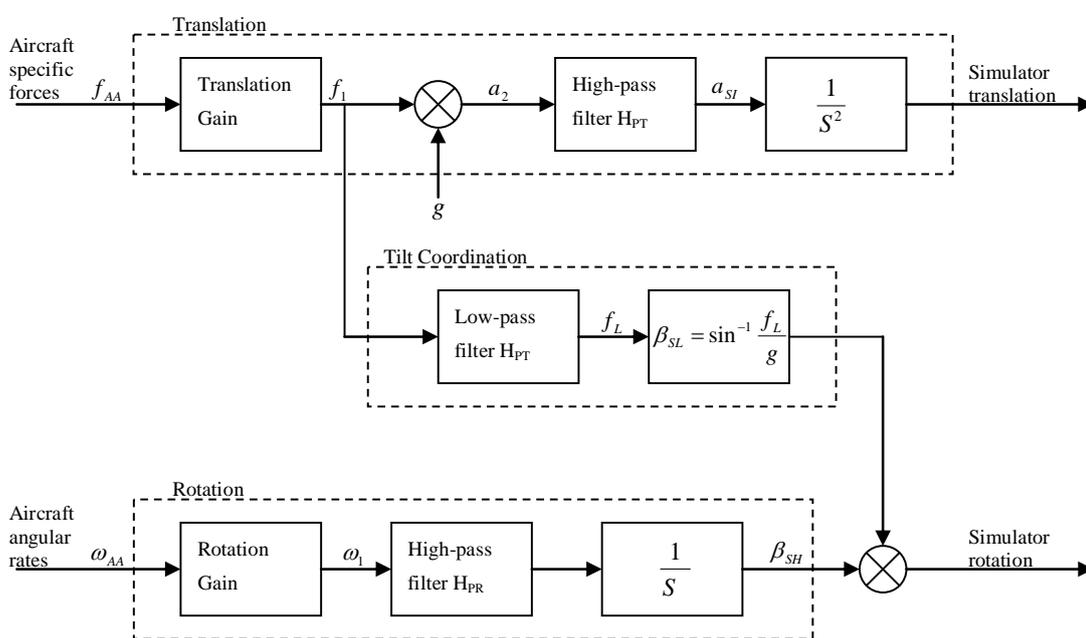


図 3 Motion Drive Algorithm のブロック線図

2. 実験の目的

本実験では、前述した通り、文献 1 の実験により求めたモーション・システムの設定毎の位相余有と本研究により求める実機の位相余有を比較することにより、シミュレータがどの程度実機に近い操縦性を有しているかを調べ、同時にモーション・システムの設定の最適値を求めることを目的とした。そのため、シミュレータと同様のタスクにて実機の位相余有を測定する実験を実施した。

3. 実験方法

JAXA 保有の実験用航空機 MuPAL- α を使用して文献 1 におけるフライト・シミュレータの位相余有測定と同様の正弦波を追従する

実験を実施して実機の位相余有を測定した。

MuPAL- α の右席は本来の操縦系統とは別系統のフライ・バイ・ワイヤによる操縦系となっており、操縦性および応答をプログラムによって変更することができるイン・フライト・シミュレーション機能を有している。また、右席に設置された実験用ディスプレイにはシミュレータと同じ PFD(Primary Flight Display)を表示することができる(図 4)。そこで本実験ではシミュレータでの実験同様、PFD に表示されるピッチ・コマンドに対してコラムを使って追従し、その結果より位相余有を測定する。また、ロール・コマンド追従タスクでは同様に PFD に表示されるロール・コマンドに対してホイールを使って追従し、位相余有を測定する。

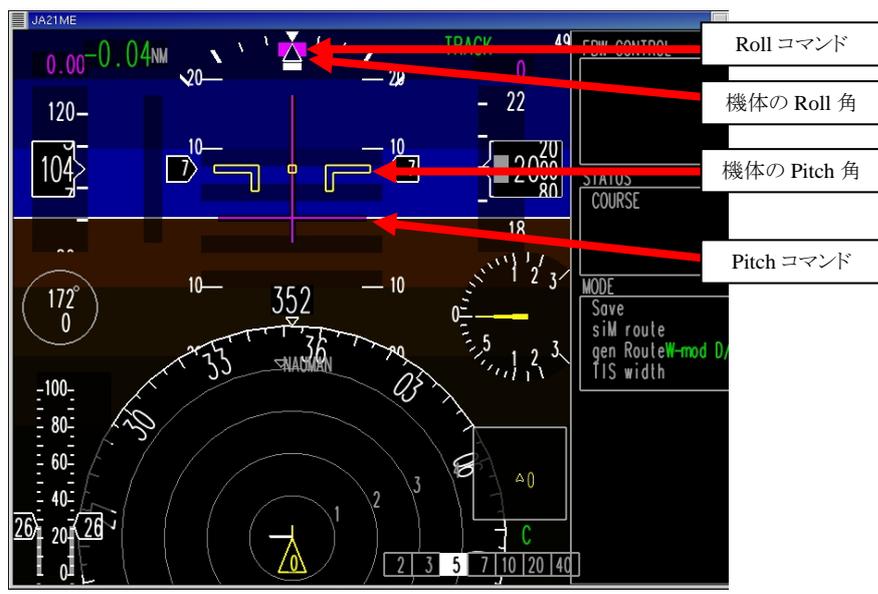


図 4 Primary Flight Display のコマンド表示

追従する正弦波周波数は表 1 とした. シミュレータでの実験とほぼ同じ印加周波数としたが, 安全性と実験の所要時間を考慮してシミュレータでは計測した 1.5 及び 2.0Hz の追従コマンドを省略した.

表 1 印加周波数

正弦波周波数 [Hz]	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0
-------------	------------------------------------

また, 正弦波の振幅もシミュレータと同じピッチ 2°, ロール 5° とした. これは MuPAL- α のフライ・バイ・ワイヤ・システムにより制御されるエレベータ蛇角が飽和しないように調整した結果である.

飛行モデルによる違いを検証するために, MuPAL- α のイン・フライト・シミュレーション機能を使用して二種類の異なった操縦性を持つ飛行モデルによる位相余有の計測を行った. すなわち, パイロットの操縦入力と蛇面の動きを母機である Dornier228 の動きと一対一に対応させた 228 モードと B747 の機体特性³⁾を模擬した B747 モードでの飛行を行い, 測定された位相余有をそれぞれ対応した数学モデルで測定したシミュレータの位相余有と比較した.

実機での実験時の飛行形態を表 2 に示す.

表 2 飛行形態

Aircraft	Dornier228	B747
Nominal Speed	120 [kt]	120 [kt]
Altitude	2000 [ft]	2000 [ft]
Flap	1	Up
Gear	Down	Up

シミュレータでの実験と同じ 3 名のパイロットによって実機の位相余有を測定した. 3 名共固定翼機の十分な操縦経験を有し, 飛行時間は 5000 時間を超えている.

4. 実験結果

飛行実験により得られた実機の位相余有を表 3 に示す.

表 3 実機の位相余有

Aircraft	コマンド	パイロット	位相余有 [deg]
Dornier228	Pitch	Pilot A	124.20
		Pilot B	65.40
		Pilot C	75.80
	Roll	Pilot A	130.10
		Pilot B	85.20
		Pilot C	82.20
B747	Pitch	Pilot A	100.80
		Pilot B	94.60
		Pilot C	71.30

上記飛行実験により得られた位相余有の値をシミュレータで得られたモーション・シス

テムの設定毎の位相余有の変化を示した図に重ねてみると図 5~7 のようになる. 見やすくするために, 実機の位相余有をシミュレータ

での試験結果の上にゲイン 0 から 1.2 までの横幅一杯の線として描画した. 線の色はパイロット毎に区別されている.

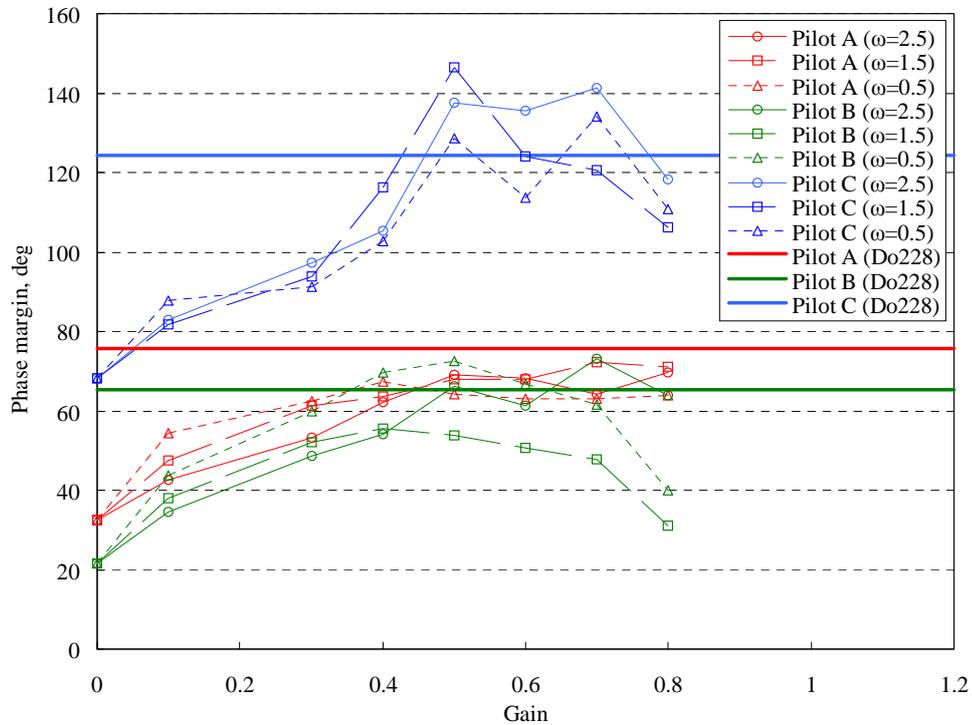


図 5 Dornier228 ピッチ・コマンド追従タスクにおけるシミュレータと実機の位相余有

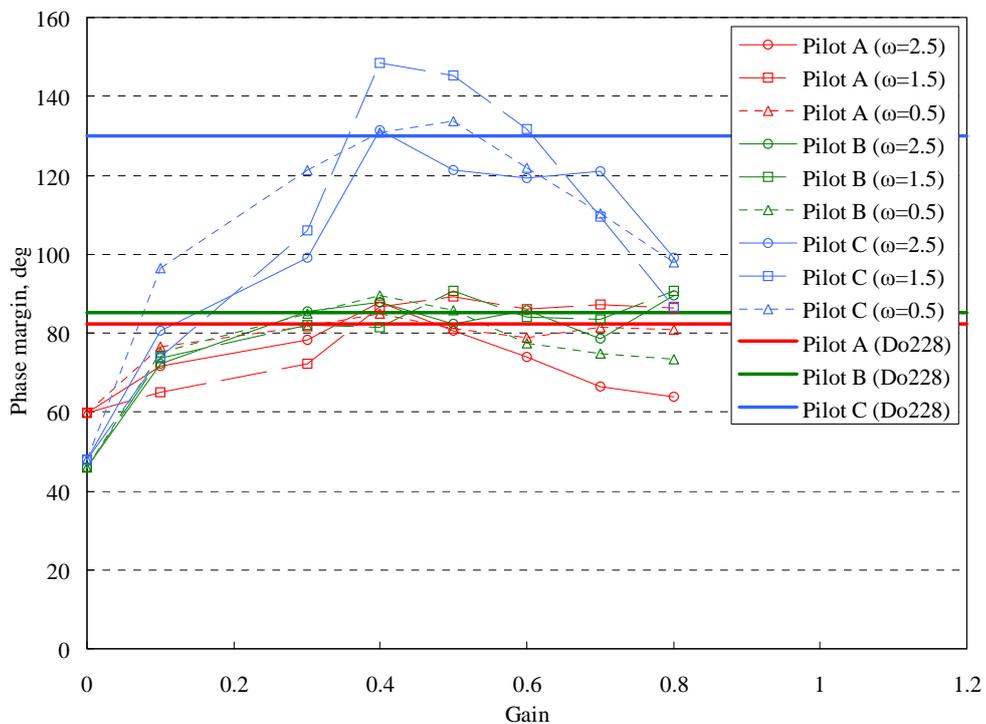


図 6 Dornier228 ロール・コマンド追従タスクにおけるシミュレータと実機の位相余有

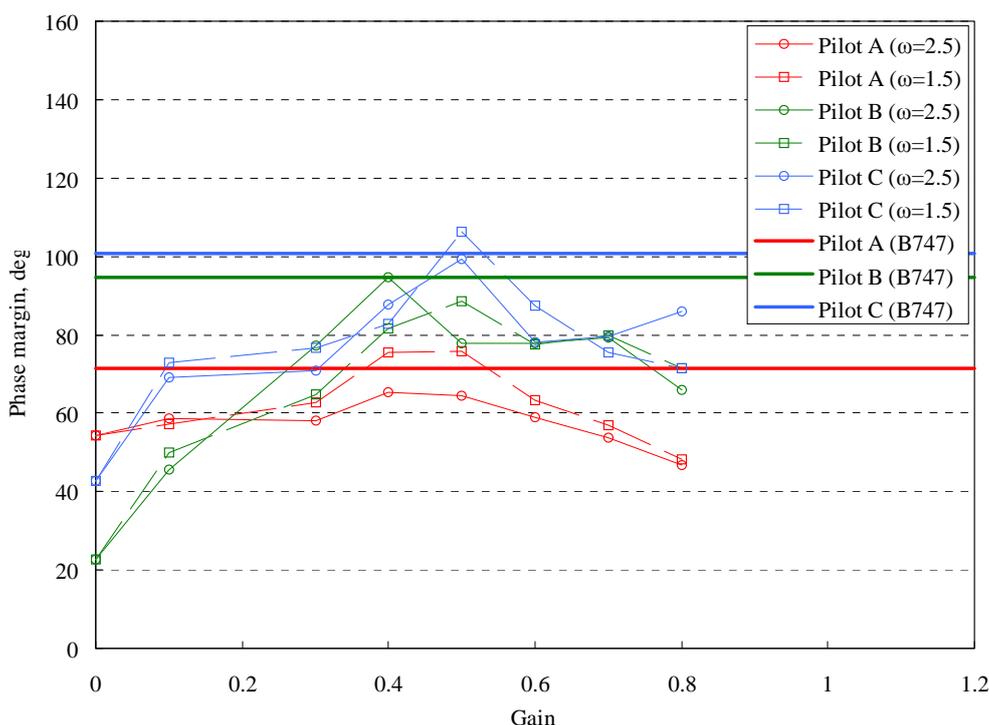


図 7 B747 ピッチ・コマンド追従タスクにおけるシミュレータと実機の位相余有

5. 考察

シミュレータの実験において、位相余有はゲインが 0.4 または 0.5 になるまで増加し、その後減少した。パイロット・コメントでも同様の傾向が見られた。また、飛行実験で計測された位相余有は、シミュレータでの同じコマンド追従タスクにおける位相余有の最大値とほぼ一致した。シミュレータ実験と飛行実験において、機体特性やビジュアル・キューなどが同等であるとの仮定に基づけば、モーション・システムのゲインが約 0.5 で実機と等価なモーション・キューを得られていたことになる。今回、特性の異なる2機種において位相余有がシミュレータと実機でほぼ同じ値になったことから実機と等価な操縦性を達成するためのモーション・システムの設定の変更は必要なく、どちらもゲイン 0.5 を提案できる。

一方、シミュレータの実験において位相余有はゲインが 0.4 または 0.5 で最大となった後低下する結果が多く見られた。パイロット・コメントも同様の傾向を示している。シミュレータにおいて理想ではゲインが 0 から 1.0 までの間で大きくなるに従って位相余有が増加し、

実機の位相余有と一致する付近で、パイロットの補償により位相余有が一定になると予想していたが、シミュレータの位相余有は実機の位相余有とほぼ一致した直後悪化してしまった。今回の実験では、シミュレータと実機の実験でパイロットの補償量あるいはワークロードが等価であることは確認できておらず、したがって、シミュレータの実験ではパイロットの補償の結果として同等の位相余有が得られた可能性があり、実機と同等のモーション・キューを呈示するためには 0.5 よりも大きいゲインが適当である可能性がある。

このことは、シミュレータの時間遅れやアクチュエータの応答性能などの理由で、0.5 以上のゲインでは適切なモーション・キューが呈示できない可能性があることを意味している。文献 1 でも述べたが、JAXA フライト・シミュレータのモーション・システムの周波数応答は、位相余有の交差角周波数付近で -18° の位相差がある。これは 83ms の等価遅れに換算され、システム伝達遅れと合わせて 150ms の遅れとなる。位相余有が低下する原因は、ゲインが 0.5 を超えた時に上述の遅れが影響し

て操縦性を悪化させたためと推測される。

6. おわりに

今回の実験では、飛行シミュレーションと実際の飛行で等価な操縦タスクを実施し、モーション・キューの効果を比較した。その結果、モーション・システムのあるゲインにおいて実機と等価な操縦性を達成できることがわかった。また、操縦性の異なるモデルでイン・フライト・シミュレーションによる比較を行い、実機とシミュレーションの操縦性が等価となるゲインの値が同じであることがわかった。

更にハードウェアを改善しシステム伝達遅れを減らすことと同時にゲインを大きくしてパイロットの補償量を減らせば、現在より更に操縦性を実機に近づけることができる可能性があることが分かった。

文献 1 および今回の実験では、パイロット数が不足しているため、より多くのパイロットによる測定が必要である。

異なる操縦性を持つ2機種で、位相余有が実機と同等になったゲインがどちらも約 0.5 となったことから飛行モデルの違いによるモーション・システムの設定の変更は必要ないと考えられるが、全ての飛行モデルにおいて設定の変更が必要ないと言うには検証した飛行モデル数が不足している。

また、全てのモーション・システムの設定について検証するためには、検証タスクの種類も不足している。特に航空機の操縦性にとって重要な要因となるヒープ方向の検証を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 萩原敏正, 船引浩平, 若色薫, 村岡浩治, 野嶋琢也; フライト・シミュレータにおけるモーション・キューの客観的評価手法についての研究, JAXA-RR-08-009 (2009)
- 2) McRuer, D. T. and Krendel, E. S.; *Mathematical Models of Human Pilot Behavior*, AGARD AG-188 (1974)
- 3) Heffley, R. K. and Jewell, W.F.; *Aircraft Handling Quality Data*, NASA CR-2144 (1972)
- 4) Advani, S. K., Hosman, R. and Potter, M; *Objective Motion Fidelity Qualification in Flight Training Simulators*, AIAA 2007-6802 (2007)
- 5) Advani, S. K., Hosman, R., Lawrence, B. and Schuring, J.; *A Full-Flight Simulator of the 1903 Wright Flyer*, AIAA 2003-5815 (2003)
- 6) 川原弘靖, 岡田正典, 渡辺顯, 坂東俊夫, 若色薫; 飛行シミュレーション試験設備, モーション模擬装置の構成および機能, 性能, NAL TM-575 (1987)
- 7) Reid, L. D. and Nahon, M. A.; *Flight Simulator Motion-base Drive Algorithm, Part 1-3*, UTIAS CN ISSN 0082-5255 (1985-1986)
- 8) *Manual of Criteria for Qualification of Flight Simulator*, ICAO9625 (2003)
- 9) Groen, E. L., Hosman, R. and Dominicus, J. W.; *Motion Fidelity during a Simulated Takeoff*, AIAA 2003-5680 (2003)
- 10) 田中敬司; 人間パイロットモデルを利用した手動制御系の一評価法, NAL TR-613 (1908)
- 11) Hosman, R.; *Pilot's perception and control of aircraft motions*, Delft University Press (1996)