

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

振動ピンを用いた皮膚感覚呈示装置による
パイロットへの飛行情報呈示に関する研究

野嶋 琢也, 船引 浩平

2008年2月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

振動ピンを用いた皮膚感覚呈示装置による パイロットへの飛行情報呈示に関する研究*

野嶋 琢也^{*1}, 舩引 浩平^{*1}

A Study on Pilot Flight Display using pin-array-type Tactile Display*

Takuya NOJIMA^{*1} and Kohei FUNABIKI^{*1}

Abstract

When flying aircraft, it is required for pilots to watch outside and flight instruments inside carefully. However, it often becomes difficult because of high visual workload. The visual workload often increases during take off phase, landing phase of flight, or doing some kind of tasks such as hovering, etc.. Furthermore, the condition of weather and aircraft itself may also increase it. If the visual workload becomes too high, it becomes difficult for pilots to gather flight information appropriately. Therefore, such difficulties sometimes lead to accidents or incidents. For such situation, we have proposed using a Tactile Flight Display (TFD) for flight safety. A TFD is a kind of flight instrument using tactile display. It enables pilots to feel some kind of flight information through their tactile sensation. In this paper, we describe about two kinds of TFDs which we have developed. Both of them consist of pin-array-type tactile display devices. One of the developed TFD provides a pilot with flight vector cue, another TFD provides pitch angle cue. Then we report about the experimental result for evaluating the flight performance using those two types of TFDs.

Keyword: *Tactile Display, Flight Display, Human Interface, Pilot*

1. はじめに

航空機の飛行方式を大別すると、計器飛行方式と有視界飛行方式に分けることができる。計器飛行方式は管制官の指示による飛行方式であり、他機との間隔確保など、自機の安全は管制官に委ねられている。一方、有視界飛行方式では管制官の指示によらない飛行が可能となっているが、他機との間隔調整を含めた自機の安全は、パイロットの責任となっている。

有視界飛行方式、計器飛行方式のどちらを選択するかは、天候の状況、運航する機体の大きさや装備、パイロットの保持するライセンス種別、飛行の目的などに依存している。天候が悪い場合、長距離の移動の場合などには計器飛行方式が選択されることが多く、天候がよく、農薬散布や写真撮影のように比較的自由度の高い飛行が必要な場合には有視界飛行方式が選択されることが多い。本報告では特に有視界飛行方式に着目するものとした。

有視界飛行方式の場合、パイロットは比較的自由度の高い飛行を実施することが可能となる。しかし自機状態

の把握のため、コックピット内部の水平儀、高度計、速度計といった基本飛行計器類を監視すると同時に、周辺を飛んでいる他の航空機、山やビル、電線といった障害物の監視、ならびに地上目標物からの自機の位置の把握といった作業をバランス良く遂行する事が求められる。通常の状態であれば、これらの作業はパイロットにとって困難なものではない。しかし、離着陸など特定の飛行フェーズや、ホバリング、写真撮影、海難救助など特定のタスクを行う場合、悪天候や機体の故障など飛行条件、あるいはそれらの条件が重ね合わさるような特定の状況下では、困難な作業となる可能性がある。

例えば飛行機による写真撮影の場合、撮影上の都合から特定地点を中心とした、低高度・低速かつ深いバンクでの旋回が要求されることがある。このように高度な技量を要求される飛行を実施する場合、パイロットには通常以上に注意深い計器監視および周辺監視、そして精密な操縦操作が要求され、その視覚的なワークロードは高くなると考えられる。この時、障害物が接近するなどの条件が重なった

* 2007 年 11 月 7 日 受付 (Received 7 November, 2007)

^{*1} 総合技術研究本部 飛行システム技術開発センター (Flight Systems Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

場合、さらに視覚的なワークロードが高くなり、コックピット内外の適切な監視が困難になる可能性が考えられる。本報告では特に1名乗務可能な小型民間機を想定し、この問題に対して触覚を通じた情報呈示による解決を提案する。例えば触覚を通じて自機の姿勢に関する情報を提示することで、コックピット内部の計器類の監視の必要性を低減し、コックピット外部の監視作業に集中可能な環境の構築が可能になると考えられる。このような手法を用いることで、最終的にはパイロットのワークロードを軽減し、より安全な飛行の実現を目指す。

その一方、このような問題に対しては、触覚ではなくビープ音等の音声を情報伝達的手段として使うことも考えられる。例えば音声を通じて自機の姿勢に関する情報を呈示する事で、触覚の場合と同様、コックピット内部の計器類を視覚的に監視する必要が低くなり、パイロットをコックピット外部の監視作業に集中させることが可能になると考えられる。しかし、情報呈示に利用される音声は別の音声情報、例えば管制通信やその他の警告音声などを重畳してしまう恐れがあるという点を考慮するならば、音声によるこの種の情報の呈示は慎重になるべきであると考えられる。

一般に「触覚」と言った場合、物の形や重さなどに関する力覚と、物体表面のテクスチャ感や振動感などに関する皮膚感覚とに分類することが可能である。力覚は操縦桿の反力という形を通じて、舵面にかかる空気力に類する情報を呈示しており、飛行に関する情報呈示手段として利用されていると言える。しかし皮膚感覚については、現時点では飛行に関する情報の呈示手段としては利用されているとは言えない。これはつまり、飛行に関する情報の呈示手段として皮膚感覚を利用した場合、音声を利用した場合とは異なり、既にある情報を重畳してしまう可能性が低い事を意味している。そこで本研究では特に皮膚感覚に着目するものとした。

本報告では皮膚感覚を通じて飛行情報を呈示する装置のことを Tactile Flight Display(TFD)と呼ぶものとし、TFDを通じて提示すべき情報について検討を加えた。そしてTFDを用いた飛行情報の呈示手法として、飛行経路指示型とピッチ角指示型の二つの手法を提案し、それぞれを利用したときの飛行機の操縦可能性について評価を行った。第2章では過去の関連する研究について述べ、第3章ではシステムの設計指針について述べる。第4章では飛行経路指示型のTFDとして試作したシステムの詳細ならびに評価実験の結果について述べ、第5章ではピッチ角指示型として試作したシステムの詳細ならびに評価実験の結果について述べる。そして最後に第6章で全体をまとめる。

2. 関連研究

2.1 触覚呈示全般について

近年、人間に対して情報を伝達する手段として、従来のような視覚や聴覚だけでなく触覚を利用する研究が盛んに行われている。適切な情報を触覚を通じて呈示することで、人間にとって直感的な Human Machine Interface を構築する事が可能になると考えられており、様々な研究が行われている。

触覚に分類される感覚のうち、例えば力覚の場合、物体との接触感や物体の操作感に関する情報を呈示する事によって、現実感の飛躍的な向上、物体等の操作の直感性の向上が可能になると考えられている。この特長を考慮して、例えば Computer Graphic (CG)で描画された物体に対する接触感を呈示する[1][2]、遠隔地にあるロボットアームの操作感/接触感等を呈示する[3][4]等の様々な研究が行われている。例えばCGで描画された物体は現実には存在しないため、仮に接触を試みたとしても、接触感を得る事は通常は不可能である。しかし力覚を通じて接触に関する情報を呈示する事によって、対象の質感や固さ、重さといった情報を直感的に取得する事が可能となり、現実感を向上させることが可能となる。

航空の分野においても力覚を通じた情報呈示は従来から利用されており、Fly-By-Wire(FBW)機における Artificial Feel がその例として挙げられる。この場合、舵面にかかる空気力を呈示する力覚呈示装置と捉える事が出来る。

皮膚感覚の場合、通常であれば視覚や聴覚で感知する種類の情報を、皮膚感覚を通じて呈示するという「感覚代行」と呼ばれる観点の研究が多くなされてきた。例えば White らはカメラにて撮影した画像を、椅子の背面に搭載された400個の振動子を通じて人に対して呈示するというシステムを構築している[5]。その後類似の手法を用いて、カメラで撮影された文字/画像の情報を、多数の振動ピンで構成される装置で表示するという OPTACON の様な製品が発売が発売されるなど、この領域における研究は盛んに行われてきた。従来は機械的な振動刺激が多く使われていたが、近年は皮膚感覚の生理学的な機序が徐々に明らかになってきており、この原理を利用して、電気刺激を利用した皮膚感覚呈示の研究も盛んに行われている[6]。例えば kajimoto らは皮膚表面より電氣的に皮膚内部の感覚受容器を刺激し、皮膚感覚を生成するという手法を利用する事で、カメラ画像を額に皮膚感覚刺激として映し出す FRS と呼ばれるシステムを開発している[7]。

本報告では古くから研究されている振動子を利用した皮膚感覚呈示に着目するものとし、次節では航空分野における皮膚感覚呈示について、関連する研究と各々の得失について論じる。

2.2 航空分野における皮膚感覚呈示

皮膚感覚を通じた情報呈示は、視覚・聴覚に次ぐ情報呈示手段として、航空の分野においても従来から注目されていた[1][8]。例えば Erp J.等[9]は 64 個の振動モータをベストの内側に配置し、目標とする高度の方向や、現在機体が上昇、下降、あるいは静止しているかという情報を呈示するシステムを構築している。また、Raj A.等[10]はヘリコプタがホバリングする際の位置変位量を、フライトスーツに装着した振動子を利用してパイロットに呈示するシステムを構築した。また、McGrath B.等[11]は皮膚感覚呈示装置を利用した状況認識システムを構築し、実機による飛行実験を実施している。

一般に背中や上半身は皮膚感覚のための感覚受容器の密度が低く、空間的な感覚解像度が低い事が知られている。しかし感覚呈示可能な面積が広いこともあり、航空の分野も含め従来の研究では、背中・上半身全体への呈示という手法が多く採用されてきた。この時、特に航空分野では、振動子付きの衣服を着用する[9][10][11]、あるいは振動子付きの座席を利用する[12]といった方法が主として用いられている。

ここで、例えば振動子付きの衣服を利用する場合について考えてみる。振動を確実に身体に伝えることを考えた場合、身体と振動子が適度に接している必要がある。このため、振動子付きの衣服は通常の衣服と比較して拘束感が高くなり、その結果機能性、快適性はある程度犠牲にせざるを得ないと考えられる。

一方で座席に振動子を配置した場合、拘束感や衣服の快適性に関する問題は回避可能となり、正しく着座している限りに於いては、パイロットは座席内部の振動子からの振動を感じ取る事が可能となる。しかし、パイロットは飛行の状況によっては身体を大きく動かすことがあり、必ずしも常に正しく着席しているわけではない。例えば周囲の安全確認のため、あるいは着陸時であれば滑走路探索のため、上体を動かして滑走路や周辺障害物を確認しようと努力し、大きく身体を動かす事があるこの時、身体が動く事によって振動子と身体が離れ、確実な情報の呈示が困難となる恐れがある。

このような問題に対して我々は、背中や上半身に対してではなく、手先に対して皮膚感覚情報を呈示する事を提案する。手先を利用する事によって、皮膚感覚刺激が呈示可能な面積は減少する反面、皮膚感覚の受容器密度は背中・上半身よりも高いことから、必要な情報の呈示は可能であると考えられる。また、皮膚感覚刺激装置を操縦桿に組み込むか、あるいは手袋に装着するといった手法を採用する事によって、無用な拘束感や呈示の不確実性という問題を回避する事が可能になると考えられる。

以上の考えに基づいて、次章では TFD を設計する上での指針について論じる。

3. システム設計指針

3.1 TFD 基本設計指針

窓外監視と計器監視の両立は、通常であればパイロットにとって困難な作業とはならない。そこで本報告では、あくまで一次的な情報源は従来型の計器類であるものとする。そして視覚的な負荷が特に高い飛行状況の場合に、安全のために TFD を利用する、という利用法を想定した。

例えば空撮の場合であれば撮影地点付近までは従来型の計器を利用し、従来と同様に飛行する。そして撮影地点付近で低高度・低速かつ深いバンクでの旋回をする際に、TFD を通じて高度関連の情報取得する、という利用方法が考えられる。この時、TFD を使用するか否かについては、パイロットは自らの意志で選択出来る事が望ましく、使用する場合は遅滞なく使用可能な状態となる事が望ましい。また不使用の場合でも、従来の操縦操作に影響を及ぼさない事が重要であると考えられる。

実際に TFD を利用する場合、TFD はあくまで安全のための計器として位置づけており、従来型計器の完全な代替を目指すものではない。そのため TFD では、従来型計器等を通じて呈示されている情報のうち、想定される条件下で、必要とされる要素が安全な操縦を可能とする精度で提供されていれば十分であると考えられる。例えば空撮の場合、窓外監視を実施すると同時に、TFD を利用して高度関連情報を取得し、航空機の高度を一定の範囲内に留めることが可能であれば、TFD から十分な情報が提供できたものと捉える事が出来る。

また、本報告では対象機の規模を 1 名乗務が可能な小型民間機とし、TFD は操縦桿に搭載するか、あるいはパイロットの手袋に装着することを想定している。そのため TFD は、限られたスペースに搭載できるよう、十分に小さい構成であることが望ましいと考えられる。

以上の条件を整理すると、システム設計上の指針は以下の通りとなる

- ✓ 作業負荷の度合いに応じて、TFD の使用/不使用をパイロットが選択できること。
- ✓ 不使用の場合には、パイロットの動作を妨げることなく、従来と変わらぬ操縦が可能であること。
- ✓ 使用の場合には、遅滞なく簡便に利用できること。
- ✓ 従来型の計器を補完し、想定する状況に於いて安全に飛行を継続することが可能となるだけの情報が提供できること。
- ✓ 可能な限り小型である事。

本稿では上記指針に基づいて二つの形式の TFD を試作したので、これを報告する。なお、今回は簡単のため、縦方向の動きにのみ着目し、横方向については考慮しないものとした。

続いて、今回試作した二つの形式の TFD について述べる。

3.2 試作システム設計指針

一部の高度なアビオニクスを搭載した航空機には、操縦を支援する目的で、Flight Path Vector(FPV)、あるいはFlight Director(FD) と呼ばれる表示機能が搭載されている。FPV/FD を利用する事で、パイロットは所定の飛行経路角/姿勢角の実現が容易になる。そこで本報告では、TFD を FPV ならびに FD と同等の機能を有する計器として構成する事によって、パイロットの操縦を支援し、安全性の向上を目指すものとした。

なお、FPV と同等の情報を表示可能な TFD の事を飛行経路角指示型 TFD、もしくは TFD_{FPV} と呼び、FD と同等の情報を表示可能な TFD の事をピッチ角指示型 TFD、もしくは TFD_{FD} と呼ぶものとする。そして、 TFD_{FPV} ならびに TFD_{FD} について実験を行い、両型式の TFD を利用したときの飛行機の操縦性について、それぞれ評価を行った。具体的には提案する二つの形式の TFD について、

- TFD を利用した飛行が可能であるかどうか
- 飛行が可能であるのならば、どの程度の精度での飛行が可能であるか

という二点についての評価を実施している。

次章ではまず、飛行経路角指示型の TFD の試作、ならびにその評価実験について述べる。

4. 飛行経路角指示型 TFD

4.1 システム試作

飛行経路角指示型の TFD を試作するに際して、図 1 に示す簡易型のフライトシミュレータを利用した。図 1 のシミュレータは Microsoft 社製 ForceFeedback2 ジョイスティックおよび IBM 社製の ThinkPad X31 から構築されており、三菱プレシジョン社製の MSCP(Multi-Simulation Control Program)を利用することで、様々な機種を模擬可能な汎用型のフライトシミュレータとして構成されている。本報告ではシミュレーション用のモデルとして、Dornier 社の Dornier-228 のモデルを利用した。



図 1 簡易型シミュレータ上に実装された TFD

そしてジョイスティック上に、KGS 社製の点字ディスプレイユニット SC-9 を利用した皮膚感覚呈示装置を搭載することで TFD を構築している(図 2)。

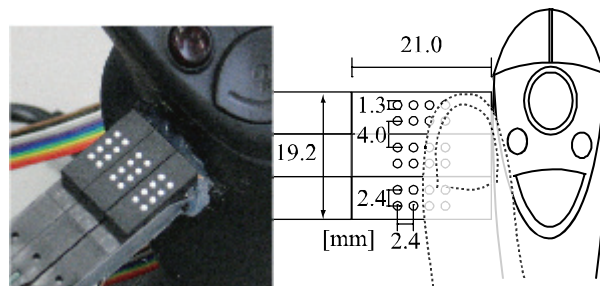


図 2 TFD 拡大図

SC-9 は一つのユニットに上下動可能なピンが 8 本配置されており、本システムでは図 2 に示すように 3 基のユニットを利用している。そしてパイロットは図 2 右にあるように、右手でジョイスティックを握りつつ、その親指を皮膚感覚呈示装置上におくことで、装置上に呈示される情報を取得しながら操縦を行う。

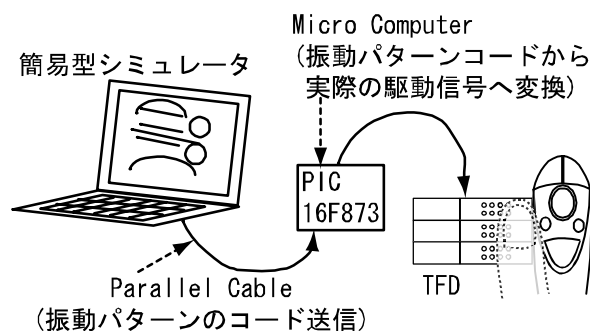


図 3 システム構成

この時、図 3 にあるように、簡易型シミュレータからはその時の飛行状態に応じて、適切な振動パターンのコードが Micro Computer に送られる。Micro Computer としては Microchip 社の PIC16F873 を利用しており、この中でパターンコードが実際の TFD 駆動信号へと変換され、TFD に送信されている。

続いて情報呈示手法について述べる。

4.2 情報呈示手法

TFD_{FPV} では、皮膚感覚を通じて目標とする経路角と現在の経路角の誤差を表示している。図 4 にあるように、現在の飛行経路角を P_a 、目標の飛行経路角を P_{acmd} 、そして P_a と P_{acmd} との差を経路角誤差 P_{ae} とした。今回は縦方向にのみ着目していることから、飛行機は特定高度 (H_{cmd}) で水平直線飛行するものとし、その高度を維持するための経路を目標経路 P_{acmd} として設定している。

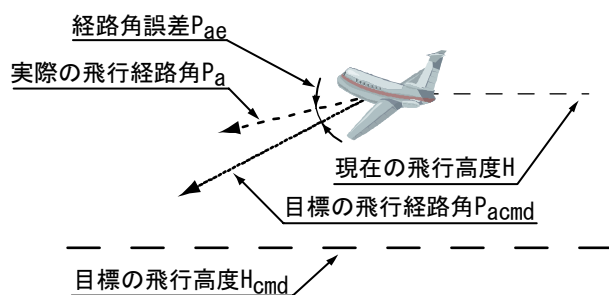


図 4 飛行経路角の誤差

この時、例えば図 5 左に示すように $H=H_{cmd}$ とした時、高度条件を満たしていることから P_{acmd} は水平となる。

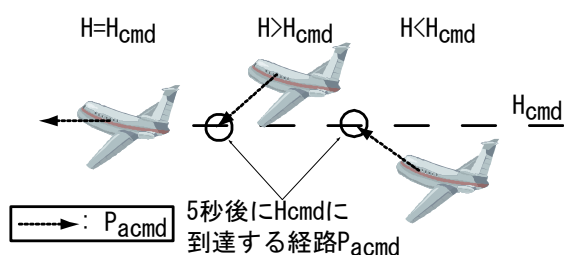


図 5 目標飛行経路設定例

また、 $H \neq H_{cmd}$ の場合、同図右にあるように 5 秒後に所定の高度 H_{cmd} に到達するような経路角を目標経路角 P_{acmd} として設定した。そして目標経路角 P_{acmd} と実際の経路角 P_a との間の誤差 P_{ae} が所定の閾値を超える場合、その情報を皮膚感覚呈示装置上に表示される刺激パターンの移動方向と速度を利用してパイロットへ呈示している。

なお、本システムでは高度の許容誤差を 50[ft] と設定した。パイロットのライセンス取得試験では、滑走路の周囲を旋回する経路においては高度 ± 100 [ft] 以内の変化であること、との基準が示されている[14]。そこで本実験ではその半分である ± 50 [ft] を高度の許容誤差として採用している。

続いて図 6 に、ピンの刺激パターンを例示する。図中の A~F はそれぞれある瞬間の皮膚感覚呈示装置の刺激パターンを示しており、それぞれ 2×4 のピンが 3 つ並んでいる様子を示している。各 A~F 中の●印は振動刺激を生成しているピンを示し、○印は刺激生成をしていないピンを示している。

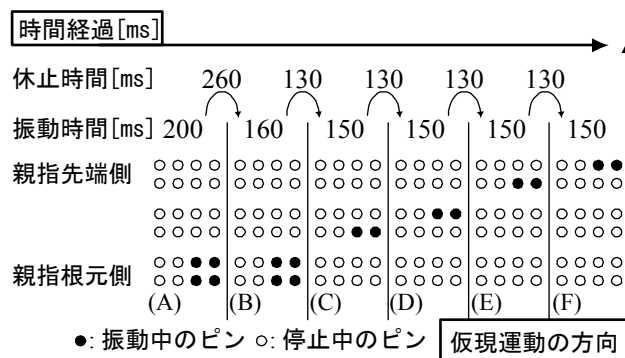


図 6 情報呈示手法

本システムでは一定の周波数 F_B [Hz] で振動しているピンを、さらに時間の経過と共に図 6 中の A~F のように刺激パターンを変化させることによって、パイロットに対して親指根元側から親指先端側の方向の仮現運動を呈示している。まず A ならびに B にあるように、親指根元側で 4×4 のピン領域が 2 回振動することにより、仮現運動の起点を示している。そして C~F という形で刺激パターンを変化させることで、実際の仮現運動を表示している。

なお、仮現運動とは、複数の異なる部位に継時的に刺激を呈示することによって、実際には移動していないにもかかわらず、刺激部位が移動しているように感じられる現象の事を意味している[13]。この時仮現運動の方向で操縦桿の操作方向を示し、その速さで経路角の誤差量を示している。

例えば現在の飛行経路が目標飛行経路よりも上になっている場合、操縦桿を前に倒して、現在の飛行経路を下げる操作が必要となる。この時 TFD_{FPV} 上では、操縦桿を前に押す指示、すなわちピッチダウン指示を生成するため親指根元から先端側へ向かう方向での刺激を生成する。具体的には図 6 にあるように、A のパターンでまず 200[ms] 振動を呈示し、その後 260[ms] 振動を休止する。その後、B のパターンで 160[ms] 振動を呈示し、130[ms] 振動を休止する。以下同様にして、F まで繰り返す。A から F へと振動位置が変化する事によって、利用者は振動刺激が根元から指先へと移動する感覚を得る事が出来る。そして F のパターン終了後は 200[ms] の振動休止後、改めて A のパターンから繰り返すことによって、所望の振動感覚呈示を行っている。

この時、誤差の量は仮現運動の速さによって表示されている。しかし皮膚感覚を経由した場合、連続的な速度変化は判別しづらいと考えられることから、ある度段階的に変化するようにして速度差の判別が容易になるようにしている。具体的には経路角誤差に応じた仮現運動速度を 4 段階に分けて変化させた。仮に飛行機が高度 H で水平直線飛行をしているとすると、実験で想定している

速度(105[kt])の場合、 $|H-H_{cmd}|=50[ft]$ の時に $|P_{ae}| \approx 2.5[deg]$ となる。そこで、 $|P_{ae}| < 2.5[deg]$ の時は経路角が一致したとみなして刺激は生成せず、 $2.5[deg]$ 以上で刺激を生成するものとした。

表 1 高度誤差と経路角誤差の関係

$ H-H_{cmd} [ft]$	$ P_{ae} [deg]$
200	10.0
100	4.5
50	2.5

以降、仮現運動の速度を変化させる高度差($|H-H_{cmd}|$)と経路角誤差($|P_{ae}|$)との関係を表 1 に示す。経路角誤差が表 1 に示す値を超えるたびに仮現運動を段階的に早くすることによって、飛行経路角誤差 P_{ae} の情報をパイロットにフィードバックしている。そしてパイロットは、指先への振動刺激の指示に従って操縦桿を動かし、振動が停止した位置で停止させることによって適切な操作を実施することが可能となる。

ここでピンの振動周期 F_B について考察を加えることにする。一般に人間の皮膚感覚の特徴として、長時間振動に暴露されていると、徐々に感覚が鈍くなるという特性がある事が知られている。そのため、TFD においても同様の問題が生じる可能性があると考えられる。

飛行経路角指示型/ピッチ角指示型に関わらず、パイロットが実際に TFD を利用する状況を想定したとき、その利用時間は概ね数十分～数時間程度になるものと考えられる。例えば空撮であれば、撮影をする間の数十分程度の利用が考えられ、海難救助であれば、探索任務を実施する数時間の間の利用が考えられる。この時、仮にシステムが理想的に動作するとした場合、パイロットは航空機を所定の状態に維持することが可能となり、TFD を長時間利用したとしても、パイロットが振動に暴露される時間はそれ程長くならず、感覚の鈍化の影響も少ないと考えられる。

しかし、何らかの理由によりパイロットが航空機を所定の状態に維持することが困難となった場合、パイロットは長時間 TFD からの振動に暴露されることとなり、時間と共に感覚が鈍くなっていくものと考えられる[13]。そして感覚が鈍くなることによって、TFD からの情報を適切に取得することが困難となり、ますます航空機を所定の状態に維持することが困難になるという、負のループが形成される可能性があり得る。

この問題について、皮膚感覚受容器の側面から捉えることにする。皮膚感覚の受容器には速順応型と遅順応型とがあり、遅順応型の受容器の方が速順応型の受容器よ

りも比較的長時間反応し続けることが知られている[13]。そのため、刺激に対する応答の持続性を考慮するならば、遅順応型受容器の特性に合わせることが有利であると考えられる。そして、この速順応型受容器には、数百[Hz]程度の高い周波数の振動に敏感に反応するパチニ小体と、数十[Hz]程度の低い周波数の振動に敏感に反応するマイスナー小体があることが知られている。そして遅順応型受容器は高周波に対して反応が鈍いことから、刺激に対する応答の持続性を考慮するならば、マイスナー小体が敏感に反応する数十[Hz]近辺の周波数で振動させることが有利であると考えられる。そこで本システムでは、ピンを $F_B=30[Hz]$ で振動させ続けるものとした。

続いて、TFD_{FPV} に関して行った評価実験について、結果と考察について述べる。

4.3 実験および考察

本実験では、パイロットはピッチ操作のみ可能とし、それ以外(ロール/ヨー/パワー)は自動で制御されるものとした。また、ランダムに風向・風速を変化させる事によって、高度維持のためにピッチ操作が要求される環境を設定した。

そして、

- ✓ TFD_{FPV} 不使用
 - 被験者は簡易シミュレータの計器画面上に表示される通常計器により飛行。
- ✓ TFD_{FPV} 使用
 - 被験者は TFD_{FPV}、ならびに簡易シミュレータの計器画面上に表示される姿勢計のみを利用して飛行。姿勢計以外の従来型計器(高度計/昇降率計)は利用せず。

の二つの条件下で特定高度を維持するような飛行を行い、両者の間で所定の高度との誤差の RMS(Root Mean Square error)を比較した。なお、TFD 利用時であっても、実際の利用環境であれば、水平線より自機の姿勢は把握可能である。しかし本実験で利用するシミュレータは水平線を表示する機能を有していないため、今回は姿勢計を表示する事でその代替とした。

本実験ではパイロットライセンスを保有する 4 名を被験者とした。4 名中 3 名は今回のシミュレーションで利用している Dornier-228 の実機について十分な操縦経験と技量を有している。また、残る 1 名についても同機のシミュレータによる操縦経験は十分に有している。一方、全員 TFD_{FPV} による飛行は初めてであることから、全員に対して TFD_{FPV} による高度維持操作について慣熟飛行を十分に行い、その上で評価実験を実施した。

実験開始時は目標高度で水平飛行可能な状態にトリムが取られている。被験者はランダム風の吹く環境下で、

TFD_{FPV} の使用/不使用の各条件における高度維持の飛行をそれぞれ約 3 分間ずつ行った。この時の各被験者の RMS を図 7 に示す。

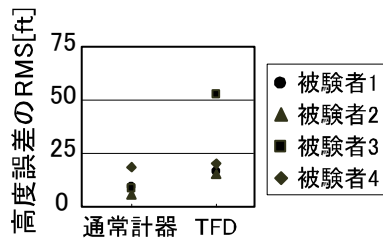


図 7 高度維持タスク実験結果

また、被験者より以下のコメントが寄せられた。

- ✓ 仮現運動の速さ・方向の判別が難しい
- ✓ 特に方向は時々間違えて認識してしまい、逆操作をしてしまう事がある
- ✓ 利用していると徐々に感覚が麻痺してくる

図 7 より、4 名中 3 名の被験者においては、飛行時の誤差が制限値以下となっていることから、TFD_{FPV} を利用して高度誤差を 50[ft]以下におさめた飛行は可能であると判断できる。

一方実験後のコメントからは、被験者は仮現運動の速さと操作量の関係性が明確には分かりづらく、方向の判別も難しかった事が示唆されている。上記のコメントは被験者全員に共通しており、実験中に誤認識したことを認識していたようである。情報取得に困難があることから、飛行機を振動刺激の発生しない閾値以下に常に保つことが困難となり、長時間振動刺激に暴露され、徐々に感覚が麻痺していったものと推察される。そして第 4.2 節で言及したような、感覚が麻痺した事によりさらに情報取得が困難となるという負のループが形成されていた可能性が考えられる。

以上より、本実験において提案するシステムは、通常計器と比較して誤差が増大しており、個人差も大きいと考えられることから、従来計器と同等の性能を持つとは言い難い。特に着陸直前のように高度の余裕がない状態での利用は難しいものと思われる。しかし、本来 TFD は補助的な計器として位置づけており、また、当初の誤差 50[ft]以下という目標は概ね達成していることから、ある程度高度に余裕がある状況下で、短時間での利用は可能であると考えられる。その反面、個人差の大きさや信号の誤認識の問題を考慮するならば、現状では全てのパイロットに対して普遍的に利用可能なシステムであるとは言い難い。この点については、信号呈示手法の改善、ならびに適切な訓練手法を導入することなどにより改善する必要があると考えられる。

続いて次章では、もう一つの型式であるピッチ角指示

型 TFD について、試作したシステムとその評価実験について報告する。

5. ピッチ角指示型 TFD

5.1 システム試作

ピッチ角指示型 TFD を構築するにあたり、TFD_{FPV} を構築した過程で得られた知見に基づいて、種々の改善を行った。

まず刺激方向の判別を改善するため、図 8 にあるように利用する皮膚感覚呈示装置のユニットを 3 基から 2 基に減らし、物理的に両者の間に空間を設けた。

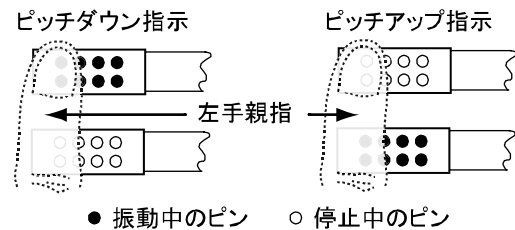


図 8 ピッチ角指示型 TFD の構成

また操作指示の手法についても単純化し、2 基のユニットのどちらが振動するかで操作方向を指示し、その時の振動周期で操作量を呈示するという手法に変更した。本システムでは 2 基のユニットのうちどちらが振動したかが判別しやすくなることを狙い、物理的に空間を設けてユニットを配置した。図 8 左側の場合、親指先端側のユニットが振動しているため、操縦桿を前に倒す、すなわちピッチダウン信号を呈示していることとなる。そして実験条件を実際の飛行に近づけるため、固定翼シミュレータ FSCAT-A (Flight Simulator Complex for Advanced Technology Airplane, 図 9) 上に TFD_{FD} を構築した。



図 9 JAXA 固定翼シミュレータ(FSCAT-A)



図 10 TFD の搭載状況

図 10 左に示すように、コックピットの左席、機長席側の操縦桿のトリムスイッチ付近に皮膚感覚呈示装置を搭載している。利用する場合は図 10 右のようになる。

シミュレーションに利用するソフトウェアおよびモデルは、第 4 章と同様、MSCP および Dornier-228 である。ただし、計算機は CONCURRENT 社製の iHawk 860 を利用している。また、FSCAT-A では窓外視界映像が表示可能であることから、ここに大樹町近辺の映像を表示する事で、水平線の呈示を行った。

5.2 情報呈示手法

図 11 に示すように目標ピッチ角 θ_{cmd} と現在のピッチ角 θ との間の誤差を θ_e とする。

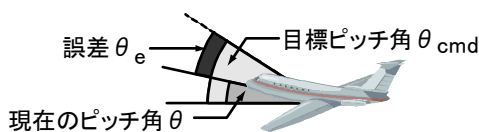


図 11 ピッチ角の誤差

本システムでは $F_t = K \cdot \theta_e - B \cdot \dot{\theta}_e$ のように、誤差 θ_e およびその微分値より皮膚感覚刺激強度 F_t を決定し、この F_t の大きさに基づいて刺激の周期ならびに指示方向を決定している。今回は刺激周期は 1-30[Hz] とし F_t の大きさに応じて周期を 16 段階に分けて呈示した。 F_t のレベルを $N(N=0 \sim 15)$ とすると、システムより生成される刺激の周波数 S は、

$$N=0 \text{ の時 } S=0(\text{刺激停止})$$

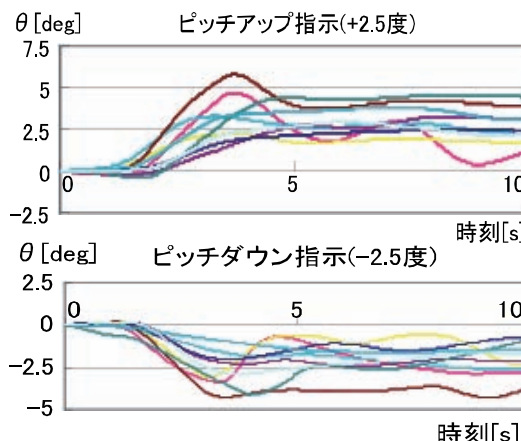
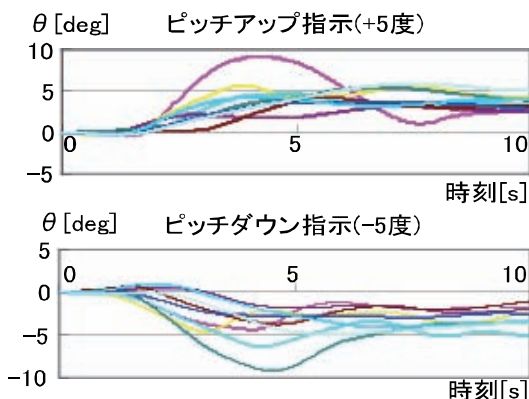
$$N \neq 0 \text{ の時 } S = S_{\min} \cdot 10^{\frac{N}{15} \log(\frac{S_{\max}}{S_{\min}})}$$

により決定した。ここで K 、 B 、および $F_{t\max}$ は実験時に定める定数であり、 S_{\max} および S_{\min} は皮膚感覚呈示装置から出力される刺激周波数の最大値及び最小値であり、 $S_{\max}=30[\text{Hz}]$ ならびに $S_{\min}=1[\text{Hz}]$ である。この時、パイロットは呈示された刺激に基づいて、目標ピッチ角との誤差が最小になるように機体のピッチ制御を行う。今回のシステムでも比較的高い高度での飛行を想定し、ピッチ角の誤差は 1.0[deg] 以下を目標とした。

5.3 実験および考察

本実験では、システムを通じて指示されるピッチ角をステップ状に変化させ、その時の応答について調べた。水平安定飛行状態の姿勢から、ピッチ角指示値を ± 2.5 、 ± 5 [deg] の合計 4 通りにステップ状に変化させ、その時の収束値の誤差について評価を行った。先のシステムと同様に縦方向にのみ着目するため横方向の操舵は自動とし、本実験では飛行速度にかかわらずエンジン出力は一定としている。また、今回のシミュレーション環境では無風とした。

4 通りのピッチ角指示値をランダムに呈示し、被験者には指示されるピッチ角に対して可能な限り忠実に追従してもらった。指示は 10 秒間出されるものとし、その間は前節で述べたロジックに従って TFD_{FD} より皮膚感覚刺激が呈示される。本実験では被験者は 3 名とした。全員 Dornier-228 について十分な飛行経験を有している。十分な慣熟飛行を行った後、評価実験を実施した。まず図 12 にピッチ角指示が ± 2.5 [deg] の時のピッチ角履歴を示し、図 13 に ± 5 [deg] を指示したときのピッチ角履歴を示す。

図 12 ± 2.5 [deg] 指示の時のピッチ角履歴図 13 ± 5 [deg] 指示の時のピッチ角履歴

さらに上記の結果について、刺激入力開始後 8-10 秒の間の機体ピッチ角誤差の RMS をとった結果を図 14 に示す。

また、被験者より以下のコメントが寄せられた。

- ✓ 一度指示方向を誤認識するとしばらく気づかない事がある
- ✓ 指示方向を確認しつつの操作になり、どうしても操作が遅れる
- ✓ 方向の指示と比較して操作量の指示は分かりやすく、操作をスムーズに行う事ができた
- ✓ しばらく利用していても皮膚感覚が鈍くなるようなことがなかった

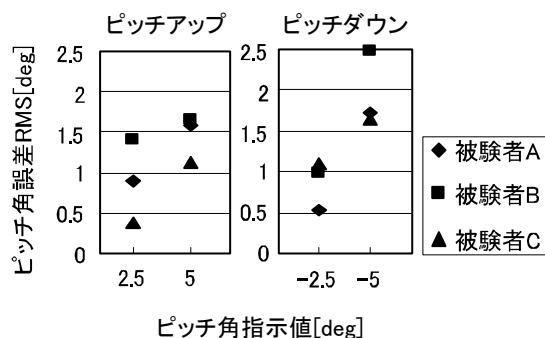


図 14 ピッチ角指示実験結果

図 12 ならびに図 13 では、ピッチ角指示開始直後に、指示値に追従できていないケースが見受けられるが、最終的には指示値周辺に収束していることがみてとれる。そして図 14 において、ピッチ角指示値が $\pm 2.5[\text{deg}]$ の場合、誤差は概ね $1.0[\text{deg}]$ 程度、平均で $1.0[\text{deg}]$ 以下となることから、当初の目標は達成できたと言える。しかし、ピッチ角指示値が $\pm 5[\text{deg}]$ の場合には明らかに $1.0[\text{deg}]$ を大きく上回る結果となっており、目標を達成したとは言えない。

また実験後のコメントからは、TFD_{FPV} と同様に操作の方向指示に関する認識に困難が伴う状況が観察されている。しかし、操作量の指示に関しては特に大きな問題は指摘されていない。また、長時間の利用による感覚麻痺の問題についても、TFD_{FPV} の方式よりも改善したものと考えられる。

指示値が $\pm 2.5[\text{deg}]$ の時は誤差を目標値以内に抑えることが出来たことから、安定飛行可能な角度を中心とした狭い範囲内であれば、ピッチ角指示値に対する追従が可能であると考えられる。空撮時の低高度・深いバンク角での旋回という状況を考えた場合、旋回に入った段階で安定な姿勢角を設定しておくことによって、 $\pm 2.5[\text{deg}]$ 程度までの姿勢角のずれであれば TFD を利用して修正が可能であり、適正な姿勢を保ったまま旋回を継続することが可能であると考えられる。

しかし指示値が $\pm 5[\text{deg}]$ の時には、誤差を目標値以内に抑えることができていない。K および B の値を調整す

ることである程度誤差を減少させることは可能であると考えられるものの、この結果は現状の TFD_{FD} の限界を示唆しているものと考えられる。この点について、実際の飛行状況を考慮して考察を加える。

実際の飛行で急激で大きな角度指示が表示されるであろう状況を考えると、突風等により急激に姿勢や高度が乱される、あるいは他の飛行機・障害物が接近してくる、といった状況が考えられる。

突風などのために TFD_{FD} より指示されるピッチ角が急激に大きく変動した場合、先の実験より、パイロットが TFD_{FD} の指示に追従することは困難であると考えられる。

しかし一般に、高度が極端に低い、あるいは障害物がある、といった状況でない限り、高度や姿勢の乱れは急いで修正する必要はなく、ゆっくりとした修正で十分である。そのため、TFD_{FD} からの指示も、その変化速度に制限を設け、パイロットが追従可能な範囲で変化させれば十分であると考えられる。

一方、他機・障害物との衝突の危険がある場合、回避のため急激な操作が必要とされることがある。しかし実験結果より、回避のために TFD_{FD} で指示されるピッチ角を急激に変化させたとしても、パイロットはその急激な変化には追従しきれないことが予想される。よって、TFD_{FD} にのみ依存した回避操作は非常に困難であり、このような緊急時には速やかに TFD_{FD} の利用を停止し、従来通りの操作に移行するよう促すことが現実的であると考えられる。

6. まとめ

今回我々は、皮膚感覚呈示装置を用いたパイロットの操縦支援装置、Tactile Flight Display (TFD) の提案を行い、その効果を実験を通じて確認した。

本論文ではまず飛行経路角指示型の TFD、TFD_{FPV} を試作している。TFD_{FPV} では、ピンの振動による仮現運動の方向と速さを利用して、パイロットに対して操縦桿の操作方向と操作量とを伝達している。この TFD_{FPV} を用いて高度維持の実験を行い、その結果、TFD_{FPV} を利用した飛行に於いても目標からの高度誤差を概ね $50[\text{ft}]$ 以内に押さえる飛行ができる事を確認した。しかし同時に、TFD_{FPV} の利用には個人差が大きいことも確認した。このことより、TFD_{FPV} は全てのパイロットが容易に利用可能であると考えられる。

続いてピッチ角指示型の TFD、TFD_{FD} を試作した。TFD_{FD} では二つの皮膚感覚呈示装置を利用し、振動の部位と周期を利用して、パイロットに対して操縦桿の操作方向と操作量とを伝達している。この TFD を用いてピッチ角追従の実験を行い、その結果、ピッチ角の変化が $\pm 2.5[\text{deg}]$ 程度の小さいものであれば、 $1.0[\text{deg}]$ 程度の誤差

で追従できる事を確認した。

以上の結果より、TFDのみを利用して従来型の計器と完全に同等の飛行を実現することは困難であるものの、高度を維持する、姿勢角を維持するなどのような、特定の安定状態を維持するための飛行は充分可能であると考えられる。よって、一時的に安全のための補助的な計器として利用するのであれば、有用であると考えられる。

その一方、TFD_{FPV}、TFD_{FD}共に操作方向指示に関して信頼性が低いという問題がパイロットより指摘されており、今後はこの点について改善を進める予定である。また、実際の利用状況を想定して、視覚的な作業負荷の高い状況での利用可能性についても検証を進めていく予定である。

7. 参考文献

- [1] Susumu Tachi, Taro Maeda, Ryokichi Hirata and Hiroshi Hoshino, "A construction method of virtual haptic space", proceedings of International Conference on Artificial Reality and Tele-existence (ICAT), pp.131-138, 1994.
- [2] フライラット ソムサック, 山田 啓太, 長谷川 晶一, 小池 康晴, 佐藤 誠: 力覚提示を伴う仮想物体の両手多指操作環境の開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.6(20010601) pp. 1140-1148, 2001.
- [3] 舘 暲, 阿部 稔, : テレグジスタンスの研究 第 1 報, 第 21 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.167-168, 1982.
- [4] 舘 暲, 小森谷 清, 澤田一哉, 井上利之, 井上幸三, "HRP 遠隔操作プラットフォーム", 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No.1, pp.16-27, 2001.
- [5] White W, Saunders A, Scadden L, Bach y, Rita P, Collins C, "Seeing with the Skin", Perception and Psychophysics, Vol.7(1), pp.23-27, 1970.
- [6] Kajimoto, Kawakami, Maeda, Tachi, "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation," Ninth International Conference on Artificial reality and Telexistence, 1999.
- [7] Kajimoto, Kawakami, Tachi, "Optimal design method for selective nerve stimulation and its application to electrocutaneous display," Tenth Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.303-310, Mar 2002.
- [8] Veen H., Erp J.: Tactile Information Presentation in the Cockpit; Proceedings of the First International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction, p.174-181, August 31-September 01, (2000)
- [9] Erp J., Veltman H., Veen H.: A Tactile Cockpit Instrument to Support Altitude Control; Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 47th Annual Meeting, pp.114-118, (2003)
- [10] Raj A., Kass S., Perry J.: Vibrotactile Displays for Improving Spatial Awareness; Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress, vol.1, pp.181-184, (2000)
- [11] McGrath B., Estrada A., Graith waite M., Raj A., Rupert A.: Tactile Situation Awareness System Flight Demonstration Final Report; USAARL Report No.2004-10, (2004)
- [12] Tan H., Gray R., Young J., Traylor R.: A Haptic Back Display for Attentional and Directional Cueing; Haptics-e, Vol.3, No.1, (2003)
- [13] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 新編 感覚・知覚 心理学ハンドブック, 誠信書房, (1994)
- [14] 運輸省航空局技術部乗員課: 操縦士実地試験実施細則 事業用操縦士 自家用操縦士; 空 乗 第 2039 号, 平成 10 年 3 月 20 日, (1998)
- [15] 若色薫, 野田文夫, 村岡浩治, 飯島朋子, 船引浩平, 野嶋琢也: 研究開発用飛行シミュレータの開発; 第 41 回飛行機シンポジウム講演集, 2B4, (2003)

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-040

発 行 平成 20 年 2 月 29 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (有) ノースアイランド

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2008 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

