

# 皮膚感覚を通じたパイロットへの飛行情報呈示に関する研究

野嶋 琢也\*<sup>1</sup> 船引 浩平\*<sup>1</sup>

A study on flight information display methods through tactile sensation of pilots

Takuya NOJIMA\*<sup>1</sup> and Kohei FUNABIKI\*<sup>1</sup>

**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.

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

## 1. はじめに

飛行機やヘリコプタ等の航空機は通常、一般によく知られている旅客・貨物輸送以外にも、農薬散布や写真撮影、海難救助など様々な目的で利用されている。農薬散布や写真撮影などに用いられる航空機は一般に小型のものが多く、自動操縦装置などは搭載されていない事が多い。さらに実際の飛行においては有視界飛行方式が一般に用いられている。

有視界飛行方式とは管制官からの指示によらない飛行方式の事であり、原則として他機との飛行間隔の調整など、自機の安全確保はパイロットの責任において行われる。そのため有視界飛行方式を選択した場合、パイロットは自機状態の把握のために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、パイロットにとってこれらの作業はさほど困難ではない。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、困難を伴う作業となりうる。

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。このような飛行は安定が悪いことから、一般に利用される二地点間の移動のための飛行では通常行われる事はない。この時、パイロットには自機状態の把握のために通常以上に注意深い計器監視および操縦操作が必要とされる一方、障害物の回避および精密な旋回中心点の把握のためにも注意深いコックピット外部の監視(窓外監視)が要求される事となり、通常の安定した飛行時よりもコックピット内外の監視作業負荷は増大する。海難救助などの場合も同様に、要救助者探索のための窓外監視業務と、飛行のための計器監視業務とが同時に要求され、通常の飛行より視覚的な作業負荷は増大する。

このような場合、時によっては窓外監視の負荷が高すぎて計器監視を適切に行うことが出来ず、安全に飛行を継続する事が困難になる場合がある。この問題に対して我々は、窓外監視と計器監視を両立させる手段として、触覚を通じた情報呈示を提案してきた。一般に触覚とは、物の形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区別されるが、本研究では特に皮膚感覚に着目した。皮膚感覚を通じて飛行情報を呈示することで自機状態を監視し、同時に視覚を通じて窓外監視を行うという形で、窓外監視と飛行情報の監視を両立させる事が可能になると考えられる。その結果、より安全な飛行を実現す

\*1: 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部

\*1: Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Aerospace Technology

ることが可能になると考えられる。

このように皮膚感覚を通じて飛行情報を呈示する装置のことを、本論文では Tactile Flight Display (TFD) と呼ぶものとした。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

航空の分野に於いても皮膚感覚は視覚、聴覚に次ぐ情報呈示手段として従来から注目されており、様々な研究が行われてきた<sup>[1]</sup>。例えば Erp J. 等<sup>[2]</sup>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<sup>[3]</sup>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<sup>[4]</sup>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、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。

上半身に対する皮膚感覚刺激を実現するためには、刺激呈示装置が利用者の身体に適度に接触している必要がある。そのため従来は、振動子付きの衣服を着用する<sup>[2][3][4]</sup>、あるいは振動子付きの座席を利用する<sup>[5]</sup>といった方法が取られてきた。

しかし、例えば振動子付きの衣服を利用する場合、振動を確実に身体に伝えるためには振動子がある程度体に密着している必要がある。そのため、無用な拘束感をパイロットに与え、さらに衣服としての機能性、快適性はある程度犠牲になるものと考えられる。一方で座席に振動子を配置した場合には、パイロットの上体の動きによって振動子と身体が離れ、情報の呈示が困難になる可能性がある。実際にパイロットは、周辺を飛行する機体の探索のため、あるいは着陸時であれば滑走路探索のためなど、必要に応じて上体を大きく動かす事が多々ある。そのため、座席に振動子を配置

した場合には、時として必要な皮膚感覚情報を感じる事が困難になる事があり得る。

これに対し我々は、特にパイロットの手先皮膚感覚を利用する事を提案する。手先を利用した場合、刺激呈示に利用できる面積は減少する反面、皮膚感覚の解像度は背中・上半身よりも高く、必要な情報の提示は可能であると考えられる。そして、パイロットは操縦中常に操縦桿を把持することから、操縦桿に小型・軽量の皮膚感覚刺激装置を搭載することで、容易に利用可能な情報呈示を実現できると考えられる。

以上の考えに基づいて、次章では TFD の設計指針について論じる。

## 3. システム設計指針

通常の飛行であれば、パイロットにとって窓外監視と計器監視の両立はさほど困難な作業とはならない。よって、通常の場合では TFD のようなシステムを利用する必要性は高くないと考えられる。そこで本論文では、一次情報源はあくまで従来型の視覚的な計器とし、通常は従来型の計器を利用するものとする。そして視覚的な負荷の高い飛行状況の場合に、航空機が危険な状況にならないように補助的に TFD を利用するものとした。そのため飛行状況によって、パイロットが TFD の使用/不使用を容易に選択できることが望ましく、使用しない場合には、従来と同等の操縦環境が実現できることが望ましいと考えられる。

従来型の計器は、全ての飛行状態において要求される精度を満足できなければならない。その一方、TFD はあくまで安全のための補助計器であり、特定の条件下での利用を想定している。そのため、仮に従来型計器と同等の能力を常に確保することが困難であるとしても、飛行状況に応じて安全性を考慮して設定された精度での飛行が可能れば十分であると考えられる。

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し、窓外監視を実施しながらも航空機の高度を一定の範囲内に留めるような操作を行う、といった形での利用が考えられる。この時、TFD を利用して飛行機を安全な高度範囲に制御することが可能であれば、従来計器と同等の高度維持能力が確保できなくても大きな問題にはならないと考えられる。

また第 2. 章でも述べたように、可能であればシステムは小型で、大きな改修を伴わず航空機に搭載できるものが望ましい。そこでシステムの設計にあたっては、

- 視覚的な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するだけの能力を有すること。
- 可能な限り小型である事。

が重要であると考えられる。本論文では上記の方針に基づいて、二つの型式のTFDを試作し、評価を行った。

ここで、航空機について一般に用いられる座標系について定義する。航空機は重心位置を原点とし、機体前方をX軸正、機体右方をY軸正にとり、機体下方をZ軸正にとる右手座標系が用いられている。この時、特にXZ平面内での運動を縦方向の運動と呼び、XY平面内での運動と分けて議論されることが多い<sup>[7]</sup>。また、安全のためには高度を適切に制御することが重要であると考えられることから、本実験では高度、すなわち縦方向に着目することとした。

パイロットは航空機の縦方向の運動を制御するために、高度、速度、昇降率、そしてピッチ角、エンジン出力といった情報を利用している。そして全ての航空機には、これらの情報を表示するために高度計、速度計、昇降率計、姿勢計、エンジン出力計が必ず搭載されている。さらに近年では、これら基本的な情報を統合し、より高度な情報の提供が可能な機材も存在する。例えば高度や昇降率を統合して目標となる飛行経路を指示するFlight Path Vectorと呼ばれるものや、あるいはFlight Directorと呼ばれる、目標となる姿勢角を指示する計器などが例として挙げられる。

本論文では、皮膚感覚呈示装置をこのFlight Path Vector、あるいはFlight Director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。Flight Path Vector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<sub>FPV</sub>と呼び、Flight Director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<sub>FD</sub>と呼ぶものとする。そして、TFD<sub>FPV</sub>ならびにTFD<sub>FD</sub>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。

TFDの評価にはいくつかの手法が考えられるが、本論文では、視覚的な情報入手が制限された状態で、TFDからの情報に基づいた飛行が可能かどうか、と言う点について評価を行うこととする。TFDの利用状況を考えた場合、視覚的な情報入手を制限した上で、さらに監視作業などなんらかの負荷を与えた状態で評価するという手法も考えられる。しかしTFDは飛行用の計器としては新規に提案されたものであり、航空機の操縦に利用可能であるかどうかと言う点はまだ明確にはなっていない。そのため、本論文ではまず

この点に着目して評価を行うこととした。

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。

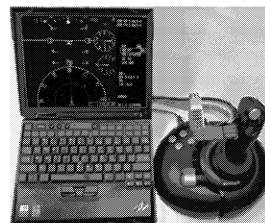


図1 簡易型シミュレータ上に実装されたTFD  
Fig.1 The Tactile Flight Display with Flight Simulator on a Notebook PC.

図1中の簡易型シミュレータは、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、三菱プレジジョン社製の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。本論文ではシミュレーション用のモデルとして、Dornier社のDornier-228(19人乗り双発ターボプロップ)のモデルを利用した。

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)。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。

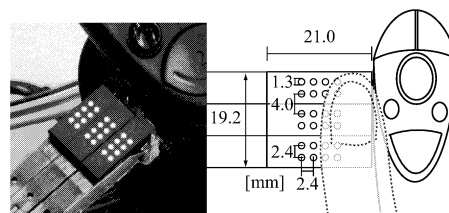


図2 TFD拡大図  
Fig.2 A Zoom View of the TFD.

続いて、呈示する情報と呈示手法について述べる。

### 4.2 情報呈示手法

TFD<sub>FPV</sub>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3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、

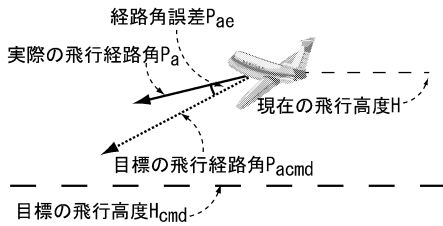


図3 飛行経路角の誤差  
Fig.3 The Flight Path Angle Error

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  $P_{acmd}$  として設定した。この時、例えば図4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。また、 $H \neq H_{cmd}$  の場合、

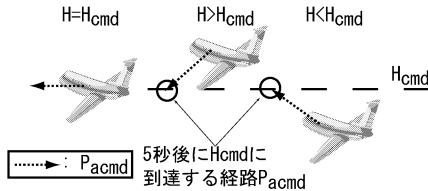


図4 目標飛行経路設定例  
Fig.4 An Example of Nominal Flight Path Angle

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 15[m] と設定した。パイロットのライセンス取得試験において、滑走路の周囲を旋回する経路においては高度  $\pm 100$ [ft] 以内の変化であること、との基準が示されている [8]。そこで本実験ではその半分である  $\pm 50$ [ft]、約 15[m] を高度の許容誤差として採用している。

続いて図5に、ピンの刺激パターンの一例を示す。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  $2 \times 4$  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。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5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

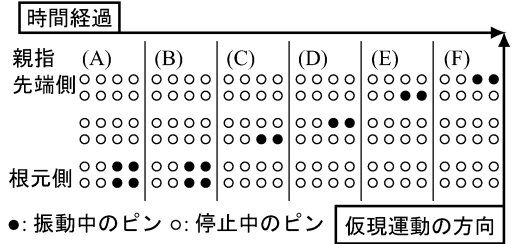


図5 情報呈示手法  
Fig.5 An Example of the Display Method.

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する [6]。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<sub>FPV</sub>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、図5にあるように親指根元から先端側へ向かう方向での刺激を生成する。

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つ考えられることから、ある程度段階的に変化するようにして速度差を判別しやすく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 (約 195[km/h]) の場合、 $|H - H_{cmd}| = 15$ [m] 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] 以上になって刺激を生成するものとした。以降、高度誤差  $|H - H_{cmd}| = 30$ [m] は  $|P_{ae}| \approx 4.5$ [deg]、 $|H - H_{cmd}| = 60$ [m] は  $|P_{ae}| \approx 10.0$ [deg] となることから、経路角誤差の絶対値が 4.5[deg]、10.0[deg] を越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。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。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はならないと考えられる。しかしシステムに何らかの問題があり、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であるとしたならば、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<sup>[6]</sup>。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<sup>[6]</sup>。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を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<sub>FPV</sub> 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

本実験では環境条件を以下のように設定した。

- 被験者は操縦桿による高度操作のみ可能。それ以外は自動で制御される。
- シミュレーション内部で風速・風向がランダムに変化する風が吹いている。

通常パイロットが高度制御を行う場合、操縦桿操作と同時にエンジンの出力操作を行っている。しかし本実験では操縦桿操作のみによる高度維持を想定していることから、エンジン出力は一定速度を保つべく自動で制御されるものとした。また横方向についても、飛行方向を自動で維持するようにしている。

さらに、シミュレーション内部では風速・風向がランダムに変化する風が吹いているため、高度維持のためには被験者の操作が必要となっている。仮に被験者が適切な操作をしなかった場合、ランダムに吹く風の

影響で、飛行機の高度も変化していくこととなる。そして、

- TFD<sub>FPV</sub> 利用せず。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を利用して飛行。
- TFD<sub>FPV</sub> 利用する。被験者は TFD<sub>FPV</sub>、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は利用せず。

の条件でそれぞれ特定高度を維持するような飛行を行いたい、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、パイロットは通常、コックピット外部の水平線からある程度自機の姿勢を把握している。そして TFD の利用時は、TFD を通じて飛行に必要な情報を取得しつつ、目でコックピット外部を監視するという形態を想定している。よって、本来であれば TFD 利用時でも水平線から姿勢情報を取得する事ができると考えられる。しかし今回構築したシミュレーション環境では、被験者は水平線情報を得る事ができない。そのため、本実験では水平線の代わりに従来型計器を利用して姿勢情報を提供するものとした。

今回は 4 名の被験者に対して実験を行った。全員がパイロットライセンスを保有している。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<sub>FPV</sub> による飛行は初めてであることから、全員に対して TFD<sub>FPV</sub> 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。

シミュレーション開始時には機体は目標高度にあり、無風であればその高度が維持可能な機体条件が整えられている。被験者はランダム風の吹く環境下で、TFD<sub>FPV</sub> 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。各被験者の試行結果を図 6 に示す。

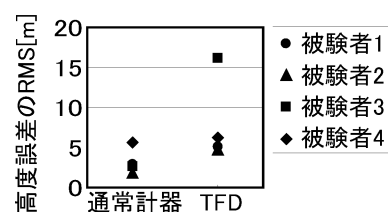


図 6 高度維持タスク実験結果  
Fig. 6 The Result of Altitude Keep Experiment.

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
  - 利用しているうちに徐々に感覚が麻痺してくる
- 図6を見ると、被験者によっては15[m]を若干越えるものの、TFD<sub>FPV</sub> 利用時の高度誤差は概ね15[m]以下におさまっていると判断できる。

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事から、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15[m]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<sub>FPV</sub>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7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。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

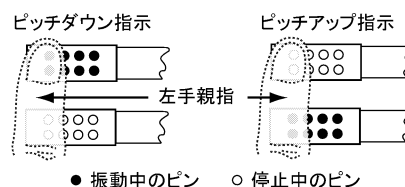


図7 ピッチ角指示型TFDの構成  
Fig.7 The Basic Structure of a pitch-command-TFD.

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7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することとなる。そして実験条件を実際の飛行に近づけるため、JAXA 所有の固定翼シミュレータ FSCAT-A (Flight Simulator Complex for Advanced Technology Airplane, 図8) 上にTFD<sub>FD</sub>を構築した。図9左に



図8 JAXA 固定翼シミュレータ (FSCAT-A)  
Fig.8 JAXA's Flight Simulator(FSCAT-A).

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9右のようになる。

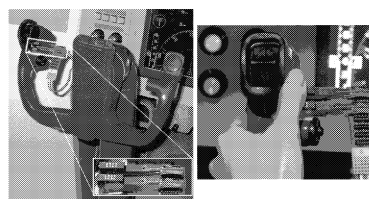


図9 TFDの搭載状況  
Fig.9 Installation of The TFD.

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 では窓外視界映像の呈示用に無限遠表示装置 (Wide Angle Collimated/WAC) と呼ばれる装置が実装されており、これを用いて水平線の呈示を行った。

### 5.2 情報呈示手法

図10に示すように目標ピッチ角  $\theta_{cmd}$  と現在のピッチ角  $\theta$  との間の誤差を  $\theta_e$  とする。本システムでは  $F_t = K \cdot \theta_e - B \cdot \dot{\theta}_e$  のように、誤差  $\theta_e$  およびその微

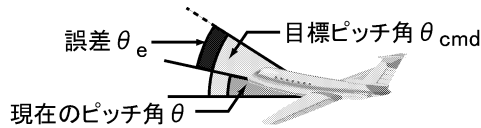


図 10 ピッチ角の誤差  
Fig. 10 The Pitch Angle Error.

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  $N(=0\sim 15)$  とすると、システムより生成される刺激の周波数  $S$  は、 $N=0$  の時  $S=0$ (刺激停止)、 $N\neq 0$  の時、 $S = S_{min} \cdot 10^{N/15 \cdot (\log(S_{max}/S_{min}))}$  により決定した。ここで  $K$ 、 $B$ 、および  $F_{tmax}$  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、 $S_{max} = 30$ [Hz] ならびに  $S_{min} = 1$ [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  $\pm 2.5$ 、 $\pm 5$ [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<sub>FD</sub> 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。その結果を図 11 に示す。図 11 の縦軸は、刺激入力開始後 8-10 秒の間の機体ピッチ角誤差の RMS であり、横軸はその時のピッチ角指示値を示している。

図 11 において、ピッチ角指示値が  $\pm 2.5$ [deg] の場合、誤差は概ね 1.0[deg] 程度、平均すると 1.0[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  $\pm 5$ [deg] の場合には明らかに 1.0[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。

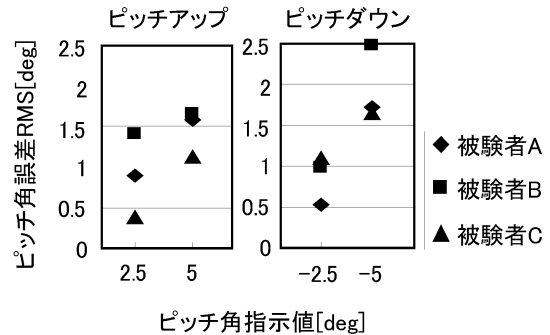


図 11 ピッチ角指示実験結果  
Fig. 11 The Result of Pitch Angle Command Experiment.

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ならば気づかないことがある
- 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

実験後のコメントからは、TFD<sub>FPV</sub> 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<sub>FPV</sub> の方式よりも改善したものと考えられる。

指示値が  $\pm 2.5$ [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、 $\pm 2.5$ [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  $\pm 5$ [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<sub>FD</sub> 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<sub>FD</sub> 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<sub>FD</sub>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<sub>FD</sub>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<sub>FD</sub>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<sub>FD</sub>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<sub>FD</sub>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<sub>FPV</sub>を試作している。TFD<sub>FPV</sub>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<sub>FPV</sub>を用いて高度維持の実験を行い、その結果、TFD<sub>FPV</sub>を利用した飛行に於いても目標からの高度誤差を概ね15[m]以内に押さえる飛行ができる事を確認した。

続いてピッチ角指示型のTFD、TFD<sub>FD</sub>を試作した。TFD<sub>FD</sub>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±2.5[deg]程度の小さいものであれば、1.0[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<sub>FPV</sub>、そしてTFD<sub>FD</sub>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。

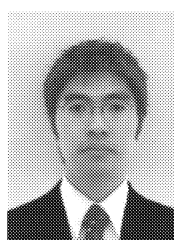
## 参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] McGrath B., Estrada A., Graithwaite M., Raj A., Rupert A.: Tactile Situation Awareness System Flight Demonstration Final Report; USAARL Report No.2004-10, (2004)
- [5] Tan H., Gray R., Young J., Traylor R.: A Haptic Back Display for Attentional and Directional Cueing; Haptics-e, Vol.3, No.1, (2003)
- [6] 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)
- [7] 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治: 航空機力学入門; 東京大学出版会, (2001)
- [8] 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)
- [9] 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)

(2006年7月26日受付, 11月27日再受付)

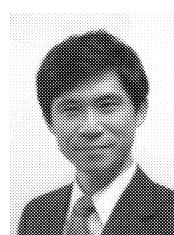
## 著者紹介

野嶋 琢也 (正会員)



2003年東京大学工学系研究科博士課程修了。同年航空宇宙技術研究所入所、現在宇宙航空研究開発機構に在籍。総合技術研究本部飛行システム技術開発センター研究員。主にヒューマンインタフェース、シミュレーション技術、運航安全の研究に従事。ヒューマンインタフェース学会、バーチャルリアリティ学会、ロボット学会、航空宇宙学会、IEEE 会員。博士(工学)。

船引 浩平



1991年東京大学工学系研究科修士課程修了。同年航空宇宙技術研究所入所、現在宇宙航空研究開発機構に在籍。総合技術研究本部飛行システム技術開発センター主任研究員。主にコックピットディスプレイ技術、航空ヒューマンファクタの研究に従事。航空宇宙学会会員。