

プロペラと再帰性投影技術による 飛行情報表示装置の研究

野嶋 琢也^{*1}

梶本 裕之^{*2}

A Study on a Flight Display using Retro-reflective Projection Technology and a Propeller

Takuya Nojima^{*1} and Hiroyuki Kajimoto^{*2}

Abstract --- The head up display (HUD) is becoming increasingly common in the aerospace field because it has many benefits such as enabling operations in poor visibility and improving flight safety. The HUD is a kind of augmented reality display that enables a pilot to observe the scene outside the cockpit while simultaneously viewing an artificial image of flight information. However, the HUD is too expensive and heavy for light airplanes. In this paper, we propose a new method to compose a simple HUD using Retro-reflective Projection Technology and a propeller. In this report, we also describe the developed system and preliminary experimental results.

Keywords: retro-reflective projection technology, head up display, augmented reality

1 はじめに

近年、オーグメンテッドリアリティ(AR)の技術は注目を集めており、医療[1][2][3]、エンターテイメント[4][5][6]など様々な分野において利用される事例が増加している。航空分野においても同様の状況となっており、例えば、航空機のワイヤリングガイドシステム[7]や、メンテナンス訓練システム[8]などといった形で利用が広がりつつある。また、近年大型の民間旅客機の間で普及しつつある Head Up Display (HUD) [9]も、AR システムの一つとして挙げることができよう。

一般的に航空機用の HUD は、CRT により生成される映像をレンズ系を用いて無限の遠方に投影し、コンバイナを利用して現実の映像と合成する、という構造になっている。これを利用する事により、パイロットはコックピットの外を監視しながら、同時に HUD 上に表示される計器やその他の情報を監視する事が可能となる。このため特に着陸時など外部監視要求の高まる状況下に於いては、HUD を利用する事により視線移動量を削減し、パイロットの作業負担を軽減する事が可能となる。さらに HUD 上にバーチャルな滑走路や水平線、そして機体姿勢情報などを描画する事により、視界不良時の安全性向上や、状況認識能力の向上、といった効果がある事が知られている。

このような利点がある一方で、価格や重量の問題から、HUD は小型機の間ではあまり広まっていないという問

題がある。しかし小型機の事故率は大型機の事故率と比較して高い事が知られており、小型機を対象とした安全性向上のための安価なシステムに対する要求は高いと考えられる。

そこで本研究では特に視線移動量の削減という観点に着目し、現実世界の景色と、各種飛行情報とを融合して表示可能な、小型機のための安価な AR システムの構築を目指す。

本章では航空機における HUD の得失と AR システムとの関連について述べた。第2章では飛行情報表示装置に対して要求されるべき事項について考察を加える。そして第3章では第2章において得られた条件に基づいて、近年注目を浴びている再帰性投影技術(RPT: Retro-reflective Projection Technology)[10]を利用したシステムについて提案を行い、第4章において提案概念に基づいた予備実験を実施する。そして第5章において実機を用いた実験とその結果について紹介し、第6章ではその結果について考察を加える。そして第7章において本論文の結論を述べる。

2 飛行情報表示装置に関する条件

本章では、AR を利用した飛行情報表示装置を構築するにあたり、システムに対して必要とされる条件について考察する。航空機において操縦に直接影響を及ぼす可能性のある AR システムを構築する場合、下記のような項目について考慮すべきであると考えられる。

- 現実世界映像の取得方法に関する問題
- バーチャル映像の投影距離に関する問題

以下ではこれらの点について、さらに詳細を述べる。

*1 宇宙航空研究開発機構

*2 電気通信大学

*1 Japan Aerospace Exploration Agency

*2 The University of Electro-Communications

2.1 現実世界映像の取得方法

ARにおける視覚提示技術に関して、現実世界情報の取り込み手法に着目した場合、大きく二つに分類する事が出来る。一つは現実世界の情報をカメラで一度取り込む Video-see-through 方式であり、一つは現実世界の情報を直接肉眼で観察できる Optical-see-through 方式である[11]。本節では両者の方式の得失について、航空機の操縦に直接影響を及ぼすシステムという観点から比較していく。

Video-see-through 方式とは、現実世界の映像情報と人工的な映像情報とを計算機等の内部で融合させる方式を指す。計算機内部で映像情報を融合しているため、現実世界の映像に対しても任意の修整を加えることが可能となり、現実の映像情報、および人工的な映像情報の間の時間的・空間的な不整合の修整(レジストレーション)が比較的容易になるという利点がある。その反面、現実世界をカメラ等で撮影する必要があり、その品質はカメラの能力により制限を受けるという問題もある。

一方 Optical-see-through 方式とは、現実世界の映像情報と人工的な映像情報を光学的に融合させる方式であり、基本的に HUD はこの方式に分類することができる。この方式の場合、現実世界の映像情報取得のためにはカメラは必要とされず、現実世界の映像と人工的な映像はハーフミラーや透過型液晶などの光学素子を利用して融合されている。この方式の場合、Video-see-through 方式とは異なり、現実世界の映像に対して任意の修整を加えることはできない。その反面、現実世界の映像を肉眼で直接観察しているため、その品質に関してデバイスによる制約をほとんど受けない利点がある。

レジストレーションの観点から両者を比較した場合、Video-see-through 方式には現実世界の映像に対して任意の映像操作が実行できるという、Optical-see-through 方式にはない利点がある。そこで仮に Video-see-through 方式でシステムを構築することを考えてみる。この場合パイロットは現実の世界はカメラを通じた映像でのみ認識し、それに基づいて操縦する、という形になる。この状態で仮にカメラが故障した場合、Video-see-through 方式では外界を視認する手段が無くなってしまったため、安全上問題が生じる恐れがある。技術的には、例えば複数台のカメラを利用して故障確率を下げる、あるいは外界が視認できない時間を短くなるような提示系を構築する、といった対策を講じることは可能である。しかし着陸時などパイロットに余裕のない状態で上記のような故障が生じた場合、状況によっては安全性に影響を及ぼす可能性があることから、その適用には十分慎重であるべきである。また、一般的にはカメラの明るさに対するダイナミックレンジは人間のそれより狭く、視野角も決して広くはない。加えて、十分な視野角と解像度を有する提示系の構築まで含めて考えた場

合、システム全体の複雑さ、重量、コストは大きな問題になると考えられる。

これに対して Optical-see-through 方式の場合、現実世界の映像に対して任意の操作を加える事は出来ないため、レジストレーションの観点では自由度が低くなると言える。その一方で現実世界の映像を直接肉眼で観察する事が可能であり、カメラは必須の構成要素ではない。その分システムをシンプルに構成する事が可能となり、故障確率や重量、消費電力を低減させる事が可能になると考えられる。本論文では特にこの点を重視して、Optical-see-through 方式に基づいたシステムの構築を目指すものとする。

2.2 映像の投影距離

パイロットは操縦時、コックピットの窓を通してほぼ無限の遠方を見ている。同時に従来の計器も監視しているが、それらはコックピットの窓の直下に存在し、パイロットからの距離はせいぜい 50[cm]~1[m]程度である。このことはパイロットに対して、視線移動量の増加、焦点調節の必要という形で負荷を与える結果となっていた。

このような問題に対して航空機用 HUD を利用した場合、コックピットの窓を通して外界を監視すると同時に、HUD 上に表示される計器を監視する事が可能であることから、視線移動量の削減が可能となっている。また、航空機用 HUD の場合は一般に、その映像投影面が無限の遠方に位置している。その結果、現実世界の映像と人工的な映像との間で焦点調節をせずに、同時に視認する事が可能となっている。

しかし投影面を無限遠とするための光学系が複雑であることが、システム全体の価格・重量を押し上げる要因の一つとなっていた。そのため価格低減等を目的として、映像投影面を有限距離とした HUD も研究されている[12]。この場合、焦点調節の負荷軽減については難しいものの、外界を見ながら同時に飛行情報を視認する事は可能であることから、視線移動量の削減は可能であると考えられる。特に着陸時には滑走路の探索や自機の姿勢の修正のため、コックピット外部の監視要求が高くなり、コックピット内外の視線移動が大きな負荷となる事が知られている。このような状況において HUD を用いる事で、視線移動量を削減する事が可能となり、パイロットの負荷が軽減されるものと考えられる。そこで本研究では特に視線移動量の削減という効果に着目し、コストに大きく影響する無限遠への映像投影には拘らないものとした。

以上の点を考慮して次章では、再帰性投影技術を用いた飛行情報表示装置について提案する。

3 再帰性投影技術を用いた飛行情報表示装置

ARにおける視覚提示技術としてはこれまで様々な手

法が研究されてきたが[11][13], 近年は特に再帰性投影技術(RPT: Retro-reflective Projection Technology) [10]に対して注目が集まっている. RPT では原理的に, 再帰性反射材と同軸光学系を組み合わせる事により, スクリーン距離の差に起因する映像の輝度ムラがほとんど無く, 対象形状に関わらずゆがみのない映像を表示することが可能となっている[10]. 今回我々は特にこの点に注目した.

航空機のcockpit正面の窓は, 一般的に機体形状に合わせて曲面形状を有していることが多い. そこで例えば, cockpitの窓に再帰性反射材を貼付, もしくは塗布することを考える. この上に映像を投影した場合, RPT の原理上, 曲面形状によらず, ゆがみのない映像を得ることができるものと思われる. さらに, 投影する映像としてcockpitの外の映像, ならびに飛行情報を融合した映像を利用することにより, 視線移動量の削減, 状況認識能力の向上といった利点を得ることができるものと考えられる.

しかし, 上記の手法には大きな問題が存在する. そもそも本研究では, カメラの明るさに対するダイナミックレンジや故障時の安全性を鑑みて, Optical-see-through方式を目指すものとしている. 上記の手法を利用した場合, 再帰性反射材そのものが存在する領域に関しては, 現実世界と融合するためにカメラ映像が必要であり, Optical-see-through が成立していない. どんなに小さい領域であっても再帰性反射材の存在する領域そのものは背景を透過しないため, 故障時にはその領域が現実世界の映像を遮る結果となり, 安全性に問題が生じるおそれがある. そこで我々は, cockpitの窓ではなくプロペラに着目した.

小型機にも単発機, 双発機などいくつか種類が存在するが, 運航時の経済性という観点では単発機の方が有利であり, 実際に広く使われている. そして単発機の場合, そのほとんどはcockpit前面にプロペラが搭載されており, 推進力を得る方式が採用されている. そしてプロペラは物理的にはcockpit前面に存在しているにも関わらず, 飛行中は高速回転しているため肉眼でその存在を視認することはできない. そこで我々は, プロペラの裏面に再帰性反射機能をもたせることにより, RPTのスクリーンとして実装する方法を提案する.

プロペラの裏面に再帰性反射機能を実装する上では, プロペラの裏面に対してスクリーン材を貼付する, あるいは塗布するという手法が考えられる. この時, 再帰性反射材そのものはプロペラとともに高速回転するため, 飛行中にその存在を視認することは難しい. つまり高速回転させることにより, 再帰性反射材そのものをバーチャルに透明化することが可能となるのである. そしてこの再帰性反射材表面上に映像を投影し, 視認可能であるならば, 航空機における AR システムとして利用可能で

あると言えよう. 映像の視認性については次章の予備実験に譲り, 本性では更に, プロペラに対して RPT を適用することの利点について考察を進める.

プロペラを映像面として利用することを考えた場合, 映像の表示手法としては, RPTではなく, 例えばLEDを利用するといった方法も考えられる. しかしLEDの場合, プロペラに対して何らかの方法でLEDを物理的に実装する必要がある. 仮に表面に配置するのであれば, LED自体の物理的形状によりプロペラの形状が変化するため, 空力的な性能の影響を及ぼす可能性がある. あるいは内部に実装することを考えた場合, プロペラ自体を製作し直す必要が生じてしまう. 一方, RPTを利用した場合, 原理的に対象形状によらずに輝度ムラやゆがみのない映像が得られることから, プロペラの形状, 角度に依存せずゆがみのない映像が視認可能であると考えられることから, プロペラ面に映像を投影する手段としてはより相応しいと考えられる.

続いて次章では, 映像の視認に関して検証実験を実施する.

4 予備実験

一般に高速回転体に何らかの物体を取り付ける場合, 重量バランスなどを考慮して取り付けないと危険な場合がある. そこで本章では簡単に, かつ安全に利用可能な高速回転体としてまず扇風機に着目した. そして実際に飛行機のプロペラを使用して実験する前に, 再帰性反射材からなる高速回転体上に映像が投影可能であり, 視認可能であるか, という点について扇風機を利用して検証するものとする. 実験には山善社製の LT-CM300を利用した. この扇風機は半径 30cmの羽根 5 枚で構成されており, 各羽根の表面上にレフライト社製再帰性反射シート(シルバーグレー, ブロードタイプ, 8301 番)を 2.5x9[cm]のサイズに切ったものを貼付している(図 1). なお, 本実験で利用した再帰性反射シートには接着性がないことから, 今回は事務用両面テープを用いて, 図 1 のように各羽根の中心部分に固定している.

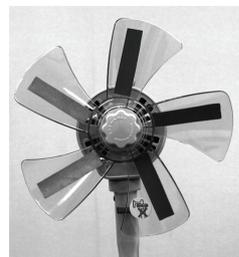


図 1 再帰性反射シートを貼付した扇風機
Fig.1 Electric fan with retro-reflective sheets

この状態で扇風機を動作させ, Epson 社製の液晶プロジェクタ(EMP-1810)を用いて, 図 2 に示すような 2 種類の映像を回転面に対して投影した. プロジェクタの輝

度は 3500[lm]となっており、プロジェクタと扇風機との間の距離はおよそ 2[m]となっている。

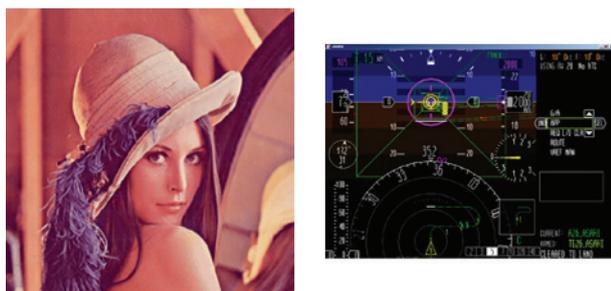


図 2 実験に用いた投影画像

(左:標準画像, 右:トンネル型飛行計器表示画面)

Fig.2 Projected images (left: a standard image, right: a tunnel-in-the-sky instrument image)

本実験では投影された映像状態を判断するため、まず一般的な標準画像(図 2 左)を投影した。次いで航空計器としての利用可能性を検証するため、現在 JAXA で開発中のトンネル型飛行計器[14]の画面(図 2 右)を投影している。なお、本実験では完全な同軸光学系は構築せず、カメラとプロジェクタを近接させる事により同軸光学系を近似する事で映像の確認を行っている。つまりプロジェクタから扇風機の回転面に対して直接映像を投影し、そしてカメラをプロジェクタの映像投影部近傍に配置して撮影している。その結果を図 3 に示す。

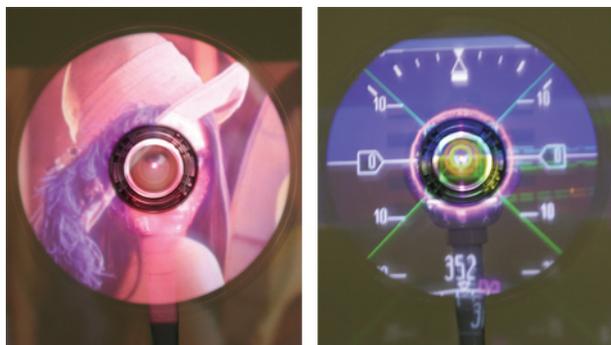


図 3 再帰性反射シート付扇風機上に投影された映像

Fig.3 Images projected onto the electric fan using RPT

再帰性反射シートを貼付した状態で回転させた扇風機には、特段の振動も生じることなく、通常と同様に動作する事が確認できた。また、本実験は夜間、室内の照明を消灯した状態で実施しているが、このような照明条件の下であれば、少なくとも図 3 にあるように高い品質の映像が視認可能である事が確認できた。図 3 右のように、姿勢計の表示や数値も問題なく読み取る事が可能であり、航空機への適用可能性を示唆する結果となった。今回の結果を踏まえて次章では、実際に実機のプロペラを投影面とした実験を実施したのでそれについて報告する。

5 実機プロペラへの投影実験

5.1 実験準備

今回の実験では、JAXA 保有の小型単発機、ビーチ・エアクラフト・コーポレーション製の A36(ボナンザ)を利用している(図 4)。



図 4 実験に用いた機体

Fig.4 Aircraft used in the experiment

5.1.1 プロペラへの再帰性反射機能実装方法

本節ではプロペラに再帰性反射機能を実装するための方法について考察を加える。プロペラに再帰性反射機能を実装するためには、プロペラに再帰性反射機能を有する塗料を塗布するか、同様の機能を有するシート状のものを貼付する、という二種類の方法が考えられる。しかし第 4 章冒頭部でも述べたように、高速回転体に物体を搭載・装着する場合には十分注意しなければならない。遠心力により貼付されたシートがはじき飛ばされる、あるいは重量バランスが崩れる事で異常振動が発生し、機器の破壊や、周囲の人間の安全を脅かす、といった危険性が想定されるためである。特にプロペラの場合、飛行中にそのような状況が生じると飛行に支障を来す事から、許可なく改変したプロペラで飛行を実施する事は認められていない。

現時点ではプロペラへの再帰性反射機能の実装は、どちらの方法を採用したとしても、飛行に耐えるだけの安全性証明がなされていない。そのため、このままでは飛行に供する事は難しい。しかし、まずは提案概念の有効性を検証する事が必要である事から、本論文では実験環境を地上に限定し、提案概念の有効性に関する検証を行う事を優先することとした。そして改めて飛行を想定した詳細かつ厳密な安全性の検証に移行するものとする。ただし、実際に飛行に供されているプロペラには、金属製の銘板が取り付けられている、あるいは各種の塗装がされているという事実が示すように、技術的にはプロペラにシート状のものを貼付、あるいは塗装の上での運用は可能であり、飛行に足るだけの安全性証明も可能であると考えられる。

続いて、実際に再帰性反射機能を実装するための手法について考察を加える。本論文では地上での実験を前提としており、安全が確保されていればプロペラの改変に対する制限は緩い。しかし、実験後には飛行が予定されているため、飛行可能な状態に復旧で

きる事が必須の条件となる。

仮に塗料を利用して再帰性反射機能を実装する場合、シート状のものよりもプロペラ表面形状や重量バランスに対する影響は小さく、実験時の安全性という観点で優れていると考えられる。一方、プロペラにはその種類に応じて、利用可能な塗料がプロペラメーカー等により指定されており、原則としてそれ以外のものを塗布して飛行する事は認められていない。そのため、実験後の飛行のためには溶剤等で再帰性反射塗料を除去する必要がある。しかし現状では溶剤のプロペラ本体に対する影響が不明であり、完全な除去手法が確立していないという問題がある。一方シート状の再帰性反射材を貼付する手法を利用していた場合、塗料形式のものとは比べると、プロペラ表面形状に対する影響は大きいものと思われる。また、重量バランスについては慎重に対処する必要がある反面、簡単な試験を通じて確認したところ、後述の実験で利用するシートは容易に除去可能であった。

そこで本実験では、実験後の復旧の確実性を考慮して、重量バランスに配慮した上でシート状の再帰性反射材を貼付する方式を採用するものとした。そして今回の実験は実機を用いての映像視認性の確認が主目的である事から、飛行は実施せず、機体を地上に固定した状態でプロペラを回転させるものとする。

5.1.2 実験システム構築

第4章で利用したレフライト社製の再帰性反射シートの場合、布製のため若干重量がある事と、接着性がないため強力に貼付するためには手間がかかる事から、今回は新たに 3M 社製の再帰性反射シート(Scotchlite 680-85, ブラック)を利用することとした。本実験では、3M 社製のものがレフライト社製のものと比較して軽量である点、シール形式になっているため、プロペラ背面への貼付が容易であるという点を重視し、採用している。実験に際しては図 5 にあるように、再帰性反射シートをプロペラ形状に裁断し、プロペラの裏側ほぼ全面を覆うように貼付した



図 5 再帰性反射シート貼付状態

Fig.5 Retro-reflective sheet applied to a blade

図 5 のプロペラ中、白く光っている領域が、再帰性反射シートが貼付された領域である。実験ではプロペラ間

の重量バランスを考慮して、三枚のプロペラの羽根の全てに再帰性反射シートを貼付している。

そしてこのプロペラに対して、BenQ 社製プロジェクタ (MP770, 3200[lm])を用いて映像を投影した結果を図 6 に示す。なお、この時プロジェクタはパイロットの右眼のすぐ横に、光軸がプロペラの方向を向くようにして設置してある。これにより第4章における実験と同様、同軸光学系の近似を実現している。これ以降の撮影画像はすべて、パイロットの右眼位置にカメラをおいて撮影したものである。図 6 ではプロペラに対して投影した映像の色が分解して表示されてしまっている様子が示されている。図 6 左の画像において特に顕著であるが、女性の顔中心を挟んで右側と左側の領域で色が異なっている。さらに、背景の建物右側の壁付近と女性の顔右側領域とでも色が異なっている。

ここで用いたプロジェクタは単板の DMD(Digital Micromirror Device)方式のものであり、フルカラーの画像を投影するために 4 色のカラーホイール(赤, 緑, 青, 黄)を利用している。そのため、各瞬間で投影画像の色が異なっている。一方、プロペラの方は 1000 ~ 2500[RPM]の幅で回転しており、両者の間は同期がとられていない。そのため、プロペラの羽根が 1 回転する間に数回投影画像の色が変わっており、表示色と表示位置(プロペラ位置)が毎回変化するため、各色が分解されて表示されてしまったものと考えられる。

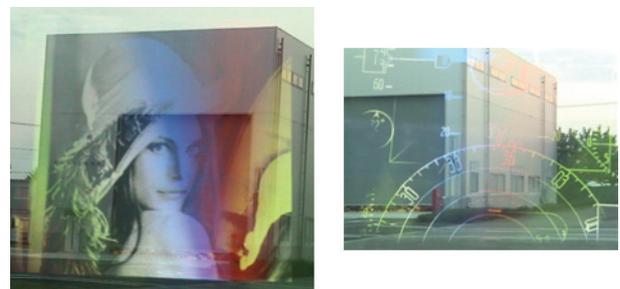


図 6 単板の DMD プロジェクタを用いた場合の投影状態

Fig.6 Projected images using a single chip DMD projector

この結果を踏まえて、本実験では、あらためて予備実験で使用した Epson 社製の液晶プロジェクタ (EMP-1810)を使用するものとした。当該プロジェクタは 3LCD 方式であり、カラーホイールは利用していない。つまり各瞬間において常にフルカラーの映像が表示されている事から、前述のような色が分解されて表示されるような現象は生じないものと考えられる。なお、実験時には前述の実験と同様、右眼の横にプロジェクタを設置する事で同軸光学系の近似を行っている。

続いて、RPT によりプロペラ面上に表示される映像の視認性と、環境条件、ならびにプロペラ回転数・ピッチ角等との関係について、実験を通じて検証を行う。

5.2 実験条件

本実験は全て屋外で実施した。その際、実際の利用状況を想定して、日中の晴天・曇天時のもとの映像の投影実験を実施している。また、同時に映像投影時にプロペラの回転数およびピッチ角を変化させて、その視認性を確認した。なお、プロペラの回転数はアイドル状態の1000[RPM]から、巡航状態の2500[RPM]の間で変化させている

5.3 実験結果

実際に日中(晴天)に屋外で投影実験を実施したところ、映像を視認する事が出来なかった。以下に掲載する実験結果は全て曇天の環境で実施したものである。曇天の環境下であれば、図7ならびに図8に示すように、良好な映像を確認することができた。図7及び図8は共に、左側が投影状態を示す画像であり、パイロット視点からの映像となっている。そしてそれぞれ右下にその一部を拡大した画像を掲載している。特に図7については、投影画像と地面上に実際に描かれている線との関係についての模式図を右上に掲載している。

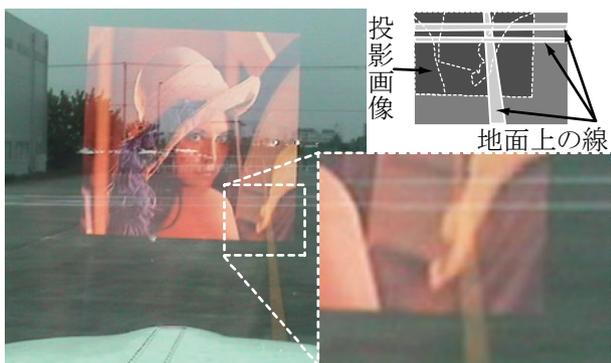


図7 標準画像投影状態

Fig.7 Displayed image (standard image)

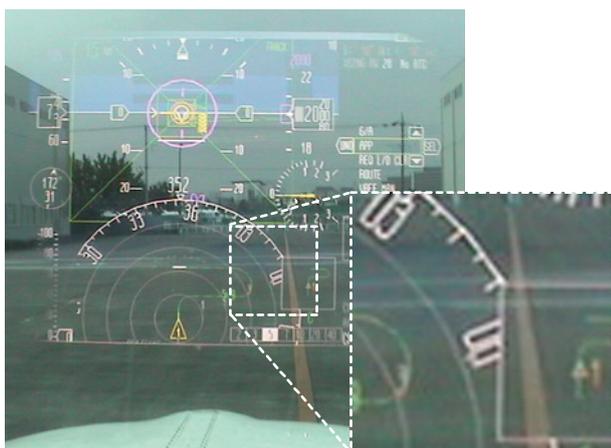


図8 トンネル型飛行計器表示画面投影状態

Fig.8 Displayed image (tunnel-in-the-sky)

この結果より、RPTにより投影された映像を通して背景の現実映像も同時に確認することが可能であることが

確認できた。しかし図8では、RPTにより投影された映像と背景の現実世界の映像とが混ざり合い、一瞬で映像の内容を判断するには分かりにくい状態となっている。今回投影した画面はそもそもHUDを想定したのではないため、このような問題が生じたものと考えられる。今後は今回提案する方式にふさわしい映像の表示内容を開発する必要があると考えられる。

今回実験に使用した機体では、ピッチ角変化と同期して回転数が変化する機能が実装されている。そのため、両者の変化に対して独立に映像の視認性を確認することはできなかったものの、プロペラの回転数並びにピッチ角を変化させた場合でも、映像の視認を妨げるような変化は生じないことを確認した。ただし、回転数変化に応じて映像のちらつき度合いは変化している。

次章では今回の実験結果をふまえ、提案する方式に関してさらに考察を加える。

6 考察

本章ではプロペラに映像を投影した場合の現実の映像、つまり外部光の透過率、ならびに映像の視野角について考察する。また、再帰性反射材の反射特性とプロジェクタの設置条件についても考察を加える。

6.1 外部光透過率

今回はプロペラの裏面に再帰性反射シートを貼付して映像を投影している。ある瞬間にプロペラの再帰性反射材によって反射される光と、プロペラの回転面を通過する光の比率は、プロペラの大きさとプロペラに貼付した再帰性反射シートの面積に依存する。これを外部光透過率として規定する。より厳密に定義するならば、「1.0から実際の再帰性反射材の面積を、再帰性反射材が通過する領域の面積で割ったものを引いた値」となる。図9のようなプロペラと回転面を定義した時透過率 T_r は式1により定義される。

$$T_r = 1 - S_1 / S_2 \quad \text{式 1}$$

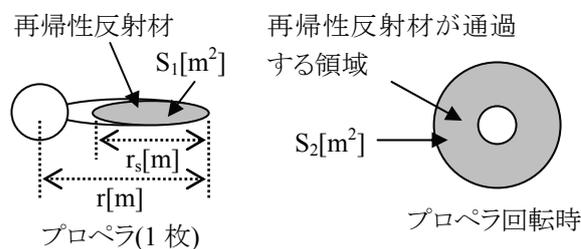


図9 プロペラの羽根と再帰性反射シートとの関係

Fig.9 Relationship between a blade and retro-reflective sheet

今回プロペラに貼付した再帰性反射シートの長軸方向の長さ r_s はおよそ $0.72[m]$ となっており、その面積 S_1 は約 $8.7 \times 10^{-2} [m^2]$ となっている。そしてプロペラ半径 r はおよそ $1.05[m]$ であることから、 $S_2 = \pi \cdot (r^2 - r_s^2)$ より、再

帰性反射材が通過する領域の面積 S_2 は、およそ $2.59[\text{m}^2]$ となる。よって外部光透過率は $1 - 8.7 \times 10^{-2} \times 3 / 2.59 \cong 0.90$ となる。つまり外部光の9割がプロペラを通過する計算となっている。それに対して航空機用の HUD の場合、一般的に外部光の7割程度が透過する使用となっていることから、既存の HUD よりも高い外部光透過率を実現している。今回提案システムにおける外部光透過率について、考察の結果を表 1 にまとめる。

表1 外部光透過率
Table 1 Transparent ratio

	既存の HUD	今回の実験システムにおける値
外部光透過率	70%程度	90%程度

この透過率の観点で両者を比較した場合、RPT を用いた提案手法の方が外部光透過率が高い分、現実世界の視認性に於いては優れていると言える。その反面、外部光透過率の高さに比較してプロジェクタからの光量が十分高くないため、相対的に映像が見えづらい状況となってしまっているという問題がある。

ここでその対策として、より光量の強い投影系を利用する事を考える。今回実験に利用したプロジェクタの明るさは $3500[\text{lm}]$ であり、そもそも晴天時屋外での利用は困難であると考えられる。しかし高輝度プロジェクタを利用した場合、一般に高輝度になるほど重量・サイズ・発熱量が増大するため、コックピット内部での配置が困難になると考えられる。例えば現在実験で利用しているプロジェクタ(EMP-1810)の場合、重量が 2.9kg 、サイズが $345 \times 257 \times 86[\text{mm}]$ と比較的小型軽量であり、地上実験の限りに於いては、コックピット内部での配置は大きな問題とはなっていない。しかし高輝度プロジェクタ(例えば Sanyo 社製の LP-XF47 であれば、 $15000[\text{lm}]$ 、 $36.5[\text{kg}]$ 、 $581 \times 816 \times 252[\text{mm}]$) の場合には、特に小型機のコックピットでは配置が困難になると考えられる。

また、小型軽量のプロジェクタであっても、実際に飛行する事を考えた場合には、そのまま頭部の近傍に配置する事は、パイロットの操縦操作に対して問題となる可能性があり得る。そのような場合には Head Mounted Projector(HMP) model-2[15]のように、光源を頭部から分離するなど、パイロット頭部近傍に配置する装置の小型軽量化を図る必要があると考えられる。

今回は曇天時に実験を行い、良好な映像を視認する事が出来た。このことを考慮するならば、今回実験で利用したようなプロジェクタであっても、夜間や視界不良時など、環境光がそれほど明るくない状況下での利用を前提とするならば、十分有用であると考えられる。ただし、視界不良時であっても、雨天や霧が発生している状況の場合、空気中の水滴による異常反射や映像擾乱が発生する可能性が存在する。また、静止している場合と

飛行している場合とでは、水滴の状態が異なると考えられる事から、映像擾乱の度合いも変わってくると考えられる。今後はこの点について、地上実験ならびに飛行実験を通じて検証を行っていく必要があるものと考えられる。一方、晴天時であっても、プロペラに再帰性反射材が装備されている場合、太陽と機体の位置関係によっては再帰性反射材による太陽光反射が問題になる可能性が存在する。この点についても検証していく必要がある。

6.2 視野角

文献[16]によると、日本における単発機で使用しているプロペラの直径は $1[\text{m}]$ 程度のものが大半を占めていることがわかる。また、操縦者視点位置からプロペラ面までの距離については正確な値は記載されていないものの、三面図から代表的な機種について測定してみると、 $2[\text{m}]$ 強のものがその大半を占めている事が分かる。今回実験で使用したボナンザに関しても、同様の数値となっている。ここではこれらの値を代表値として、単眼に対して同軸光学系ないしはその近似が成立している状態での、本方式で提示可能な視野角について計算する。

なお、今回提案する方式で最大の視野角を得るためには、画像の形状に拘らずにプロペラ面全体に投影すればよい。しかし通常、プロジェクタは提示範囲を広げると映像は暗くなってしまう。そこで本章では、投影映像の明るさと視野角のトレードオフの一つの基準として、プロペラ回転面のうち、視認可能な領域に於いて最大となるような、3対4の矩形画像を投影するものとした。また、従来の HUD 等との比較を容易にするために、プロペラ上には一般的なディスプレイで採用されている3対4の画面を投影するものとした。採用するものとした。

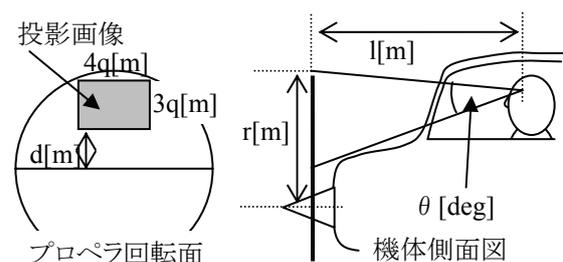


図 10 プロペラと視野角

Fig.10 A propeller and the field of view

基本的に機体によって遮蔽されるため、パイロットは回転するプロペラの一部の領域しか見る事が出来ない。ここで図 10 にあるように、プロペラ回転中心上方 $d[\text{m}]$ より上側が、映像の投影可能領域であるとする。そこでプロペラ回転中心より $d[\text{m}]$ 上方の領域において、プロペラが描く円に内接する最大の長方形の大きさを求める事により、およその視野角 $\theta [\text{deg}]$ を計算する。ただし、こ

の長方形は縦横の比率が3対4であるとする。さらに図10にあるように、 $l[m]$ をパイロット視点位置からプロペラ面までの距離とし、プロジェクタ映像のプロペラ回転面上の縦横の大きさを $3q[m]$ ならびに $4q[m]$ とする。この時、プロペラ回転半径 r と d, q の間には式2の関係

$$r^2 = (2q)^2 + (3q+d)^2 \quad \text{式 2}$$

が成立する。さらに、プロペラ回転半径 r と d の間に $d=p \cdot r$ の関係が成立するとすれば、この時の q は式3

$$q = r/13 \cdot (\sqrt{13-4p^2} - 3p) \quad \text{式 3}$$

のようになる。そして縦横の視野角をそれぞれ θ_V ならびに θ_H とすると、両者は式4及び式5により得られる。

$$\theta_V = 2 \cdot \arctan(1.5q/l) \quad \text{式 4}$$

$$\theta_H = 2 \cdot \arctan(2q/l) \quad \text{式 5}$$

文献[16]をもとに実際のプロペラと、プロペラ下面の死角の関係を考慮すると、 p はおおよそ0.1~0.5程度の値が現実的であると考えられる。そしてプロペラの半径 r を1[m]とし、パイロットからプロペラ回転面までの距離 l を2[m]とする。この時、縦横の視野角はそれぞれ $13 < \theta_V < 22$ [deg]および $17 < \theta_H < 28$ [deg]となる。既存の代表的なHUDの縦横の視野角が、それぞれ22~28[deg]ならびに28~34[deg]である[9]ことを考えると、若干低い値となっているものの、実用に耐えうる視野角が実現可能であると言える。

なお、今回実験で使用した機体の場合、プロペラの半径は1.05[m]であり、パイロット視点位置からプロペラ面までがおおよそ2[m]となっている。また、プロペラ半径に対する死角の長さの割合 p はおおよそ0.3となっていることから、縦横の視野角がそれぞれ $\theta_V = 18.3$ [deg]、 $\theta_H = 24.2$ [deg]の映像が提示できている計算となる。ここでの考察の結果を表2にまとめる。

表2 視野角の比較

Table 2 Field of View Comparison

	既存の HUD	RPT を用いた提案方式 (今回の実験システムにおける値)
θ_V	22~28[deg]	13~22[deg](18.3[deg])
θ_H	28~34[deg]	17~28[deg](24.2[deg])

6.3 再帰性反射材の反射特性とプロジェクタ配置

今回の実験では、プロジェクタを眼のすぐ横に配置する事で同軸光学系を近似し、映像の投影を行っていた。この条件で実際に映像を観察した結果、歪みや輝度ムラのない、均一な映像が確認できている事から、視認可能な範囲に於いてはこの近似は妥当なものであったと考えられる。ここでは特に映像の輝度の観点から、どの程度の範囲で近似が成立するかという点について、考察を加える。

一般的に再帰性反射材は図11右にあるような、 θ に依存する反射特性を有している。そして厳密な同軸光

学系では、図11左において $\theta=0$ [deg]となることから、再帰性反射材の最大反射率となる領域を利用する事が可能となる。しかし今回は近似を行っているため、 $\theta \neq 0$ [deg]であり、観察者は最大輝度の映像を視認できていない事となる。また、プロジェクタを観察者から離して θ を大きくするほどに映像が暗くなり、視認が難しくなる。実験ではプロジェクタを右眼のすぐ横に配置しており、プロジェクタ光軸中心と右眼の間の距離はおおよそ15[cm]となっている。眼とスクリーン面の間の距離が2[m]である事を考えると、 $\theta=4.28^\circ$ に相当する。今回実験で使用した反射材の測定を行ったところ、 $\theta=4$ [deg]になると、反射率が $\theta=0$ [deg]の時と比較して50%弱に減少していることが判明した。また、左眼の場合についても同様に、光軸中心からの距離はおおよそ21.5[cm]となることから、 $\theta=6.13$ [deg]となる。この角度における反射率を測定したところ、 $\theta=6$ [deg]で40%弱となるような特性を有している事が分かった。両眼での映像の視認性に大きな問題がなかった事を考慮するならば、今回の実験環境においては、 $\theta=6$ [deg]程度(プロジェクタ光軸中心と眼球との間の距離では20[cm]程度)までであれば離すことが可能であると言える。

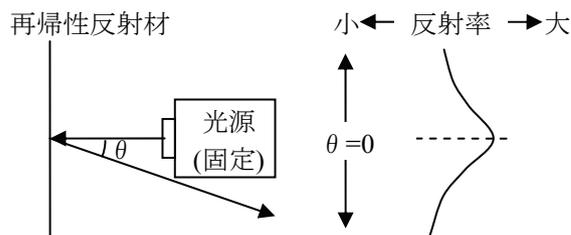


図11 再帰性反射材の反射特性(例)

Fig.11 Characteristic of reflection of retro-reflective material (example)

しかし例えば、右眼とプロジェクタ光軸との間の θ が極端に大きい場合には、右眼では映像を確認できるが、左眼では確認できないという状態が発生しうる。この問題に対しては、 θ を大きくとらない、プロジェクタを観察者の横ではなく上部、つまりコックピット天井に固定する、といった方法が有効であると考えられる。ただし、プロジェクタを観察者の上部に配置した場合でも、 θ が極端に大きい場合には画像が暗くなり、航空計器として利用するには難しい状況が発生する恐れがある。今回実施した実験と同等の環境であれば、実験結果より先の考察と同様、観察者の上方20[cm]程度までが一つの目安となると考えられる。ただし夜間でのみの使用を前提とする場合、周囲環境が暗いために映像の視認性が向上する事から、この間隔はより広くとる事が可能であると考えられる。

7 結論

今回我々は、小型単発機のためのRPTを利用した飛行情報表示装置について提案を行った。航空機のプロペラの裏面をRPTの映像投影面とすることで、撮像系を使用せずに再帰性反射材そのものを光学的に透明にする、Optical-see-through方式のRPTを提案し、実際に航空機を用いて映像の視認実験を実施した。実験の結果、提案方式を利用することにより、現実世界にバーチャルな情報を重畳して表示・視認できることを確認した。

また、今回提案する方式に関して、外部光透過率、視野角などを、日本に存在する小型単発機のサイズに関する情報を元に考察を行った。一般的な小型単発機において縦横の視野角が、それぞれ22~28[deg]ならびに28~34[deg]という、ある程度実用的な視野角で映像を投影することが可能であることを確認した。しかし外部光透過率は90%に達しており、現時点ではバーチャルな映像を晴天日中の環境下で視認することが難しい。そのため、特に夜間や悪天候時での有効性が高いと考えられる。例えば、夜間飛行を支援するために赤外線映像を投影する、悪天候時に飛行経路、地形情報などを表示するなどといった利用法が考えられる。

今後は、今回提案する手法において最適な情報表示手法を構築する予定である。同時にプロペラの裏面に再帰性反射機能を実装するための最適な手法を検討し、安全性を検証した上で実際に様々な環境下において飛行実験を実施し、より詳細に実用性について検証を行う予定である。

参考文献

- [1] H. Fuchs, et al.: "Augmented Reality Visualization for Laparoscopic Surgery", Proceedings of MICCAI, pp. 934-943, 1998.
- [2] H. Iseki, et al.: "Clinical Application of Augmented Reality in Neurosurgical Field", Computer Graphics International 2003, IEEE Computer Society, pp.44-51, 2003.
- [3] J. Fischer, et al.: "Utilizing Image Guided Surgery for User Interaction in Medical Augmented Reality", Technical Report WSI-2005-04, WSI/GRIS, March 2005.
- [4] M. Billinghurst, et al.: "The MagicBook-Moving Seamlessly between Reality and Virtuality", IEEE Computer Graphics and Applications, vol.21, no.3, pp.6-8, 2001.
- [5] A. D. Cheok, et al.: "Human Pacman: a sensing-based mobile entertainment system with ubiquitous computing and tangible interaction", Proceedings of the 2nd workshop on Network and system support for games, pp.106-117, 2003.
- [6] W. Piekarski and B. Thomas: "ARQuake: the outdoor augmented reality gaming system", Communications of the ACM, vol.45, no.1, pp.36-38, 2002.
- [7] D. Sims: "New realities in aircraft design and

manufacture", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 14, no. 2, p.91, 1994.

- [8] T. Haritos and N. D. Macchiarella: "A mobile application of augmented reality for aerospace maintenance training", a proceeding of Digital Avionics Systems Conference, Vol.1, pp. 5.B.3.1-5.B.3.9, 2005.
- [9] C.R.Spitzer: "The Avionics Handbook", CRC Press, 2000.
- [10] 稲見, 川上, 柳田, 前田, 館: "現実感融合の研究(第1報) - シームレスな現実感融合手法の提案と試験の実装 -", 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.281-284, 1998.
- [11] R. T. Azuma: "A Survey of Augmented Reality", Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 6, no. 4, pp. 355-385, 1997.
- [12] D. P. Burch, et al.: "Enhanced Head-up Display for General Aviation Aircraft", proceedings of 21st Digital Avionics Conference, 11.C.6.1-11.C.6.11, 2002.
- [13] O. Blumber and R. Raskar: "Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds", A K Peters Ltd., 2005.
- [14] K. Funabiki: "Design of Tunnel-in-the-sky Display and Curved Trajectory", proceedings of 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS2004-8.4.4, 2004.
- [15] 稲見, 川上, 関口, 高幣, 柳田, 遠藤, 小林, 上田, 前田, 満洲, 館: "頭部搭載型プロジェクタの研究(第2報) - 試験の実装 -", 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, pp.59-62, 1999.
- [16] "日本航空機全集 2007", 鳳文書林, 2007.

(2007年12月11日)

[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。研究開発本部飛行技術研究センター研究員。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。バーチャルリアリティ学会、ヒューマンインタフェース学会、ロボット学会、航空宇宙学会、IEEE会員。博士(工学)

梶本 裕之 (正会員)



1998年3月東京大学工学部計数工学科卒業。2003年3月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学。博士(情報理工学) 2001年4月日本学術振興会特別研究員(DC1)。2003年4月東京大学助手。2006年9月電気通信大学助教授。2007年4月同准教授。触覚ディスプレイ、触覚センサ、バーチャルリアリティシステムなどの研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会各会員。