

NAIST-IS-MT0751118

修士論文

複合現実感技術を用いた 飛行船操縦支援システムの構築

水戸 博之

2009年3月17日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

水戸 博之

審査委員：

横矢 直和 教授 (主指導教員)

杉本 謙二 教授 (副指導教員)

山澤 一誠 准教授 (副指導教員)

複合現実感技術を用いた 飛行船操縦支援システムの構築*

水戸 博之

内容梗概

近年、飛行船に関する研究が行われ、教育やエンターテインメント、趣味等の様々な用途において、無人飛行船が身近に利用されるようになった。しかし、無人飛行船を地上から見上げて操作するのは直感的でないため、意図した通りに操縦するのは不慣れなユーザには難しく、操縦者が直接視認できない遠隔地を飛行させる際には、飛行船の状況を把握させるためのカメラ画像等が必要となる。そこで本研究では、無人飛行船の操縦に不慣れなユーザを対象として、その操作を複合現実感技術によって視覚的に支援するシステムを構築することを目的とする。本システムは飛行船上のPCと俯瞰画像撮影用カメラ、そして地上のユーザ側のPCから構成され、双方のPCではネットワークを介してデータの送受信を行う。飛行船上のPCではカメラ画像と飛行船の位置・姿勢情報を取得・送信し、ユーザ側のPCでは受信した情報を元に操縦支援情報を生成し、ユーザへ提示する。主な操縦支援情報としては、カメラ画像をそのまま提示するだけでなく、地図や現実環境のCGモデル等の仮想空間内にカメラ画像を重畳表示し、その空間内に現在の飛行船の状態を示すCGモデルを描画する。これにより、ユーザは飛行船やその周囲の状況を直感的に把握して容易に操縦できるとともに、遠隔地の飛行船を操縦することが可能となる。本研究では屋内環境においてシステムを構築し、飛行船の操縦未経験者を対象に被験者実験を行い、提案システムの有効性を確認する。

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0751118, 2009年3月17日.

キーワード

無人飛行船，操縦支援，複合現実感，俯瞰画像，重畳表示

Support System for Controlling Unmanned Airship Using Mixed Reality*

Hiroyuki Mito

Abstract

Recently, a number of researches on airships have been conducted. Unmanned airships are expected to be used in various applications such as education, entertainments, and hobbies. However, it is not intuitive to control an airship just looking at it from the ground. Therefore, it is difficult for an inexperienced user to control it as he intends. In addition, a user needs to get more information such as camera images when the airship flies out of the immediate sight of the user. This study aims at developing a support system which makes an inexperienced user to control the unmanned airship intuitively with mixed reality. The system is composed of a computer with a camera on the airship, a computer at the user's side, and the network connecting between the computers. The computer on the airship sends camera images and the position-and-orientation of the airship. The user-side computer receives them, generates control support information, and presents it to the user. The support information includes captured images overlaid on virtual spaces such as map or CG model of real environment, and a CG model of the airship which represents the condition of the airship. The system helps the user to understand the circumstances of the airship intuitively and to control the airship easily. Moreover, the user can control the airship even when it flies out of the sight. A prototype system has been constructed and the

* Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0751118, March 17, 2009.

experiments have been carried out in an indoor environment with inexperienced users to examine the validity of the system.

Keywords:

unmanned airship , control support , mixed reality , bird's-eye view image , overlay

目次

1. はじめに	1
2. 飛行船の操縦支援に関する従来研究と本研究の位置付け	3
2.1 遠隔操作ロボットの操縦支援に関する研究	3
2.2 飛行船の操縦インタフェースに関する研究	8
2.3 本研究の位置付けと方針	12
3. 複合現実感技術を用いた飛行船操縦支援システム	14
3.1 システムの概要と処理手順	14
3.2 飛行船搭載カメラの位置・姿勢推定処理	14
3.3 操縦支援情報生成に用いるデータの送受信処理	19
3.4 操縦支援情報の提示処理	19
4. 飛行船操縦支援システムによる被験者実験	21
4.1 実験環境	21
4.2 実験方法	21
4.3 実験結果	27
4.4 考察	30
5. まとめ	34
謝辞	36
参考文献	37
付録	42
A. 被験者実験のアンケート調査による評価結果	42
A.1 各操縦方法の評価点	42
A.2 自由記述における意見	42

目次

1	地上からの目視による無人飛行船の操縦の様子	2
2	トレイグジスタンス実験システム [19]	4
3	遠隔ロボットを用いた被災地環境探索システム [21]	5
4	Nagatani らのシステムにおける操縦者用の GUI[21]	5
5	没入型ヘリコプタ遠隔操縦システム [22]	7
6	操縦者に提示される画像の一例 [22]	7
7	触覚デバイス等による操縦インタフェース [9]	8
8	カメラ画像の提示による操縦インタフェース [24]	10
9	航行情報の提示による操縦インタフェース (Ramos ら [4])	10
10	航行情報の提示による操縦インタフェース (Xie ら [25])	11
11	航行情報の提示による操縦インタフェース (勝山ら [26])	11
12	飛行船操縦支援システム の概念図	15
13	本システムで用いた屋内用無人飛行船	15
14	飛行船操縦支援システムにおける処理の流れ	16
15	システムを用いた飛行船操縦の様子	18
16	用いたマーカの一例	18
17	ユーザに提示される操縦支援情報の一例	20
18	屋内実験環境	22
19	屋内実験環境の CG モデル	23
20	飛行船の CG モデル	23
21	地上からの目視による飛行船操縦の様子	24
22	[カメラ] の方法で提示される画像の一例	25
23	[CG] の方法で提示される画像の一例	25
24	屋内実験環境における飛行経路の概略図	26
25	被験者による各操縦方法の評価結果	29
26	飛行船操縦支援システムにおける提示情報の改善例	35

表 目 次

1	システムの機器構成	16
2	実施タスクの平均所要時間	28
3	各操縦方法の [カメラ+CG] に対する有意差の有無	29
4	左右の操作感覚に関する評価結果	43
5	位置感覚に関する評価結果	43
6	操縦のしやすさに関する評価結果	43

1. はじめに

飛行船はヘリウムガスの浮力によって飛行するため、飛行機やヘリコプターといった他の航空機と比較して、移動に必要なエネルギーが小さく、低速・低高度での安定した飛行や空中での静止も可能である。何らかの問題が起きた場合でも飛行船はゆっくりと降下するため、人を負傷させる心配も少なく安全性が高い [1]。また、障害物や段差、人混みのある場所等でもその上方の空間を自由に移動でき、カメラ等のセンサを搭載して上空を飛行させれば一度に広域の情報を得ることも可能である。このため、飛行船に関する研究が数多くなされており、屋内外の環境におけるセキュリティのための監視システムや、大気汚染、森林管理、地質検査等の環境調査、地震や台風、洪水等の災害時の被災地偵察、その他の様々な用途に飛行船が応用されている [2-11]。また近年、人間とコミュニケーションを取りながら活動するロボットに関する研究が盛んに行われている。そのため、多種多様なロボットが開発されており、飛行船もその一つとして積極的に研究されている [12]。これにより、飛行船を教育 [13,14] やエンターテインメント [15,16] 等に利用しようとする試みがあることや、趣味としてのラジコン飛行船の人气が高まっている [17] こともあり、上記のような専門的な用途に限らず、誰もが手軽に飛行船を利用できるようになった。

しかし、無人飛行船を利用する際、図1のように地上から飛行船を見上げて無線送信機（プロポ）を用いて操縦するのは、飛行船が操縦者に対して正対している状態のときに左右の操作を誤ることや、遠方に位置する飛行船との距離感がつかめないことがあるため、操作が直感的に分かりにくく、不慣れなユーザにとっては容易でない。

そこで本研究では、直感的な飛行船の操縦の実現を目指し、飛行船の操縦に不慣れなユーザを対象に操縦支援を行うシステムを提案する。提案システムでは地上から見上げて行う通常の操縦に対して、主に以下の要求を満たす機能の実現を目標とし、飛行船の操縦者に操縦支援情報を提示する。

- 飛行船を左右に旋回させる際の感覚を向上させる。
- 飛行船が現在どこに位置しているかの感覚を向上させる。



図 1 地上からの目視による無人飛行船の操縦の様子

- 飛行船が操縦者から直接視認できない遠隔地を飛行している場合にも，飛行船を操縦可能にする．

以下，2章では飛行船の操縦支援に関する従来研究を概観し，本研究の位置付けを示す．3章では，本研究で構築した飛行船操縦支援システムについて説明し，4章では提案システムの有効性を検証するために行った被験者実験について示す．最後に，5章で本論文のまとめと今後の課題について述べる．

2. 飛行船の操縦支援に関する従来研究と本研究の位置付け

本章では、飛行船の操縦支援に関する従来研究を概観し、1章で示したシステムの満たすべき要件に鑑みて、どのような操縦支援情報が必要とされるかを明らかにし、本研究の位置付けを示す。

2.1節では、飛行船の操縦支援のために実現すべき機能を考えるために、遠隔操作ロボットに関する研究においてロボットの操縦支援のためにどのような機能が実現されているかを明らかにし、そこで利用される技術が飛行船の操縦支援にどのように応用できるかを述べる。また2.2節では、飛行船の操縦インタフェースに関する研究において飛行船の操縦支援のためにどのような技術が用いられているかを概観し、システムに要求される項目がそれらの研究で満足されているかを明らかにする。そして2.3節で本研究の位置付けと方針について述べる。

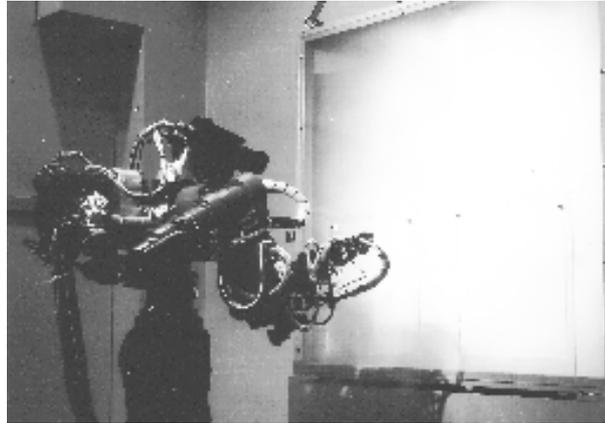
2.1 遠隔操作ロボットの操縦支援に関する研究

ロボットの遠隔操作に関して、大山らはテレグジスタンス型ロボット操縦システムについて概説している [18]。テレグジスタンスとはロボットの遠隔制御のための概念であり、操縦者と遠隔地のロボットが感覚情報を共有することで、操縦者はあたかもロボットとしてそこにいるかのような感覚が得られる。テレグジスタンスの概念を具体化するために、大山らは、操縦者とロボットの間に仮想現実 (VR: Virtual Reality) 環境を介在させることで人間の持つ機能を拡張することを目指し、図2のような人間型ロボットによるテレグジスタンス実験システムを構築した [19]。このシステムでは、煙の中で作業を行う際に、人間には見ることでできない現実環境の情報をCGモデルとして生成し、人間がその仮想空間内で作業を行うことで、煙の中でロボットを操作することができたとしている。

このようなVR技術を発展させた技術は複合現実感 (MR: Mixed Reality) と呼ばれ、近年盛んに研究が行われている [20]。複合現実感とは、現実世界と仮想世界を融合した複合環境の構築・描画技術であり、電子的な仮想世界を現実世界の



(a) システムの概観



(b) 不可視環境下での作業の様子

図 2 テレイグジスタンス実験システム [19]

情報で補強する拡張仮想感（AV：Augmented Virtuality）と，現実世界の情報に電子データを重畳する拡張現実感（AR：Augmented Reality）を統合した概念として提唱された．テレイグジスタンスでは，この複合現実感技術を用いることでロボットの操縦者に有益な情報が提示できるとされる．

Nagatani らは，災害時の被災地の情報収集を目的として衛星通信や親子型遠隔操作ロボットを用い，図 3 のような被災地環境探索システムを開発した [21]．倒壊建造物内部の環境情報収集に用いられる小型探索ロボットでは，通信データ量の制限から，カメラ画像の情報に大きく依存しないで遠隔操作を行うための情報収集・提示技術が開発された．一般に，遠隔操作でロボットを動かす場合，ロボットに搭載した 1 台のカメラの映像を用いると映像に距離感がなく，視野角も狭いため操作性が良くない．この改善案として，複数台のカメラによるステレオビジョンで映像に距離感を持たせることや，ロボットの視野角を広げることが考えられたが，彼らの研究では通信データ量が膨大になるカメラ画像の利用は現実的

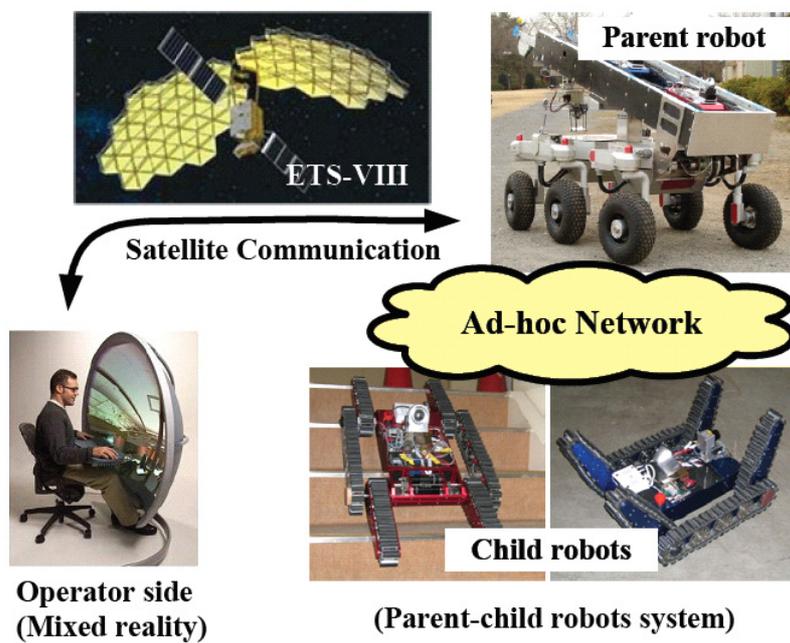


図 3 遠隔ロボットを用いた被災地環境探索システム [21]

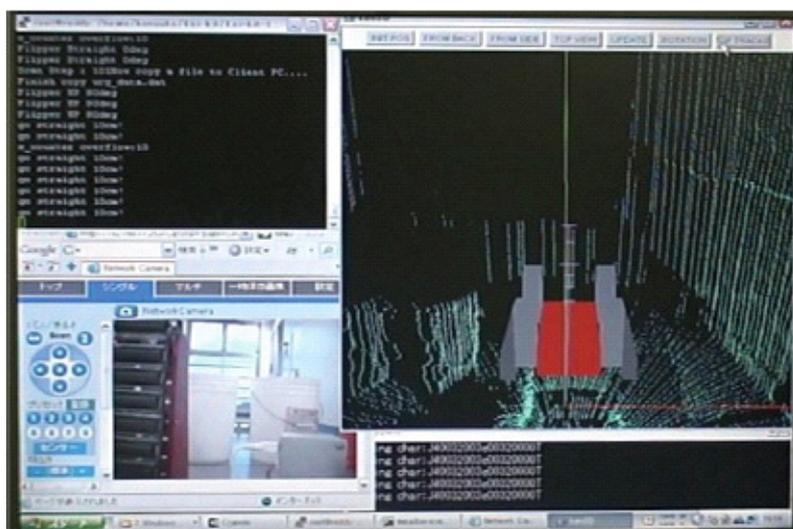


図 4 Nagatani らのシステムにおける操縦者用の GUI [21]

でなかった．このため，三次元距離センサユニットを用いて，現実環境のCGモデルとして構築した図4のような仮想空間の中で，ロボットの位置・姿勢情報を反映させた仮想物体を表示させる複合現実感技術の開発が進められた．

Nagataniらの技術は飛行船の操縦支援にも応用することができ，1章で示したシステムが満たすべき要求項目の，操縦者が飛行船を視認できない状況での遠隔操作が実現可能であり，ロボットの視点に合わせた現実環境のCGモデルを操縦者に提示することで，左右の操作感覚の向上も実現できる．また，複合現実感技術を用いることで，仮想空間の中で自由に視点を移動して飛行船を操縦することも可能となるため，カメラ画像の距離感のなさや視野の狭さ等の問題も解決でき，システムが満たすべき要求項目である位置感覚の向上も期待される．Nagataniらのシステムでは，現状では補助的にカメラ画像が利用され，操縦者に屋内の映像が伝送されており，将来的にはCGモデルの情報のみで遠隔操作することが目標とされているが，動的環境への対応を考慮するとCGモデルのみでなくカメラ画像の利用が必要である．

Koedaらは，有人ヘリコプタの操縦よりも難しいといわれるラジコンヘリコプタの操縦支援のために，図5のような没入型ヘリコプタ遠隔操縦システムを提案した[22]．彼らのシステムでは，機体にカメラとトランスミッタを搭載して上空からの映像を地上に送信し，地上の操縦者は機体から受信した映像を見ながら操縦を行う．さらに，操縦者に提示される映像には，拡張現実感技術を用いて注釈等の情報が付加される．図6の提示画像例では，カメラ画像に建造物のCGモデルや現実環境へのテキストの注釈が重畳表示され，画面左下には現在のヘリコプタの姿勢を表す仮想ヘリコプタが描画されている．これにより，操縦者は飛行中のラジコンヘリコプタから地上を見渡しているかのような感覚で操作できるため，操縦の難易度が有人ヘリコプタと同等になるとともに，操縦者はヘリコプタの現在の状態を確認することができる．また機体が直視できない状態でも，カメラの映像が受信できれば継続して飛行できるとしている．

Koedaらの技術を飛行船の操縦支援に応用すれば，操縦者は飛行船から地上を見渡しているかのような感覚で操作できるため，システムが満たすべき要求項目のうち，飛行船を左右に旋回させる際の感覚の向上が期待される．また，カメラ

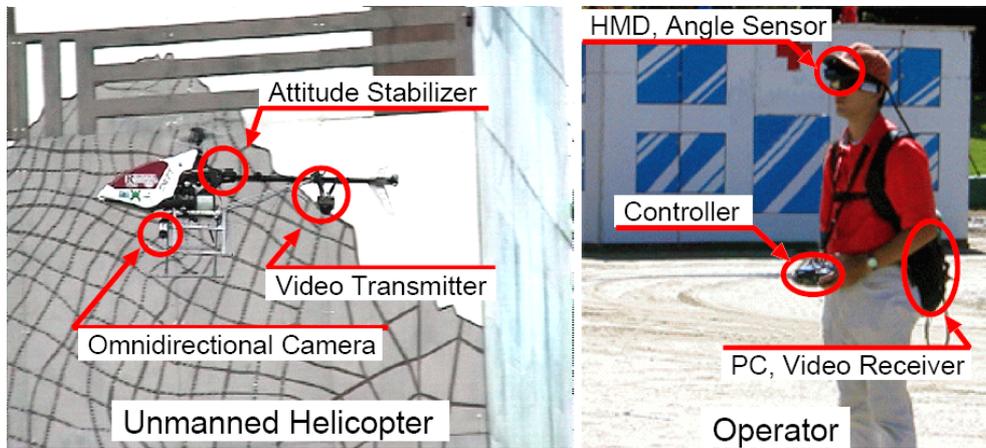


図 5 没入型ヘリコプタ遠隔操縦システム [22]

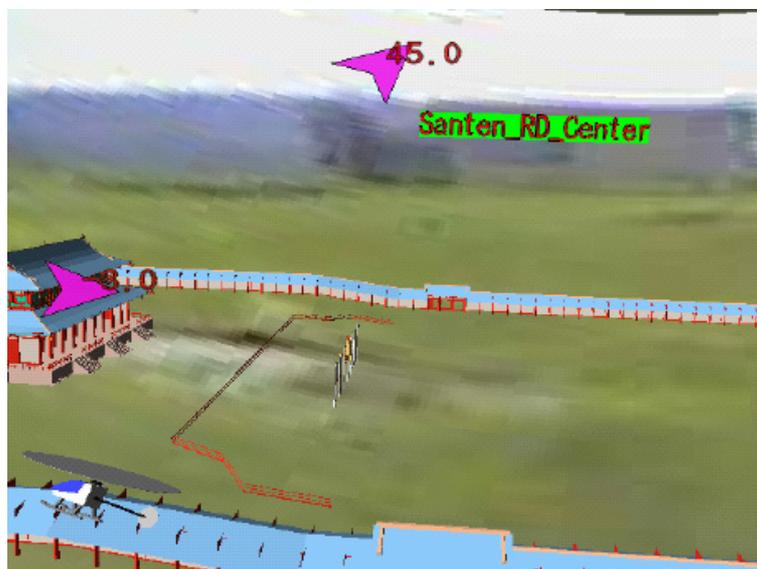


図 6 操縦者に提示される画像の一例 [22]



図 7 触覚デバイス等による操縦インタフェース [9]

の映像が受信できれば、それを見ながら操作を継続できるため、飛行船を直接視認できない状況での遠隔操作の要求項目が満たされる。しかし、Koeda らのシステムでは画面にヘリコプタの姿勢を表す情報が提示されるが、それによって飛行船の位置を直感的に把握することはできないため、位置感覚を向上させる技術が必要である。

2.2 飛行船の操縦インタフェースに関する研究

前節では遠隔操作ロボットの操縦支援に関する従来研究について述べた。ここでは、飛行船の操縦インタフェースに関する研究において、飛行船の操縦支援のためにどのような技術が用いられているかを概観する。

Thalmann らは、監視システムやセキュリティシステムの実現のために飛行船を用い、図 7 のような触覚デバイスや頭部追跡等の入力インタフェースを利用することで、直感的かつ正確に飛行船を操作できるシステムを開発した [9]。ユーザは飛行船に搭載されたカメラの向きを頭の動きにより操作し、ヘッドマウントディスプレイを通して飛行船からの俯瞰画像を見る。これにより、ユーザは自ら

の手を飛行船の操縦に専念させることができ、飛行船を直接見ることなく、仮想的なコックピットの中にいるかのような感覚で飛行船の操縦を行うことができる。このようなインタフェースを用いることで高い臨場感が実現でき、直感的な操作が可能となるが、システムの実現のためには複雑な機器構成を要する。また彼らのシステムでは、実験の際に突然の強風を受けて飛行船が大破したという例が示され、飛行船がどのような状態にあるかをより正確に把握できる必要があると報告されている [23]。

以上の Thalmann らの技術を用いて飛行船の操縦支援を行う場合、システムが満たすべき要求項目のうち、左右の操作感覚の向上および遠隔地に位置する飛行船の操縦が実現可能である。しかし位置感覚の向上のためには、飛行船の位置や姿勢を直感的に認識するための情報が必要とされる。

Paulos らは、臨場感豊かなトレイグジスタンスシステムの実現の一つの応用として、飛行船ロボットを用いたシステムを開発した [24]。Paulos らのシステムでは、飛行船に搭載されたカメラの映像やマイクの音声が無線通信によりインターネット上に配信される。インターネットに接続したユーザは、図 8 のようなブラウザを通して遠隔地の音声を聞きながら映像を閲覧し、飛行船を操作する。また、飛行船に搭載されたスピーカーで周囲に話しかけることも可能であり、臨場感の向上が図られる。しかし、このシステムではカメラの映像がユーザにそのまま提示されるのみで、飛行船を操縦するためには飛行船の位置等の状態が把握しにくい。

以上から Paulos らのインタフェースでは、システムが満たすべき要求項目のうち、飛行船を左右に旋回させる際の感覚の向上が期待され、遠隔地に位置する飛行船の操作も実現されているが、飛行船の位置の把握が難しいため位置感覚の向上が求められる。

Ramos ら、Xie ら、勝山らは、飛行船の自律制御における運行管理のために、ユーザに飛行船の航行情報を示すナビゲーション画面を提示することで飛行船の操縦を支援するシステムを開発した [4, 25, 26]。これらのシステムでは、図 9、図 10、図 11 に示すように、GUI を用いて飛行船の位置や速度等の航行情報をユーザに提示することで、ユーザがミッションの進捗具合を把握し、新たなミッショ

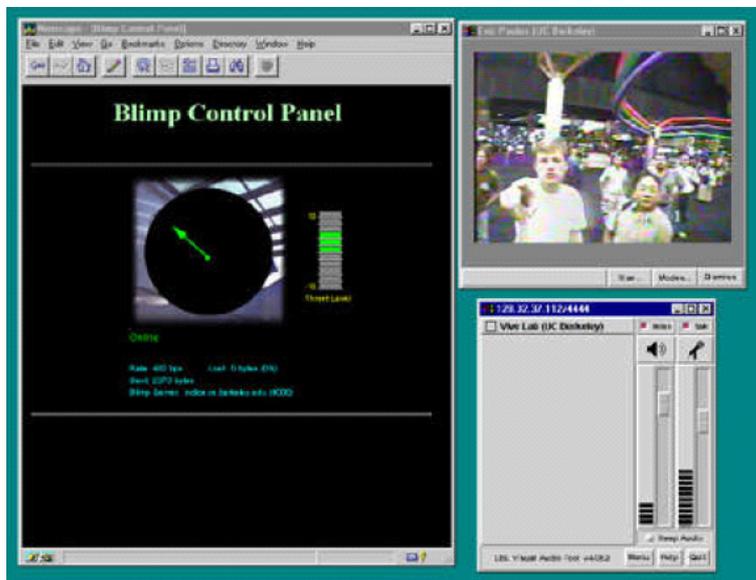


図 8 カメラ画像の提示による操縦インタフェース [24]



図 9 航行情報の提示による操縦インタフェース (Ramos ら [4])

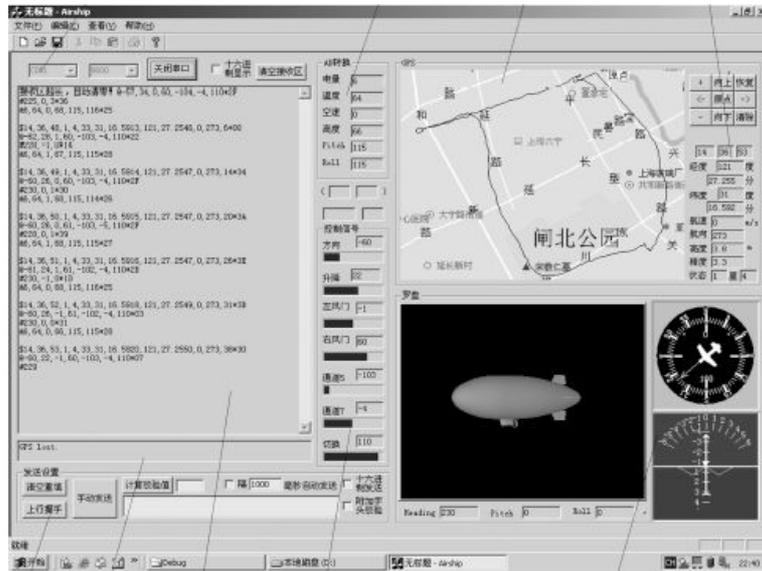


図 10 航行情報の提示による操縦インタフェース (Xie ら [25])



図 11 航行情報の提示による操縦インタフェース (勝山ら [26])

ンの開始や中止等を指示する際の判断をサポートする。

このようなインタフェースを用いると、ユーザは現在の飛行船の詳細な情報を把握できるため、システムが満たすべき要求項目のうちの位置感覚の向上が期待され、遠隔地に位置する飛行船の操縦が実現できる。しかし、ThalmannらやPaulosらのシステムと比較して、飛行船の操縦に不慣れなユーザが直感的に状況を把握して操縦することは難しく、左右の操作感覚の向上は見込めない。

2.3 本研究の位置付けと方針

本研究は、無人飛行船の操縦に不慣れなユーザを対象に、その操作を支援するシステムを構築することを目的とする。本システムでは、地上から見上げて行う通常の操縦に対して、1章で示した以下の要求を満たす機能の実現を目標とする。

- 飛行船を左右に旋回させる際の感覚を向上させる。
- 飛行船が現在どこに位置しているかの感覚を向上させる。
- 飛行船が操縦者から直接視認できない遠隔地を飛行している場合にも、飛行船を操縦可能にする。

前節までに述べたように、飛行船を左右に旋回させる際の操作感覚の向上は、飛行船から地上を見渡しているかのような映像をユーザに提示することで実現可能である。本システムではそのために、飛行船にカメラを搭載して俯瞰画像を取得する。また、飛行船が現在どこに位置しているかの感覚の向上は、飛行船に搭載されたカメラの画像をそのままユーザに提示するだけでは実現できない。本システムでは位置感覚の向上のために、複合現実感技術を用いて現実世界と仮想世界を融合、すなわちカメラ画像と現実環境・飛行船のCGモデルを合成し、ユーザが飛行船の状況を直感的に把握するための操縦支援情報を提示する。これによって同時に、飛行船が操縦者から直接視認できない遠隔地を飛行している場合にも飛行船の操縦が可能となり、本システムに求められる機能が実現される。

本システムでは、ユーザはディスプレイの画面に提示される操縦支援情報を見ながら、通常のラジコンの操作と同様に無線送信機を用いて操作を行う。また、

本研究では屋内環境でシステムを構築するものとし，以降では主に屋内環境における飛行船操縦支援システムについて述べる．

3. 複合現実感技術を用いた飛行船操縦支援システム

3.1 システムの概要と処理手順

本研究では、2.3 節で示したシステムの設計方針に従い、屋内環境において飛行船操縦支援システムを構築した。ここでは構築したシステムの概要と処理の流れを示す。構築したシステムの概念図を図 12 に、本システムで用いた屋内用の小型無人飛行船を図 13 に示す。

本システムは飛行船に搭載された PC (以下、飛行船 PC) と俯瞰画像撮影用のカメラ、地上のユーザ側の PC (以下、ユーザ PC) とディスプレイから構成され、双方の PC でネットワークを介してデータの送受信を行う。飛行船 PC ではカメラ画像と飛行船の位置・姿勢情報を取得し、無線 LAN を介してそれらをユーザ PC に送信する。ユーザ PC では受信した情報を元に複合現実感技術を用いて操縦支援情報を生成し、ユーザの手元のディスプレイに提示する。データの送受信を行う際、転送データ量を削減するために、カメラ画像は Motion JPEG 形式 [27] で圧縮して転送する。ユーザはディスプレイに表示される操縦支援情報を見ながら、市販の無線送信機を用いて操作を行う。このように飛行船を操縦することで、ユーザは飛行船を直感的に操縦することが可能となる。構築したシステムの機器構成を表 1 に、システムの処理の流れを図 14 に示す。また、ユーザが本システムを利用して飛行船を操縦する様子を図 15 に示す。

以降では、3.2 節で飛行船搭載カメラの位置・姿勢推定処理について述べ、3.3 節では操縦支援情報の生成に用いるデータの送受信処理について説明する。そして、3.4 節では操縦支援情報の提示処理について述べる。

3.2 飛行船搭載カメラの位置・姿勢推定処理

2.3 節で述べたように、本システムでは複合現実感技術を用い、カメラ画像と屋内環境・飛行船の CG モデルを合成して操縦支援情報を生成・提示する。仮想物体を現実世界に位置ずれなく表示させるには、現実世界を映すカメラの位置・姿勢を推定し、それに基づき仮想物体を描画する必要がある。

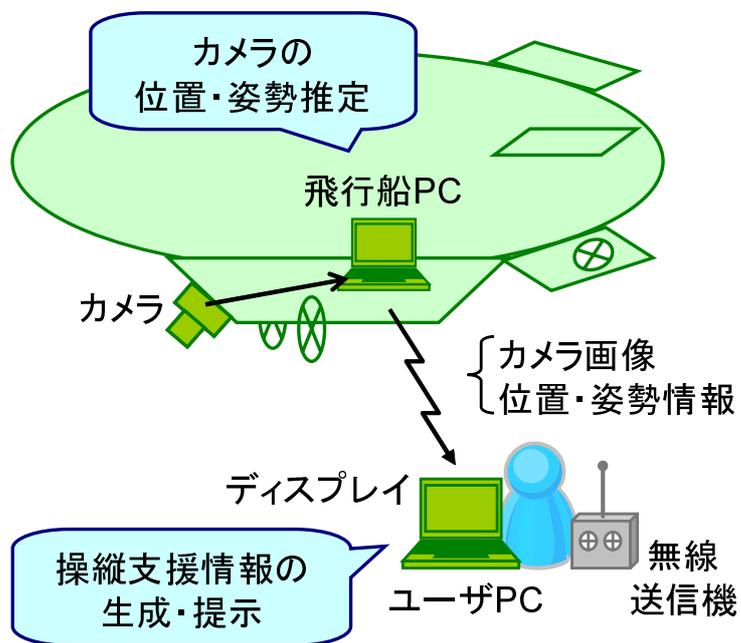


図 12 飛行船操縦支援システムの概念図

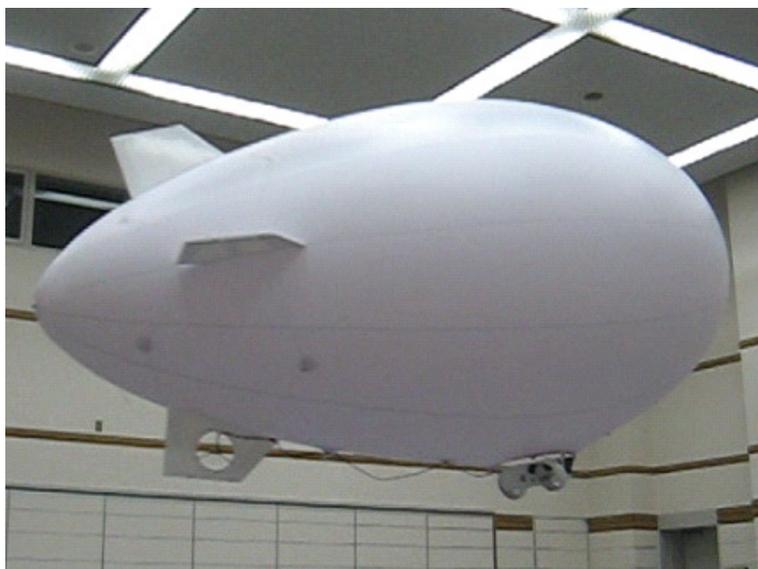


図 13 本システムで用いた屋内用無人飛行船

表 1 システムの機器構成

飛行船	OFFICE21 RC-350 (図 13 参照) 全長:約 3.5m , 直径:約 2.0m , ペイロード:約 1.8 ~ 2.2kg
飛行船 PC	SONY VGN-UX90PS CPU:Core Solo U1400 (1.20GHz) , メモリ:512MB
カメラ	Logicool QVX-13NS 解像度:960×720 画素 , フレームレート:30fps , 画角:48° × 42°
ユーザ PC	DELL Inspiron 530s CPU:Core 2 Duo E6850 (3.00GHz) , メモリ:2.00GB
無線送信機	JR PROPO X2610 , 72MHz

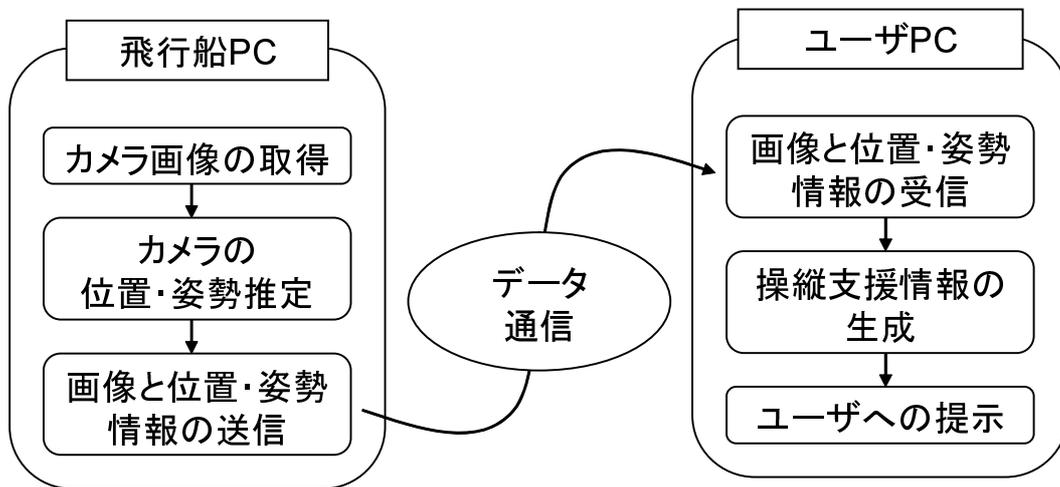


図 14 飛行船操縦支援システムにおける処理の流れ

カメラの位置・姿勢の計測には，従来，位置計測のための GPS と姿勢計測のためのジャイロ等のセンサ類を組み合わせる手法と，カメラで撮影した画像からカメラの位置・姿勢を計測する手法がよく用いられているが，屋内では GPS の利用が困難であるため，後者の手法がよく用いられる [28]．また後者の手法には，現実環境の自然特徴点の位置を利用する方法や，現実環境に位置・形状・色が既知のマーカを配置する方法があるが，本システムでは，容易に導入可能で精度良く位置・姿勢が計測できることから，現実環境に既知のマーカを配置する方法を用いた．

本システムでは，図 16 のようなカラーパターンを持つ正方形のマーカを屋内環境中の床面に複数配置し，ARToolkit [29] を利用してそれらを認識することでカメラの位置・姿勢推定処理を行う．ARToolkit のマーカ検出処理では，まず入力されたカメラ画像からマーカ領域を抽出し，そのマーカの 4 頂点の座標値を求める．次にマーカの内部に描かれたパターンを，事前に登録したパターンとのテンプレートマッチングによって識別する．そして 4 頂点の座標値からマーカの三次元位置情報，具体的には，マーカ座標系からカメラ座標系への変換行列 T_{cm} を求める． T_{cm} は回転移動成分 $R_{3 \times 3}$ と並行移動成分 $T_{3 \times 1}$ から成り，以下の式で表される．

$$T_{cm} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

この行列により，マーカ座標系とカメラ座標系の位置関係が規定され，カメラ画像と仮想物体を合成して表示することができる．さらに ARToolkit では，世界座標系における個々のマーカの位置を事前に登録しておくことで，カメラ画像中で認識された複数のマーカから得られる個々の変換行列 T_{cm} が統合され，世界座標系におけるカメラの位置・姿勢が一意に求まる．またマーカパターンの認識精度は，マーカの大きさ，パターンの単純さ，そして光源の条件等に大きく影響されるため [30]，本システムでは図 16 のような単純なカラーパターンを持つマーカ

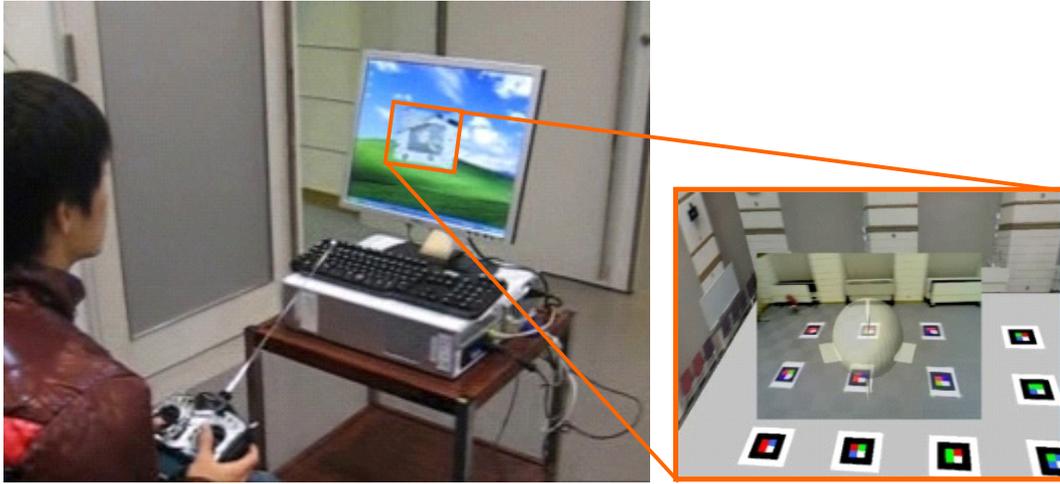


図 15 システムを用いた飛行船操縦の様子

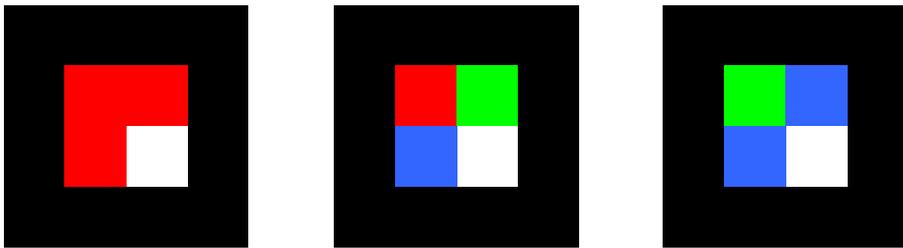


図 16 用いたマーカの一例

を用い、これらをマット紙に印刷することで光の反射を抑え、マーカの認識精度を確保する。マーカパターン認識のための登録作業とカメラのキャリブレーションは、ARToolKit に付属のツールを用いて行う。

3.3 操縦支援情報生成に用いるデータの送受信処理

データの送受信処理では、TCP/IP プロトコルによる通信を行い、操縦支援情報の生成に必要なデータの送受信を行う。飛行船 PC では、取得されたカメラ画像と飛行船の位置・姿勢情報を各フレーム毎に無線 LAN 経由でユーザ PC へ送信し、ユーザ PC では受信したデータを元に操縦支援情報を生成し、ユーザへ提示する。

この際、非圧縮のカメラ画像を無線および有線 LAN 経由で伝送するには、画像のデータ量によっては通信コストが非常に大きくなる。このため、飛行船 PC では画像と位置・姿勢情報の送信処理の前に画像を JPEG 形式に圧縮し、ユーザ PC では画像と位置・姿勢情報の受信処理の後に JPEG 形式データの展開処理を行う。これにより多少の CPU 負荷は伴うものの、遅延の抑制やネットワーク負荷の軽減によるシステムの動作速度の向上が見込まれる。JPEG 圧縮時の画像の圧縮率を上げることでデータ量が削減できるが、画質の劣化を伴うため、データの送受信に要する時間と転送データ量のバランスを適切に調整する必要がある。

3.4 操縦支援情報の提示処理

ユーザ PC では、受信した画像およびカメラの位置・姿勢推定結果を元に、複合現実感技術を用いて操縦支援情報を生成し、ユーザへ提示する。主な情報として、カメラの位置・姿勢情報に基づいて屋内環境の CG モデルを描画し、そこにカメラ画像を合成、さらに飛行船の状態を示す CG モデルを描画する。カメラ画像にマーカが映らない等、カメラの位置・姿勢推定ができないときは、カメラ画像のみを提示する。これにより、飛行船の位置・姿勢情報が得られない場合でも飛行船の操縦を継続することができ、1章で示したシステムの満たすべき要求項目のうち、遠隔地に位置する飛行船の操縦が可能となる。

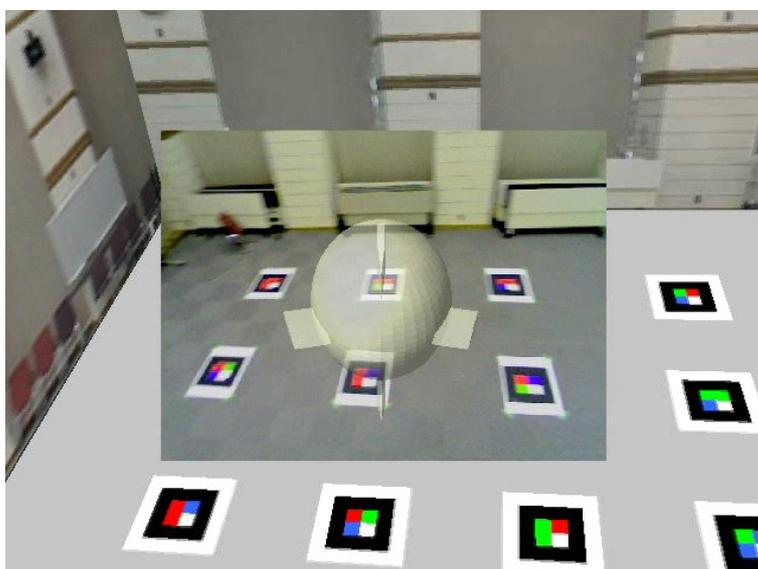


図 17 ユーザに提示される操縦支援情報の一例

本システムでユーザに提示される画面表示例を図17に示す。表示画面では、推定されたカメラ位置に基づき屋内環境のCGモデルを描画し、そこにカメラ画像を合成し、その手前に飛行船のCGモデルを描画する。飛行船と周囲の環境が見渡せるよう、飛行船の後方上空の視点から見た画面がユーザへ提示される。これにより、カメラ画像をそのまま提示する場合に比べて屋内環境・飛行船のCGモデルにより視野が拡張され、ユーザは三人称視点から飛行船を見ることで、飛行船の位置を直感的に把握して操縦することが可能になる。このような操縦支援情報を提示することで、1章で示したシステムの満たすべき要求項目のうち、左右の操作感覚の向上と位置感覚の向上が実現できると考えられる。

4. 飛行船操縦支援システムによる被験者実験

構築したシステムの有効性を検証するために，屋内環境において被験者による飛行船操縦実験を行った．以下では，まず 4.1 節で実験を行った環境や機器等について述べ，4.2 節で提案システムとその比較対象のシステムを用いた実験方法について述べる．4.3 節では実験結果を示し，4.4 節でその結果について考察する．

4.1 実験環境

実験は図 18 のような約 12m 四方，約 6m の高さの屋内環境で行った．図 18 は，本学の先端科学技術研究調査センター内の研修ホールであり，環境中には大きさ 56cm 四方のマーカを 2m 間隔で 25 枚配置した．実験では，飛行船 PC は学内の無線ネットワーク（IEEE802.11g，54Mbps）に，ユーザ PC は学内の有線ネットワーク（100Mbps）に接続した．カメラ画像の Motion JPEG 形式への変換には Independent JPEG Group [31] の JPEG 画像圧縮ライブラリを用い，ライブラリの圧縮品質のパラメータを 0（低画質）～100（高画質）のうち 50 に設定した．また，飛行船に搭載するカメラの解像度は 480×360 画素に設定した．

本実験では，図 18 の環境を再現するために，マーカを配置した床面と部屋の四方の壁の合計 5 枚のテクスチャを直方体の各面にマッピングして屋内実験環境の CG モデルを構成した．また，飛行船の CG モデルは 3DCG ポリゴンモデルを用いて作成した．実験に用いた屋内実験環境および飛行船の CG モデルを図 19，図 20 に示す．

4.2 実験方法

本実験では，ユーザが飛行船を操縦する際に感じる左右の操作感覚と位置感覚について調べた．また本システムを用いて操縦することで，ユーザが直接視認できない遠隔地に位置する飛行船を操縦できるか確認した．実験では，提案システムとその比較対象の操縦方法として [直視]，[カメラ]，[CG]，[カメラ+CG] の 4 つを以下のように定めた．



図 18 屋内実験環境

操縦方法

[直視] システムなし：飛行船を直接見上げての操縦

[カメラ] 比較システム 1：カメラ画像のみの提示による操縦

[CG] 比較システム 2：CG モデルのみの提示による操縦

[カメラ+CG] 提案システム：カメラ画像と CG モデルの提示による操縦

被験者は、[直視]の方法では図 21 のように飛行船を直接見ながら操縦する。[直視] 以外の方法では、図 15 のようにディスプレイの画面を見ながら操縦する。このとき [カメラ]、[CG] により被験者に提示される画像の一例を図 22、図 23 に示す。[カメラ+CG] による提示例は図 17 に示した。上記の操縦方法を比較するために被験者毎に以下の手順で実験を行い、それぞれの方法の操作性を評価する。

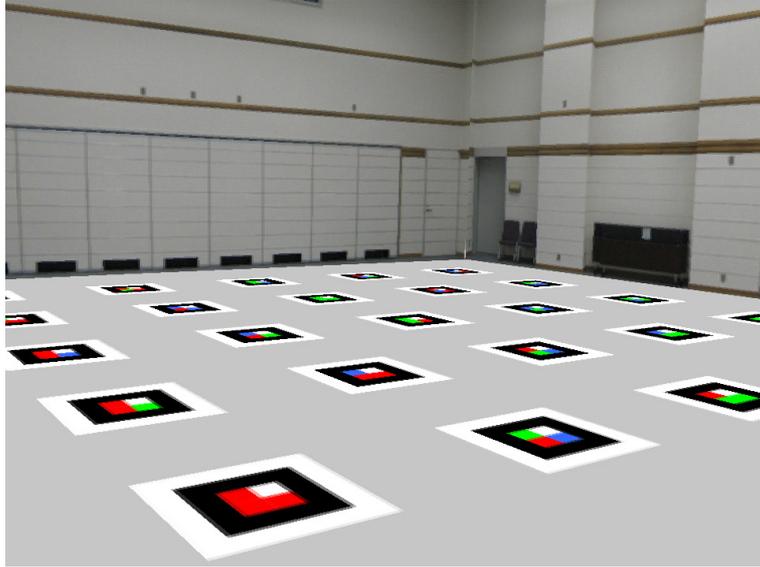


図 19 屋内実験環境の CG モデル

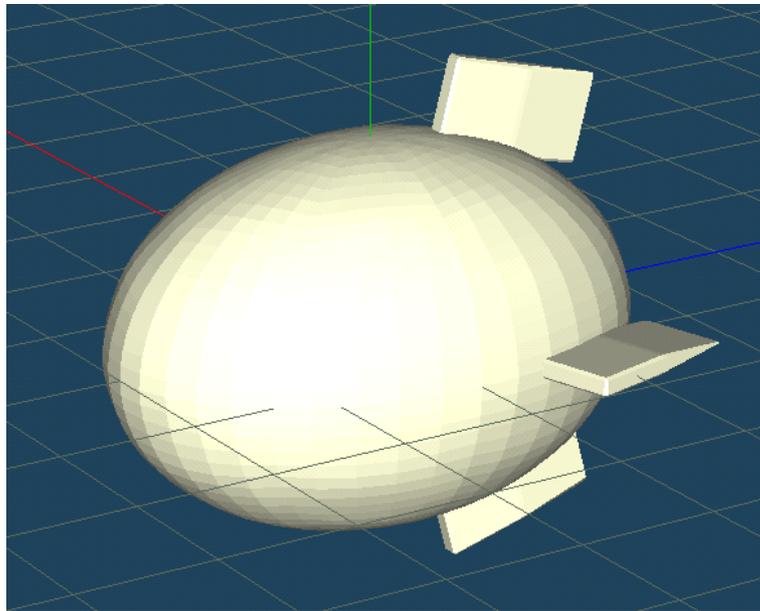


図 20 飛行船の CG モデル



図 21 地上からの目視による飛行船操縦の様子

実験手順

[1. 操縦練習]

飛行船の操作方法を説明し，上記のそれぞれの操縦方法で練習してもらう．

[2. 操縦実験]

以下の各タスクの所要時間をストップウォッチで計測する．被験者は図 24 のような飛行経路の概略図に従って飛行船を操縦する．

[2-1. 周回操作]

[直視] と [カメラ+CG] による操縦について左右の操作感覚の違いを調べるために，指定された位置を順に通過させ，実験環境内を周回させる．

[2-2. 直進・停止操作]

[カメラ] と [カメラ+CG] による操縦について位置感覚の違いを調べるために，指定された始点位置から終点位置まで直進させ，停止させる．



図 22 [カメラ] の方法で提示される画像の一例

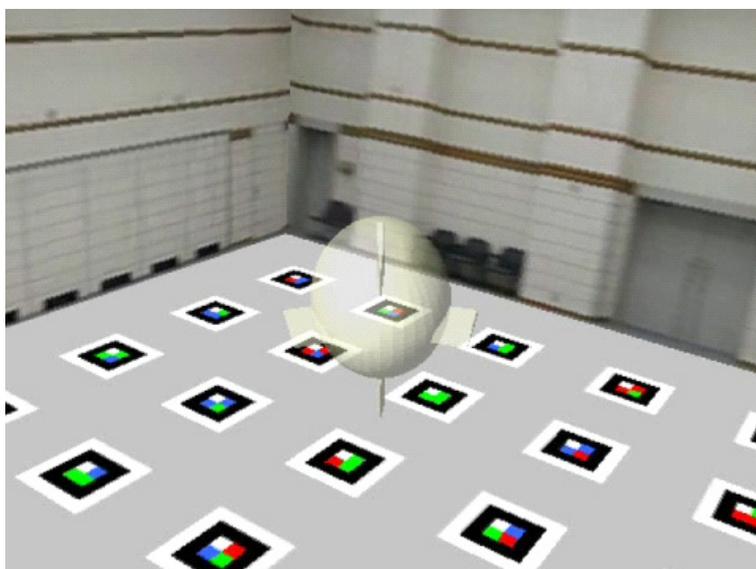
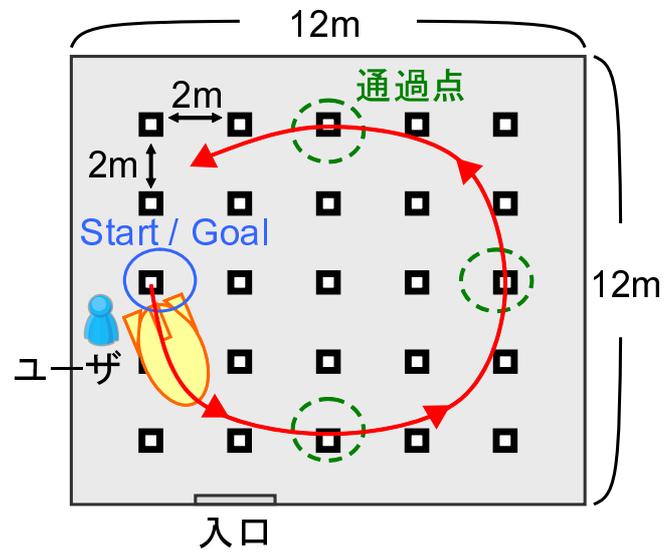
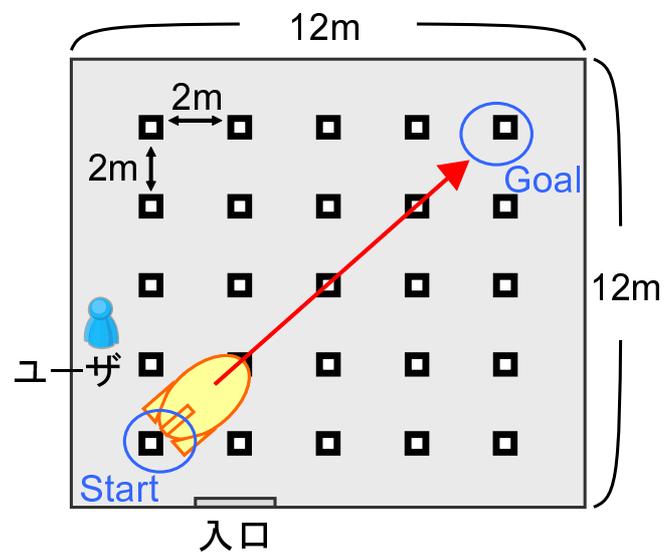


図 23 [CG] の方法で提示される画像の一例



(a) 周回操作



(b) 直進・停止操作

図 24 屋内実験環境における飛行経路の概略図

[3. アンケート調査]

左右の操作感覚と位置感覚，総合的な操縦のしやすさの3項目について，各被験者に4段階評価で答えてもらい，各操縦方法の感想と改善すべき点を自由記述で答えてもらう．

実験順序による実験結果への依存を軽減するために，実験時には各タスク（周回操作の[直視]と[カメラ+CG]，直進・停止操作の[カメラ]と[カメラ+CG]）において，被験者毎に順序を入れ替えて実験を行った．本実験は実験の目的や条件についての知識がなく，飛行船や飛行機，ヘリコプタのラジコンの操縦経験がない21名を対象に実施した．

4.3 実験結果

周回操作と直進・停止操作の実験で計測したタスクの平均所要時間を表2に示す．所要時間について，各操縦方法の間で有意水準を5%に設定してt検定を行った結果，周回操作では統計的に有意な差が認められ，直進・停止操作では有意差が認められなかった．

次に，アンケート調査で得られた結果として，各評価項目に関する各操縦方法の評価結果のグラフを図25に示す．図25は全被験者による4段階評価の平均評価点を表す．左右の操作感覚と総合的な操縦のしやすさでは[カメラ+CG]の方法が最も高い評価となり，位置感覚では[直視]の方法が最も高い評価となった．これらの評価結果について[直視]，[カメラ]，[CG]と[カメラ+CG]の間で有意水準を5%に設定してt検定を行った結果，統計的な有意差の有無が表3のように確認された．

被験者実験のアンケート調査による詳細な評価結果として，各操縦方法・評価項目に関する評価点および自由記述における意見を付録Aに示す．

表 2 実施タスクの平均所要時間

(a) 周回操作

操縦方法	平均所要時間
[直視]	3' 04"
[カメラ+CG]	3' 47"

(b) 直進・停止操作

操縦方法	平均所要時間
[カメラ]	1' 06"
[カメラ+CG]	1' 09"

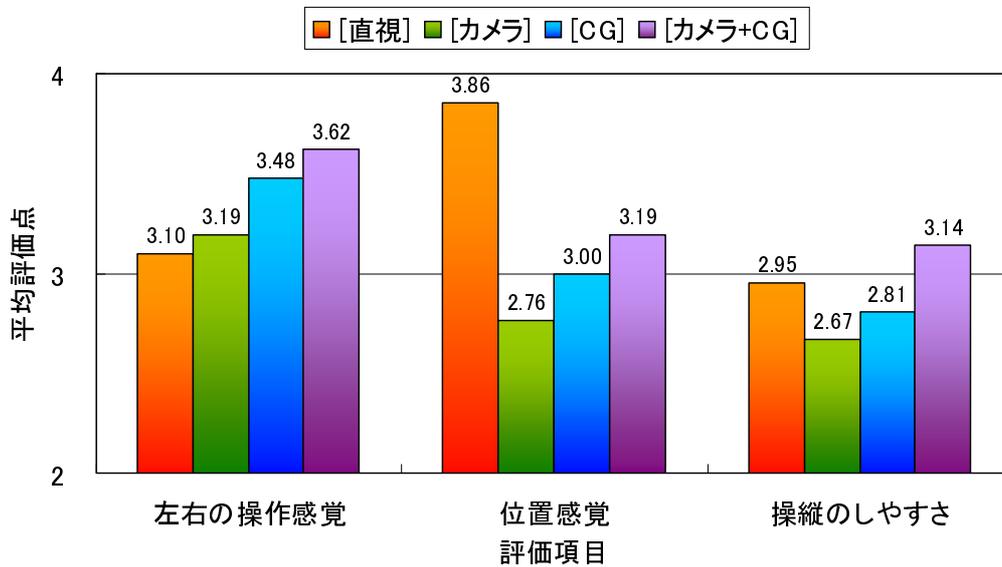


図 25 被験者による各操縦方法の評価結果

表 3 各操縦方法の [カメラ+CG] に対する有意差の有無

	[直視]	[カメラ]	[CG]
左右の操作感覚	あり ([カメラ+CG] > [直視])	なし	なし
位置感覚	あり ([カメラ+CG] < [直視])	なし	なし
総合的な 操縦のしやすさ	なし	あり ([カメラ+CG] > [カメラ])	なし

4.4 考察

実施タスクの所要時間に関する考察

まず表2の結果を考察する。周回操作の実験では、[直視]の方が[カメラ+CG]より短時間でタスクが終了した。これは、実験時の被験者の様子から、[カメラ+CG]のときは[直視]に比べて操作が慎重になっていることが窺え、所要時間の増加につながったと考えられる。直進・停止操作の実験では、[カメラ]と[カメラ+CG]で所要時間の差がなく、それぞれの操縦方法の位置感覚は同程度だったといえる。

アンケート調査の結果に関する考察

次に、左右の操作感覚、位置感覚、総合的な操縦のしやすさについて、図25と表3の結果および自由記述の結果から考察する。

左右の操作感覚

[カメラ+CG]が[直視]に対して有意な差を持つと認められた。これは、ユーザが飛行船と正対している場合に左右の旋回操作に誤りを起こしやすく、飛行船を常に後方から見るほうが直感的であるためだと考えられる。このことは以下のアンケートの記述からも認められる。

- ([直視]について) 飛行船と向き合ったときに、左右の操作を少し混乱する。
- [CG]、[カメラ+CG]に共通で言える事だが、飛行船の後方から見る方が左右の操作は容易だった。

[カメラ]と[CG]は、[カメラ+CG]と同様に飛行船の進行方向の様子を見ながら操作できるため、左右の操作感覚に差がなかった。

位置感覚

[直視]は[カメラ+CG]に対して有意な差を持つと認められたが、[カメラ]、[CG]では[カメラ+CG]に対する有意差が認められなかった。また実験の際に、[カメ

ラ] , [CG] , [カメラ+CG] では , 被験者が飛行船を壁にぶつけることがあったため , これらでは [直視] に比べて飛行船の位置が把握しにくいと考えられる . 位置感覚では主に以下のような意見が得られた .

- ([カメラ] について) [直視] に比べ左右感覚がとても把握しやすかったが , 位置と高さが分かりにくかった .
- ([CG] について) いまひとつ位置を把握しにくい . どれくらい曲がっているかが分かりにくい .
- ([カメラ+CG] について) [CG] よりは高さや壁からの距離が分かりやすいが , 直視の感覚とずれるため , 慣れが必要と感じた .
- ([直視] について) 近い場所にあるときは操作しやすかったが , 遠くになると位置が分かりにくく操作が難しかった .
- 広い空間だと [CG] , [カメラ+CG] の良さがより発揮されると思う .

4 番目・5 番目の意見から , 今回のような狭い実験環境では [直視] の方が位置感覚が良いといえるが , 屋外環境等 , 飛行船からユーザまでの距離が離れる場合には [CG] や [カメラ+CG] の方が位置感覚が良い可能性があるため , 今後検証する必要がある . 上記の他 , 位置感覚の改善のためにユーザに提示すべき情報について以下の意見を得た .

- 現在の飛行スピードが必要 .
- 全体で現在どの位置にいるかどうかの情報が必要 .
- 飛行船を横から見た図があれば高度が分かりやすいのではないかと感じた .
- [カメラ] , [CG] , [カメラ+CG] では , 現在の加速度を把握するのが難しかった .
- リモコンの操作量に対して飛行船 CG に力覚量のようなものを加えると直感的に操作できるような気がする .

1 番目～3 番目は飛行船の速度，現在位置，高度等が必要という意見である．飛行船の速度はフレーム間のカメラ位置の違いから計算し，現在位置は環境を真上から見たマップを画面に表示すれば良い．高度は上記の意見の通り，水平方向から飛行船を見た図でユーザに提示できる．4 番目・5 番目は加速度が必要という意見であり，送信機の操作量を飛行船にかける力として提示すれば良い．以上の情報をユーザに提示することで飛行船の状態の把握が容易になり，位置感覚が良くなると考えられる．

総合的な操縦のしやすさ

[カメラ+CG] が [カメラ] に対して有意な差を持つことが認められた．[カメラ] について以下の記述があった．

- カメラの画角が狭いため操作しにくかった．
- カメラ画像だけでは飛行船の姿勢を認識できなかった．

これに対し [カメラ+CG] は，飛行船やその周囲の全体像が把握しやすいため，[カメラ] に対して有意差があったと考えられる．[直視] では，[カメラ+CG] より左右の操作感覚が悪かったが位置感覚は良く，総合的な操縦のしやすさに差はなかった．[カメラ+CG] と [CG] では，今回の実験環境が屋内の静的環境であったため，左右の操作感覚および位置感覚に差がなかったと考えられる．これは以下の記述からも認められる．

- ([CG]，[カメラ+CG] について) カメラ画像がある方が，少し高さ把握ができた気がする．その他は違いがはっきりとは分からなかった．
- ([カメラ+CG] について) あまり [CG] との差異がなかった気がする．

しかし，[CG] は [カメラ+CG] と異なり動的環境に対応できないため，動的環境ではこれらの方法に差が生じる可能性があり，今後検証する必要がある．その他に，画面の表示に関して以下の意見を得た．

- ([CG]，[カメラ+CG] について) 地面がゆれるので操縦しにくかった．

- ([カメラ+CG] について) カメラ画像と CG の切り替わりがちらつく .

前者はカメラの位置・姿勢推定の誤差や失敗が原因であるため，位置・姿勢推定を改善する必要がある．後者では，カメラの位置・姿勢推定に失敗したときは，それまでの情報から飛行船の位置を予測することで，途切れなく支援情報を表示することができる．

5. まとめ

本論文では、飛行船に搭載されたカメラの俯瞰画像等を用いて、複合現実感技術により操縦支援情報をユーザに提示することで、その操作を視覚的に支援するシステムについて述べた。構築したシステムでは、地上から見上げて行う通常の操縦に対して、以下の要求を満たす機能の実現を目標とした。

- 飛行船を左右に旋回させる際の感覚を向上させる。
- 飛行船が現在どこに位置しているかの感覚を向上させる。
- 飛行船が操縦者から直接視認できない遠隔地を飛行している場合にも、飛行船を操縦可能にする。

上記の要求項目の実現のために、本システムでは具体的な操縦支援情報として、カメラの位置・姿勢情報に基づいて現実環境のCGモデルを描画し、そこにカメラ画像および飛行船の状態を示すCGモデルを描画するというアプローチをとった。

システムを用いた被験者実験では、[カメラ+CG]では[直視]より左右の操作感覚が良いことが示されたが、[カメラ]、[CG]との違いは認められなかった。また、[カメラ+CG]の位置感覚は[直視]の方が良く、[カメラ]、[CG]とは差がなかった。そして総合的な操縦のしやすさでは、[カメラ+CG]は[カメラ]より良いが、[直視]、[CG]に対して評価結果に有意な差がないことが示された。そしてアンケートの記述結果から、本システムに要求される今後の課題として以下のものが挙げられる。

- 提示される操縦支援情報の充実化
- カメラの位置・姿勢推定処理の改善
- 屋外環境等の広い空間や動的環境におけるシステムの有効性の検証

本研究では、システムにおける提示情報の改善案として図26のようなものを考えている。図26では、地図上にカメラ画像を投影し、飛行船の現在位置や姿勢を表現するCGモデルを重畳表示する。画面中央には飛行船の速度・加速度を矢

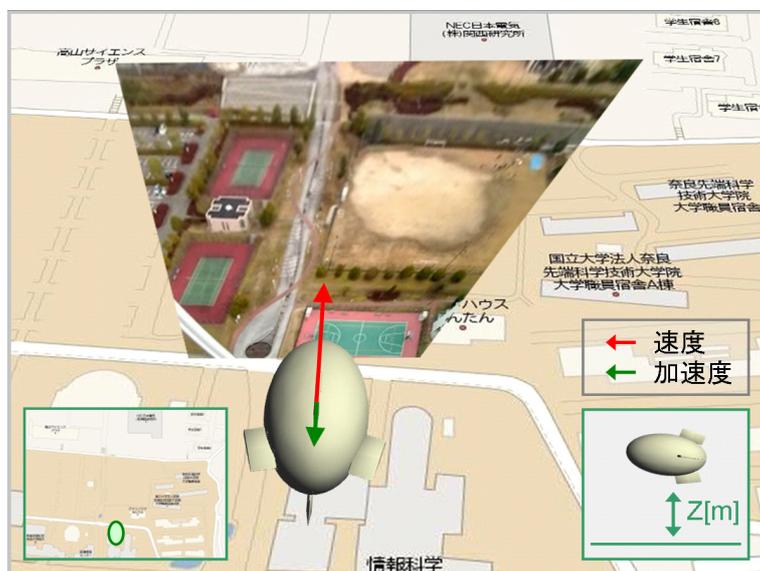


図 26 飛行船操縦支援システムにおける提示情報の改善例

印で示し、画面左下には飛行船の現在位置を示すために環境を真上から見たマップ、そして画面右下には飛行船の高度を示すために飛行船を水平方向から見た図を表示する。このようなシステムの実現により、さらに直感的で分かりやすい飛行船の操縦支援ができると考える。

謝辞

本研究を行うにあたり，懇切なる御指導，御鞭撻を頂いた視覚情報メディア講座 横矢直和教授に心より感謝申し上げます．また，本研究の遂行にあたり有益な御助言，御指導を頂いた応用システム科学講座 杉本謙二教授に厚く御礼申し上げます．そして，日々の研究活動から本論文の執筆に至るまで，本研究の全過程を通して多大なる御指導，御助言を頂いた視覚情報メディア講座 山澤一誠准教授に心より感謝致します．さらに，公私にわたり大変お世話になり，研究に関する的確な御助言を頂いた視覚情報メディア講座 神原誠之助教に心より感謝致します．また，本研究を進める上で，多大なる御助言，御指導を頂いた佐藤智和助教に心より感謝致します．本研究の構想にあたり，御多用の中にもかかわらず貴重な御意見を頂いた，像情報処理学講座 眞鍋佳嗣准教授，応用システム科学講座 平田健太郎准教授，日本電気株式会社 池谷彰彦氏に厚く御礼申し上げます．そして，実験実施の際や日々の研究活動において懇切なる御助言，御協力を頂いた，インターネット・アーキテクチャ講座 島田秀輝特任助教，像情報処理学講座 浦西友樹研究員に心より感謝致します．さらに，実験の遂行のために多大なる御助言，御支援を頂いた，有限会社オフィストゥエンティワン 中山祐之氏をはじめとする皆さま，ならびに本研究の被験者実験にご協力頂いた皆さまに厚く御礼申し上げます．また，研究室での生活を支えて頂いた視覚情報メディア講座事務補佐員 高橋美央女史に心より感謝致します．そして，研究活動だけでなく日々の生活においても大変お世話になった視覚情報メディア講座の皆さまに心より感謝致します．最後に，二年間の大学院生活を終始温かく見守ってくれた家族に感謝します．

参考文献

- [1] A. Elfes, S. S. Bueno, M. Bergerman, J. J. G. Ramos and S. B. V. Gomes: “Project AURORA: Development of an Autonomous Unmanned Remote Monitoring Robotic Airship,” *Journal of the Brazilian Computer Society*, Vol. 4, No. 3, pp. 70–78 (Apr. 1998).
- [2] H. Zhang and J. P. Ostrowski: “Visual Servoing with Dynamics: Control of an Unmanned Blimp,” *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '99)*, Vol. 1, pp. 618–623 (May 1999).
- [3] G. A. Kantor, D. Wettergreen, J. P. Ostrowski, and S. Singh: “Collection of Environmental Data From an Airship Platform,” *Proceedings of the SPIE Conference on Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems IV*, pp. 76–83 (Oct. 2001).
- [4] J. J. G. Ramos, E. C. de Paiva, J. R. Azinheira, S. S. Bueno, S. M. Maeta, L. G. B. Mirisola, M. Bergerman and B. G. Faria: “Autonomous Flight Experiment with a Robotic Unmanned Airship,” *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '01)*, Vol. 4, pp. 4152–4157 (May 2001).
- [5] S. van der Zwaan, A. Bernardino and J. Santos-Victor: “Visual Station Keeping for Floating Robots in Unstructured Environments,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 39, No.3–4, pp. 145–155 (Jun. 2002).
- [6] T. Fukao, K. Fujitani and T. Kanade: “An Autonomous Blimp for a Surveillance System,” *Proceedings of the 2003 IEEE and RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '03)*, Vol. 2, pp. 1820–1825 (Oct. 2003).

- [7] E. Hygounenc, I.-K. Jung, P. Soueres and S. Lacroix: “The Autonomous Blimp Project of LAAS–CNRS: Achievements in Flight Control and Terrain Mapping,” *International Journal of Robotics Research (IJRR '04)*, Vol. 23, No.4–5, pp. 473–511 (Apr.–May 2004).
- [8] A. Elfes, J. F. Montgomery, J. L. Hall, S. S. Joshi, J. Payne and C. F. Bergh: “Autonomous Flight Control for a Planetary Exploration Aerobot,” *Proceedings of the AIAA Space 2005 Conference*, AIAA–2005–6717 (Aug. 2005).
- [9] D. Thalmann, P. Salamin, R. Ott, M. Gutiérrez and F. Vexo: “Advanced Mixed Reality Technologies for Surveillance and Risk Prevention Applications,” *Proceedings of the 21st International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS '06)*, Vol. 4263, pp. 13–23 (Nov. 2006).
- [10] S. Sasa, Y. Matsuda, M. Nakadate and K. Ishikawa: “Ongoing Research on Disaster Monitoring UAV at JAXA’s Aviation Program Group,” *Proceedings of the International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology (SICE Annual Conference '08)*, pp. 978–981 (Aug. 2008).
- [11] J. Bijker and W. Steyn: “Kalman Filter Configurations for a Low-Cost Loosely Integrated Inertial Navigation System on an Airship,” *Control Engineering Practice*, Vol. 16, No. 12, pp. 1509–1518 (Apr. 2008).
- [12] 細井一弘, 杉本雅則: “Shepherd:ユーザ視点のマルチロボットコントロールを実現するモバイルインターフェイス”, 人工知能学会第 20 回全国大会, 3F3–4 (2006 – 6).
- [13] H. Zhang: “Flying A Blimp – A Case Study of Project-Based Hands-on Engineering Education,” *Proceedings of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition*, session 1306 (Jun. 2002).

- [14] NPO 法人 組込ソフトウェア技術者・管理者育成研究会: Let's GO GO! マジカル・スプーン, <http://www.sesame.jp/workinggroup/WorkingGroup8/MagicalSpoon.htm>.
- [15] 川村秀憲, 角田久雄, 山本雅人, 高谷敏彦, 大内東: “ホバリング制御に基づくエンタテインメントバルーンロボットの開発”, 知能・情報・ファジイ学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 29–37 (2005 – 4).
- [16] 有限会社オフィストゥエンティワン: AIR MEDIA FACTORY OFFICE21, <http://www.e-office21.jp/>.
- [17] G. Wyeth and I. Barron: “An Autonomous Blimp,” *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics (FSR '97)*, pp. 464–470, (1997).
- [18] 大山英明, 前田太郎, 舘暲: “SF と科学技術におけるレイグジスタンス型ロボット操縦システムの歴史”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 59–68 (2002 – 3).
- [19] 大山英明, 常本直貴, 舘暲, 井上康之: “仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 272–281 (1994 – 3).
- [20] 田村秀行, 大田友一: “複合現実感”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 52, pp. 266–272 (1998 – 3).
- [21] K. Nagatani, K. Yoshida, K. Kiyokawa, Y. Yagi, T. Adachi, H. Saitoh, T. Suzuki and O. Takizawa: “Development of a Networked Robotic System for Disaster Mitigation –System Description of Multi-Robot System and Performance Tests of the Robots–,” *Proceedings of the 6th International Conference on Field and Service Robotics (FSR '07)*, pp. 333–342 (Dec. 2007).
- [22] M. Koeda, Y. Matsumoto and T. Ogasawara: “Development of Annotation-Based Assistance System for Unmanned Helicopter with Wearable Augmented Reality Environment,” *Proceedings of the 3rd CREST/ISWC Work-*

- shop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing*, pp. 23–26 (Oct. 2004).
- [23] X. Righetti, S. Cardin, D. Thalmann and F. Vexo: “Immersive Flight for Surveillance Applications,” *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI '07)*, pp. 139–142 (Mar. 2007).
- [24] E. Paulos and J. Canny: “Ubiquitous Tele-embodiment: Applications and Implications,” *International Journal of Human-Computer Studies (IJHCS)*, Vol. 46, No. 6, pp. 861–877 (Jun. 1997).
- [25] S.-R. Xie, J. Luo, J.-J. Rao and Z.-B. Gong: “Computer Vision-Based Navigation and Predefined Track Following Control of a Small Robotic Airship,” *Acta Automatica Sinica*, Vol. 33, No. 3, pp. 286–291 (Mar. 2007).
- [26] 勝山靖博, 大場洋一: “成層圏プラットフォーム 追跡管制システム”, *東芝レビュー*, Vol. 60, No. 11, pp. 7–11 (2005 – 11).
- [27] G. K. Wallace: “The JPEG Still Picture Compression Standard,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 38, No. 1, pp. xviii–xxxiv (Feb. 1992).
- [28] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: “不可視マーカを用いた位置・姿勢推定のための環境構築とユーザ位置・姿勢推定システム”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 13, No. 2, pp. 257–266 (2008 – 6).
- [29] H. Kato and M. Billinghurst: “Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System,” *Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR '99)*, pp. 85–94 (Oct. 1999).
- [30] H. Kato and M. Billinghurst: ARToolKit, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>.

[31] Independent JPEG Group, <http://www.ijg.org/>.

付録

A. 被験者実験のアンケート調査による評価結果

A.1 各操縦方法の評価点

各評価項目に関する各操縦方法の評価結果を表 4～表 6 に示す。各表はそれぞれの操縦方法に関して、4 点～1 点の評価点（4 が最高点）を付けた被験者の数を示し、「平均」の欄に各々の操縦方法に対する被験者全体の平均評価点を示す。

A.2 自由記述における意見

アンケート調査の自由記述において被験者から得られた意見の詳細として、[直視]、[カメラ]、[CG]、[カメラ+CG] のそれぞれの方法についての感想と、飛行船の操縦のために必要だと感じた情報を以下に記す。

[直視] の方法についての感想

- 左右方向への操作が難しい。
- 近い場所にあるときは操作しやすかったが、遠くになると位置が分かりにくく操作が難しかった。
- 左右が難しい。
- 個人的に、[直視] は方向を頭で考えながら操作できるので、若干ではあるが操作しやすかった。
- 高さ情報は [直視] が一番分かりやすかった。障害物との距離も [直視] が一番分かりやすかった。
- 今回の条件の中で最も得られる情報量が多く（ xyz 空間，加速度，速度等），操縦しやすかった。

表 4 左右の操作感覚に関する評価結果

操縦方法	評価				平均
	4	3	2	1	
[直視]	7	9	5	0	3.10
[カメラ]	9	8	3	1	3.19
[CG]	12	7	2	0	3.48
[カメラ+CG]	14	6	1	0	3.62

表 5 位置感覚に関する評価結果

操縦方法	評価				平均
	4	3	2	1	
[直視]	18	3	0	0	3.86
[カメラ]	5	7	8	1	2.76
[CG]	6	9	6	0	3.00
[カメラ+CG]	7	11	3	0	3.19

表 6 操縦のしやすさに関する評価結果

操縦方法	評価				平均
	4	3	2	1	
[直視]	4	12	5	0	2.95
[カメラ]	3	8	10	0	2.67
[CG]	4	10	6	1	2.81
[カメラ+CG]	6	13	1	1	3.14

- 左右を混乱するが狭い環境であれば操縦に問題ない。
- 高さ，位置の把握が簡単。
- 左右の操作が慣れるまで難しい。経験がものをいう方法だと感じた。
- 飛行船が遠く，高くあると，位置把握が難しそう。
- コントローラの操作に慣れれば，ある程度操縦できると思う。
- 上下左右の操作が，空間的に飛行船を認識できるため，一番しやすかった。
- 遠近感覚がつかみにくい。マーカの上を通過しているのか分からない。
- 左右の調整がややこしくて上手くできない。
- 高さの調整はしやすい。
- 全体的に思うようにいかなかった。
- 飛行船と向き合ったときに，左右の操作を少し混乱する。
- 方向修正がしやすい。
- こちらから見えない部分（壁との距離等）が把握しづらい。
- 奥行き把握が難しかった。
- 奥から手前に来るときの左右の扱いが難しかった。
- 最初は一番分かりやすいと思ったが，慣れていないこともあり，途中から左右の操作ミスが多くなった。

[カメラ]の方法についての感想

- [CG]よりも混乱はするが操縦できる。

- [直視] に比べ左右感覚がとても把握しやすかったが、位置と高さが分かりにくかった。
- 最もやりやすい。
- 飛行船の操縦方法としては最も困難であるが、飛行船の楽しさ（飛行船から見る映像）を最も感じることができる。
- [カメラ] , [CG] , [カメラ+CG] では部屋の広さと飛行船の大きさの対比が分かりにくかった。
- 比較的操縦しやすい（左右が一致する。直視に比べて現在位置把握がしやすいため）。
- 高さの把握が困難。視野が狭いため、位置感覚も難しかった。
- もう少し、先の方の情報まで見ることができると操縦しやすいかもしれない。
- カメラの画角が狭いため操作しにくかった。
- カメラ画像だけでは飛行船の姿勢を認識できなかった。
- 壁までの距離が把握しづらい。
- 位置があまり分からなかった。
- カメラ画像を直接見れるので位置を把握しやすく、一番動かしやすかったと思う。
- 視角が狭いので、左右がわかりづらい。
- 飛行船の高度と、障害物との距離が分かりづらい。
- 視野が少し狭い。左右の移動が難しい。
- 高さが分かりにくい。
- 周りの壁との距離等が分からない。

- ややラグがあった気がする .
- 全体との位置関係が分かりづらくやりにくかった .

[CG] の方法についての感想

- 上下方向と加速度の変化が分かりにくい .
- CG がブレてたまに見にくくなる .
- マーカーが見えなくなったときに表示がなくなる点が難しかった .
- [CG] , [カメラ+CG] に共通で言える事だが , 飛行船の後方から見る方が左右の操作は容易だった .
- 飛行船の旋回が [直視] や [カメラ] よりもしやすかった .
- 飛行船の高度が分かりにくかった .
- 実際の挙動に対してずれがあるため , 自分が直感的に操作するより , 早くに操作しないと , 同じにならない感じがする .
- 高さが感覚的にとらえるのが難しかった .
- CG だけだと距離感がつかみにくい .
- 飛行船がぶつかる感覚が分からない .
- 左右方向の操作が楽 .
- [カメラ] に比べ位置感覚が把握しやすかった .
- 高さ感覚が分かりにくかった .
- 高さがよく分からない .
- ラグがなければ遠隔操作できそうだが , 高さや壁との距離が分かりにくいので苦労した .

- ゲーム感覚で操作できる .
- CG モデルを作り込めば , 一番操作しやすい方法になる可能性がある .
- [カメラ] , [CG] , [カメラ+CG] では部屋の広さと飛行船の大きさの対比が分かりにくかった .
- [CG] , [カメラ+CG] では画面のちらつきが気になった .
- 高さの情報が見つみにくい .
- マーカー認識が出来ない場合 , 映像が途切れるのが問題 .
- 飛行船の映像があるため , 位置把握が簡単 . 特に左右の操作感覚が楽に感じた .
- いまひとつ位置を把握しにくい . どれくらい曲がっているかが分かりにくい .
- 壁に飛行船を当てる恐怖感が減った .
- 比較的 , 左右の操作に関して操作しやすかった .
- 酔いそう .
- 飛行船をどっちに進めようかという操作はとても分かりやすい .
- 高さ方向が把握しづらかった .
- 地面がゆれるので操縦しにくかった .
- 高さ情報が分からないので , どこにいるかがつかみにくかった .
- 高さの感覚が分かりづらい .
- 飛行船の状態が分かりづらい .
- 高さの情報が欲しい .
- 周りの状況は分かりやすいが , 高さがよく分からない .

- 思っていたのよりも操縦しやすかった。
- 表示部分が少なく全体が分からない。高さも分からずかなりやりにくい。

[カメラ+CG]の方法についての感想

- 中央の重なり合っている部分が見にくいので、もう少し工夫する方が良い。
- マーカが見えなくなったときに表示がなくなる点が難しかった。
- [CG]，[カメラ+CG]に共通で言える事だが、飛行船の後方から見る方が左右の操作は容易だった。
- 実際の画像がある方が影も入って高さが分かるため、分かりやすかった。
- 4つの方法の中で一番操縦しやすかったが、飛行船の高度は分かりにくかった。
- 境界面が、気になって逆にやりづらい気がする。
- 全体像がある程度把握できるので分かりやすく感じた（[カメラ]，[CG]だと分かりにくく感じたので）。
- カメラ画像があることで、感覚（距離・スピード感）がつかみやすく、やりやすかったと思う。
- カメラ画像とCGの切り替わりがちらつく。
- [CG]に比べ高さが分かりやすくなったが[直視]に比べると高さは分かりにくかった。
- ちらちらして良くない。
- CGと地面との距離が分からない。
- [CG]よりは高さや壁からの距離が分かりやすいが、直視の感覚とずれるため、慣れが必要と感じた。

- 今回の床 CG+カメラ画像よりは、飛行船 CG + カメラ画像の方が、位置感覚の把握がしやすいように思う。
- [カメラ] , [CG] , [カメラ+CG] では部屋の広さと飛行船の大きさの対比が分かりにくかった。
- [CG] , [カメラ+CG] では画面のちらつきが気になった。
- カメラ画像と CG モデルの境界でのずれが気になった。
- 最も操縦しやすかった（自分で映像を選択できるため）。
- 飛行船の映像があるため、位置把握が簡単。特に左右の操作感覚が楽に感じた。
- カメラ画像がある方が、少し高さ把握ができた気がする（事前にマーカを見ていたから大きさの感覚的に？）。その他は違いがはっきりとは分からなかった。
- [CG] に比べるとやりやすくなったが、画像が重なっていて少し見にくかった。
- 微妙な姿勢の修正は難しかったが、操作はしやすかった。
- 地面がゆれるので操縦しにくかった。
- あまり [CG] との差異がなかった気がする。
- CG とカメラ画像がきちんと重なっているのかちょっと見づらかった。
- 画像と CG が合わない気がする。
- カメラ画像がある方が操縦しやすい。
- [カメラ] より視点が高く感じた。
- 高さは分かりにくいですが、周りの状況は分かりやすい。
- 画面が見づらかった。

- 左右の操作も比較的判断しやすく、やりやすかった。高さが分かればなおやりやすいと思う。

飛行船の操縦のために必要だと感じた情報・その他の記述

- 現在の三次元位置と速度と地図。
- 衝突検出または衝突回避。
- 壁がどこにあるか。特にカメラ画像では飛行船の全体が見えないため、壁に当たるのかよけられるのかが分からない。
- 飛行船を横から見た図があれば高度が分かりやすいのではないかと感じた。
- 後方への奥行きの情報。
- 全体で現在どの位置にいるかどうかの情報。
- 現在の飛行スピード。
- どれくらいの高さがベストな位置なのか（高さの情報）。
- 広い視野（人間くらい）。
- ぶつかるかぶつからないか。
- 現在の移動状況（ちょっと前とどのくらい移動したか）があると分かりやすいかもしれないと感じた。
- 空間的な広さ。
- 即応性。
- 曲がる時頭を振ってほしい。
- 上下の操作がプロペラの向きと連動なので、左右も同じと思ってしまい左右の操作が混乱した（特に飛行船は動作が遅れて出てくるので）。また、バックのときは上下の操作が逆になるので、その部分も混乱した。

- 飛行船の三次元位置（特に高さ情報）。
- 障害物との距離。
- 飛行船の動き方（俯瞰モデルは位置はわかりやすいが、飛行船がどういう姿勢かがわかりにくかった）。
- [CG] , [カメラ+CG] について , xyz 空間の情報（特に上下方向）。
- インタフェース（プロポ）と飛行船 CG とのインタラクション（リモコンの操作量に対して飛行船 CG に力覚量のようなものを加えると直感的に操作できるような気がする。誤作動を修正しやすい）。
- 前方の情報。
- 高度情報・現在の速度（惰性）。
- 広い空間だと [CG] , [カメラ+CG] の良さがより発揮されると思う。
- 高さ把握のための表示（ゲージとか m （メートル）とか）。
- 真上から見た全体図。
- 現在の高さ情報。
- 曲がる時に飛行船の後ろが当たってしまうのでその情報が分かればもう少し操縦しやすいかもしれない。
- 今、飛行船がどのくらいの惰性で進んでいるのか。
- 飛行船の先端にもカメラがあったら分かりやすくなるかもしれない。
- バードアイのような画像も見えたらもっと分かりやすかったかもしれない。
- 視点を変えて CG でいろんな方向から見れるようにすれば分かりやすいと思う。
- [カメラ] について画角。

- [CG] について飛行船の影 .
- [カメラ+CG] について画角と飛行船の影 .
- ゴンドラのプロペラの向きや , 推進方向が表示できれば良い .
- 広い視野 (画角) .
- 飛行船の姿勢と高さの直感的な情報 .
- 高度の情報 (地上まで何 m 等があると便利だと思った) .
- [カメラ] , [CG] , [カメラ+CG] では , 現在の加速度を把握するのが難しかった .
- ラグとの兼ね合いかもしれないが , どの程度の速度になってるか分かりにくかった .