

NAIST-IS-DD0261011

博士論文

拡張現実感による支援機能を有した  
レスキュー用ビークルに関する研究

小枝 正直

2005年2月3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  
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

小枝 正直

審査委員：

小笠原 司 教授	(主指導教員)
千原 國宏 教授	(指導教員)
横矢 直和 教授	(指導教員)
松本 吉央 助教授	(指導教員)

# 拡張現実感による支援機能を有した レスキュー用ビークルに関する研究\*

小枝 正直

## 内容梗概

平成7年に発生した阪神淡路大震災は、死者・行方不明6,435人、家屋全壊・焼失・流失111,054戸と未曾有の被害をもたらし、大都市の災害に対する脆弱性を露呈した。都市部での災害の被害を軽減するためには、家屋・インフラの耐震性向上など災害発生前の備えと、災害地の情報収集や救助活動などの災害発生後の行動が重要である。そこで本研究では災害発生後の行動に注目し、上空からの被災者搜索活動と地上での被災者救助活動を行うビークルと、その活動を支援するための拡張現実感システムを開発する。

まず上空からの被災者搜索活動として、遠隔操縦型無人ヘリコプタを用いた拡張現実感による被災者搜索システムについて述べる。本システムでは、無人ヘリコプタに搭載された全方位カメラ、GPS、ジャイロから得られる映像と自己位置・姿勢情報から、操縦者が装着したヘッドマウントディスプレイに被災者搜索に有用な情報を拡張現実感技術により表示し、その活動を支援する。次に地上での被災者救助活動として、電動車いすを用いた拡張現実感による被災者搜索システムについて述べる。本システムでは、レーザレンジファインダにより計測された自己位置・姿勢と、ステレオカメラにより計測された操縦者の頭部位置・姿勢情報を利用して、被災者までの経路を拡張現実感技術を用いて提示するものである。

---

\*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 博士論文, NAIST-IS-DD0261011, 2005年2月3日.

これらのシステムを用いて災害現場を模した環境において被災者捜索・救助活動の実験を行い、それらの実現可能性および有用性を示した。

キーワード

遠隔操縦，拡張現実感，ビークル，災害対策，レスキュー，支援

# Research on Rescue Vehicles with AR-based Support\*

Masanao Koeda

## Abstract

Natural disasters such as earthquakes or typhoon in urban areas make heavy damages and a large number of deaths. To reduce these damages, it is efficient to use robots for tasks of a search/rescue of diaster victims. However autonomous robots do not perform in unknown environments or indefinite tasks. The best choice in the real world is a manual operatoin. We developed two vehicles which have an Augmented Reality(AR) based support system for search/rescue operation. One is a compact size teleoperated helicopter which is utilized for searches disaster victims in a wide range. This helicopter fly over devastated areas and an operator surveys with an AR-based support system The other is a electric wheelchair which is used for rescue operation in door. The support system shows some guidance information and leads a rescue team to victims. Using these vehicles, some experiments were conducted and their feasibility was confirmed.

## Keywords:

Teleoperation, Augmented Reality, Vehicle, Disaster Control, Rescue, Support

---

\*Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0261011, February 3, 2005.

# 目次

第1章 序論	2
1.1. 研究背景と目的	2
1.2. 本論文の構成	5
第2章 災害時に利用されるロボット・ビークルと情報提示システム	7
2.1. はじめに	7
2.2. 上空からの情報収集を行うロボット・ビークル	7
2.2.1 有人ヘリコプタによる情報収集の現状	7
2.2.2 無人機による情報収集システム	10
2.3. 地上で作業を行うロボット・ビークル	12
2.4. 拡張現実感を用いた情報提示システム	12
2.5. 本研究のアプローチ	13
第3章 無人ヘリコプタによる上空からの搜索活動支援	14
3.1. 無人ヘリコプタの没入型遠隔操縦システム	14
3.2. 没入操縦シミュレータ	15
3.2.1 システム概要	15
3.2.2 シミュレータの操縦モード	15
3.3. シミュレータを用いた没入操縦での容易性向上の検証	19

3.3.1	タスク	19
3.3.2	結果と考察	20
3.4.	没入型遠隔操縦システムの実装と実機実験	32
3.4.1	システム構成	32
3.4.2	全方位画像のメモリベースド実時間透視投影変換	34
3.4.3	時間遅延に関する考察	35
3.4.4	実機による実験と結果	37
3.5.	シミュレータを用いた拡張現実感での操縦正確性向上の検証	40
3.5.1	タスク	40
3.5.2	結果と考察	40
3.6.	実機を用いた拡張現実感による被災者捜索支援	44
3.6.1	システム構成	44
3.6.2	実機を用いた実験	46
3.6.3	人物発見の限界についての考察	50
3.6.4	時間遅延に関する考察	53
3.7.	本章のまとめ	54
<b>第4章</b>	<b>搭乗型ビークルによる屋内での救助活動支援</b>	<b>55</b>
4.1.	はじめに	55
4.2.	搭乗型ロボット・ビークルの関連研究	56
4.3.	被災者救助のための拡張現実感による支援システムを有する電動 車いす	57
4.4.	レーザレンジファインダによるビークルの自己位置・姿勢の計測	59
4.4.1	計測方法	59

4.4.2	計測精度の検証 . . . . .	61
4.4.3	地図に存在しない障害物による影響の検証 . . . . .	61
4.4.4	自己位置計測が可能な移動速度の検証 . . . . .	64
4.5.	ステレオカメラによる搭乗者の頭部位置・姿勢計測 . . . . .	67
4.5.1	計測方法 . . . . .	68
4.6.	重畳表示の精度検証 . . . . .	70
4.7.	屋内環境における車いす搭乗者のナビゲーション実験 . . . . .	73
4.7.1	仮想物体による情報の表示 . . . . .	73
4.7.2	結果と考察 . . . . .	73
4.8.	災害現場を想定した被災者救助支援 . . . . .	78
4.9.	本章のまとめ . . . . .	81
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>82</b>
5.1.	まとめ . . . . .	82
5.2.	課題と今後の展望 . . . . .	83
	謝辞	85
	著者研究業績	89
	参考文献	93



# 目 次

1.1	災害発生時のシナリオ	3
1.2	災害対策ネットワーク	4
2.1	緊急支援情報システム概要図 ([1] より引用)	9
3.1	没入型遠隔操縦システム概念図	15
3.2	シミュレータのシステム構成	16
3.3	実験中の被験者	16
3.4	シミュレータを用いた通常操縦モードでの実験の様子	17
3.5	シミュレータを用いた没入操縦モードでの実験中の様子	18
3.6	操縦者, 離陸地点, 着陸地点, 障害物の配置	19
3.7	シミュレータによる実験結果	21
3.8	被験者 A 通常操縦モードでの結果	22
3.9	被験者 A 没入操縦モードでの結果	23
3.10	被験者 B 通常操縦モードでの結果	24
3.11	被験者 B 没入操縦モードでの結果	25
3.12	被験者 C 通常操縦モードでの結果	26
3.13	被験者 C 没入操縦モードでの結果	27
3.14	被験者 D 通常操縦モードでの結果	28

3.15	被験者 D 没入操縦モードでの結果 . . . . .	29
3.16	被験者 E 通常操縦モードでの結果 . . . . .	30
3.17	被験者 E 没入操縦モードでの結果 . . . . .	31
3.18	没入型遠隔操縦システム概要 . . . . .	32
3.19	HyperOmni Vision の光学系 . . . . .	34
3.20	時間遅延による影響 ([2] より引用) . . . . .	36
3.21	2001 年度生駒市総合防災訓練での実験の様子 . . . . .	37
3.22	4 方向透視投影画像の同時生成 . . . . .	38
3.23	2002 年度生駒市総合防災訓練での実験の様子 . . . . .	39
3.24	実験で得られた映像 . . . . .	39
3.25	操縦者, 離陸地点, マーカの配置 . . . . .	41
3.26	シミュレータの様子 . . . . .	41
3.27	被験者 A の飛行経路 . . . . .	42
3.28	被験者 B の飛行経路 . . . . .	42
3.29	被験者 C の飛行経路 . . . . .	43
3.30	被験者 D の飛行経路 . . . . .	43
3.31	無人ヘリコプタの操縦支援システム . . . . .	44
3.32	平城京跡地 . . . . .	46
3.33	仮想建造物 . . . . .	47
3.34	文字によるアノテーションの位置 . . . . .	47
3.35	飛行中の機体位置 . . . . .	48
3.36	実験中の機体姿勢 . . . . .	48
3.37	被災者捜索のためのアノテーション . . . . .	49

3.38	全方位カメラに撮像された人物	51
3.39	実験結果 (赤:静止画で人物と判別可能, 緑:動画で人物と判別可能, 青:動画で動物体を発見可能)	52
3.40	高度 6[m], 解像度 640x480[pixel] での人物の大きさと機体からの水平距離の関係	52
4.1	搭乗型ビークルによる救助活動と拡張現実感による情報提示	56
4.2	システム外観	58
4.3	システム構成	58
4.4	レーザレンジファインダ	59
4.5	実際の地図	60
4.6	線分で表現された環境地図	60
4.7	精度検証を行った位置	61
4.8	環境地図には存在しない障害物	63
4.9	初期位置, 目的地および障害物の位置	63
4.10	障害物がある環境下での自己位置計測結果	63
4.11	実験環境	64
4.12	移動速度 25[cm/s]	65
4.13	移動速度 29[cm/s]	65
4.14	移動速度 32[cm/s]	66
4.15	移動速度 35[cm/s]	66
4.16	移動速度 39[cm/s]	66
4.17	ステレオカメラによる顔情報計測システムの概観	67
4.18	テンプレート画像と計測中の様子	68

4.19	顔情報計測システムの処理の流れ	69
4.20	車いすと搭乗者の座標系	70
4.21	重畳表示の精度検証実験実施箇所	71
4.22	計測点1における実験結果	72
4.23	計測点2における実験結果	72
4.24	案内予定経路とアノテーションの位置および文字列	74
4.25	実際の走行経路	75
4.26	サブゴールまでの距離と方向に応じて変化する矢印の形状	76
4.27	車いすのみを回転させた場合の仮想物体の動き	77
4.28	頭部姿勢のみを回転させた場合の仮想物体の動作	77
4.29	地図に存在しない障害物が多数存在する実験環境	78
4.30	スタート地点, 被災者の位置と案内経路	79
4.31	走行中の自己位置推定結果	79
4.32	救助活動開始から終了までの案内の様子	80

# 表 目 次

2.1	消防・防災ヘリコプタの配備推移 ([3] より引用) . . . . .	8
3.1	障害物と着陸地点の座標 . . . . .	20
3.2	没入型遠隔操縦システム仕様 . . . . .	33
3.3	画像取得から表示までにかかる時間 . . . . .	36
3.4	操縦支援システム仕様 . . . . .	45
3.5	画像伝送にかかる遅延時間 . . . . .	53
4.1	自己位置計測システムの精度評価結果 . . . . .	62

# 第1章 序論

## 1.1. 研究背景と目的

日本周辺には活火山が集中して存在しており，地球上で発生する地震のおよそ1割が日本周辺で起きるとい世界有数の地震多発地帯である [4]．平成7年に発生した阪神淡路大震災は，死者・行方不明者 6,435 人，家屋全壊・焼失・流失 111,054 戸と壊滅的な被害をもたらした [5]．この地震は大都市で発生する災害の恐ろしさを示すとともに，大都市の災害への脆弱性を露呈することとなった．現在までに災害地で活動するロボットが世界中で開発されてきたが，災害による被害の軽減を目指した大規模な事業として，2002 年から開始された大都市大震災軽減化特別プロジェクトがある．本プロジェクトは，首都圏や京阪神などの大都市圏において阪神・淡路大震災級の被害をもたらす地震災害における人的・物的被害を最小限に抑えるための技術開発と，地震防災対策に関する科学的・技術的基盤の確立を目的とし，全国の大学・研究所が参加して5年計画で研究・開発が行われている．本プロジェクトは，

1. 地震動（強い揺れ）の予測 「大都市圏地殻構造調査研究」
2. 耐震性の飛躍的向上 「震動台活用による耐震性向上研究」
3. 被災者救助等の災害対応戦略の最適化 「災害対応戦略研究」
  - (a) 震災総合シミュレーションシステムの開発
  - (b) 大都市特性を反映する先端的な災害シミュレーションの技術の開発
  - (c) 巨大地震・津波による太平洋沿岸巨大連担都市圏の総合的対応シミュレーションとその活用手法の開発

(d) レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発

4. 地震防災対策への反映

の4つのプロジェクトと4つのサブプロジェクトから構成されている。特にサブプロジェクト3-(d)では、NPO法人国際レスキューシステム研究機構を中核機関として、大震災における緊急災害対応のための人体検索、情報収集、配信等の支援のためのロボット、インテリジェントセンサ、ユビキタス端末、ヒューマンインタフェース等の開発を担っている。また本サブプロジェクトでは災害発生時のシナリオを図1.1のように想定し、早期のうちにロボット等が効率的に貢献できる項目である情報収集 [6] に注目して、上空、地上、地中からの迅速な情報収集ロボットの開発に重点を置いている。

ここで、[7, 8]によれば地震災害での救助は次のようなプロセスで実行される。

1. 覚知: 要救助者の存在を知る。
2. 状況把握: 現場の状況を把握する。
3. 救助計画: 救助手順・分担などを計画する。
4. 検索: 要救助者の位置を特定する。

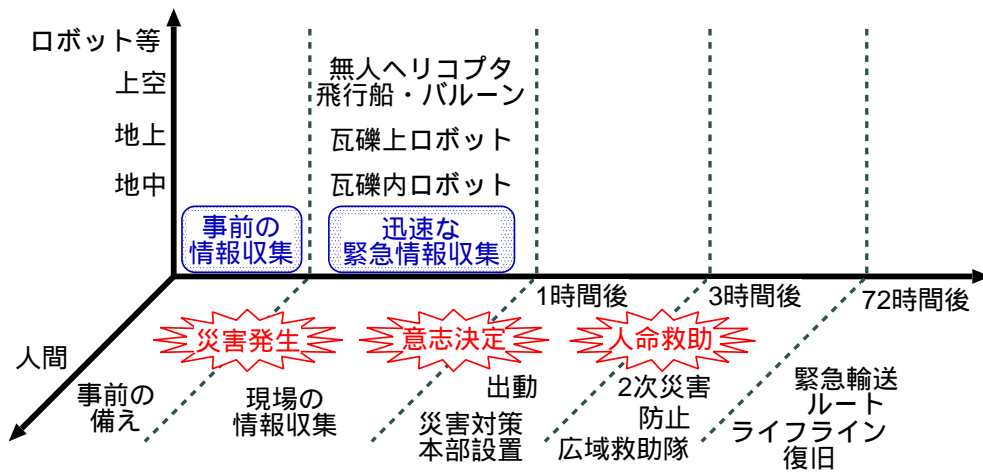


図 1.1 災害発生時のシナリオ

5. 排除: がれきを排除する .
6. 収容: 要救助者の体を収容する .
7. 救急: 診断・応急処置・救急医療・心理的援助を行う .
8. 搬送: 要救助者を病院等に搬送する .
9. 報告伝達: 活動に関する報告伝達を行う .

これらの内、サブプロジェクト 3-(d) で対象としているのはプロセス 2,4 であり、開発されているロボットの大部分が状況把握、検索用途を目的としているが、プロセス 5,6 においてロボットを利用することによりさらなる災害被害の軽減が期待できると考えられる。そこで本研究では、図 1.2 に示す災害対策ネットワークにおける、検索と収容のプロセスに着目して、災害時における被災者捜索と救助活動のためのビークルとそれを支援するためのシステム開発を目的とする。捜索活動においては、上空からの広域捜索を実現するためにビークルとして無人ヘリ

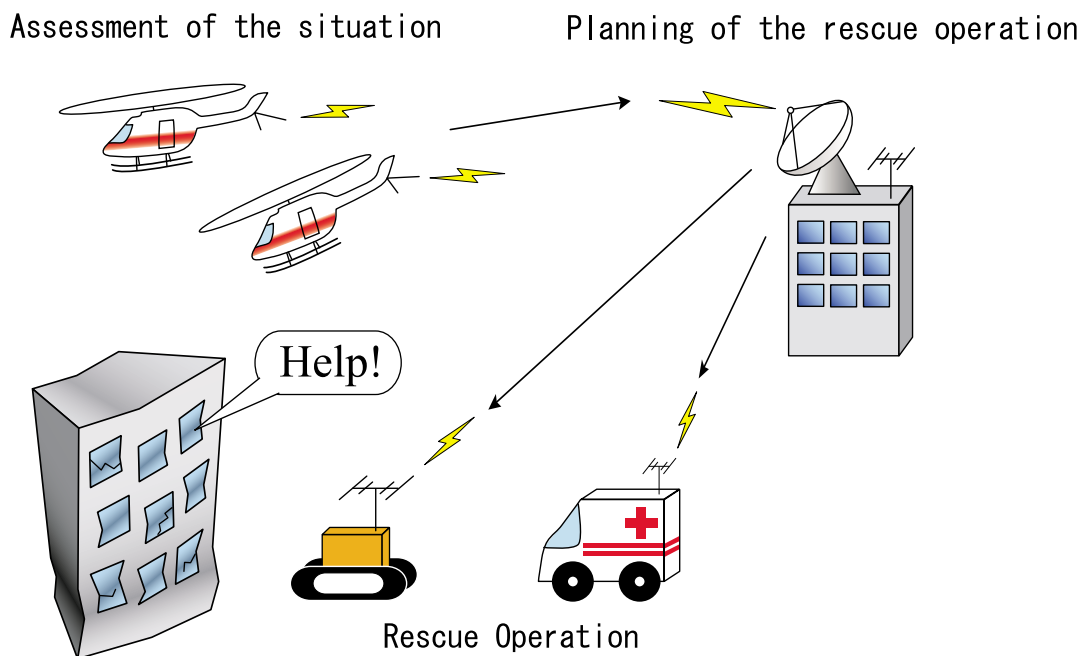


図 1.2 災害対策ネットワーク



コプタを用い，その操縦および搜索活動を支援するための拡張現実感システム，救助活動においては，被災したビルなどの屋内に存在する要救助者の救助を実現するためにビークルとしてを電動車いすを用い，非拘束・非接触な自己位置・姿勢計測と搭乗者頭部位置・姿勢計測手法を用いた拡張現実感による支援システムを実現する．

## 1.2. 本論文の構成

本論文は以下の 5 章から構成される．

第 2 章: 災害時に利用されるロボット・ビークルと情報提示システム 災害時の緊急対策のための被災者検索，情報収集を支援することを目的としたロボット，センサ，ヒューマンインタフェースに関する研究を列挙し，緊急災害対応活動を支援するために必要なシステムと要素についてまとめる．

第 3 章: 無人ヘリコプタによる上空からの搜索活動支援 はじめに国内外における主要な自律型無人ヘリコプタの研究を紹介し，小型の無人ヘリコプタによる自律飛行の可能性とその限界について考察する．次に無人ヘリコプタの没入型遠隔操縦について説明し，その特長とシステム概要を述べる．シミュレータと実機無人ヘリコプタを用いた実験とその結果を示す．さらに拡張現実感技術を用いた支援システムによる実機を用いた実験について述べる．

第 4 章: 搭乗型ビークルによる屋内での救助活動支援 屋内での救助活動に有用な搭乗型ビークルによる拡張現実感による支援システムについて述べる．これはレスキュー隊が装着した情報端末に要救助者が存在する位置までの経路を拡張現実感技術を用いて実画像に重畳表示することで，低視程下での移動の補助し，迅速な救助活動を支援するものである．本システムを用いて災害時の屋内環境を想定した状況で要救助者の救助活動支援を行い，その実現性を示す．

第5章: 結論 本論文を通しての実験と結果から本研究で得られた知見を総括し、今後の展開と可能性について述べる。さらに現状での問題点とそれらの解決への道標を示す。

## 第2章 災害時に利用されるロボット・ビークルと情報提示システム

### 2.1. はじめに

都市部での災害の被害を軽減するためには、災害地の情報収集や救助活動などの災害発生後の行動が重要である。本章では災害時に有用な情報収集および被災者救助用ビークルと救助活動の支援に有用な情報提示システムについての研究についてまとめる。最後に本研究で目標とする拡張現実感を用いた上空からの被災者搜索活動と、地上での被災者救助活動を行うビークルの特徴について述べる。

### 2.2. 上空からの情報収集を行うロボット・ビークル

#### 2.2.1 有人ヘリコプタによる情報収集の現状

ヘリコプタは垂直に離着陸できるため滑走路が必要ないこと、ホバリングが可能なことなど固定翼機にはない特長を持っており、現在様々な用途に用いられている。代表的な用途・作業内容としては、以下のようなものがある。

- 災害情報の把握，救助活動，山林等の消火活動及び救助活動
- 農薬や肥料散布等の農作業
- 航空写真の撮影
- 建築資材等の輸送運搬

表 2.1 消防・防災ヘリコプタの配備推移 ([3] より引用)

年度(平成)	7年	8年	9年	10年	11年	12年	13年	14年
消防ヘリコプタ	26	26	26	27	27	27	27	27
防災ヘリコプタ	24	32	37	39	40	41	41	41
計	59	58	63	66	67	68	68	68

これらの中で特に消防・防災ヘリコプタについては、阪神・淡路大震災以降において、その有効性が広く認識されたことによる財政措置の拡充で、急速に全国への配備が進められており、平成14年度末時点で全国に68機が配備されている(表2.1)。災害発生時には被災状況などを映像情報により把握することが迅速かつ効率的な救助活動に有効な手段であり、消防・防災ヘリコプタから撮影された被災地映像を解析し、被災範囲等を迅速かつ正確に把握するための緊急支援情報システム(図2.1)についても早急に整備を行う必要がある[9, 10]。しかし

- 機体維持費，運用コストが高価
- 操縦者の養成が困難
- 低空域の飛行は禁止
- 危険地域での利用に制約

と多数の問題を抱えている。また有人ヘリコプタが飛行時に発生する騒音が地上での救助活動の妨げになったとの報告もある[11]。そこで無人機による作業の代替が検討されている。無人機を利用することにより運用コストが格段に抑えることができ、低騒音で作業が可能になるという利点がある。

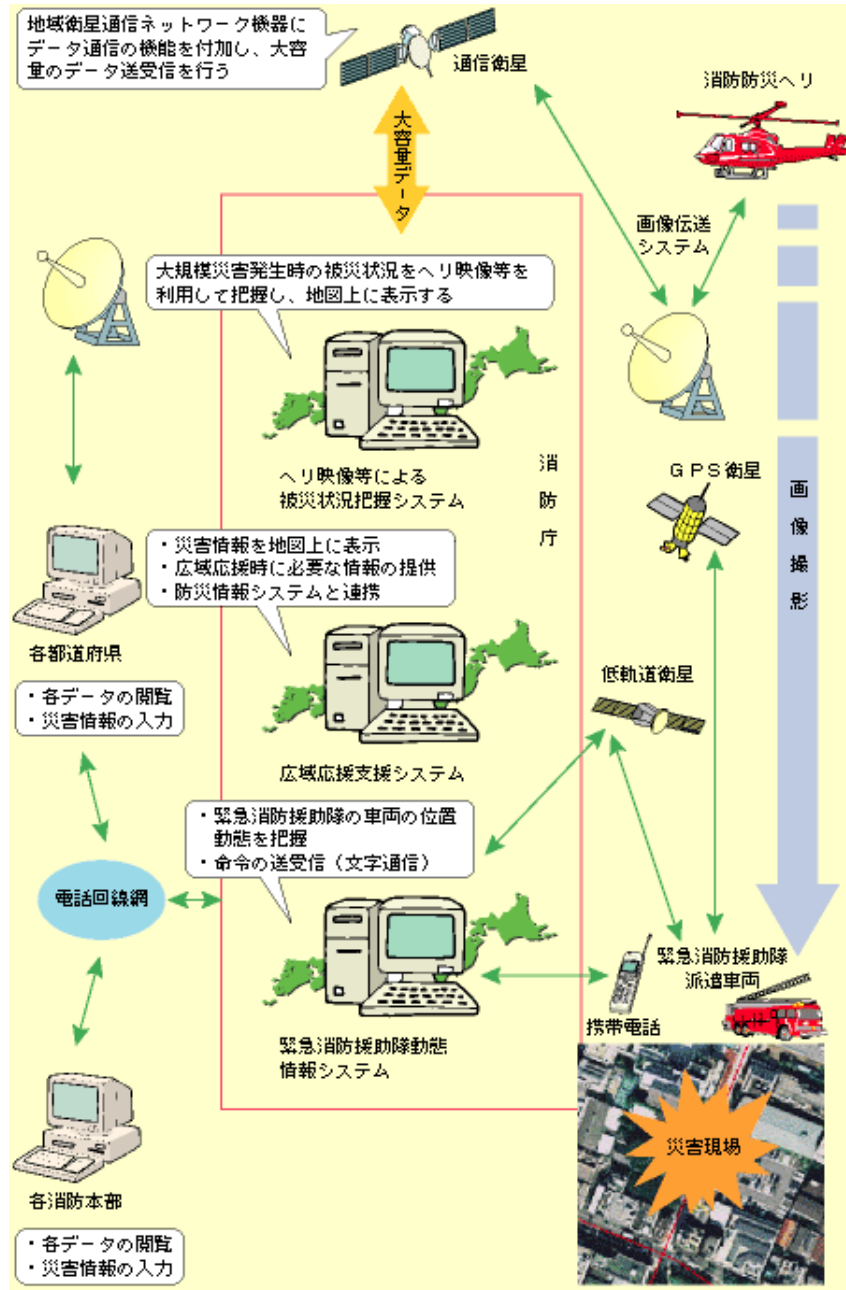


図 2.1 緊急支援情報システム概要図 ([1] より引用)

## 2.2.2 無人機による情報収集システム

**ヤマハ発動機** ヤマハ発動機では1988年に無人ヘリコプタ R-50 を，1997年に RMAX を発売した．これらの機体には加速度センサと光ファイバージャイロなどが内蔵された姿勢制御装置 YACS(YAMAHA Attitude Control System) と呼ばれるシステムが搭載されており，機体の姿勢制御を行っている．さらに GPS，通信モデムが搭載された自律飛行が可能なシステム [12] が開発されており，有珠山火口付近の観測 [13] や，モンゴルでの植物生育観測調査 [14] など実環境での実験が行われている．

**Carnegie Mellon University** Carnegie Mellon University の Autonomous Helicopter Project では YAMAHA R-50 をベースとしてカメラやレーザレンジファインダ，GPS 等を搭載した自律ヘリコプタを開発している．このシステムでは搭載されたカメラの画像を用いて機体の姿勢制御を行い，あらかじめ指定されたパスに沿って自律的に飛行することが可能である [15, 16]．また，機体の 3 次元位置・姿勢とレーザレンジファインダから得られた地表のデータなどから，高精度な 3 次元地図の作成が可能で，極地のクレータ等の地形計測実験などを行っている [17, 18]．

**東京工業大学** 東京工業大学の中村らは YAMAHA RMAX をベースにカメラと GPS を搭載した自律飛行システムを構築している [19, 20]．飛行の制御には YACS をソフト的に改造したものをを用いており，大局的なナビゲーションには GPS，着陸上付近の最終アプローチには画像情報を利用することで無人ヘリコプタの自動着陸を実現している．また機体に搭載されたカメラを用いて着陸地点となるランドマークを発見・追跡して自動着陸を行うことが可能である．

**富士重工業** 富士重工業で開発されている大型無人ヘリコプタ RPH2A は2001年から運用が開始されており，三宅島や北海道樽前山などの火山観測等で既に実績をあげている．本システムの特徴としては飛行経路に従った自律飛行，自律飛行

中であっても必要に応じて地上からの指令でホバリング・移動・旋回などが可能なことが挙げられる [21] .

産業技術総合研究所 本グループでは対象とする作業を情報収集に絞り、ワンマンオペレーションが可能な小型無人ヘリコプタを開発している。最終目標は高精度 GPS や IMU(Inertial Measurement Unit) , ステレオビジョンなどによる高精度な位置制御, 姿勢安定化制御, 高精度誘導制御の実現である [22, 23] . 現在は3台のカメラ用いた3次元地表画像生成が可能である [24] .

千葉大学 実験データと簡単な運動解析により単純なヘリコプタモデルを導出し、ヘリコプタの位置制御を実現している。ヘリコプタには自律制御装置, GPS , カメラ, 画像伝送装置等が搭載されており, 予め設定した飛行ルートに沿った飛行や, 上空で撮影した画像を無線で地上に送信することが可能である [25, 26, 27, 28] . この技術を応用して, ヒロボーおよび中国電力と共同で, 送電線巡視・点検の効率化を目指した無人ヘリコプタによる送電線巡視システムを開発している。

京都大学大学院工学研究科 災害発生時に被災地の情報収集を行う防災用エアロロボットを開発している。YAMAHA RMAX をベースに, 観測用カメラや RTK-GPS などのセンサを搭載し, さらに複合航法システムにより機体の位置・姿勢を高精度に推定するシステムを持つ。また広域用無線 LAN を搭載しており, 収集した情報を地上局へ送信できるため情報のリアルタイムモニタリングが可能となっている。さらにステレオ画像処理システムにより3次元地形マップの作成が可能である [29, 30] .

北海道大学 本研究は被災者の自発的な避難行動の支援を目的としている。情報収集・配信機器をヘリウムガス気球に搭載し, 被災地上空を飛行して収集された災害情報を周辺の被災住民に配信する InfoBalloon を開発している [31, 32, 33] .

理化学研究所 被災者への音声による呼びかけや被災者からの音声の録音機能を持った自律飛行船を開発している。飛行船には無線通信可能な小型デバイスが搭載されており、これを用いて並列的に被災者を探索して情報を迅速に収集するシステムを構築している [34]。

## 2.3. 地上で作業を行うロボット・ビークル

神戸大学 閉じこめられた被災者の発見を目的とした探索用小型ロボット UMRS (Utility Mobile Robot for Search) の開発および UMRS を使った探索システムの研究開発を行っている [35, 36, 37, 38]。センサからのデータやカメラ映像は無線 LAN でホストコンピュータに送信される。ホストコンピュータでは送られてきたデータを処理し、探索用マップを作成する。ロボットに搭載されるセンサはカメラ、赤外線センサ、二酸化炭素センサなどである。

東京工業大学 高い走破性が実証されている適応型能動 4 クローラ機構の単純化を目指して能動 2 クローラモデルを開発し [39, 40, 41]、これに作業用アームを搭載した移動クローラ車両を製作している。また圧縮空気を利用して回転運動と跳躍運動との両者を選択的に生成できる高い障害物踏破能力を持ったロボットを開発している [42, 43]。

## 2.4. 拡張現実感を用いた情報提示システム

拡張現実感 (AR: Augmented Reality) とは現実映像上に注釈となるテキストや仮想 CG オブジェクトなどを重畳して表示することにより、現実空間をバーチャルリアリティ (VR: Virtual Reality) 技術で拡張あるいは強化する手法である [44, 45]。災害時の利用を想定したものとしては、瓦礫の下に潜り込んだロボットの位置情報に基づき、救助現場の風景上にロボットを示す仮想物体を示すシステム [46] や、ウェアラブルコンピュータを用いた災害活動時のダイナミック情報提示・支援シス



テム [47] がある。その他，災害救助目的では無いが Höllerer らによる MARS[48]，興梠らによる Weavy[49]，天目らによる [50]ARISE などのウェアラブルな拡張現実感システムが研究・開発されている。

## 2.5. 本研究のアプローチ

本章では災害時に有用な被災者救助・情報収集ビークルと救助活動の支援に有用な拡張現実感を用いた情報提示システムに関する研究をまとめた。

効率的な被災者救助・情報収集には上空からの広範囲な調査が有利であることは明らかである。現時点においてはヘリコプタによる情報収集が最適であると断言できるが，有人ヘリコプタには先に述べた通り様々な問題を抱えているため，今後無人化されていくことが予想される。気球・飛行船を用いた情報収集システムも研究されているが，安定性が高い反面，機動性・運動性が低く，迅速な情報収集には不適である。また自律飛行型ヘリコプタでは，移動の際に決められたマーカを認識して追従するものや，設定された経路に沿った飛行などに留まっている。被災地での搜索活動は状況変化の激しく，効率的な搜索を行うためには，柔軟な行動が求められ，人間による判断が不可欠であり，中西らは [51] で，自律飛行の限界とオペレータによる遠隔から制御指令を与える半自律飛行の必要性に言及している。

そこで筆者は無人ヘリコプタの遠隔操縦に注目した。第 3 章では，筆者が開発した遠隔操縦型無人ヘリコプタの操縦システムと効率的に被災地域の情報収集を行うための拡張現実感を用いた情報提示システムについて述べる。

一方，現在までに開発されてきた災害対策用ビークルは，1.1 節で述べた災害地での救助のプロセスのうち状況把握と検索を目標としたものが殆どで，それ以外のプロセスに関しては研究・開発が進んでいない。そこで本研究のもう一つの目標として，救助プロセスの収容に有用なビークルの開発を目指す。第 4 章では，筆者が開発した屋内での被災者救助活動に有用な搭乗型ビークルとその活動を支援するための拡張現実感を用いた情報提示システムについて述べる。

## 第3章 無人ヘリコプタによる上空からの搜索活動支援

### 3.1. 無人ヘリコプタの没入型遠隔操縦システム

無人ヘリコプタの操縦は実機ヘリコプタの操縦より困難であると言われている。この原因として、操縦中に操縦者と機体の相対位置が大きく変化することや、操縦者と機体の距離が大きく離れた場合に目視で機体の姿勢を把握することが困難になることなどが挙げられる。無人ヘリコプタの運用範囲は、機体のサイズや操縦者の視力にもよるが、操縦者からおよそ100[m]程度が限界で、距離が離れるとともに安定飛行や飛行精度の維持が難しくなる。また遠方における高精度の飛行はごく一部の熟練した操縦者にしかできない。そこで本システムでは無人ヘリコプタにカメラを搭載して映像を無線により送信し、受信した映像を没入型ディスプレイに表示、操縦者はその映像を見ながら操縦を行う。これにより飛行中においても操縦者の視点は機体座標系に固定され、ヘリコプタの操縦が容易になると考えられる。また操縦者から機体が目視できない場合でも機体から送信された映像がディスプレイに映っている限り操縦を継続することができること、さらに機体へ搭載する機器が少ないので小型の機体を用いることができ、安価にシステムの構築ができるという利点がある。図3.1に没入型遠隔操縦システムの概念図を示す。まず没入操縦が行えるシミュレータを構築し、これを用いて被験者実験を行うことで没入操縦の優位性を示す。

## 3.2. 没入操縦シミュレータ

### 3.2.1 システム概要

構築したシミュレータのシステム構成を図 3.2 に示す。操縦者は角度センサ付きのHMDを装着し、そこに映る映像を見ながら無人ヘリコプタ用の操縦装置を用いて操作を行う。図 3.3 に実験中の操縦者の様子を示す。図中の JOYPRO-2 は、無人ヘリコプタの操縦装置をジョイスティックデバイスに変換する装置である。

### 3.2.2 シミュレータの操縦モード

本シミュレータには、通常操縦モードと没入操縦モードの2つが存在する。通常操縦モード(図 3.4)では、通常の無人ヘリコプタの操縦を模したのもで、操縦

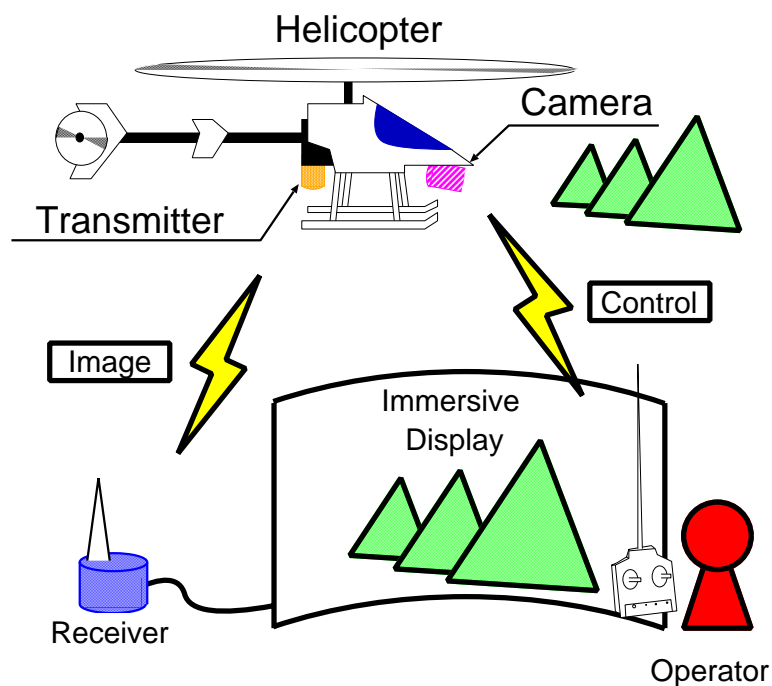


図 3.1 没入型遠隔操縦システム概念図

者は地上から機体を見ながら操縦を行う。操縦者自身の移動はできない。没入操縦モード(図3.5)では、操縦者は機体に搭載されたカメラの映像を見ながら操縦を行う。操縦者の頭の動きに応じて視点が変わり、没入した状態での操縦が可能である。またヨー方向とピッチ方向の頭の向きがそれぞれ上と左の 슬라이ドバーで表示されるため、どこを見ているのかが分かるようになっている。ただし表示される映像は全方位画像の展開や時間遅延を模していない。

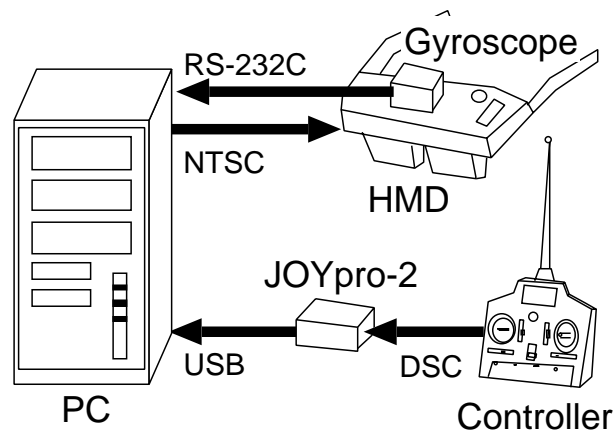


図 3.2 シミュレータのシステム構成



図 3.3 実験中の被験者

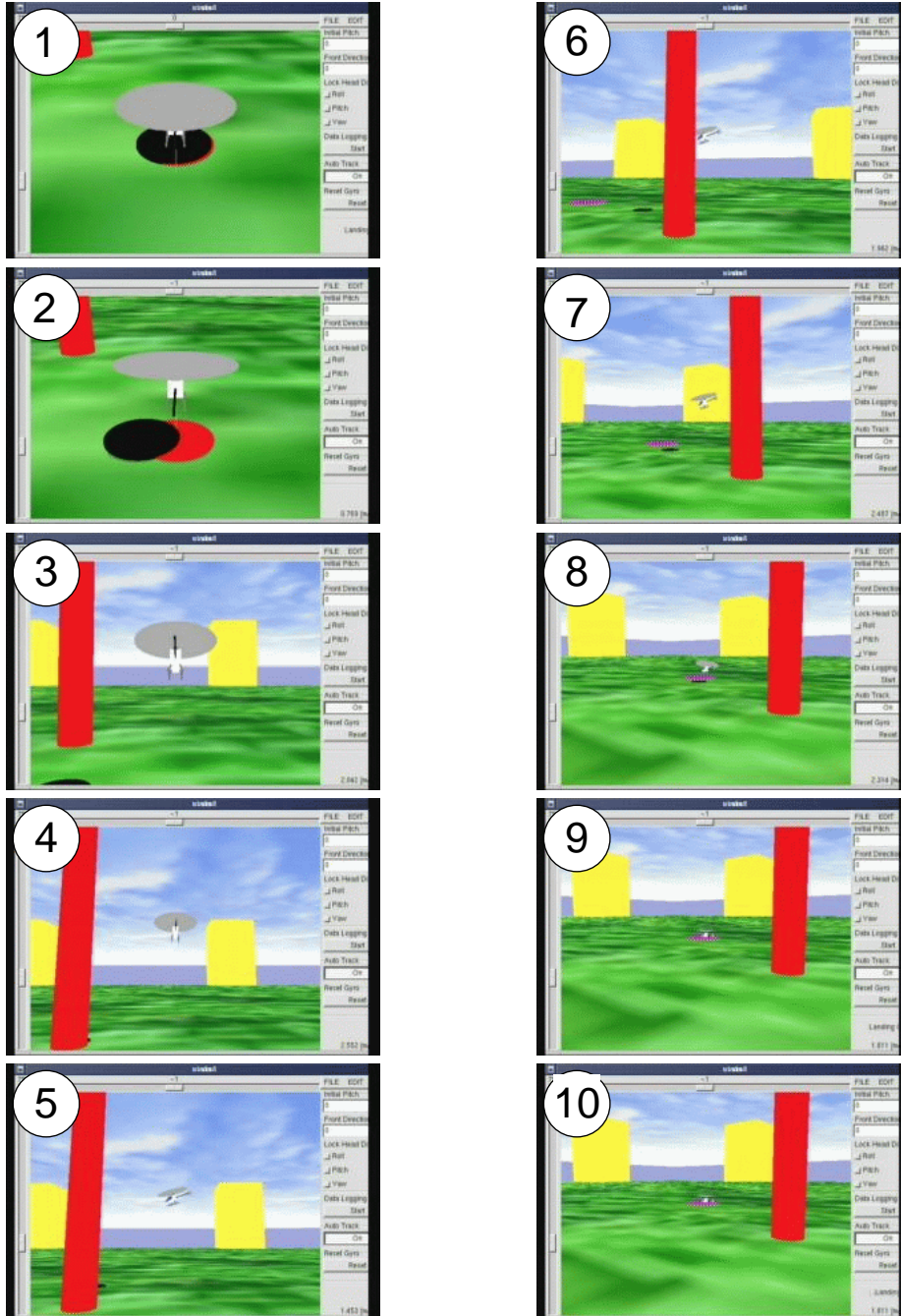


図 3.4 シミュレータを用いた通常操縦モードでの実験の様子

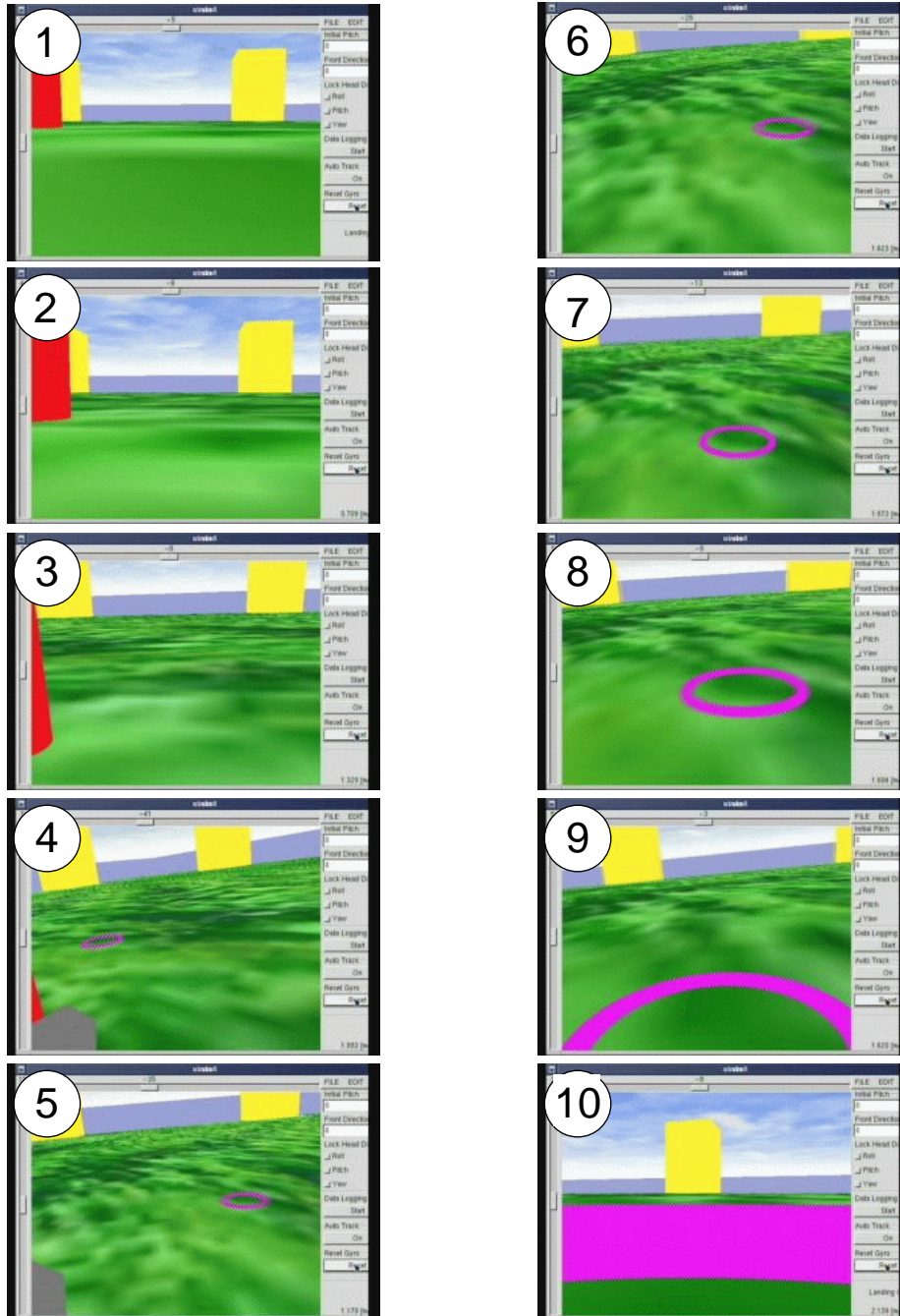


図 3.5 シミュレータを用いた没入操縦モードでの実験中の様子

### 3.3. シミュレータを用いた没入操縦での容易性向上の検証

#### 3.3.1 タスク

通常の操縦と没入状態での操縦の操縦性の違いを検証するため、環境に存在する障害物を避けて、離陸地点から着陸地点まで飛行するというタスクを5人の被験者に両モードで行わせた。障害物および着陸地点の配置を図3.6に示す。各実験での目的地と障害物の位置を表3.1にまとめる。本タスクは目的地から2[m]以内に着陸した時点で終了する。眼球の水晶体調整や輻輳角による立体知覚の限界が10[m]程度である[52, 53]ことから、着陸地点と操縦者の距離を15[m]程度に設定した。被験者は全員無人ヘリコプタの操縦経験が無いため、操縦装置とヘリコプタの挙動を覚えるために、両モードでそれぞれ10分程度練習をした後に実験を行った。

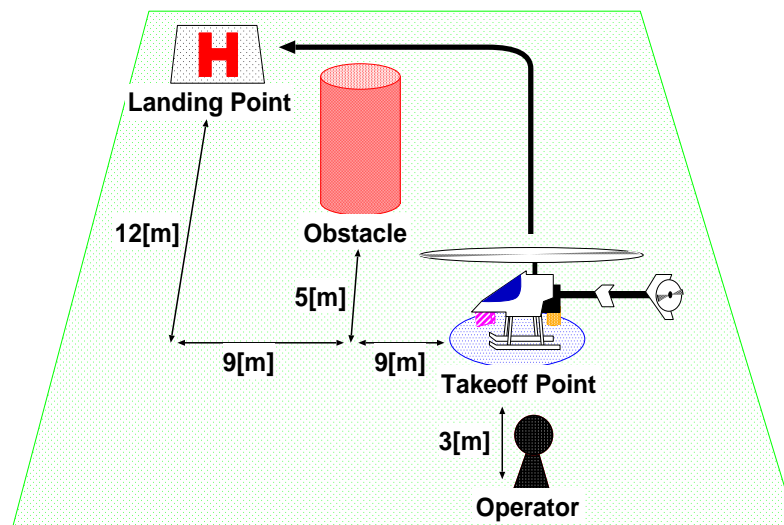


図 3.6 操縦者，離陸地点，着陸地点，障害物の配置

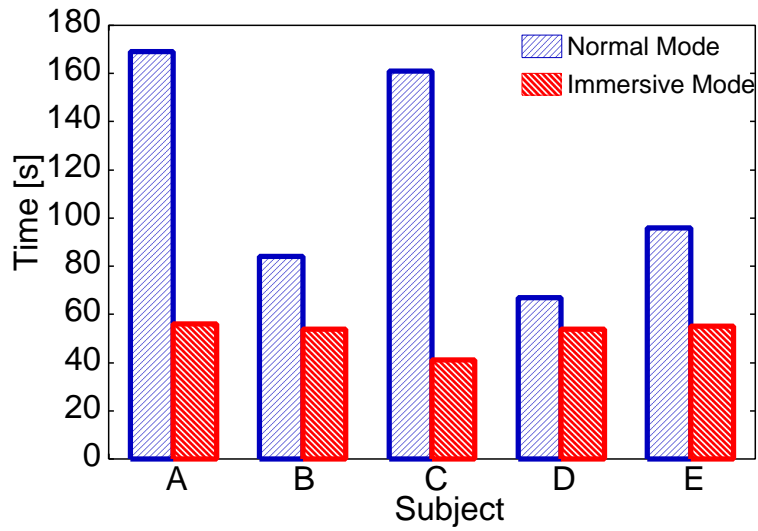
### 3.3.2 結果と考察

全被験者のタスク達成時間と総飛行距離を図 3.7 に，両モードにおける飛行軌跡，高度変化，速度変化を図 3.9～3.17 に示す．全ての被験者に対してタスク達成時間の短縮が確認できた．短縮率は平均 45%，最小 19%(被験者 D)，最大 75%(被験者 C) となった．また総飛行距離に関しては，被験者 D, E ではほとんど変化はなかったが，被験者 A, B, C では大幅に短縮された．被験者 D, E で総飛行距離にあまり変化が見られなかった原因としては，離陸地点-着陸地点間の距離が短く設定したことが考えられる．本実験ではタスク達成までの時間を比較するために短距離で実験を行った．もし離陸地点-着陸地点間の距離を離して実験を行った場合，通常操縦モードでは着陸地点付近で機体の位置および姿勢の認識が不明確になり，タスク達成までに膨大な時間がかかることに予想できるため，没入操縦での優位性が確認できることは明らかである．以上の結果より，没入状態での無人ヘリコプタの操縦は通常の操縦に比べて容易になることが確認できた．

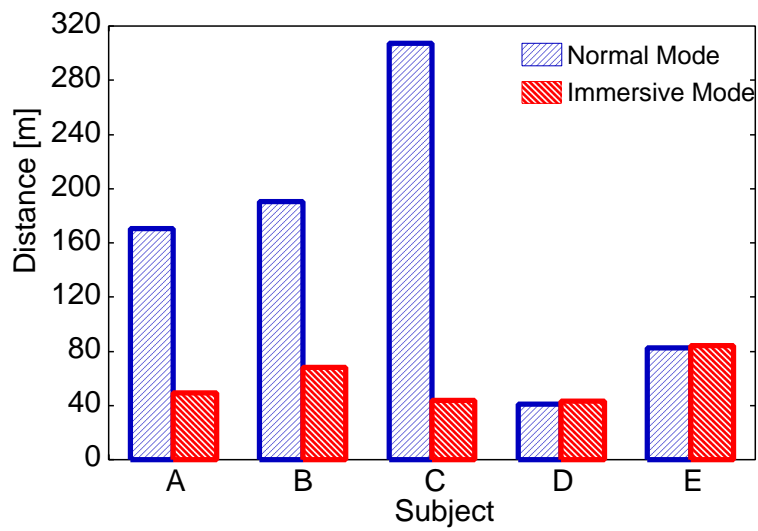
表 3.1 障害物と着陸地点の座標

	障害物 [m]	着陸地点 [m]
被験者 A	(10, 3)	(15, 15)
被験者 B	(3, 3)	(5, 10)
被験者 C	(5, 3)	(12, 12)
被験者 D	(5, 3)	(12, 12)
被験者 E	(5, 3)	(12, 12)



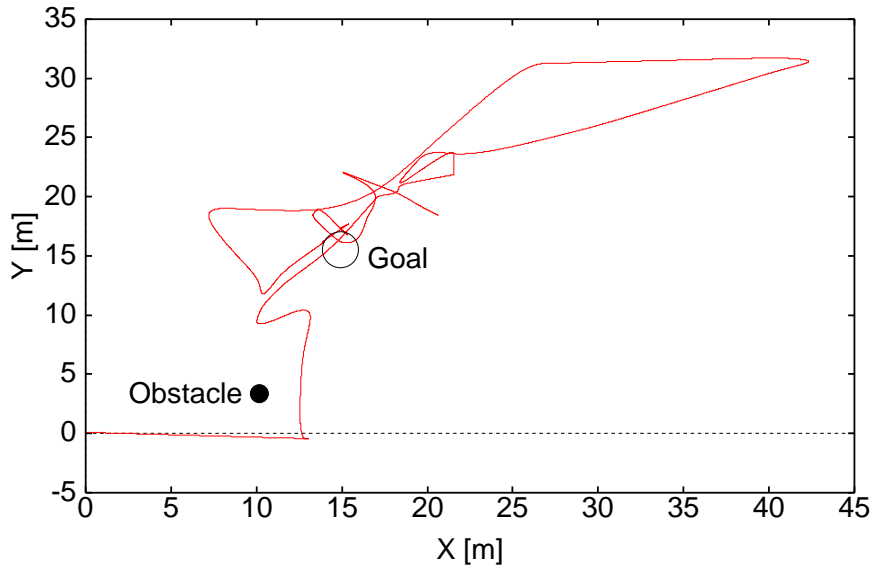


(a) タスク達成時間

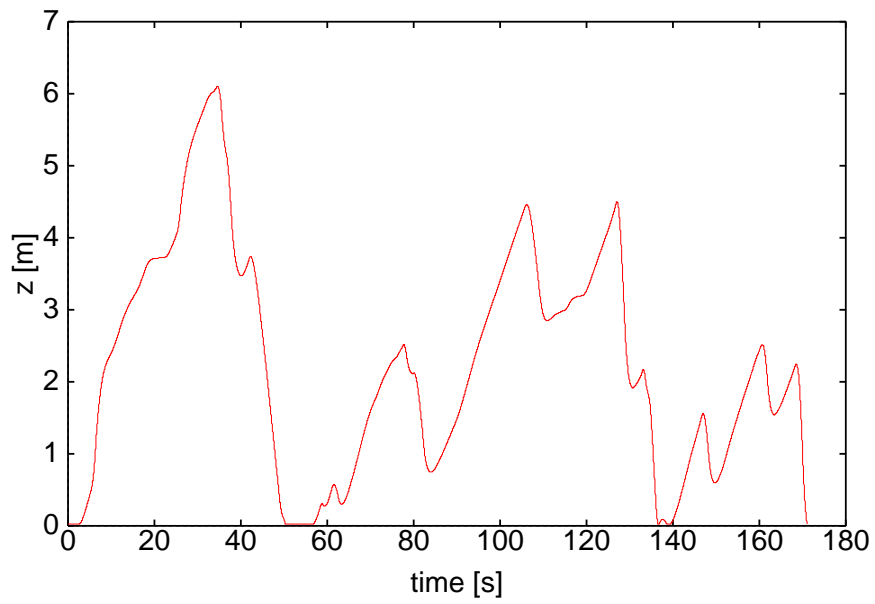


(b) 総飛行距離

図 3.7 シミュレータによる実験結果

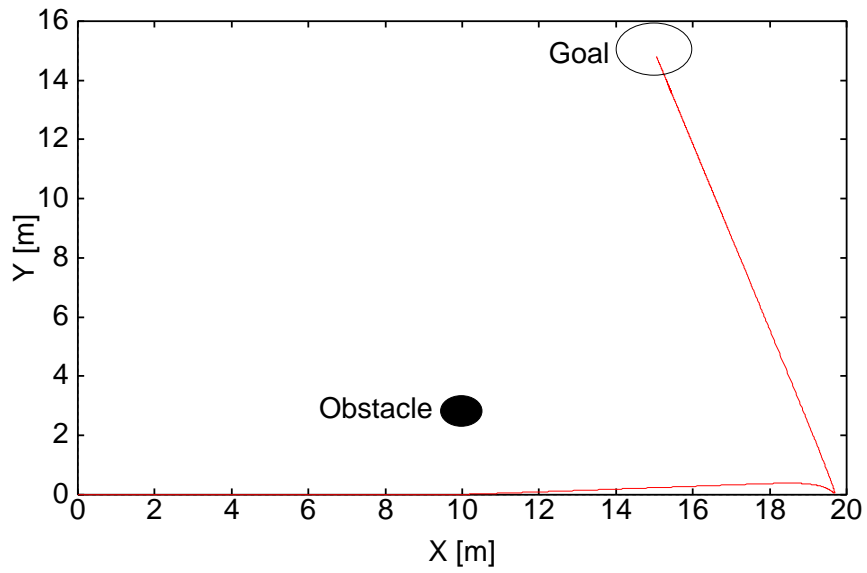


(1) 飛行軌跡

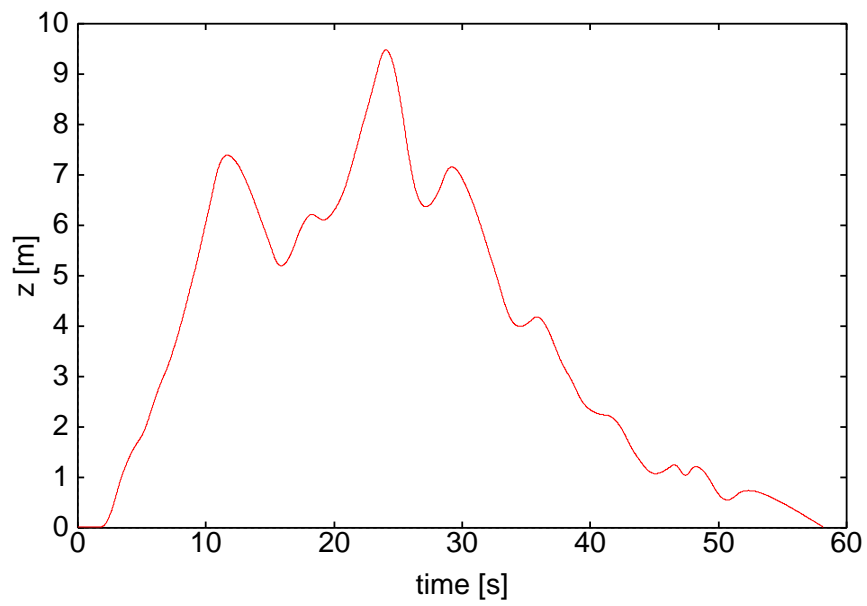


(2) 高度の時間変化

図 3.8 被験者 A 通常操縦モードでの結果

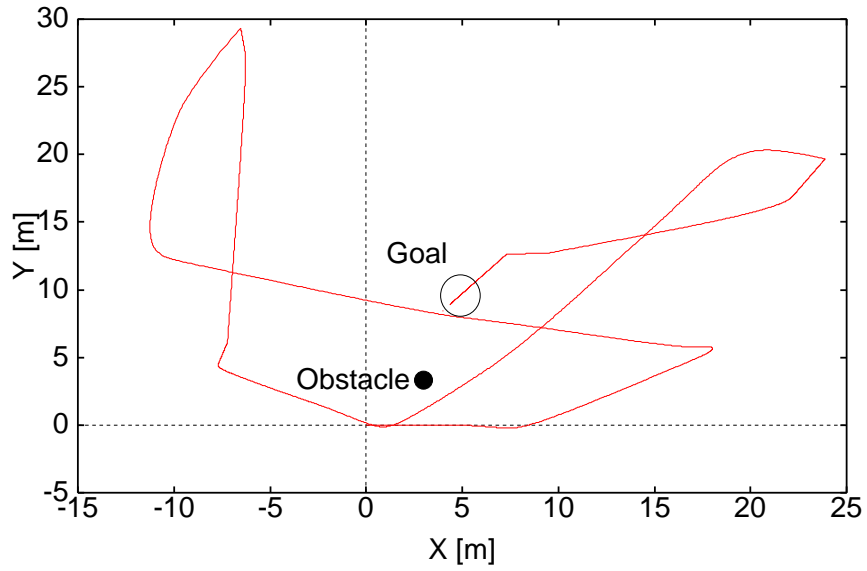


(1) 飛行軌跡

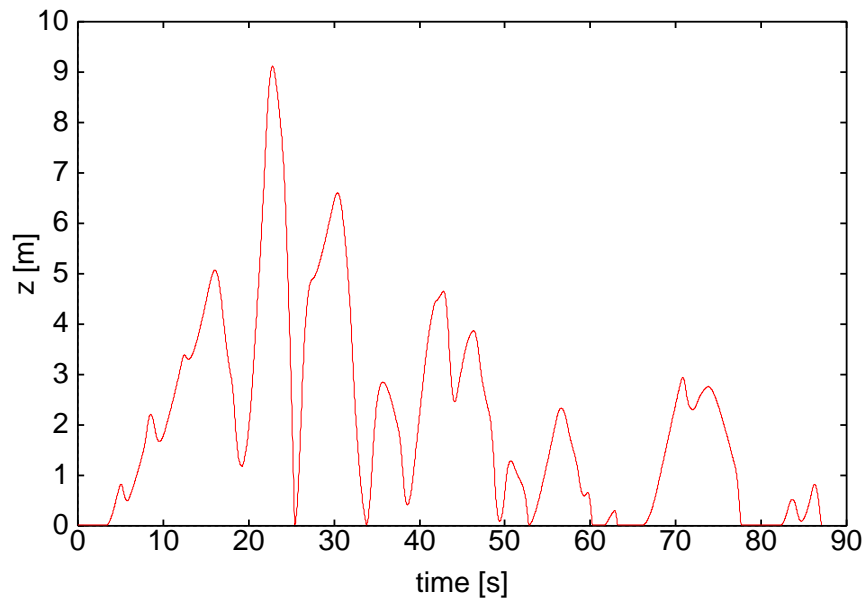


(2) 高度の時間変化

図 3.9 被験者 A 没入操縦モードでの結果

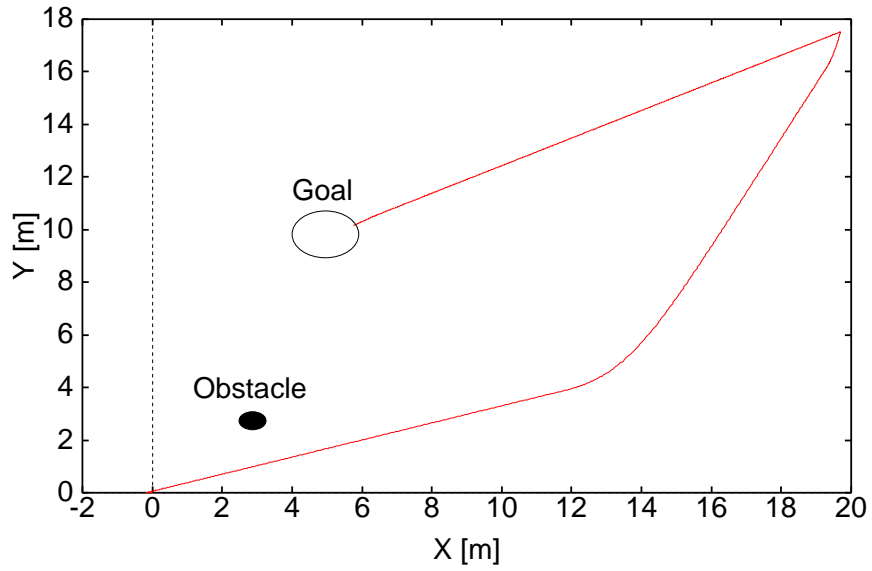


(1) 飛行軌跡

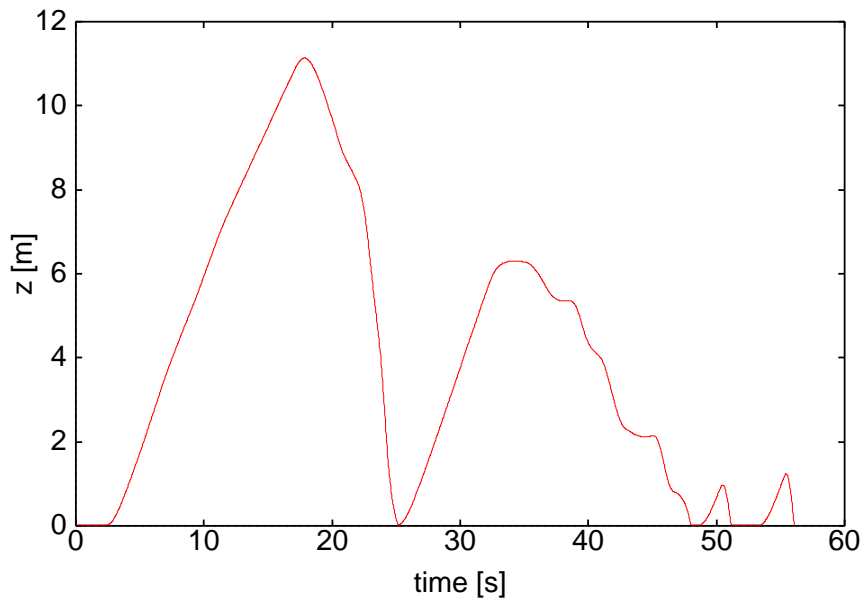


(2) 高度の時間変化

図 3.10 被験者 B 通常操縦モードでの結果

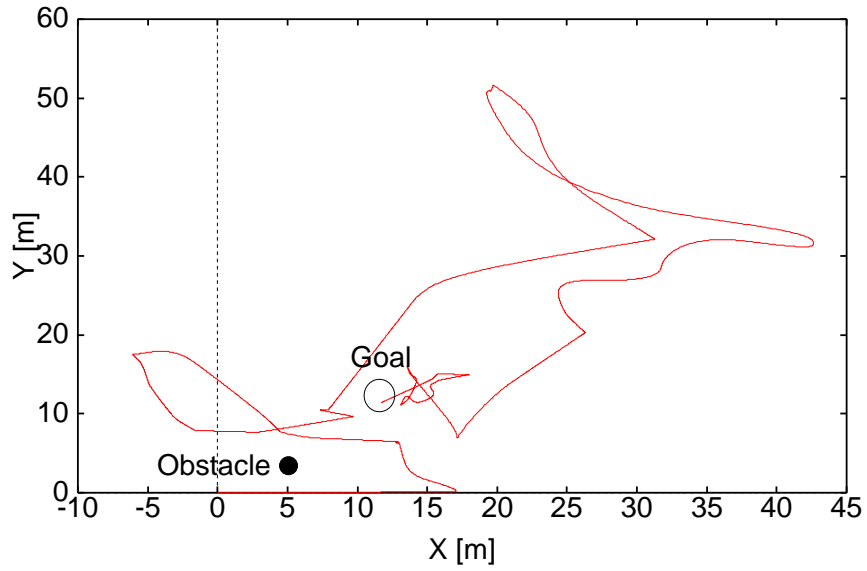


(1) 飛行軌跡

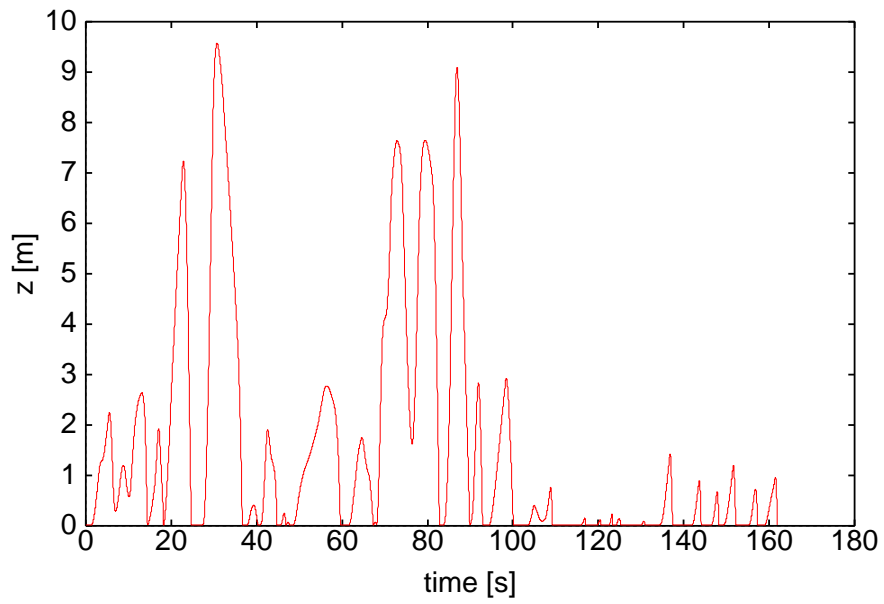


(2) 高度の時間変化

図 3.11 被験者 B 没入操縦モードでの結果

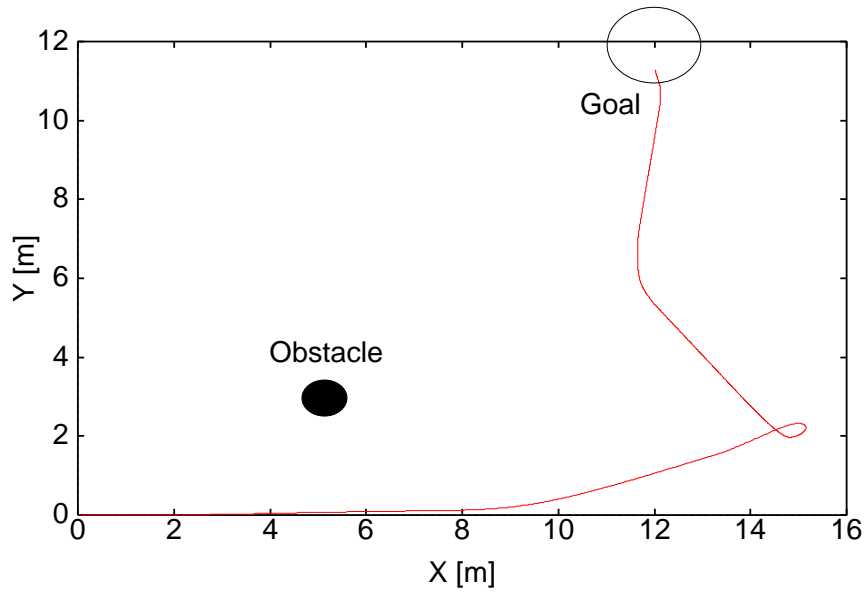


(1) 飛行軌跡

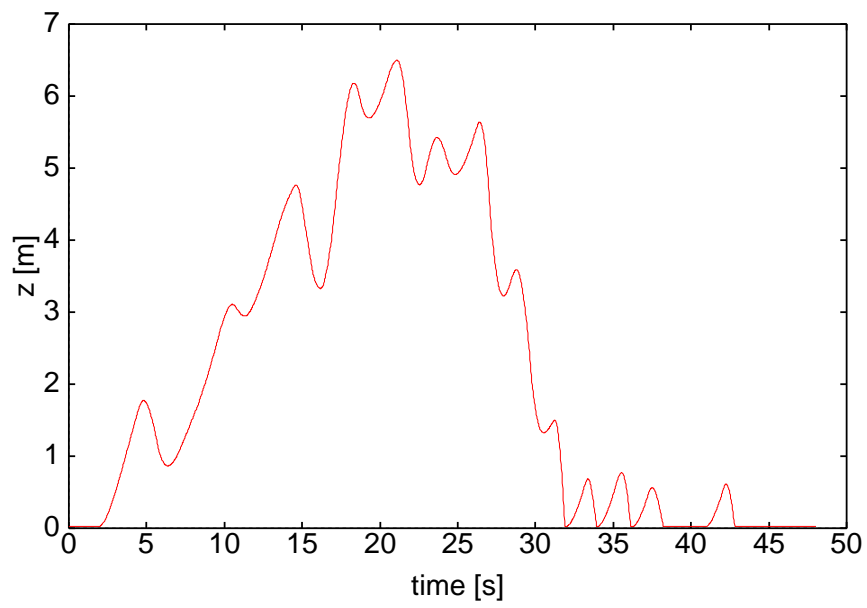


(2) 高度の時間変化

図 3.12 被験者 C 通常操縦モードでの結果

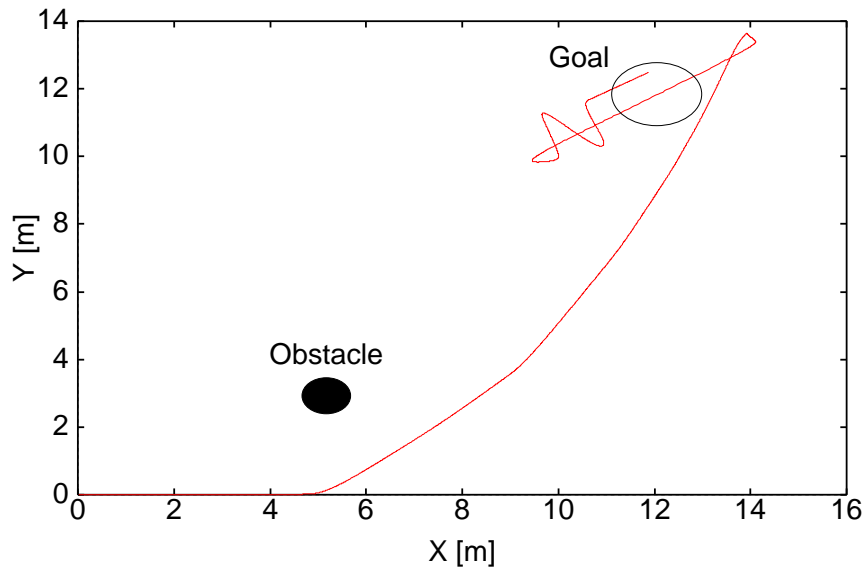


(1) 飛行軌跡

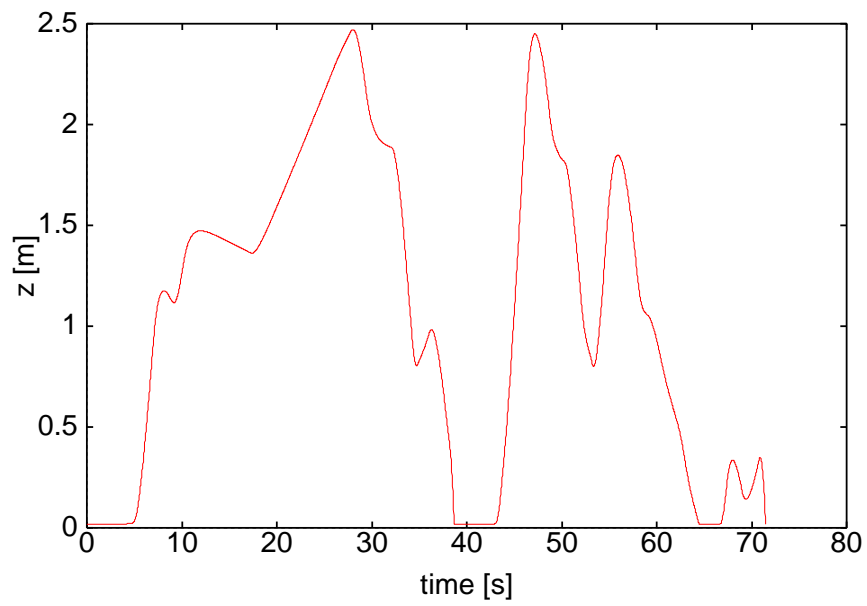


(2) 高度の時間変化

図 3.13 被験者 C 没入操縦モードでの結果



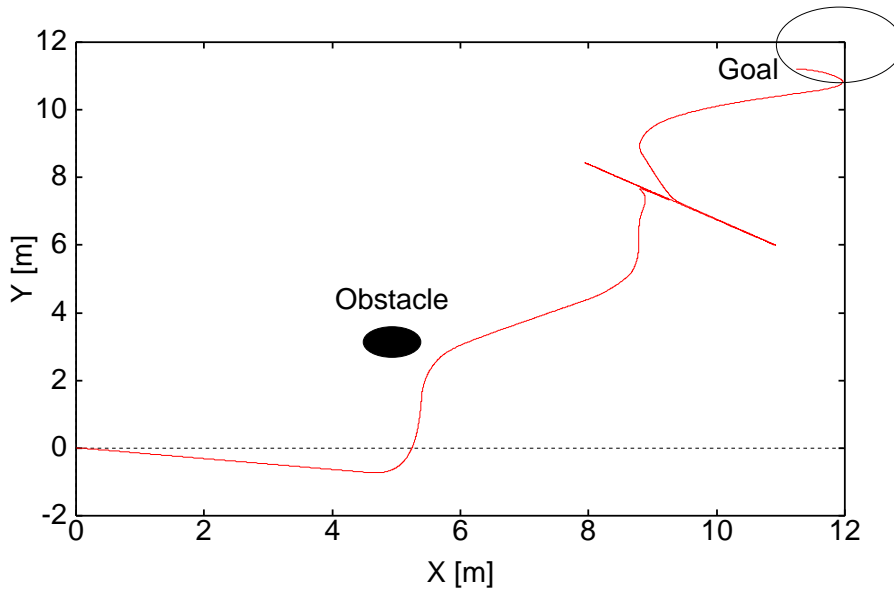
(1) 飛行軌跡



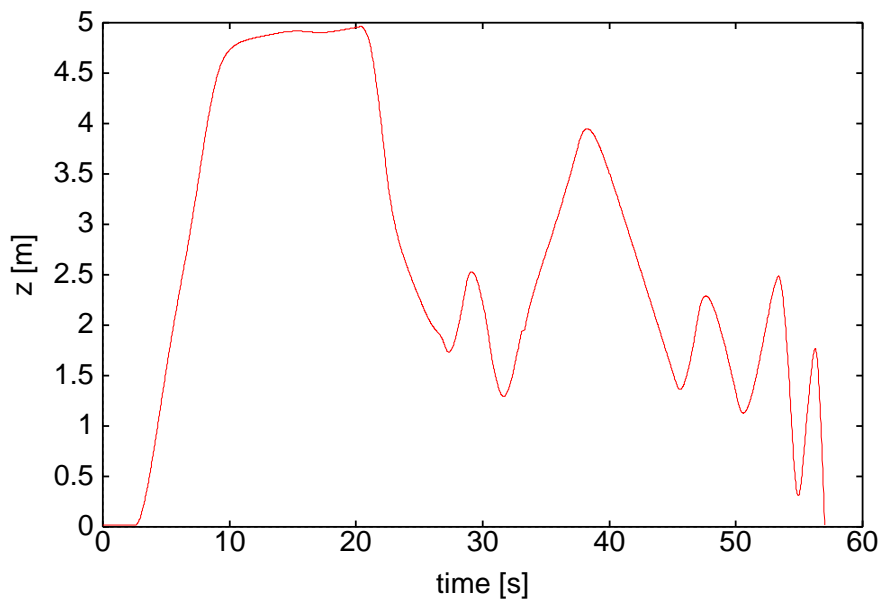
(2) 高度の時間変化

図 3.14 被験者 D 通常操縦モードでの結果



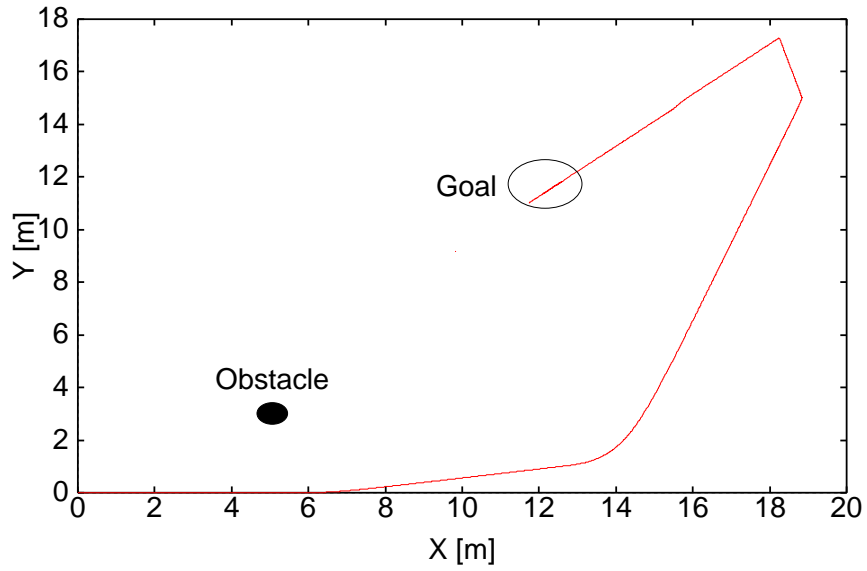


(1) 飛行軌跡

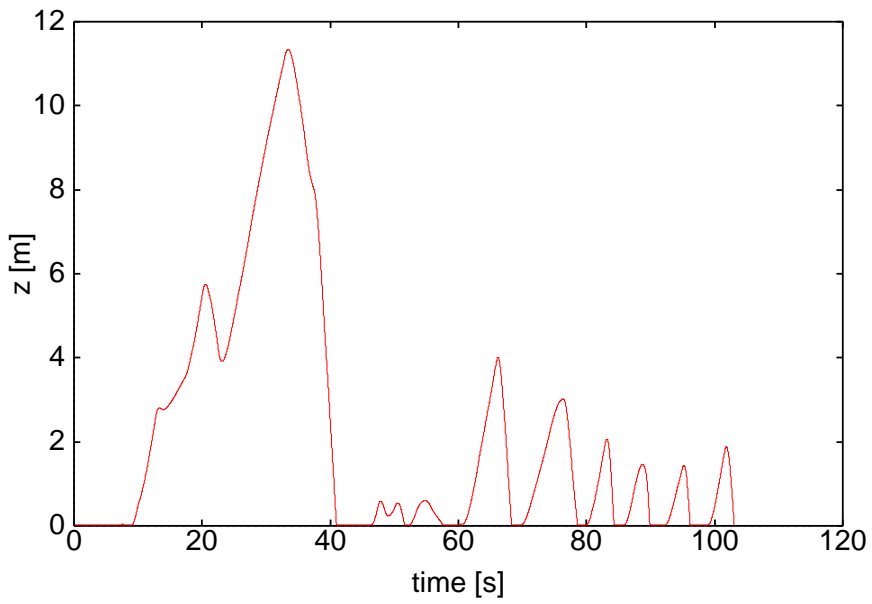


(2) 高度の時間変化

図 3.15 被験者 D 没入操縦モードでの結果

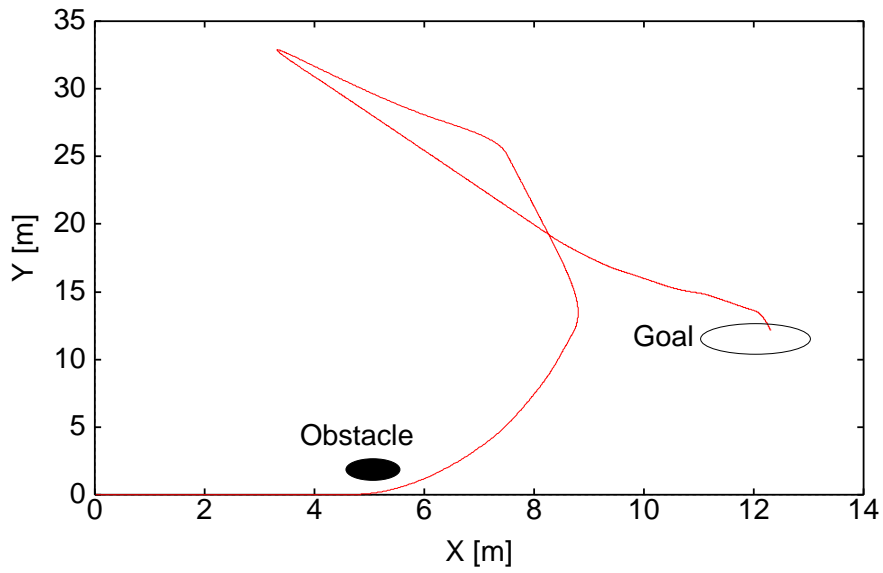


(1) 飛行軌跡

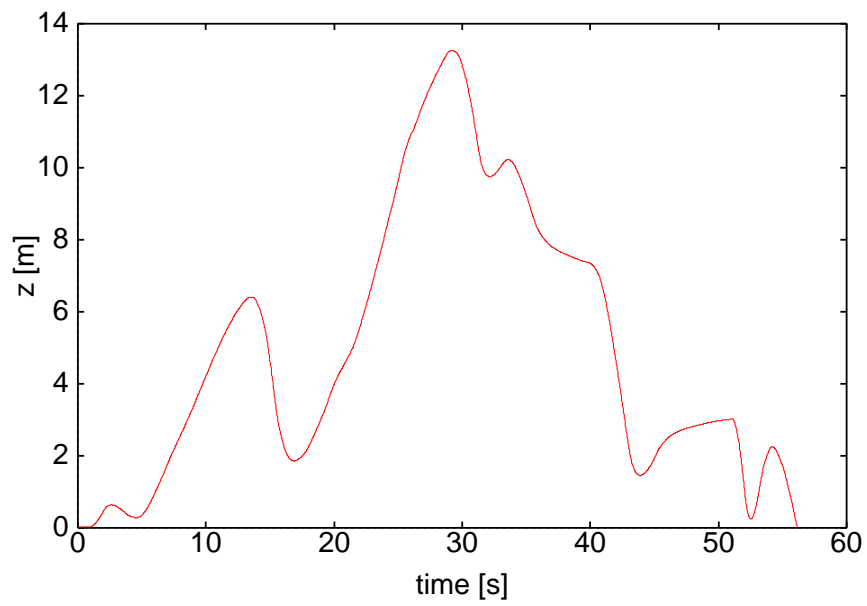


(2) 高度の時間変化

図 3.16 被験者 E 通常操縦モードでの結果



(1) 飛行軌跡



(2) 高度の時間変化

図 3.17 被験者 E 没入操縦モードでの結果

### 3.4. 没入型遠隔操縦システムの実装と実機実験

#### 3.4.1 システム構成

ヘリコプタ本体の底面に全方位カメラと画像送信用トランスミッタを搭載し、その画像を地上の操縦者へ送信する。操縦者が装着する HMD にジャイロを取り付け、頭の姿勢に応じた透視投影画像を全方位画像から生成し、その画像を操縦者の装着する HMD に表示する (図 3.18)。本システムの利用により、飛行中においても操縦者と機体の座標系が変化することはなくなるため、操縦の難易度は実機と同等になると考えられる。また操縦者と機体の距離が離れた場合や、操縦者から機体が目視できない状態においても、機体からの映像が受信できていれば飛行を継続できるという特長がある。全方位カメラを用いることで周囲の見回しに必要なカメラの回転機構が不要になり、時間遅延の軽減やシステムの単純化・軽量化・低価格化を図ることが可能になった。表 3.2 に本システムの仕様を示す。

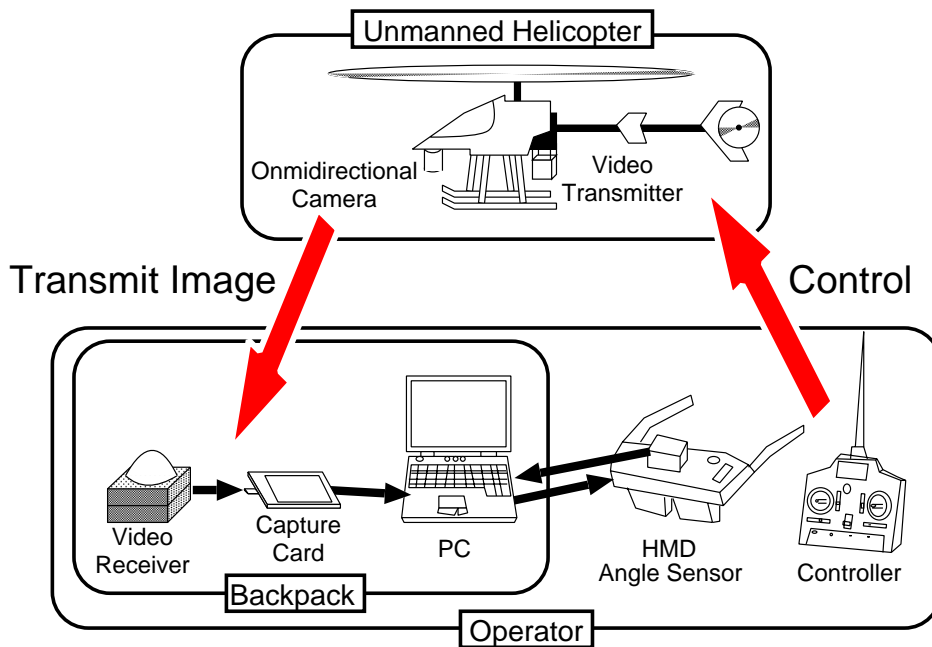


図 3.18 没入型遠隔操縦システム概要

表 3.2 没入型遠隔操縦システム仕様

Helicopter	
Airframe	HIROBO TURUGI Payload: 1.2[kg]
Stabilizer	FMA CO-PILOT
Camera	ACCOWLE Omnidirectional Vison Sensor (Hyperbolic Mirror)
Transmitter	RF BS-550GTH
Operator	
PC	TOSHIBA DynabookA1/X10PMC CPU : PentiumIII 1.0[GHz] Memory : 384[MB]
Receiver	RF BS-120GRH
Capture	HITACHI MSVCC03 Resolution : 640x480[pixel], 30[Hz]
HMD	i-O DisplaySystems i-glasses LCX2 Resolution : 450x266[pixel]
Gyroscope	DATATEC GU-3013

### 3.4.2 全方位画像のメモリベース実時間透視投影変換

HyperOmni Vision の光学系の構成を図 3.19 に示す． $Z$  軸を鉛直軸とする 3 次元ワールド座標系  $(X, Y, Z)$  を考えると，双曲面とその焦点，およびカメラのレンズ中心は式 (3.1) で表される．ただし  $a, b, c$  は双曲面の形状を決定するパラメータで  $c^2 = a^2 + b^2$  を満たす．

$$\begin{aligned} \text{双曲面} &: \frac{X^2+Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1, Z > 0 \\ \text{焦点} &: (0, 0, +c) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\text{レンズ中心} : (0, 0, -c)$$

CCD 投影面  $xy$  は  $XY$  平面に平行でカメラのレンズ中心  $O_C$  からカメラの焦点距離  $f$  だけ離れた平面とする．透視投影面上の点  $P(X, Y, Z)$  に対する写像点を点  $p(x, y)$  とした時， $x, y$  はそれぞれ式 (3.2), (3.3) で表すことができる．

$$x = \frac{(b^2 - c^2)fX}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}} \quad (3.2)$$

$$y = \frac{(b^2 - c^2)fY}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}} \quad (3.3)$$

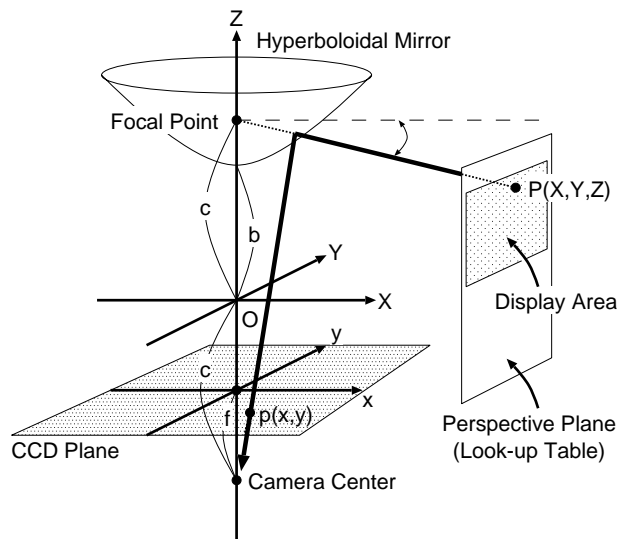


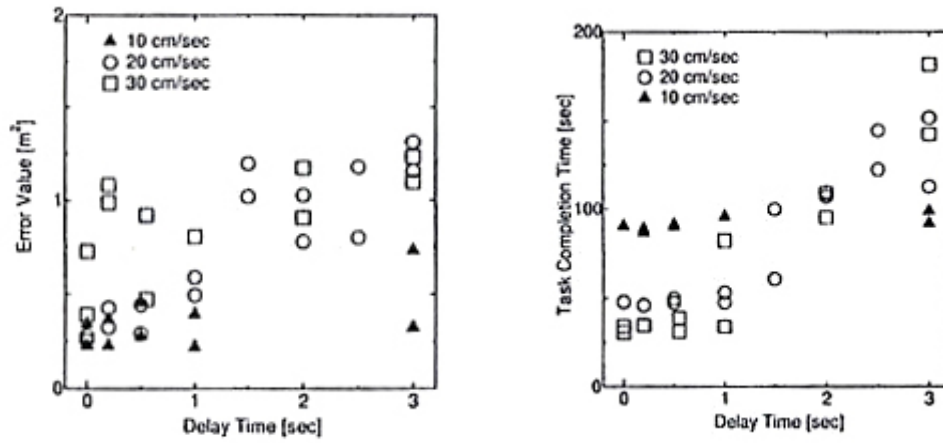
図 3.19 HyperOmni Vision の光学系

式 (3.2),(3.3) には座標に関する変数  $XYZ$  と定数  $a, b, c, f$  が含まれるだけで, CCD 投影面上の色情報には全く無関係である. そこで透視投影面上の全ての点に対応する CCD 投影面上の点をあらかじめ計算しておき, メモリ上に参照テーブルとして保持する手法を提案する. 参照テーブルを  $Z$  軸回りに  $\theta[\text{deg}]$  毎に作成しておき, 頭部のパン方向の姿勢変化に対応させる. また参照テーブルの  $Z$  軸方向の長さを表示領域より大きく作成することで, 頭部姿勢のチルト方向の動作に応じて参照位置をスライドさせる. 以上の処理により, PentiumIII 1[GHz] 搭載の PC でビデオフレームレート (30[Hz]) での透視投影変換が可能になり, 操縦者への高い没入感提示が実現できた.

### 3.4.3 時間遅延に関する考察

安藤ら [2] は移動ロボットをジョイスティックで遠隔操縦する際に視覚情報が遅延した場合における操作性への影響を定量的に評価した. ロボットの移動速度を 10, 20, 30[cm/sec], 時間遅延を 1, 2, 3[sec] とした時の標準パスからのずれと, タスク完了時間を計測した結果, 10[cm/sec] では, 標準パスからのずれ, タスク完了時間の両方においてほとんど変化はなく, また全ての移動速度において, 時間遅延 3[sec] 以内での標準パスからのずれは 1.5[m] 以下であることが示されている.

没入型遠隔操縦システムにおいて, ヘリコプタ上での画像取得から操縦者の HMD に表示するまでにかかる時間は表 3.3 に示すとおり, 99[ms] である. [2] の結果より, 機体を 20[cm/sec] 以下で移動させた場合には, 0.4[m] 程度, 30[cm/sec] で移動させた場合には, 0.8[m] 程度の位置ずれが発生すると考えられ, 運用の際にはそれらの位置ずれを考慮して操縦する必要がある.



(a) 標準パスからのずれ

(b) タスク完了時間

図 3.20 時間遅延による影響 ([2] より引用)

表 3.3 画像取得から表示までにかかる時間

処理	時間 [ms]
画像の取り込み	33
全方位画像から透視投影変換	33
HMD に表示	33
計	99



### 3.4.4 実機による実験と結果

本システムの実用性を示すために、2001年、2002年に行われた生駒市総合防災訓練に参加し公開実験を行った。2001年の防災訓練では、被災現場を模した被災したビルや土砂に埋もれた車(図3.21)などがする環境を、全方位カメラを搭載した無人ヘリコプタで飛行し、地上で受信した全方位画像から複数の透視投影画像を同時に生成する実験を行った。図3.22に表示されている4つの画面は右上が前方、下の2枚がそれぞれヨー方向 $\pm 90[\text{deg}]$ の展開画像である。左上のものは、オペレータがスライダーを動かすことで任意に展開方向を変化させることができる。提案した実時間透視投影変換により、4方向の透視投影画像が同時にビデオレートで展開可能であることを確認した。この実験より被災地の情報を効率的に収集できることが確かめられた。

2002年の防災訓練では、操縦者がHMDを装着した状態で無人ヘリコプタを操縦し、倒壊した建物の周辺を飛行して情報収集作業を行った。図3.23-(1)が調査対象の建物と実験中のヘリコプタ、図3.23-(2)が操縦者の様子である。操縦者はPC、レシーバ、バッテリーが入ったザックを背負い、HMDを装着した状態で操縦を行った。この実験中に得られた全方位画像とそれから生成された展開画像の様子を図3.24に示す。

以上の実験により、操縦者からは見えない建物の壁面や屋上などの映像が取得



図 3.21 2001年度生駒市総合防災訓練での実験の様子

でき、被災地での情報収集に利用できることを示した。また操縦者から機体が不可視の状態での操縦支援の可能性を示した。



(a) 北側の被災したビル

(b) 南側の被災したビル



(c) 倒壊した家屋

(d) 土砂に埋もれた自動車

図 3.22 4方向透視投影画像の同時生成

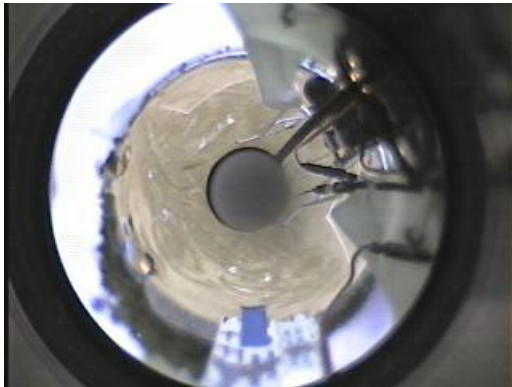


(1) 調査対象の建物と作業中のヘリコプタ

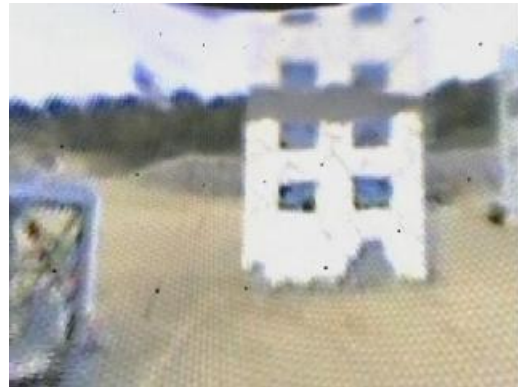


(2) 操縦者

図 3.23 2002 年度生駒市総合防災訓練での実験の様子



(1) 全方位画像



(2) 展開画像

図 3.24 実験で得られた映像

## 3.5. シミュレータを用いた拡張現実感での操縦正確性向上の検証

没入型遠隔操縦システムでは、機体からの映像にのみ依存して操縦を行うため、映像伝送の失敗や、視界不良時には操縦不能になる危険性がある。機体の詳細な位置・姿勢、目的地などの情報を拡張現実感技術を用いて、実画像に重畳表示して操縦者に提示することで、安全性が向上し、正確な飛行が可能になると考えられる。そこで、3.2で解説したシミュレータを用いて、通常の無人ヘリコプタの操縦（通常操縦）とアノテーションが表示された没入状態での操縦（アノテーション付き没入操縦）で実験を行い、飛行の正確性を比較する。

### 3.5.1 タスク

被験者には環境内に置かれた3つのマーカの上空を飛行し、離陸地点まで帰還するタスクを与えた。マーカの配置を図3.25に示す。マーカには、通常操縦では直径1[m]、高さ1[m]の円錐型、没入操縦ではアノテーションとして高さ10[m]のワイヤフレームの角柱を用いた。4人の被験者にこのタスクを与え、それぞれの飛行経路を記録した。

### 3.5.2 結果と考察

このタスクで得られた飛行経路を図3.27から3.30に示す。図中のAは操縦者の位置、Bは離陸地点、C、D、Eはマーカの位置を示している。それぞれの被験者において、通常操縦と没入操縦の飛行経路を比較すると、全被験者が没入操縦時に正確にマーカの上空を飛行していることが分かる。また通常操縦の場合、すべての被験者がD点のマーカを通過できていない。これはD点が操縦者から最も遠い地点にあるため、距離感が失われることが原因と考えられる。以上より、アノテーションを付加した没入状態での操縦では、通常の操縦に比べて正確な機体

の操作が行えることが示された。

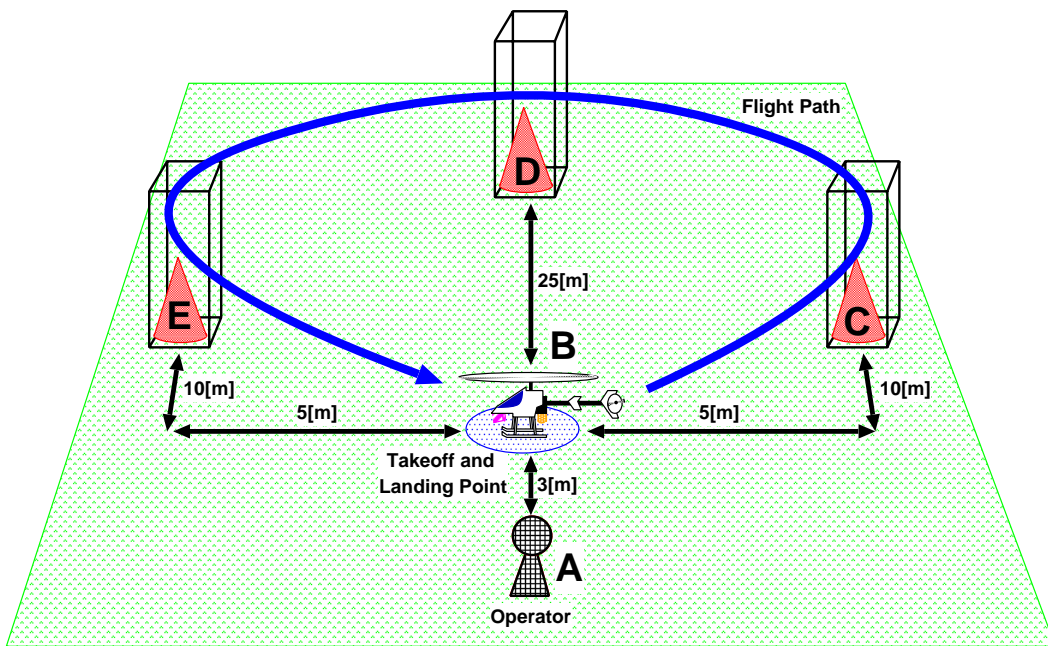
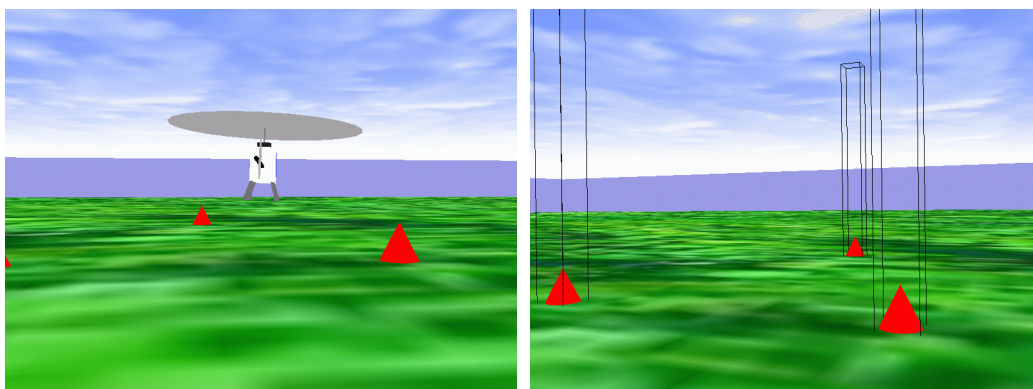


図 3.25 操縦者，離陸地点，マーカの配置



(a) 通常操縦

(b) アノテーション付き没入操縦

図 3.26 シミュレータの様子

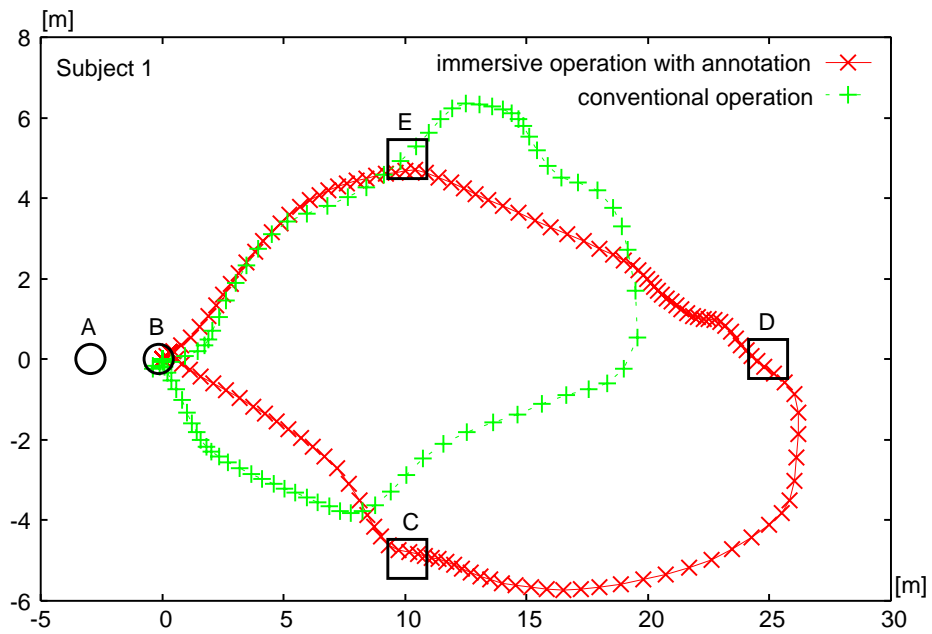


図 3.27 被験者 A の飛行経路

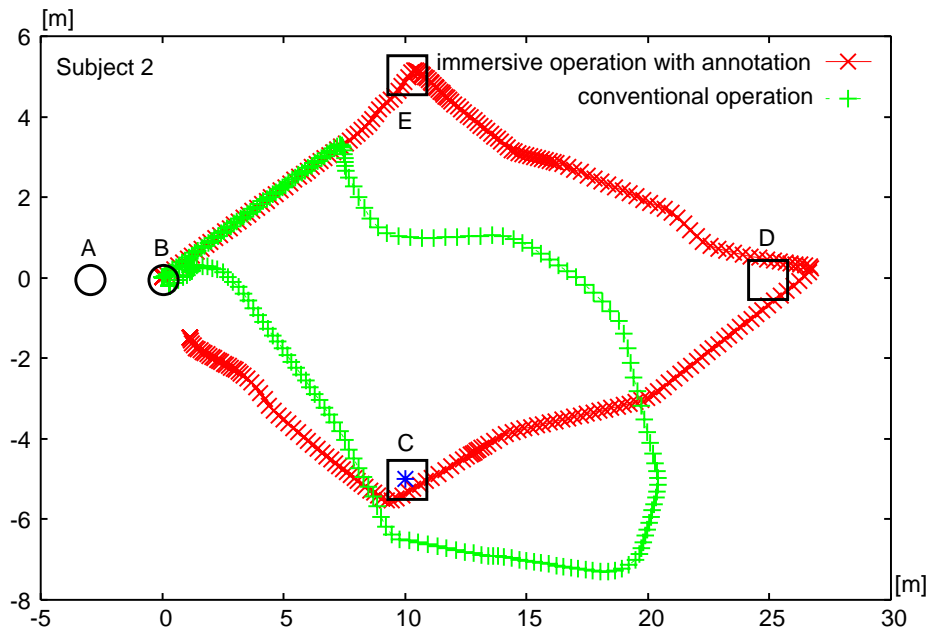


図 3.28 被験者 B の飛行経路

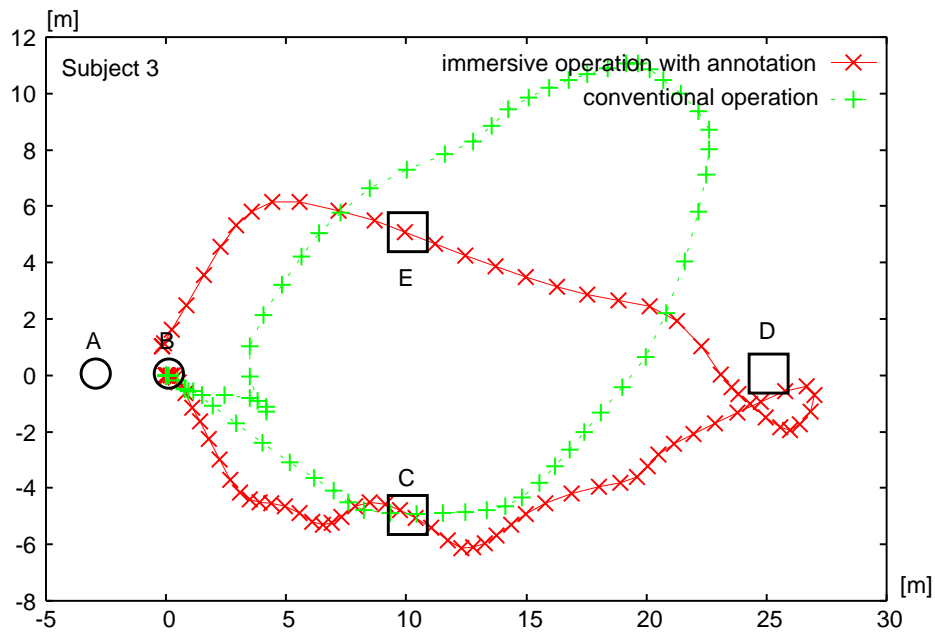


図 3.29 被験者 C の飛行経路

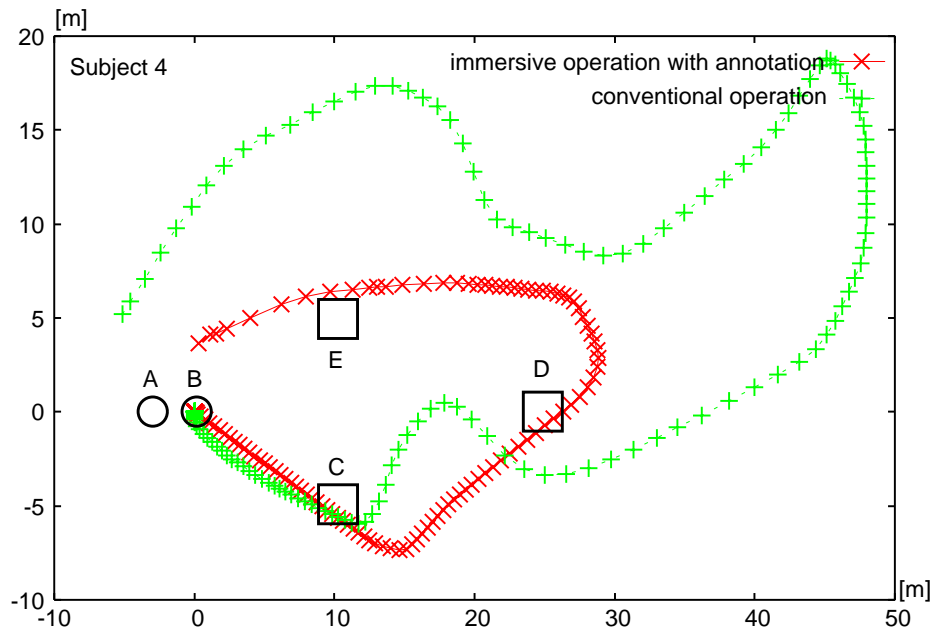


図 3.30 被験者 D の飛行経路

## 3.6. 実機を用いた拡張現実感による被災者捜索支援

### 3.6.1 システム構成

機体に搭載されたカメラから得られた画像に対してアノテーションを重畳するためには、機体の位置・姿勢を計測する必要がある。そこで無人ヘリコプタに GPS とジャイロ、小型 PC を搭載した (図 3.31)。GPS、ジャイロは PC に接続されており、常時データ収集が可能である。また得られた位置・姿勢情報は無線 LAN を用いて地上に送信する。表 3.4 に本システムの詳細な仕様を示す。



図 3.31 無人ヘリコプタの操縦支援システム



表 3.4 操縦支援システム仕様

Helicopter	
Airframe	JR VoyagerGSR Payload: 4.0[kg]
PC	SONY PCG-U1 CPU: Crusoe 867[MHz] Memory: 256[MB] WirelessLAN: WLI-USB-KS11G
Camera	ACCOWLE Omnidirectional Vision Sensor (with Hyperboloidal Mirror)
Capture	Canopus ADVC-55
GPS	I-O DATA PCGPS
Gyroscope	InterSense InertiaCube2
Operator	
PC	TOSHIBA DynabookG8/X20PDEW2 CPU: Pentium4 2.0[GHz] Memory: 768[MB] WaveLan: Embedded
HMD	i-O DisplaySystems i-glasses! LC
Gyroscope	InterSense InterTrax2
Data Relay Station	
Access Point	BUFFALO WHR2-A54F54
Antenna	BUFFALO WLE-HG-NDC

### 3.6.2 実機を用いた実験

本システムを用いて被災者捜索を想定した実験を行った。本実験は安全性を確保するために可能な限り広い場所が必要なため、文化庁の許可を得た上で奈良県奈良市の平城京跡地(図 3.32)の第二次大極殿跡南側付近で行った。大地震により周辺の建物が全て倒壊している状況設定で、操縦を支援するために、過去に存在した建造物を図 3.33 に示した CG で表示する。さらに被災者捜索を支援するために、災害時に人々が避難する可能性が高い場所を文字によるアノテーションにより表示する。文字によるアノテーションとして避難所 (Evacuation\_Area)、病院 (Medical\_Center)、警察 (Police\_Box)、消防署 (Fire\_Department)、市役所 (City\_Office)、小学校 (Elementary\_School)、図書館 (Library) を配置した。文字によるアノテーションの位置を図 3.34 に示す。CG は全て OpenGL を用いて描画し、機体の位置および姿勢に応じて仮想空間内での視点位置・姿勢を変化させた。無人ヘリコプタを図 3.34 の A 地点から離陸させ、図 3.35,3.36 に示した飛行経路と機体姿勢で 2 分程度飛行させた。この実験中に得られた画像の一部を図 3.37 に示す。図 3.37-(d),(e) の丸印部分に動作している人影が確認でき、本システムによる被災者捜索の可能性を示した。



図 3.32 平城京跡地

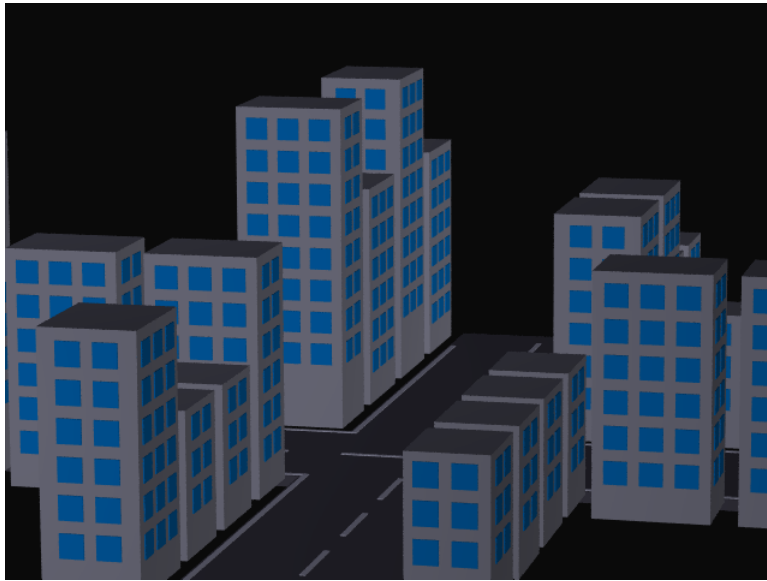


図 3.33 仮想建造物

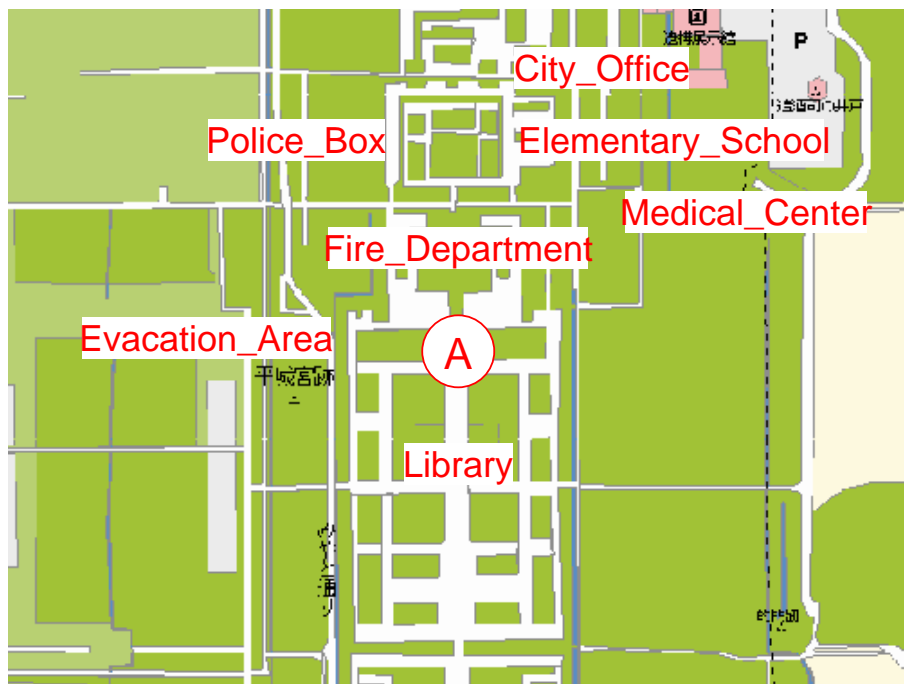


図 3.34 文字によるアノテーションの位置

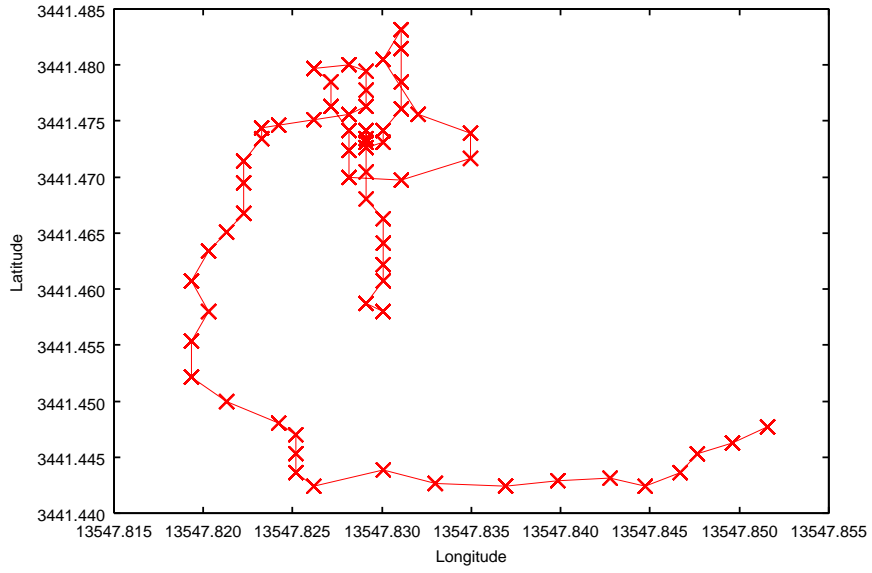


図 3.35 飛行中の機体位置

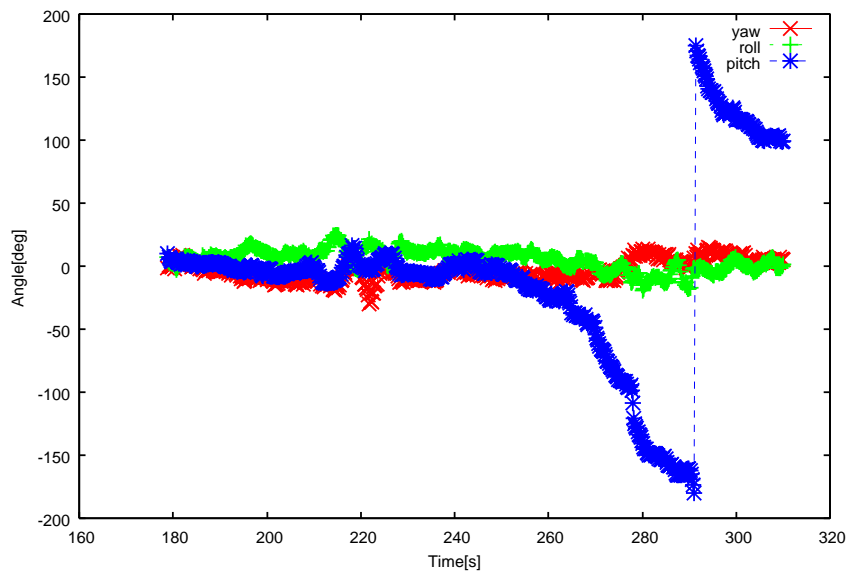
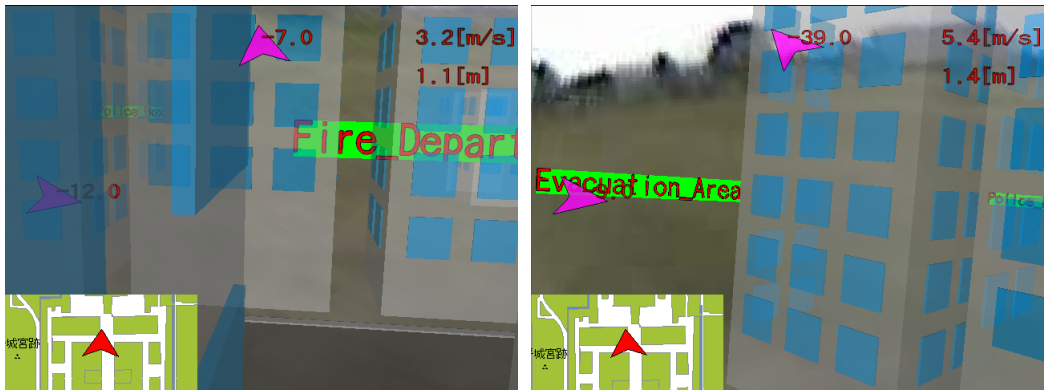
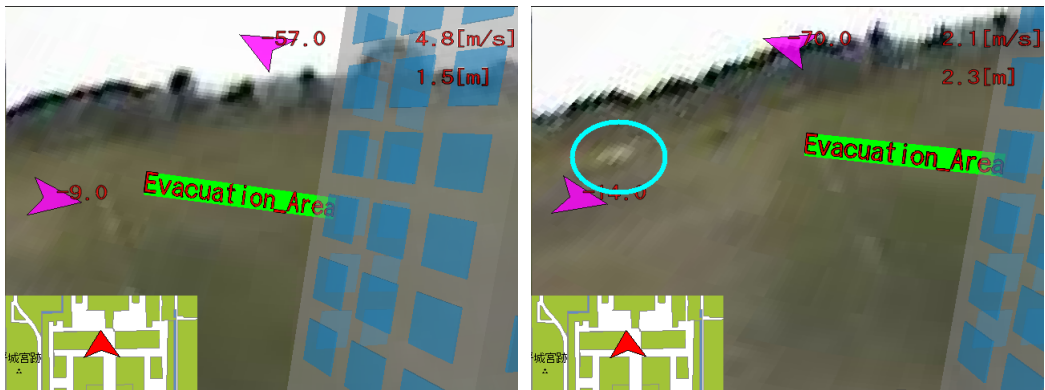


図 3.36 実験中の機体姿勢



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

図 3.37 被災者搜索のためのアノテーション

### 3.6.3 人物発見の限界についての考察

本システムを用いた場合に，地上にいる人物発見が可能な範囲について考察する．まず，地上から高さ 2.4[m] の位置に置いた全方位カメラから身長 1.7[m] の人物を 3[m] から 23[m] まで 1[m] 毎に離れた時の静止画と手を振る動画を取得する．これらを 10 人の被験者に見せ，

- 静止画で人物と判別可能
- 動画で人物と判別可能
- 動画で動物体を発見可能

と判断できる限界を計測した．画像の解像度は 320x240[pixel] である．本実験で用いた静止画を図 3.6.3 に示す．

実験の結果，静止画で人物と判別可能な距離は平均 9.4[m]，動画で人物と判別可能な距離は平均 11.0[m]，動画で動物体を発見可能な距離は平均 19.3[m] となった．全被験者の結果とその平均および標準偏差を図 3.39 に示す．それぞれの場合の全方位画像上での人物の大きさは，式 3.2,3.3 から計算できて，9.4[m] の時 11.7[pixel]，11.0[m] の場合 10.3[pixel]，19.3[m] の時 6.3[pixel] となる．先に説明した被災者搜索実験では，全方位画像解像度が 640x480[pixel]，人影が発見された時の機体高度は約 6[m]，人影までの水平距離は約 30[m] であった．図 3.40 に機体からの水平距離と全方位画像に撮像される人物の大きさの関係を示す．水平距離 30[m] において画像上で人物が占める大きさは約 7.3[pixel] であり，人物の判別限界には達していないが，動物体の判別は可能な領域を飛行していたと言える．

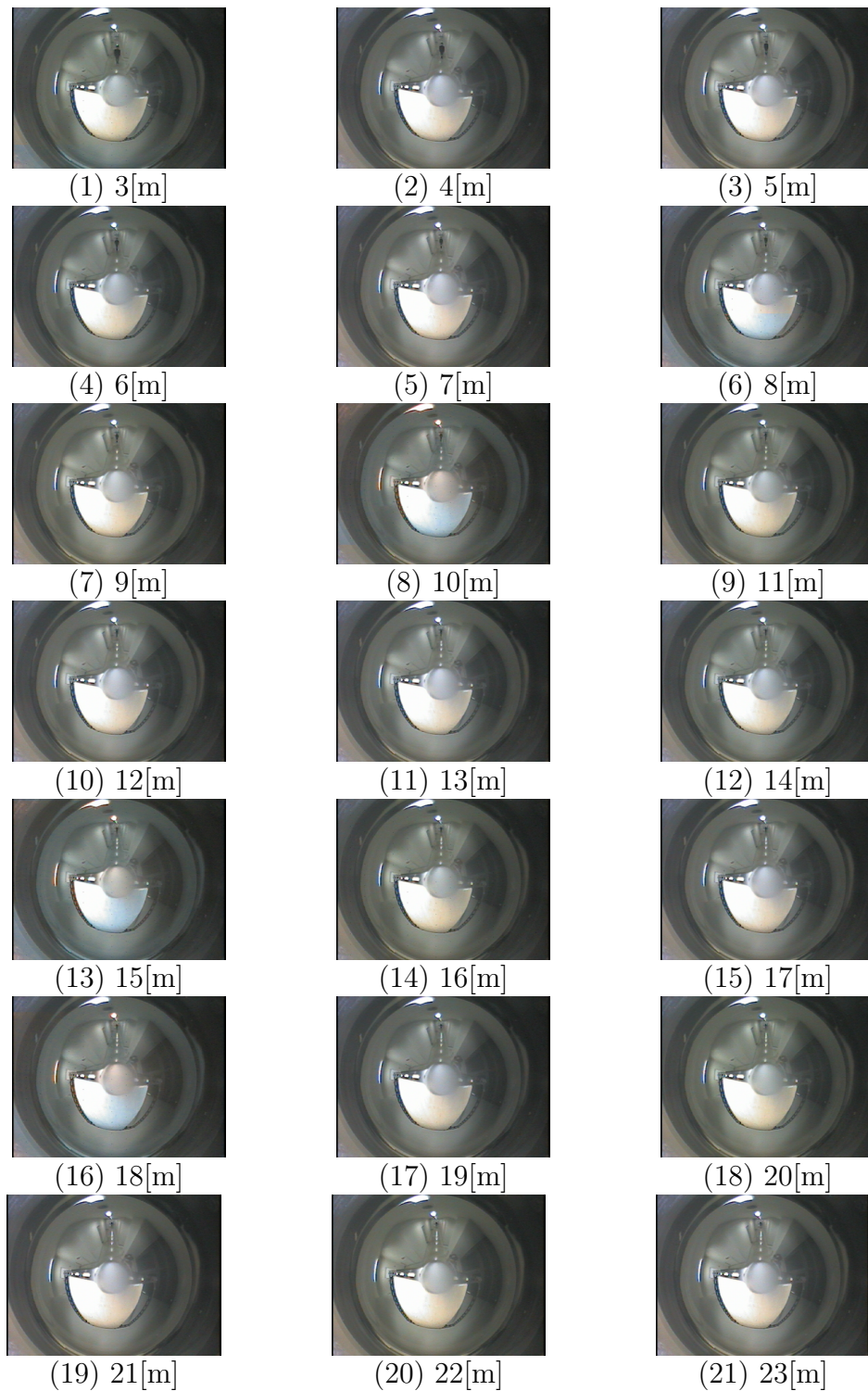


図 3.38 全方位カメラに撮像された人物

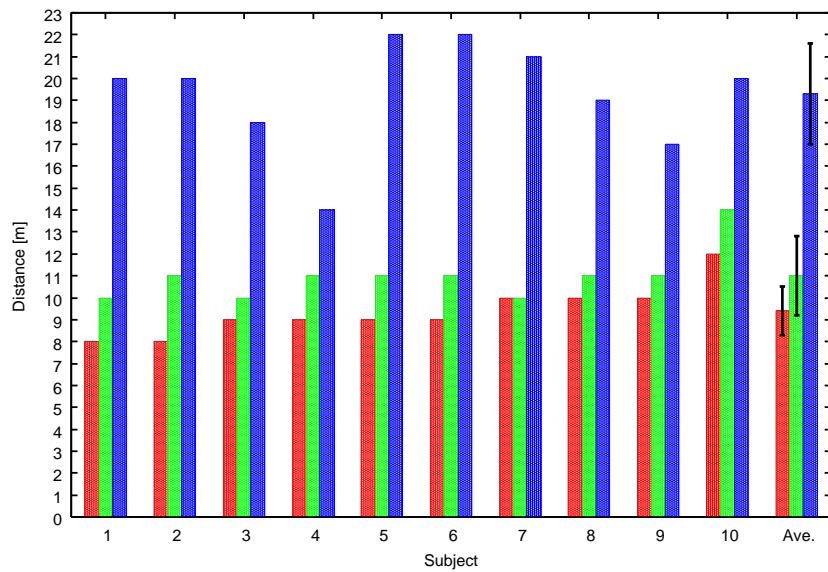


図 3.39 実験結果 (赤:静止画で人物と判別可能, 緑:動画で人物と判別可能, 青:動画で動物体を発見可能)

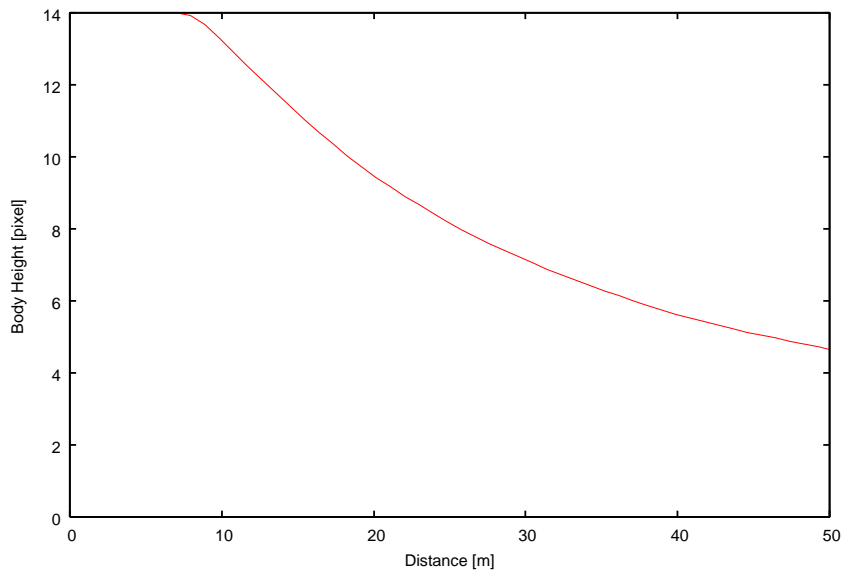


図 3.40 高度 6[m], 解像度 640x480[pixel] での人物の大きさと機体からの水平距離の関係



### 3.6.4 時間遅延に関する考察

本システムでは、640x480[pixel]の画像をJpeg圧縮してFTPで操縦者に送信している。この際に生じる1[frame]あたりの処理時間を表3.5に示す。ここに示した値は、20[frame]処理した時の平均である。画像伝送にかかる時間遅延は394[ms]であり、[2]の結果から機体を30[cm/sec]で移動させた場合には1[m]程度の位置ずれが発生する可能性がある。

表 3.5 画像伝送にかかる遅延時間

処理	時間 [ms]
画像の取り込み	33
Jpegでの画像圧縮	90
画像送信	160
Jpegでの画像展開	45
全方位画像から透視投影変換	33
HMDに表示	33
計	394

### 3.7. 本章のまとめ

無人ヘリコプタ操縦の難しさとその要因についてまとめ、自律型無人ヘリコプタの既存研究を列挙し、小型ヘリコプタでの実現可能性を示した。災害地での利用を考えた場合、事前に設定された経路を飛行することを得意とする自律型無人ヘリコプタより、人手による遠隔操縦ではの問題点を挙げ、無人ヘリコプタの遠隔操縦を容易するというアプローチから、没入型遠隔操縦の導入を提案した。全方位カメラを用いた没入型操縦の移動ロボットの研究は [54, 55] など既に存在する。筆者はその手法を無人ヘリコプタに応用し、無人ヘリコプタの遠隔操縦で特に問題となる

- 時間遅延
- ペイロードの制約

という2つの問題を、カメラ回転機構無しで全方位画像が取得可能という全方位カメラの特徴を最大限に生かして解決した。また、画像処理部分での時間遅延を抑えるために、全方位画像のメモリベース実時間透視投影変換を開発し、従来はワークステーションを用いて行われていた透視投影画像の生成を持ち運び可能なノートPCで行うことを可能にした。没入操縦の利点を示すためにシミュレータを構築し、これを用いて従来の操縦との比較を行った結果、没入操縦が操縦の容易性の点で優れていることを示した。さらにHMDとジャイロから構成される持ち運び可能な没入型ディスプレイを有する没入型遠隔操縦システムを用いて2001年度生駒市防災訓練に参加し、被災した建造物の調査作業を行い、本システムの実現性を示した。

一方、濃霧や暗闇など低視程での操縦性確保と正確な操縦、さらに効率的な調査作業を実現するために、拡張現実感を用いた情報提示の有効性について検討し、シミュレータを用いて操縦の正確性が向上することを示すとともに、実機を用いて被災者搜索の模擬実験を行い、実現可能であることを示した。

## 第4章 搭乗型ビークルによる屋内での救助活動支援

### 4.1. はじめに

第3章では、無人ヘリコプタによる上空からの要救助者の搜索支援についてまとめた。収集された要救助者の位置情報は一旦災害対策本部に収集され、そこから救助隊への指令が行われる。救助隊は自動車やオートバイで現場へ向かい、救助行動を開始するというプロセスが一般的に行われている。大都市での災害ではビル内に存在する要救助者が多数発生するが、災害を受けたビルは倒壊する可能性があり、屋内での救助活動は二次被害の発生を防止するためにもできるだけ迅速に行われる必要がある。しかし粉塵や暗闇などによる低視程状態や、机、椅子などが散乱した状況が要救助者までの移動の妨げになることが予想される。人命救助活動では現場での応急処置が重要であり、そのために様々な機器を持ち運ぶ必要がある。また要救助者を迅速に屋外まで運搬して医療機関へ移送する必要もある。

そこで屋内での救助活動に有用な搭乗型ビークルとその活動を支援するための拡張現実感を用いた情報提示システムを開発する。これは救助隊が装着した情報端末に要救助者が存在する位置までの経路を拡張現実感技術を用いて実画像に重畳表示することで、迅速な救助活動を支援するものである。図4.1に概念図を示す。搭乗型とすることで医療器具や要救助者の運搬が容易になり、迅速な救助が実現できる。

## 4.2. 搭乗型ロボット・ビークルの関連研究

近年、搭乗型ロボットが相継いで発表された。テムザック [56] の搭乗型レスキューロボット T-52 援竜 [57] がある。本機は災害現場での救助活動为目标とし、全長約 3.5[m]、全幅約 2.4[m]、重量約 5[t] で、片腕 8 自由度の双腕を有しており、搭乗操作または遠隔操作が可能である。また菅原ら [58] は、搭乗型 2 足歩行型ロボットを開発した。様々なシステムの搭載、また人間の搭乗も可能な汎用移動モジュールとして実用に足る 2 足歩行ロボットの開発を目指している。本機は脚と腰部のみで構成されており、脚機構には平行メカニズムが用いられている。トヨタ自動車株式会社では、搭乗歩行型ロボット i-foot [59] を開発している。本機はジョイスティックにより進行方向、歩行速度などをコントロールできるロボットで、将来の三次元モビリティを目指して開発されている。2005 年 3 月から開催される愛・地球博に出展される予定である。

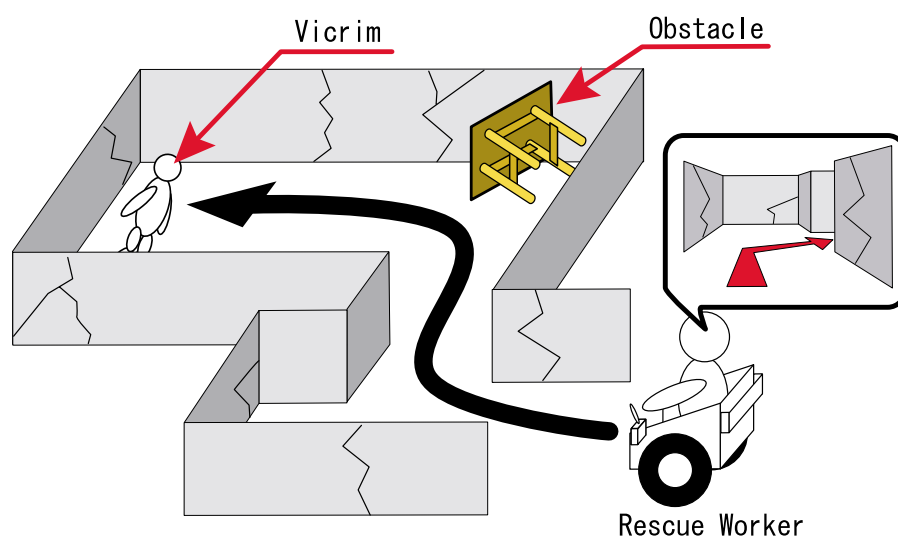


図 4.1 搭乗型ビークルによる救助活動と拡張現実感による情報提示

### 4.3. 被災者救助のための拡張現実感による支援システムを有する電動車いす

本研究では搭乗型ビークルとして電動車いすを用いる。拡張現実感による情報提示を実現するには、ユーザの自己位置・姿勢と頭部位置・姿勢の計測が不可欠である。本研究で開発したシステムでは、ステレオカメラを用いた頭部位置・姿勢計測システム [60] とレーザレンジファインダを用いた自己位置計測システム [61] を用いることで、高精度な計測を実現する。本システムを用い、災害時の屋内環境を想定して地図にない障害物が存在する状況化での要救助者の救助活動支援を行い、実現性を示す。提案する計測手法の有効性を検証するために、電動車いすをベースにした拡張現実感システムを構築した。構築したシステムの外観と構成を図 4.2, 4.3 に示す。車いすの前部には搭乗者の頭部位置・姿勢計測を行うためのステレオカメラ、搭乗者の足元に自己位置計測を行うためのレーザレンジファインダを搭載した。また、これらの制御と仮想物体の表示を行うための PC が搭載されている。搭乗者は単眼の HMD を装着し、実空間を右目、仮想空間を左眼で見る。拡張現実感を用いたカーナビゲーションシステムの最終的な実装ではヘッドアップディスプレイを用いるが、今回は実証実験のため単眼 HMD による擬似的な重畳表示とした。頭部位置・姿勢計測に必要な特徴点のテンプレート画像と計測時の画像処理結果を図 4.18 に示す。ステレオカメラを用いた顔位置・姿勢計測システムでは通常、目と口の両端および眉頭を特徴点として利用するが、本システムでは目と眉が HMD により隠蔽されるため、本実験では鼻と口の両端および HMD 前面に付けた 4 つのマーカを特徴点として利用した。

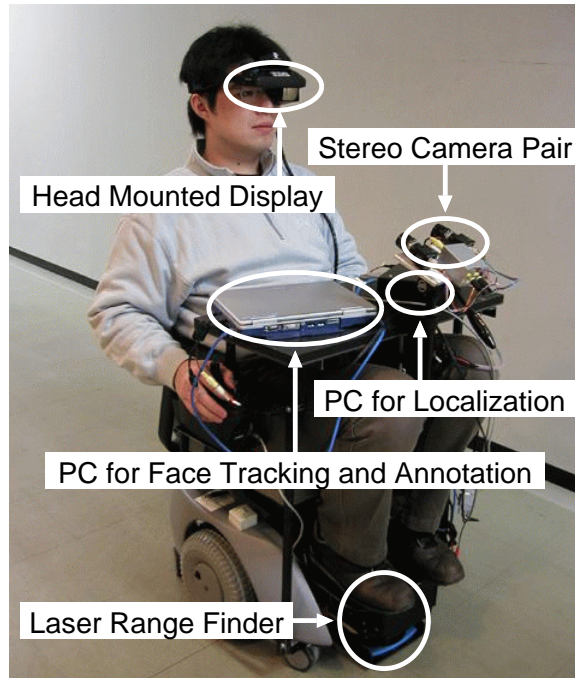


図 4.2 システム外観

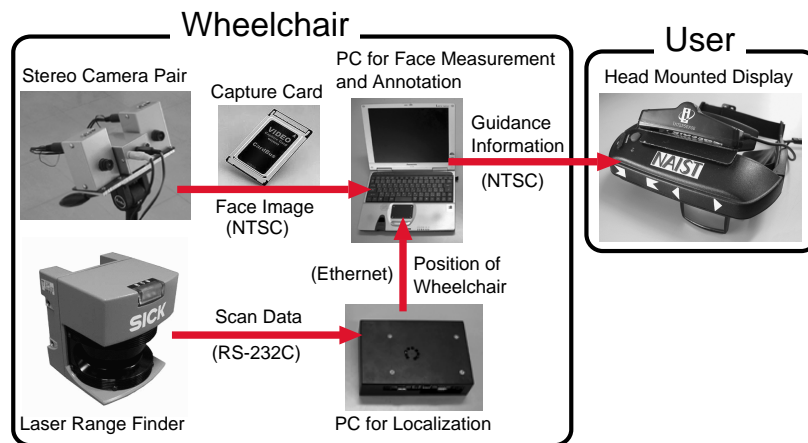


図 4.3 システム構成

## 4.4. レーザレンジファインダによるビークルの自己位置・姿勢の計測

自己位置・姿勢計測手法としては，GPS を用いる手法や超音波発信器や赤外線識別子などのランドマークを環境に設置する手法 [62] などがよく用いられている．しかし GPS には屋内環境での利用には精度的な問題があり，またランドマーク埋め込み型では設置・変更にかかるコストがかかり管理が煩雑で，さらに災害時には使えない可能性が高い．本システムでは筐体に取り付けたレーザレンジファインダ (図 4.4) から得られる水平方向の距離情報と線分で表現された環境地図を用いる．図 4.5, 4.6 に，本学 A 棟 5 階の実際の地図と線分で表現された環境地図を示す．線分で表現された環境地図は，建物の設計図などから作成可能であるが，本実験では複数の地点で得られた距離情報を統合し，それを元に人手により作成した．

### 4.4.1 計測方法

各地点において得られる距離情報と，環境地図から得られる仮定の距離情報の相関値を求め，自己位置・姿勢を計測する．相関演算には，Weiss らによって提



図 4.4 レーザレンジファインダ

案された手法 [63] を用いる . 以下にその概要を示す .

1. それぞれの地図から距離のヒストグラムを計算する .
2. 2つのヒストグラムの相関を計算して角度の誤差  $\theta[\text{deg}]$  を求める .
3. 地図を  $\theta[\text{deg}]$  回転させる .
4. 2つの地図の位置の誤差  $dx, dy$  を求める .
5. 自己位置を  $dx, dy$  だけ移動させる .

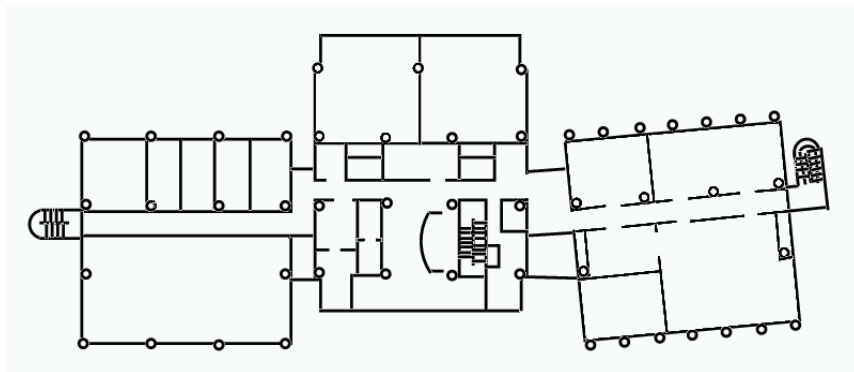


図 4.5 実際の地図

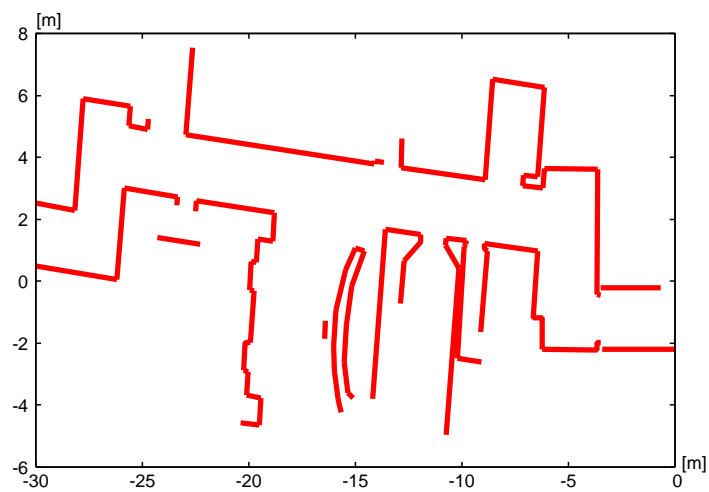


図 4.6 線分で表現された環境地図



#### 4.4.2 計測精度の検証

図 4.7 に示す本学 A 棟 5 階の A から J の各点において，車いすを矢印方向に向けて設置して距離情報を取得した．そのデータを手動で環境地図と重ね合わせた際に取得できる座標および姿勢と本システムによって計測された座標および姿勢を比較した．計測は各地点でそれぞれ 10 回ずつ行い，それらの結果を平均したもの表 4.1 に示す．実験結果より，計測点 D 点での誤差が他の計測点に比べて大きいことがわかる．これは D 点付近には特徴のない平坦な壁が多く，高い相関が得られないことが原因と考えられる．しかし生じた平均誤差は距離 5.1[cm]，角度 0.4[deg] で，拡張現実感システムに用いるには十分実用的な精度を有していると言える．

#### 4.4.3 地図に存在しない障害物による影響の検証

環境内に障害物がある場合の自己位置計測への影響を調査した．図 4.9 の A 点に，幅 65[cm] × 奥行 65[cm] × 高さ 70[cm] の 4 脚の椅子を，B,C 点に幅 48[cm] × 奥行 29[cm] × 高さ 76[cm] の箱をそれぞれ配置し，START 地点から GOAL 地点まで移動した際の自己位置計測を行った．図 4.8 に環境に置かれた障害物の

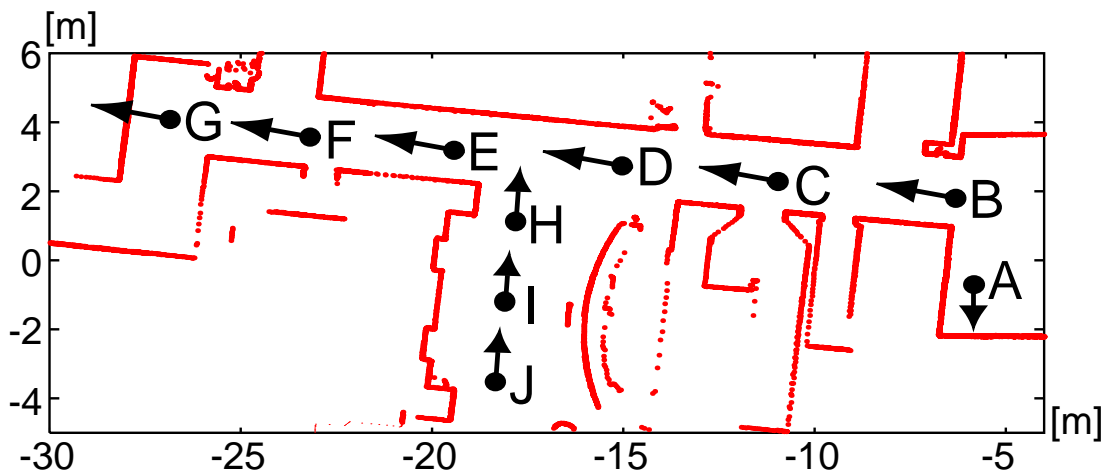


図 4.7 精度検証を行った位置

様子を示す．実験結果を図 4.10 に示す．結果より，本システムが障害物の影響を受けることなく安定して自己位置の計測が可能であることがわかる．

表 4.1 自己位置計測システムの精度評価結果

	Real			Estimated			Error	
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>angle</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>angle</i>	<i>dist.*</i>	<i>angle</i>
	[cm]	[cm]	[deg]	[cm]	[cm]	[deg]	[cm]	[deg]
A	-506	-51	177.5	-508	-50	178.5	2.2	1.0
B	-609	200	85.0	-603	201	85.5	6.1	0.0
C	-859	217	85.0	-855	217	85.0	4.0	0.0
D	-1548	281	84.0	-1541	281	84.0	7.0	0.0
E	-1942	328	83.0	-1936	329	83.5	6.1	0.5
F	-2270	365	84.0	-2265	366	84.5	5.1	0.5
G	-2683	411	85.0	-2679	409	86.0	4.5	1.0
H	-1745	114	-5.0	-1741	112	-5.0	4.5	0.0
I	-1768	-99	-5.5	-1762	-101	-5.0	6.3	0.5
J	-1794	-354	-6.0	-1790	-357	-6.0	5.0	0.0
Ave.							5.1	0.4

$$*dist. = ((\text{Real } x - \text{Estimated } x)^2 + (\text{Real } y - \text{Estimated } y)^2)^{1/2}$$

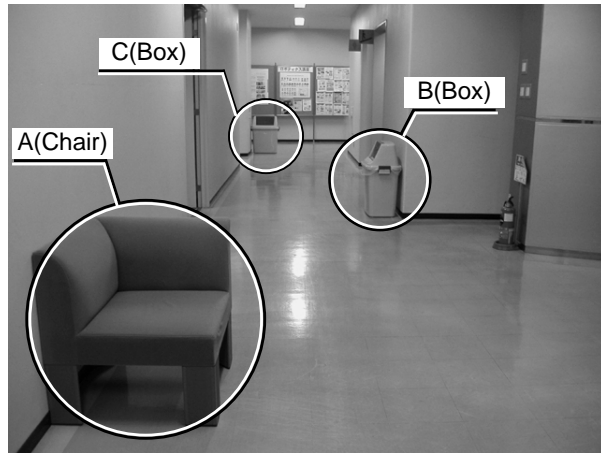


図 4.8 環境地図には存在しない障害物

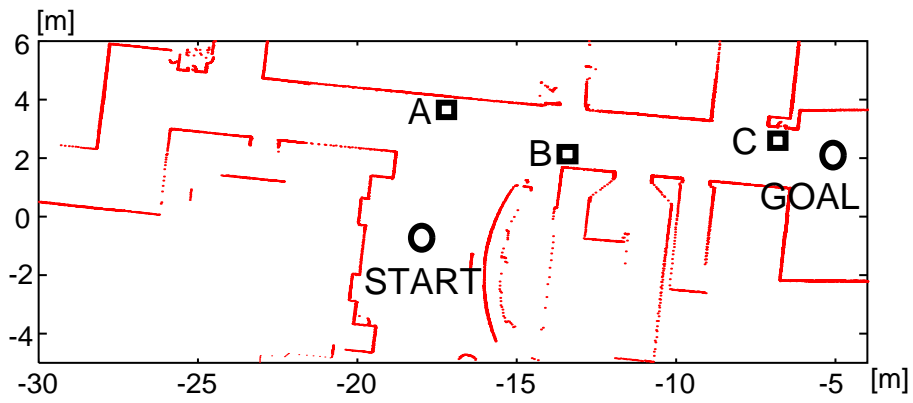


図 4.9 初期位置，目的地および障害物の位置

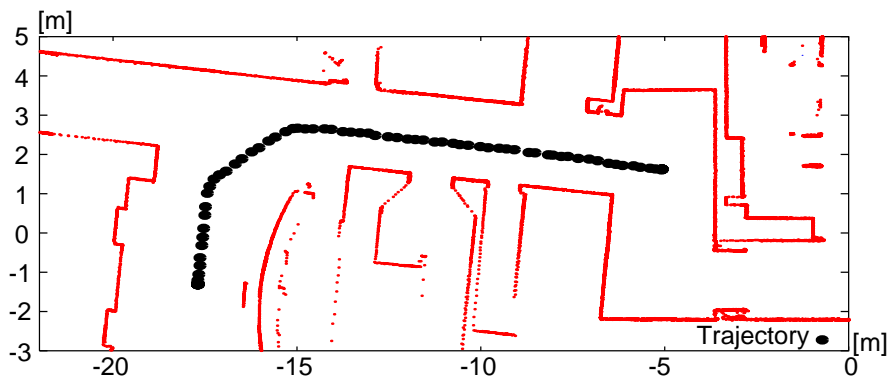


図 4.10 障害物がある環境下での自己位置計測結果

#### 4.4.4 自己位置計測が可能な移動速度の検証

車いすが静止した状態の時に安定して自己位置計測可能な場所において，車いすを一定速度・一定方向で移動させ，自己位置計測が継続できるかを見る．またその速度を変化させ，計測の限界を調べる．さらに地図にない障害物がある場合にどの程度の影響を受けるのかを検証する．実験環境は車いす前方の3面が壁に囲まれている．また地図にない障害物として縦50[cm]，横43[cm]，高さ30[cm]の1または2個の箱を前方の隅に置いて実験を行った．図4.11に本実験の実験環境を示す．

車いすを25, 29, 32, 35, 39[cm/s]で移動させた時の移動軌跡を図4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16に示す．移動速度25, 29[cm/s]では障害物の数に関わらず安定して自己位置計測が実現できているが，移動速度32[cm/s]では障害物2個の場合で自己位置計測に失敗，移動速度35[cm/s]では障害物1個の場合で自己位置計測に失敗，移動速度39[cm/s]では障害物無しの場合で自己位置計測に失敗している．本システムで用いているレーザレンジファインダの出力周期は約5[Hz]であるため，高速移動には不向きである．

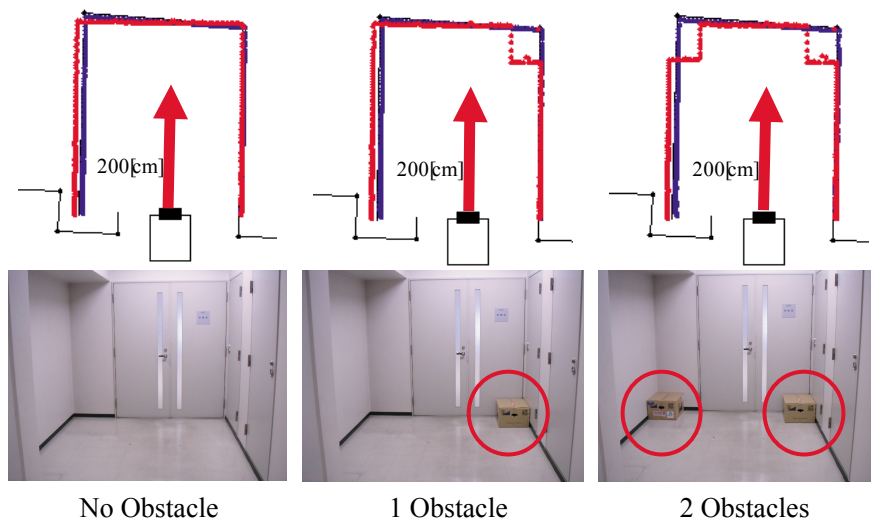


図 4.11 実験環境

高速移動時の自己位置計測を実現するための一つの方法としては，出力周期の速いレーザレンジファインダを用いることが挙げられる．例えば人間の歩行速度程度(約 100[cm])での計測を実現するためには，出力周期 20[Hz] 程度のレーザレンジファインダが必要と考えられる．

以上の結果から以後の実験では移動速度を 29[cm/s] 以下として実験を行うこととする．

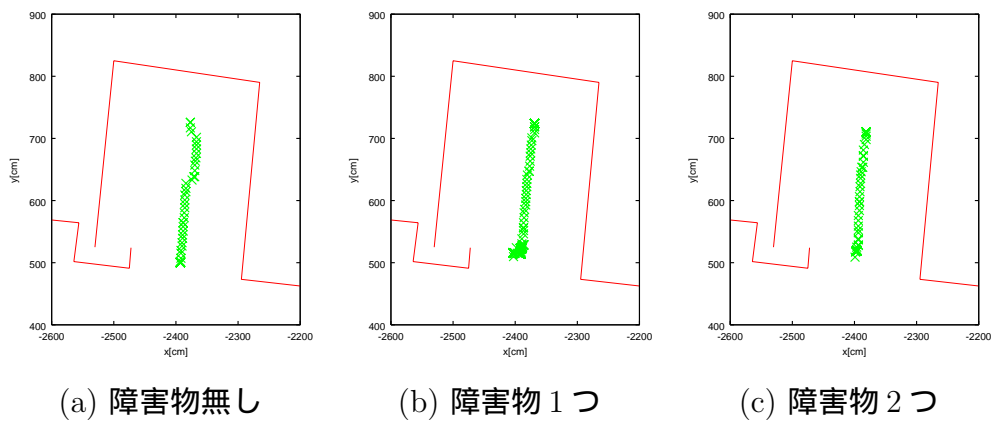


図 4.12 移動速度 25[cm/s]

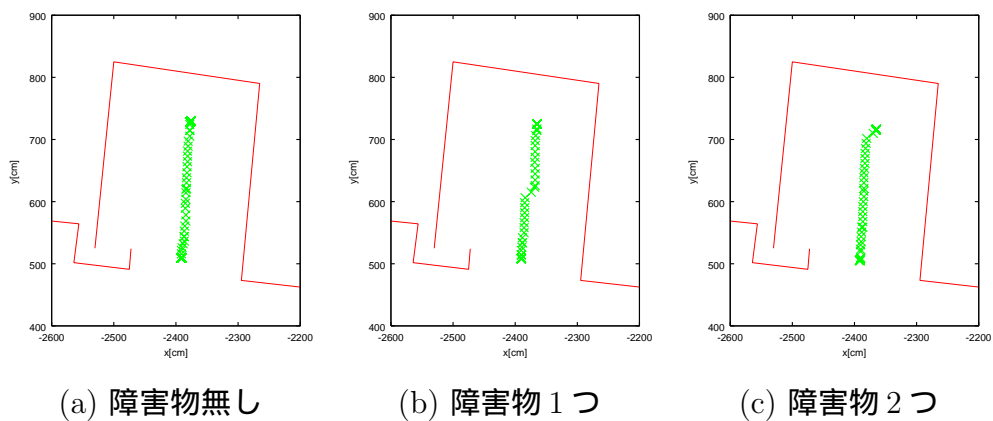


図 4.13 移動速度 29[cm/s]

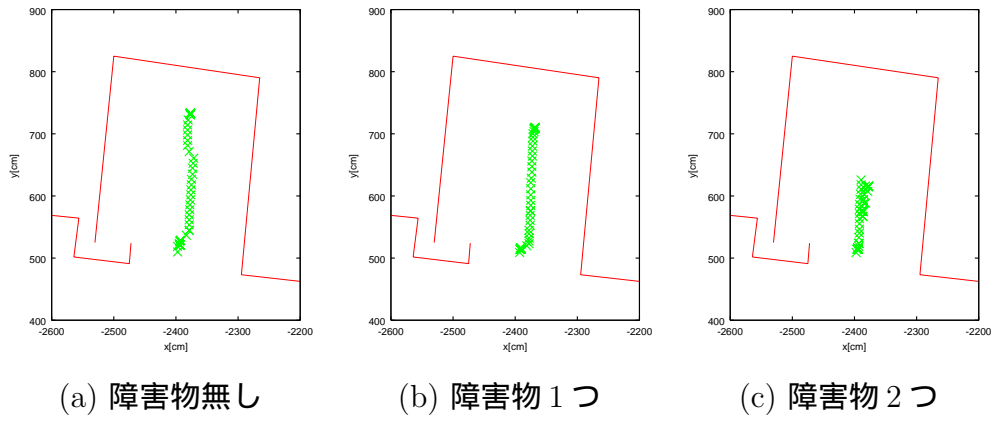


図 4.14 移動速度 32[cm/s]

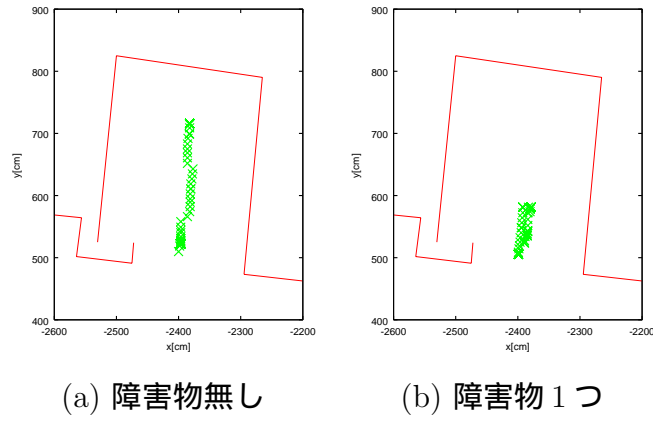


図 4.15 移動速度 35[cm/s]

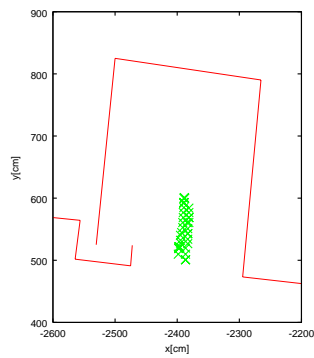


図 4.16 移動速度 39[cm/s]

## 4.5. ステレオカメラによる搭乗者の頭部位置・姿勢計測

拡張現実感システムでは搭乗者の頭部位置・姿勢計測が必要になる。既存の頭部位置・姿勢計測としては、ジャイロや磁気センサによる手法、再帰性反射マーカを用いる手法 [64] などがある。しかし、ジャイロを用いる場合は方位角ドリフトの発生や誤差の蓄積など欠点があり、磁気センサを用いる場合には金属系の素材をシステムの構築に用いることができないといった欠点、また再帰性反射マーカを用いた手法では、システムが大規模であり、計測範囲が制限されるという問題がある。さらにこれらの手法では、ユーザが機器もしくはマーカを装着する必要がある、搭乗者に拘束感・違和感を与える。

そこで松本らが開発した頭部位置・姿勢計測システム [60] を利用した。このシステムでは、ステレオカメラを用いることで顔の 3 次元位置・姿勢の計測がリアルタイムな計測が可能で、方位角ドリフトや金属による外乱が発生しないという特徴がある。また、計測可能領域は両カメラにユーザの顔が撮像される範囲に制限されるが、非拘束・非接触での計測が可能である。本システムの概観を図 4.17 に示す。



図 4.17 ステレオカメラによる顔情報計測システムの概観

### 4.5.1 計測方法

本システムの計測においては、まず顔全体の特徴を用いて顔のトラッキング(顔全体の位置・姿勢の推定処理)が行われ、その後、視線やその他の情報の推定が行われる。ここではまず、顔トラッキング機能について述べる。3次元顔モデルと3次元観測値の信頼性に基づく重み付けを考慮したモデルフィッティング処理により、高速に頭部の位置・姿勢を求めることができる。

$$E = \sum_{i=1}^N w_i (\mathbf{R}x_i + \mathbf{T} - y_i)^T (\mathbf{R}x_i + \mathbf{T} - y_i)$$

ここで  $N$  は特徴の数、 $x_i$  は顔モデル中にある位置ベクトル、 $y_i$  は対応する特徴が観測された位置ベクトル、 $w_i$  は観測の信頼性 ( $0 \leq w_i \leq 1$ )、 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  は並進および回転ベクトル、 $E$  はフィッティングエラーである。ここでは最急降下法を用いて  $E$  を最小化する  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$  を求める。図 4.19 に詳細な処理の流れを示す。

このシステムの計測精度は、頭部位置については  $\pm 2$ [mm]、頭部姿勢については  $\pm 2$ [deg] である。精度検証実験については [65] に詳細を示しているのでここでは割愛する。

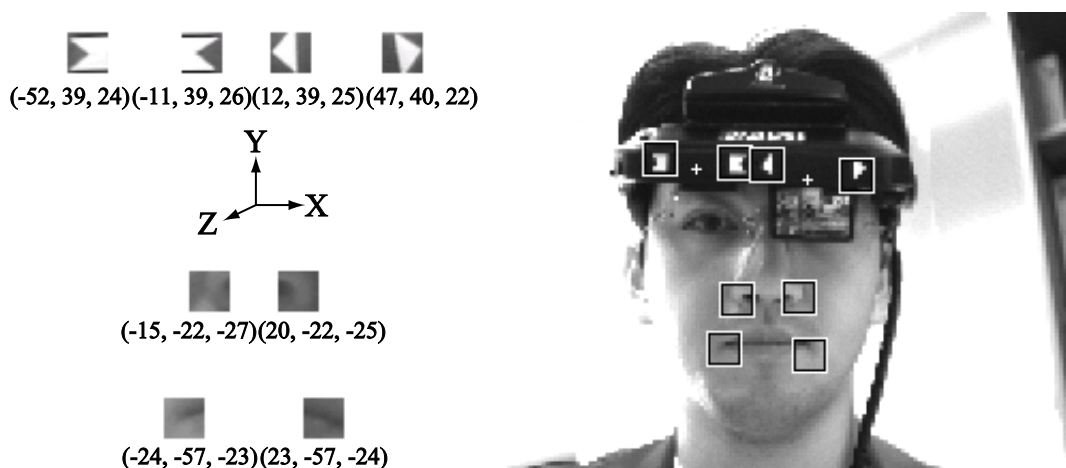


図 4.18 テンプレート画像と計測中の様子



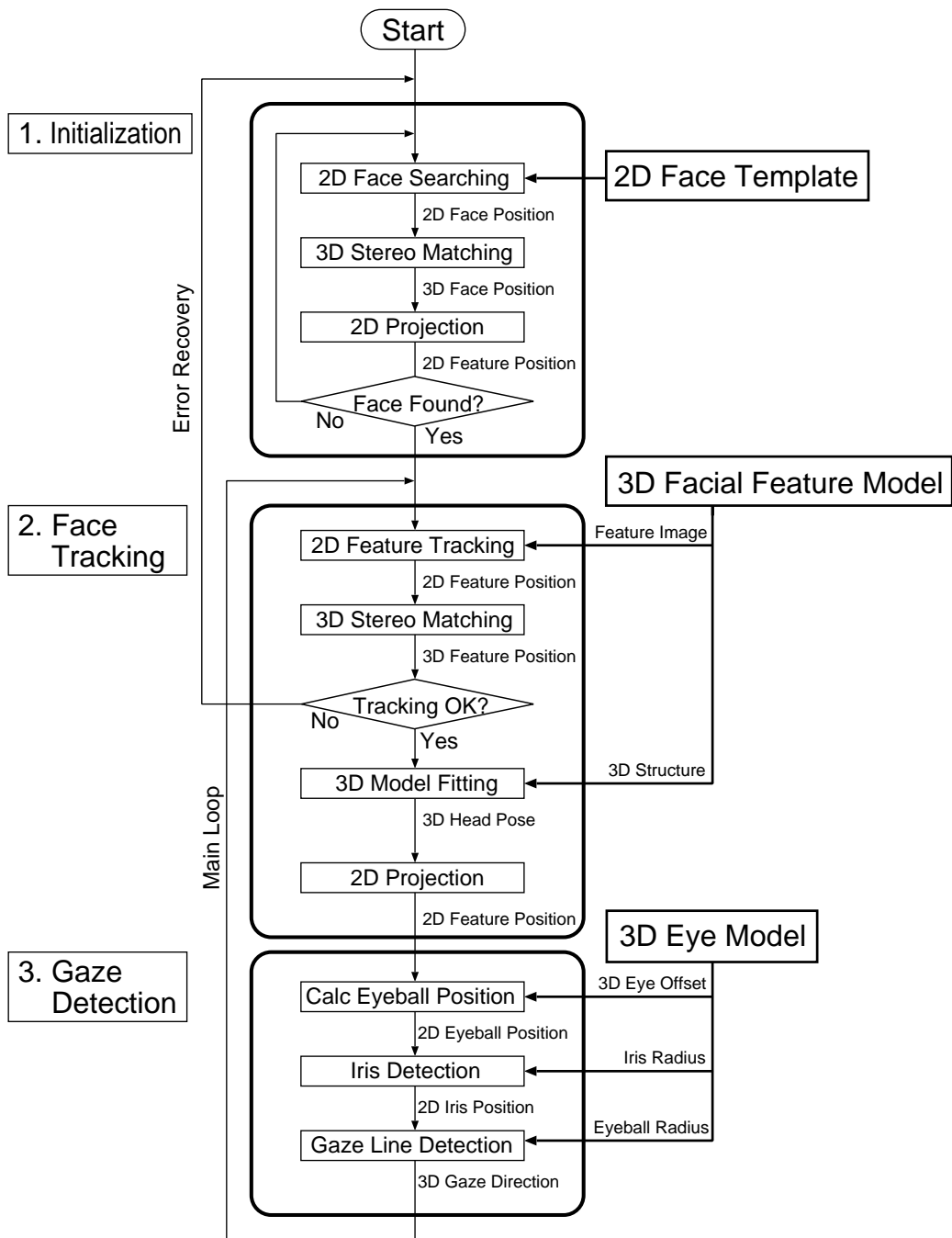


図 4.19 顔情報計測システムの処理の流れ

## 4.6. 重畳表示の精度検証

構築したシステムを用いて拡張現実感によりどの程度正確に重畳して表示されるかを実験により検証する．図 4.21 に示した計測点 1,2 において実空間中の 3 枚のパネル (縦 123[cm] × 横 94[cm]) と仮想空間中の同一座標に配置した同一寸法の仮想のパネルを重畳表示する実験を行った．仮想空間は OpenGL によって構築し，車いす搭乗者の視線方向と仮想空間での視線方向を一致させることで，実空間と仮想空間を重畳する．仮想空間内における搭乗者の視線方向は，車いす搭乗者の頭部姿勢と車いす自体の姿勢から求められる．頭部姿勢については，図 4.20 に示す座標系において，次の回転行列  $R_h$  によって求めることができる．ただし式中の  $S$  は  $\sin$ ， $C$  は  $\cos$  を表すものとする．

$$R_h(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{pmatrix} C\alpha C\beta & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ S\alpha C\beta & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma \\ -S\beta & C\beta S\gamma & S\beta C\gamma \end{pmatrix}$$

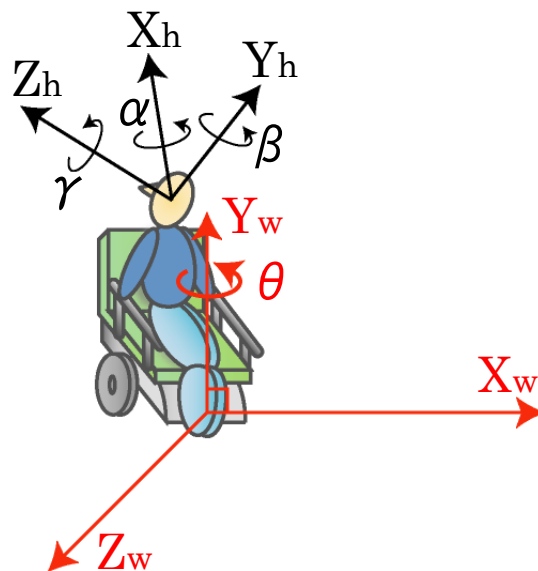


図 4.20 車いすと搭乗者の座標系

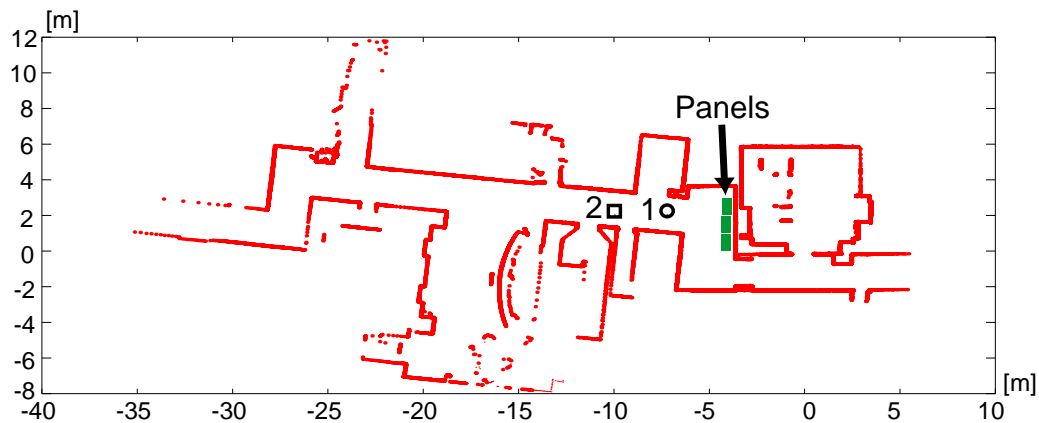


図 4.21 重畳表示の精度検証実験実施箇所

次に、車いすの姿勢については次の回転行列  $R_w$  によって求めることができる。

$$R_w(\theta) = \begin{pmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{pmatrix}$$

よって初期姿勢を  $M$  とすると、視点の姿勢  $A$  は次の計算式で求めることができる。

$$A = R_w(\theta) \cdot R_h(\gamma, \beta, \alpha) \cdot M$$

図 4.22, 4.23 に各計測点において 3 枚のパネルをそれぞれ注視したときの重畳表示の結果を示す。右のパネルを注視した場合には若干のずれが生じているが、ほぼ正確な重畳表示が実現できており、提案する計測手法が拡張現実感システムに有用であることが実証された。



(a) 左のパネルを注視



(a) 左のパネルを注視



(b) 中央のパネルを注視



(b) 中央のパネルを注視



(c) 右のパネルを注視



(c) 右のパネルを注視

図 4.22 計測点 1 における実験結果

図 4.23 計測点 2 における実験結果

## 4.7. 屋内環境における車いす搭乗者のナビゲーション 実験

構築したシステムを用いて、屋内環境で搭乗者を案内する実験を行った。

### 4.7.1 仮想物体による情報の表示

本システムでは目的地まで案内する矢印と実空間に対する注釈情報を仮想空間内に配置し、HMDを通して搭乗者に提示する。目的地までの経路上にいくつかのサブゴールを配置し、搭乗者はそれらのサブゴールを経由して目的地まで到達する。誘導を行う矢印は、次のサブゴールの位置と距離によってその向きと長さが変化する。目標のサブゴールに一定距離まで近付いた段階で、次のサブゴールを指し示す。この処理を目的地に到達するまで繰り返し行うことで誘導を実現する。矢印は搭乗者の頭部位置・姿勢にかかわらず、常に車いすの前方に存在するように描画される。また注釈情報として提示できる仮想物体は、アルファベットで構成されるテキストデータと球・立方体・円錐であり、これらは仮想空間中の任意の場所に配置することが可能である。実験は本学 A 棟 1 階エレベータホール近辺から正面玄関近辺で行った。図 4.24 に実験環境の地図と START 地点、GOAL 地点、予定走行経路、注釈情報、サブゴール群を示す。また注釈情報は、11 個のテキストデータ (Entrance, Information Desk, Office Room, Mens's Toilet, Bulletin Board, Elevator, Vending Machine, Stairs, Smoking Space, Public Telephone, Goal) と、案内の補助として全てのサブゴールとゴールに赤い円錐を配置した。

### 4.7.2 結果と考察

ガイド情報に従ってユーザが車いすを操作した時の軌跡を図 4.25 に示す。また、図 4.24 中のサブゴール A からサブゴール B に移動中の自己位置と注釈情報の重畳表示の様子を図 4.26 に示す。ここで表示されている注釈情報は、(1) では

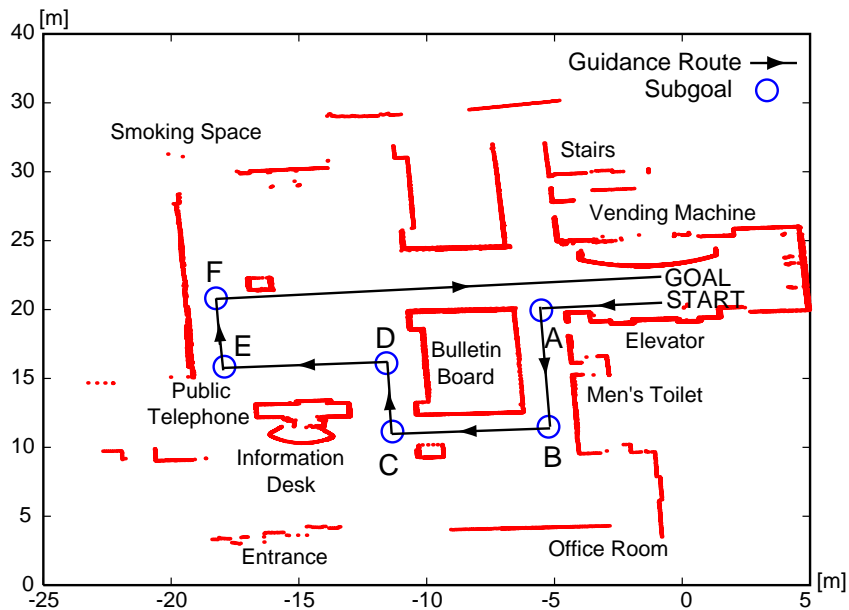


図 4.24 案内予定経路とアノテーションの位置および文字列

Men's Toilet と Office Room , (2),(3) では Office Room , (4) では Entrance , (5) では Entrance と Information Desk , (6) では Information Desk である . 次に , Men's Toilet 付近において車いすのみを左回転させた場合の自己位置と注釈情報の重畳表示の様子を図 4.27 に示す . ここで表示されている実空間に対する注釈情報は , (1) では Men's Toilet と Office Room , (2) では Office Room , (4) では Men's Toilet である . さらに , 掲示板付近及び公衆電話付近で頭部姿勢のみを回転させて掲示板及び公衆電話を注視した場合の注釈情報の重畳表示の様子を図 4.28 に示す . ここで表示されている注釈情報は , (1),(2) では Bulletin Board , (3),(4) では Public Telephone である .

以上より , 構築したシステムを用いて車いす搭乗者へのガイドが可能であることが確認できた .

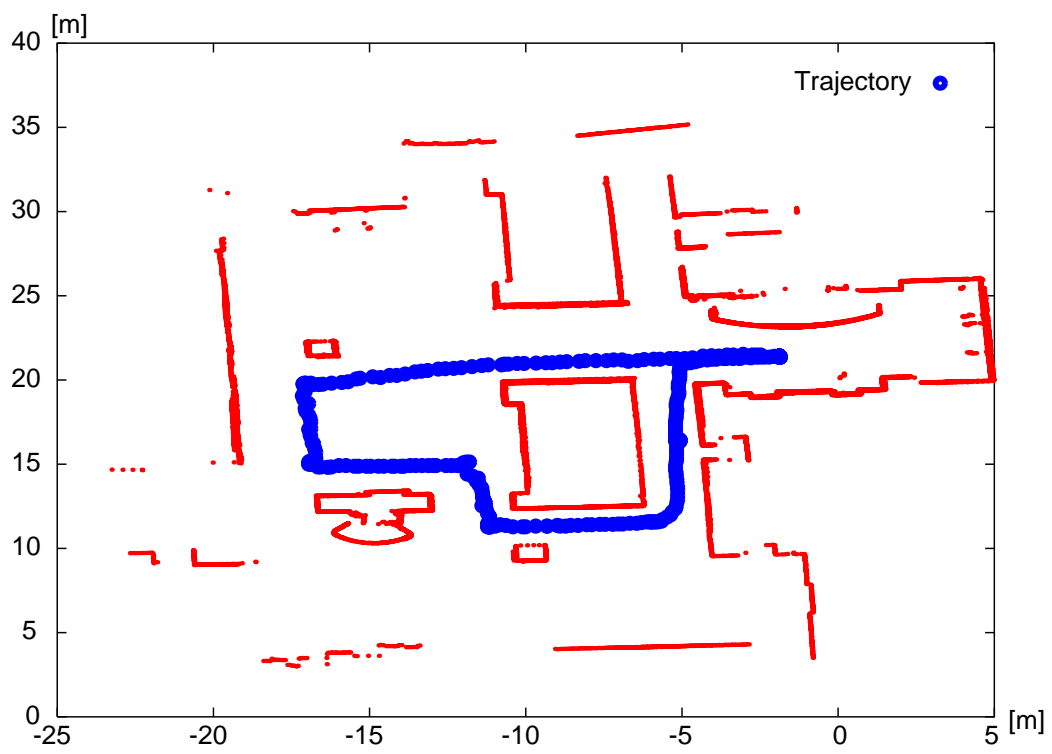


図 4.25 実際の走行経路

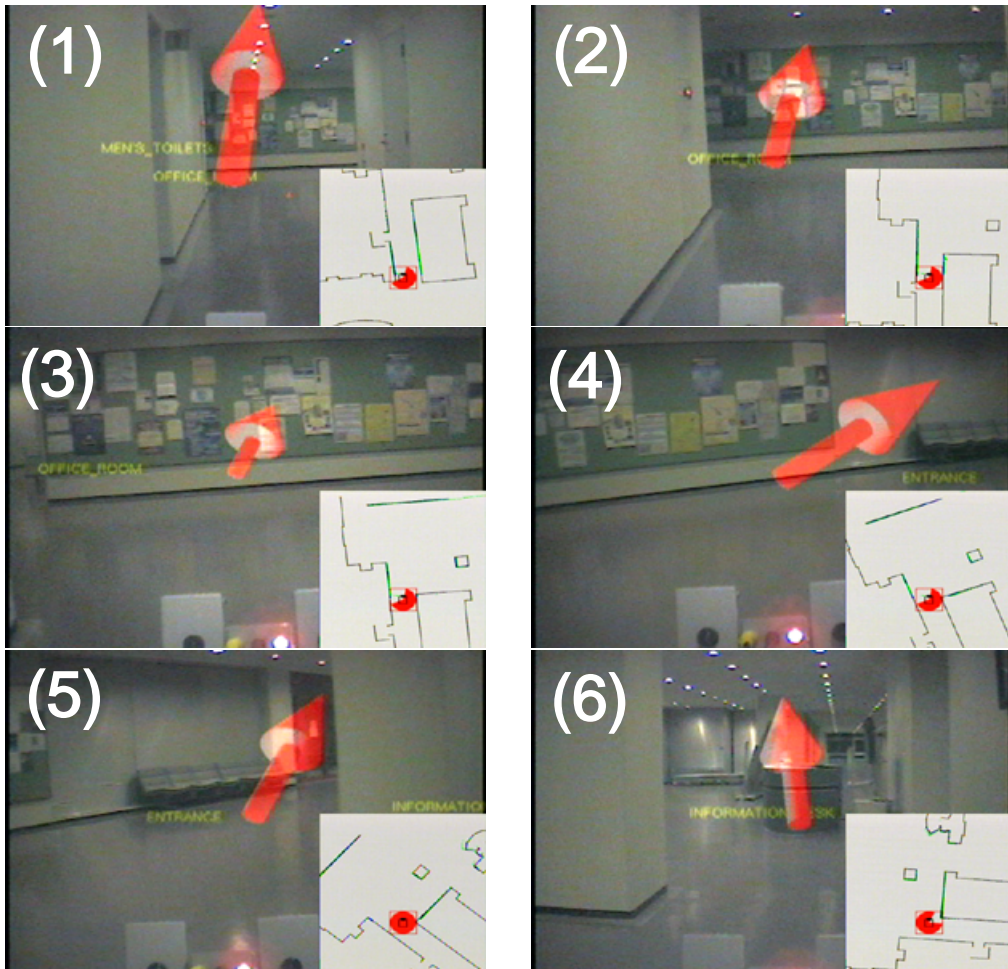


図 4.26 サブゴールまでの距離と方向に応じて変化する矢印の形状



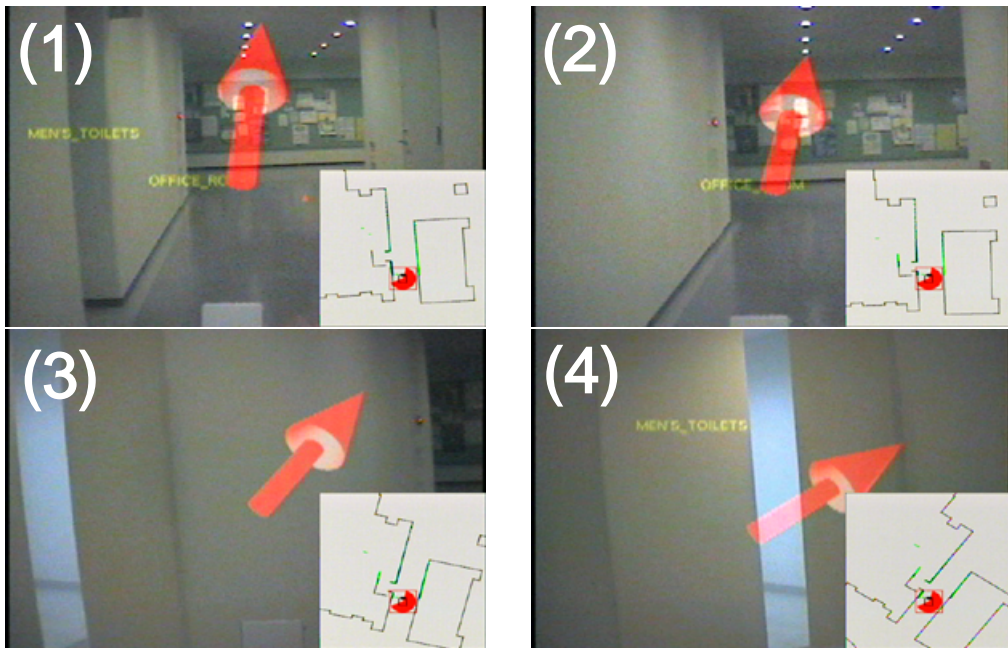


図 4.27 車いすのみを回転させた場合の仮想物体の動き

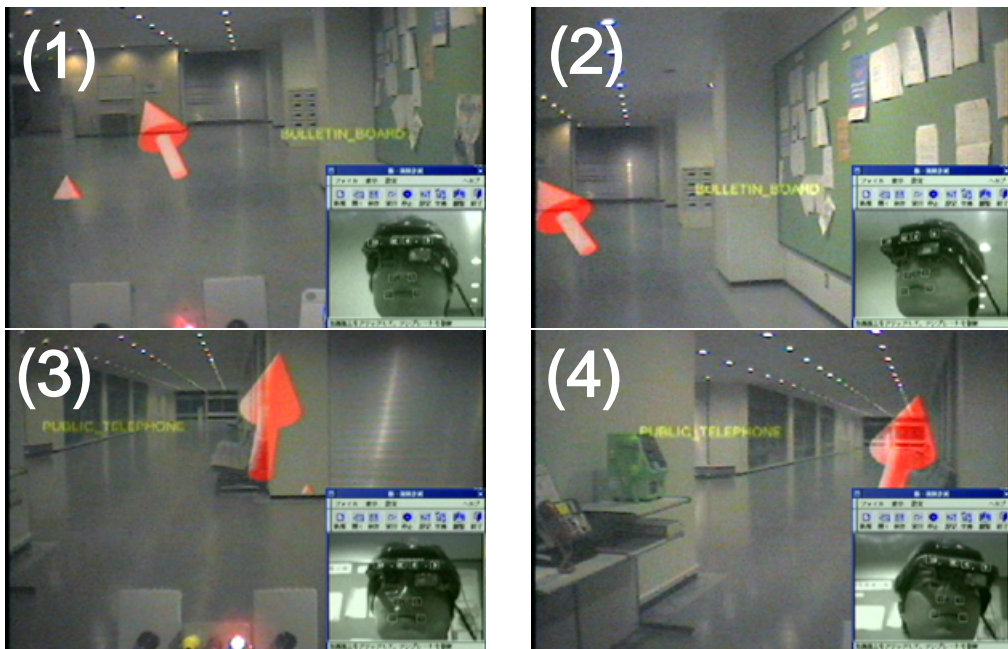


図 4.28 頭部姿勢のみを回転させた場合の仮想物体の動作

## 4.8. 災害現場を想定した被災者救助支援

開発したシステムを用い、災害現場を想定した状況化での被災者救助の支援実験を行った。本実験では搭乗者の移動を支援するために、スタート位置から被災者の位置までの経路を空間に浮遊する赤い矢印で表示する。被災者の位置は災害対策本部から知らされており、その地点までの経路も作成可能とする。環境には災害時の状況を模していくつかの障害物を配置されている。配置した障害物は倒れた椅子、段ボール箱、傘立てなどでこれらの位置を図 4.29 に示す。図内の A 点付近に多数の椅子、B 点付近に机がある。図 4.30 の A 点から移動を開始し、B 点にいる被災者まで緑の線で示された経路上に表示される矢印情報を見ながら移動する。本実験中の画面表示を図 4.32 に示す。図 4.30 内の (a) から (f) それぞれの位置で表示された画面が図 4.32-(a) から (f) になる。また画面の上部に搭乗者のパン方向の頭部姿勢、左部のチルト方向の頭部姿勢が表示されている。車いすの位置・姿勢と搭乗者の頭部位置・姿勢の変化に応じて、赤い矢印が正しく移動している。最終的に被災者までの誘導が適切に行われたことがわかる。

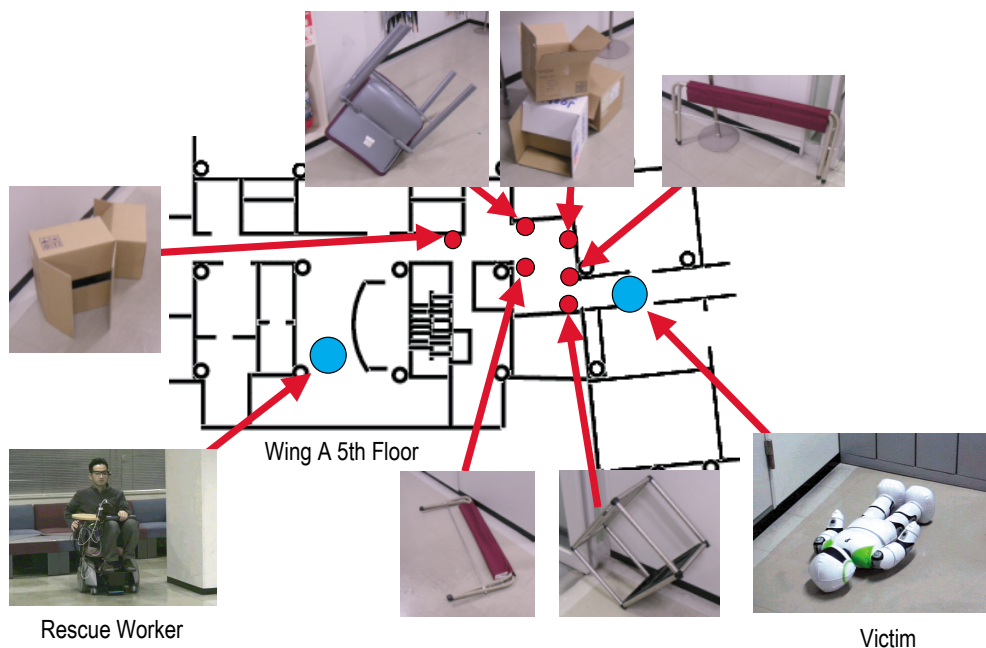


図 4.29 地図に存在しない障害物が多数存在する実験環境

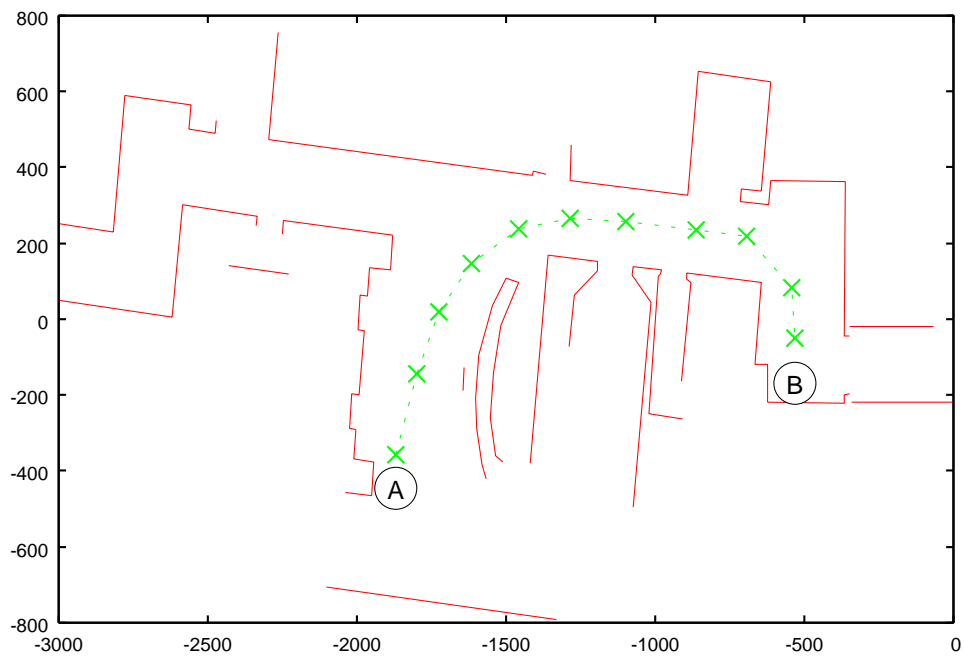


図 4.30 スタート地点，被災者の位置と案内経路

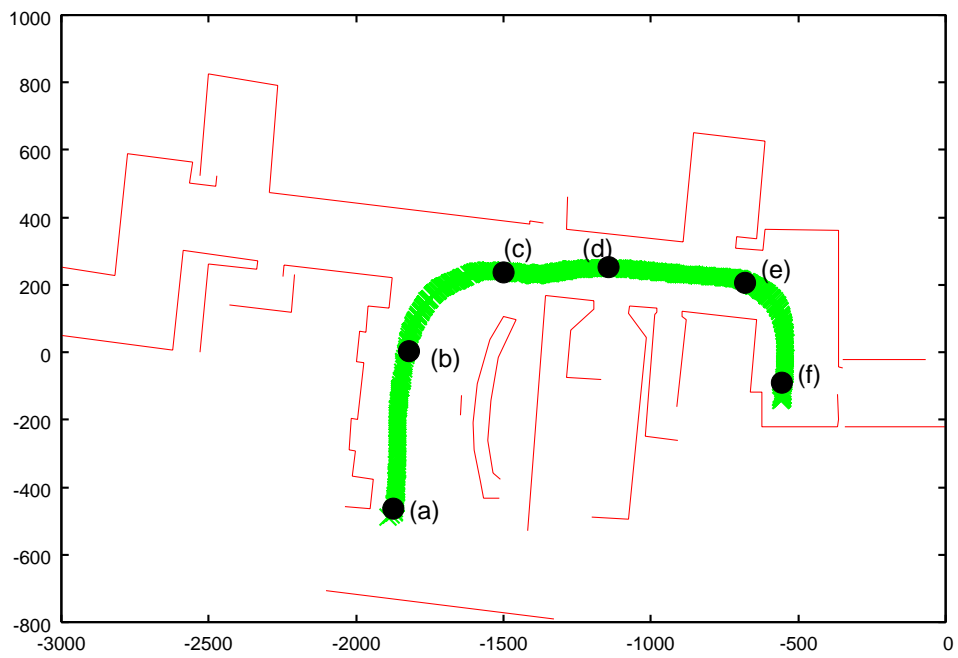


図 4.31 走行中の自己位置推定結果

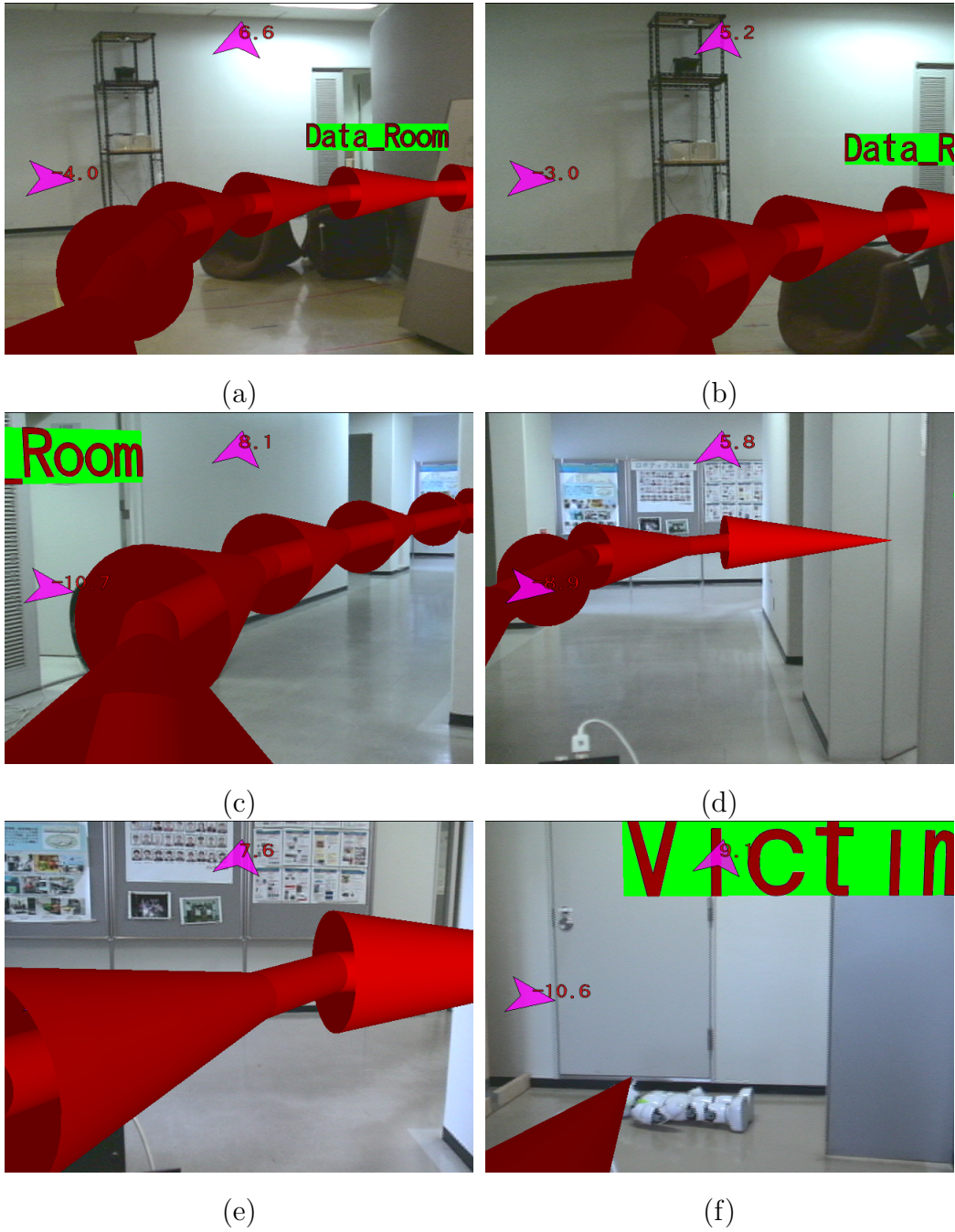


図 4.32 救助活動開始から終了までの案内の様子

## 4.9. 本章のまとめ

本章では被災者救助活動に有用な搭乗型ビークルとその活動を支援をするための拡張現実感を用いた情報提示システムを開発と実験について述べた。

はじめに、レーザレンジファインダを用いた自己位置・姿勢計測手法とステレオカメラを用いた頭部位置・姿勢計測手法について述べた。本システムではレーザレンジファインダを用いることで、環境に手を加えることなくビークルの自己位置・姿勢が計測でき、頭部位置・姿勢計測にステレオカメラを用いることで、完全に非接触・非拘束・非侵襲計測が可能であるという利点がある。

まずレーザレンジファインダによる自己位置計測の精度を検証し、位置精度 約 5[cm]、姿勢精度 約 0.5[deg] と高い精度を有することを示した。また本手計測手法の頑健性を示すために、地図に存在しない物体が存在する状況下での自己位置推定実験を行い、障害物が多数存在する環境においても安定した計測が可能であること確認した。

次に拡張現実感システムとしての性能を示すために、これらの計測結果を用いて実空間に対する仮想物体の重畳表示を行った結果、屋内での利用に問題ない程度の精度が実現できることを実験的に示した。両計測手法を組み合わせた拡張現実感提示システムを構築し、実空間と仮想空間が正確に重畳されることを示し、2つの計測手法が拡張現実感システムへの利用に有効であることを実証した。

最後に災害地での被災者の救助作業を想定して、倒れた机などが環境地図には存在しない物体がある被災現場を模した環境において、被災者が存在する位置までの案内情報を拡張現実感により表示して救助活動を支援する実験を行った。その結果、搭乗者を被災者がいる位置まで正しく誘導することが可能であることが実験的に示され、本システムによる救助の実現性を示した。

## 第5章 結論

### 5.1. まとめ

本研究では災害時における被災者捜索と救助活動のためのビークルとそれを支援するためのシステム開発を目的とした。捜索活動においては、上空からの広域捜索を実現するためにビークルとして無人ヘリコプタを用い、その操縦および捜索活動を支援するための拡張現実感システムを開発した。救助活動においては、被災したビルなどの屋内に存在する被災者救助を実現する搭乗型ビークルと、拡張現実感による支援システムを開発した。

第2章では、災害時に有用な情報収集/被災者救助ビークルと救助活動の支援に有用な情報提示システムについての関連研究を列挙し、現状の情報収集/災害救助ビークルの問題点と不十分な点について述べた。それらをふまえ、被災者捜索/救助活動のための拡張現実感による支援機能を有するビークルの開発を本研究のアプローチとすることを示した。

第3章では、まず無人ヘリコプタの操縦における問題点を示し、これを解決できる没入型遠隔操縦の利用を提案した。まず没入操縦を再現できるシミュレータを構築し、これを用いて本手法が通常の操縦と比較して容易に操縦が行えることを示した。次に全方位カメラとアナログビデオトランスミッタを搭載した無人ヘリコプタとヘッドマウントディスプレイを装着した操縦者から構成される没入型遠隔操縦システムを実装し、これを用いて2002年度生駒市防災訓練に参加してその実現可能性を示した。また、メモリベースの透視投影変換手法を提案し、操縦者が装着するノートPC上を用いて没入感提示可能なシステムを構築した。次に拡張現実感による支援により操縦の正確性が向上することをシミュレータを用い

て示した．最後に GPS・ジャイロを用いた無人ヘリコプタの 3 次元位置・姿勢計測による拡張現実感システムを構築し，これを用いて災害時の被災者捜索を想定した実験を行った結果，透視投影画像から目視で人物が発見できることを示した．

第 4 章では，屋内での救助活動に有用な搭乗型ビークルとその活動を支援するための拡張現実感を用いた情報提示システムについて述べた．本システムでは自己位置・姿勢計測にレーザレンジファインダ，搭乗者の頭部位置・姿勢計測にステレオカメラを用いることで，完全に非接触・非拘束・非侵襲な計測を実現した．まず自己位置・姿勢計測の精度評価を行い，位置誤差 6[cm]，姿勢誤差 1[deg] 以下と拡張現実感システムの利用に適していることを示した．また地図に存在しない障害物が存在した場合にも安定して計測可能であることを示した．次に拡張現実感システムとしての可能性を示すために，これらの計測結果を用いて実空間に対する仮想物体の重畳表示を行った結果，屋内利用に問題ない程度の精度が実現できることを実験的に示した．最後に被災したビル内に存在する被災者救助を想定して，操縦者を被災者まで案内する実験を行い，本システムにより救助が実現可能であることを示した．

以上の研究から，災害時における被災者の捜索活動から救助活動までを総合的に行うビークルの実現と拡張現実感による情報提示システムが実現された．

## 5.2. 課題と今後の展望

以下に本研究で開発したビークルの現状での問題点と今後の課題をまとめる．

無人ヘリコプタによる捜索活動支援に関して 無人ヘリコプタは安定性が低く，遠隔操縦を映像のみで行うことは現状では危険を伴う．関連研究でも述べた通り，近年小型無人ヘリコプタでの自律安定性が可能になりつつあり，今後これらの技術と提案手法を組み合わせることで，より有用なシステムとなり，苛酷な環境化での作業が可能になるであろう．

筆者が開発した没入型遠隔操縦システムでは，軽量化と高速化のために全方

位カメラを用いたが、現在手に入る小型で軽量の全方位カメラでは十分な解像度を得られず、特に展開画像ではさらに解像度が低下するため、人物の自動的な発見には至らなかった。ハイビジョンカメラをもつ全方位カメラが開発されている [66] が、現状ではまだサイズ・重量共に小型無人ヘリコプタのペイロードを超えており、搭載は不可能である。また高解像度画像の送信には高速なネットワークが必要になるが、これに関しても現状で容易に利用できるものとしては、IEEE 802.11g がもっとも高速で最大 54[Mbps] である。しかし、これでもハイビジョン映像のリアルタイム転送は不可能であり、さらに高速な無線 LAN の開発されることを願う。一方、CMOS イメージセンサを用いた全方位カメラが開発されつつある [67]。CMOS を用いることで柔軟な画素配置が可能となり、解像度が低下する中央付近に画素を多数配置することで、高解像度化を実現するもので、今後製品化されることを願う。

人物発見に関しては、効率的に作業を行うためサーモグラフィが効果的であるが、これも現状では大型で重く、無人ヘリコプタへの搭載は困難である。サーモグラフィの全方位化に関しては筆者を含めて成松ら [68] により研究・開発を進めており、今後に期待したい。

搭乗型ビークルによる救助活動支援に関して 本研究では搭乗型ビークルとして電動車いすを用いたが、他のビークルもしくは歩行者での実験や、それぞれの利用状況に適した位置・姿勢計測手法を組み合わせる実験を行い、拡張現実感による救助支援の有用性をより一般的に示す必要がある。被災者の位置を既知としたが、総合的な災害対策システム実現に向けて通信機能を搭載して災害対策本部から位置情報を得るシステムと、そこまでの経路を自動的に作成するシステムを実装する必要がある。またレーザレンジファインダによる自己位置・姿勢計測に必要な環境地図は現在手動で生成しているが非常に煩雑であるため、自動作成もしくは建物の設計図から生成することが望ましい。



# 謝辞

本論文に書き記した一連の研究は、筆者が奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科在学中に、ロボティクス講座(小笠原研究室)において執り行われたものです。この研究は多くの方々のお力添えにより実現することができました。ここで御礼を申し上げます。

本学 情報科学研究科 小笠原 司 教授は、修士課程からの5年間、未熟な筆者を懇切な御指導と適切な御助言によりここまでお導き下さいました。無謀とも思える無人ヘリコプタの没入型遠隔操縦システムが完成できたのは、ひとえに小笠原先生のお力添えのおかげです。深く感謝致します。

本学情報科学研究科 千原 國宏 教授には、本研究をまとめるにあたり、数々の御助言、御指摘を頂きました。また COE 研究員として採用して頂き、多くの研究資金と貴重な経験をさせて頂きました。深く感謝致します。

本学情報科学研究科 横矢 直和 教授には、本研究をまとめるにあたり、ご多忙にもかかわらず博士論文の審査委員を引き受けて下さり、数々の御助言、御指摘を頂きました。深く感謝致します。

本学 情報科学研究科 木戸出 正繼 教授には、本研究を CREST 木戸出プロジェクトに統合して頂き、多くの発表の場と研究資金、貴重な御助言を頂きました。深く感謝致します。

鳥取環境大学 情報システム学科 今井 正和 教授と本学 附属図書館 研究開発室の方々には、本研究の初期段階において、無線通信及びGPS等について御指導、御助言を頂きました。深く感謝致します。

本学 情報科学研究科 松本 吉央 助教授には、お忙しい中、筆者の拙い英語論

文や発表を入念にチェックして頂き、丁寧な御指導、御助言を頂きました。また ROBODEX をはじめとする大規模なイベントや、IPA 未踏ソフトウェア創造事業への参加など多数の貴重な経験をさせて頂きました。動かし続けることの難しさで見せることの重要性を教えて頂きました。深く御礼申し上げます。

本学 情報科学研究科 山澤 一誠 助教授には、全方位画像の展開について親切な御指導を頂きました。深く御礼申し上げます。

本学 情報科学研究科 上田 淳 助手には、制御の知識が乏しい筆者に、遅延に関して適切な御指導、御助言頂きました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 上田 悦子 助手には、普段から様々な御指導、御意見を頂きました。博士論文の執筆の際には適切なアドバイスを頂き、精神的に窮迫していた筆者を助けてくださいました。また、食事会など様々なイベントを企画して頂き、楽しませて頂きました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 竹村 裕 研究員には、研究会などで多数の貴重な御指導、御意見を頂きました。ありがとうございました。

秘書 金岡 恵 様には、物品発注や出張資料作成などで多々お世話になりました。おかげで研究を円滑に進めることができました。また適切な資産運用法について御教授頂き、多くの貴重な経験をさせて頂きました。ありがとうございました。

21 世紀 COE プログラム情報研究拠点推進室 桑野 美紀 様、足立 敏美 様には、COE フェスティバルや COE ポスドク研究員・奨励研究員研究発表会の準備、また物品発注などで大変お世話になりました。ありがとうございました。

生駒市職員の方々、特に白本 和久 様には、生駒市総合防災訓練という素晴らしい発表の場を提供して頂き、メディアの効果的な利用方法をまた興味深い本を度々頂戴し、男の生き方について学ばせて頂きました。ありがとうございました。

有限会社デジタルリサーチ 松永 直 様には、生駒市総合防災訓練において、実験装置の設置、配線などハードウェア面において御尽力頂きました。ありがとうございました。

先端科学研究調査センター 萩原 史郎 客員教授、三協国際特許事務所 大月伸

介 様には、 $\wedge$ 切直前の特許出願のために多大な御尽力頂きました。ありがとうございました。

文化庁 平城京跡管理室の方々には、平城京跡での実験許可を頂く際に大変お世話になりました。ありがとうございました。

テクノス株式会社 脇田 良夫 部長、若林 護 様、杉村 晃彦 様には、アルバイトでお世話になり、プログラマとして多くの経験をさせていただきました。ここで培ったスキルは研究以外の部分で大変役立ちました。ありがとうございました。

インパクトシステム 田中 忠彦 様には、JOYPro-2 を御提供頂きました。非常に良くできた装置でシミュレータでの実験において大変役立ちました。ありがとうございました。

ホビーショップジャンボ 様には、ヘリコプタ関連部品の購入の際に無理な注文を快くお聞き下さり、大変お世話になりました。ありがとうございました。

株式会社けいはんなの方々、特に牧野 誼 部長、竹島 康志 次長、藤原 有希子 主任には、JST 権利化試験課題申込書の作成でお世話になりました。 $\wedge$ 切直前のため休日返上で書類作成をお手伝い頂き、結果としては落選したものの、皆さんと一緒に仕事させていただけたことは、私にとって貴重な経験でした。ありがとうございました。

シャープ株式会社 足立 佳久 様には、電動車いすの論文を執筆する際の精度検証実験で大変お世話になりました。香 夫人には、家で美味しい手料理を食べさせて頂きました。また、もも・かりん・あんず 君達には、大変癒して頂きました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 博士後期課程 怡土 順一 君には、修士課程からの5年間、プログラミングやサーバ構築など色々と大変お世話になりました。2.4系カーネル用 Viomagic ドライバは、ヘリコプタでの最終実験に欠くことのできないものでした。このお蔭で実験が無事終了したと言っても過言ではありません。心より感謝いたします。

本学 情報科学研究科 博士後期課程 竹村 憲太郎 君、近藤 誠宏 君には、生駒

市防災訓練での実験で大変お世話になりました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 2002 年度卒業生 鈴木 征一郎 君 (現オリンパス) には、電動車いすのナビゲーションシステムの構築と実験をして頂きました。精度検証の実験では色々と苦労しましたが、おかげで貴重な投稿論文を作成できました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 博士前期課程 末永 剛 君、近藤 理 君には、電動車いすのナビゲーションシステムの構築の際、USB からの LRF 操作プログラムの基礎部分を作って頂きました。車いすの最終実験ができたのはお二人のお蔭です。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 博士前期課程 成松 英一 君には、人物発見限界の実験の際に手伝って頂きました。ありがとうございました。

産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター 榎永 沙織 さんには、夏の暑い最中、本学北側空閑地と平城京跡でのヘリコプタの実験を手伝って頂きました。また生活面でも多々お世話になりました。ありがとうございました。

研究生を送るにあたり、様々な形で御支援、御協力を頂きました本学 情報科学研究科 ロボティックス講座の卒業生および在学生の方々に深く感謝いたします。

最後に、5 年間に渡る学生生活を送るにあたり全面的に協力、応援してくれた家族と亡き愛犬モカに心から感謝します。

# 著者研究業績

## 学術雑誌論文

1. 小枝正直, 鈴木征一郎, 松本吉央, 小笠原司, “ステレオカメラを用いた頭部位置・姿勢計測とレーザレンジファインダを用いた自己位置・姿勢計測の拡張現実感への応用”, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.7, pp.755-761, 2004.7.

## 国際会議議事録 (査読あり)

1. Masanao Koeda, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara, “Development of an Immersive Teleoperating System for Unmanned Helicopter”, In Proceedings of 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.47-52, Berlin, Germany, 2002.
2. Masanao Koeda, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara, “Development of an Immersive Teleoperating System for Unmanned Helicopter”, In Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications 2002, pp.220-223, Nara, Japan.
3. Masanao Koeda, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara, “Annotation-Based Assistance System for Unmanned Helicopter with Wearable Augmented Reality Environment”, In Proceedings of The Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented

Reality, pp.288-289, Arlington, VA, USA, 2004.

## 国際会議議事録 (査読なし)

1. Masanao Koeda, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara, “Performance Evaluation of Annotation-Based Assistance System for Unmanned Helicopter”, In Proceedings of 2003 NAIST COE International Symposium - Ubiquitous Networked Media Computing -, pp. 43-44, Nara, Japan.
2. Masanao Koeda, Seiichiro Suzuki, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara, “Annotation System for Robotic Application”, In Proceedings of The 2nd CREST Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing, pp.97-100, Nara, Japan.
3. M. Kanbara, R. Tenmoku, T. Ogawa, T. Machida, M. Koeda, Y. Matsumoto, K. Kiyokawa, H. Takemura, T. Ogasawara, and N. Yokoya, “Nara Palace Site Navigator: A Wearable Tour Guide System Based on Augmented Reality”, In Proceedings of 3rd CREST/ISWC Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing, pp. 7-14, Arlington, VA, USA, 2004.
4. Masanao Koeda, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara, “Development of Annotation-Based Assistance System for Unmanned Helicopter with Wearable Augmented Reality Environment”, In Proceedings of 3rd CREST/ISWC Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing, pp. 23-26, Arlington, VA, USA, 2004.

## 国内発表

1. 小枝 正直, 松本 吉央, 小笠原 司, “無人ヘリコプタの没入型遠隔操縦システムの開発”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 129-130, 2001.
2. 小枝 正直, 松本 吉央, 小笠原 司, “無人ヘリコプタの没入型遠隔操縦システムの開発 -シミュレータと実機による有効性の検証-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2002 講演論文集, 2P2-A07, 2002.6.
3. 鈴木 征一郎, 小枝 正直, 松本 吉央, 小笠原 司, “拡張現実感提示を用いた車いすのナビゲーションシステム”, 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会論文集, pp. 103-104, 2002.
4. 鈴木 征一郎, 小枝 正直, 松本 吉央, 小笠原 司, “拡張現実感を用いた車いす搭乗者へのナビゲーション情報提示システム”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3I33, 2003.9.
5. 小枝 正直, 松本 吉央, 小笠原 司, “アノテーションを用いた無人ヘリコプタの操縦支援”, 第 4 回 SICE システムインテグレーション部門 講演会 SI2003, pp. 1064-1065, 2003.12.

## その他

- 特許: 遠隔操縦システム, 特許出願 2002-070810, 特許公開 2003-267295
- Masanao Koeda, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara, “Teleoperation system of small unmanned helicopter for surveillance in disaster area: SWIFT”, DISASTER REDUCTION TECHNOLOGY LIST ON IMPLEMENTATION STRATEGIES -A Contribution from Japan-, B-MH-02, pp. 162-167, Compiled for the United Nations World Conference on Disaster Reduction, Office for Disaster Reduction Research, MEXT, Government of

Japan Committee on Research and Development for Disaster Reduction  
Working Group for Development of Disaster Reduction Technology List,  
January 2005, Kobe-Hyogo.



## 参考文献

- [1] 総務省消防庁. “消防白書 平成 16 年版”, 2004.
- [2] 安藤 慶昭, 李 周浩, 橋本 秀紀. “Networked Robotics における通信遅延が及ぼす操作性への影響の定量的評価”. 第 16 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 974–974, 1998.
- [3] 総務省消防庁. “消防の動き 391 号”, 2003.
- [4] 内閣府 防災担当. “広報ぼうさい 2001 年 1 月 創刊号 No.1”.
- [5] 内閣府 今後の地震対策のあり方に関する専門調査会資料. 我が国の地震対策の概要, 10 2001.
- [6] 田所 諭. 大大特プロジェクトの目的と概要. 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.5, pp. 2–3, 2004.
- [7] S. Tadokoro, T. Takamori, S. Tsurutani and K. Osuka. “On robotic rescue facilities for disastrous earthquakes – from the Great Hanshin-Awaji (Kobe) Earthquake–”. *Robotics and Mechatronics*, Vol. 9, No. 1, pp. 46–56, 1997.
- [8] 高森 年, 田所 諭, 大須賀 公一, 鶴谷 三郎. “救助ロボット機器の研究開発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査研究会 (略称: レスキューロボット機器研究会) 報告書”. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門, 1997.
- [9] 総務省消防庁. “消防の動き 354 号”, 2000.
- [10] 総務省消防庁. “消防の動き 363 号”, 2001.

- [11] 西川 渉. なぜヘリコプタ - を使わないのか - 危機管理システムの核心. 中央書院, 1996.
- [12] 佐藤 彰. “無人ヘリコプタの自律飛行制御”. 第 37 回飛行機シンポジウム講演集, pp. 349–352, 1999.
- [13] 佐藤 彰, 鈴木 弘人, 山越隆夫. “無人ヘリコプタの自律飛行による有珠山火口付近の観測”. 第 38 回飛行機シンポジウム講演集, pp. 109–112, 2000.
- [14] 佐藤 彰. “無人ヘリコプタの自律飛行制御の開発”. Technical report, ヤマハ発動機株式会社 技術情報 第 29 号, 2000.3.
- [15] J.R. Miller and O. Amidi. “3-D Site Mapping with the CMU Autonomous Helicopter”. In *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-5)*, June, 1998.
- [16] T.Kanade B.Mettler, M.Tischler. “System Identification of a Model-Scale Helicopter”. Technical report, tech. report CMU-RI-TR-00-03, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, January, 2000.
- [17] J.R.Miller, O.Amidi, C.Thorpe, T.Kanade. “Precision 3-D Modeling for Autonomous Helicopter Flight”. In *Proceedings of International Symposium of Robotics Research(ISRR)*, 1999.
- [18] J.R. Miller, O. Amidi, and M. Delouis. “Arctic Test Flights of the CMU Autonomous Helicopter”. In *Proceedings of the Association for Unmanned Vehicle Systems International 1999, 26th Annual Symposium*, July, 1999.
- [19] 中村 心哉, 片岡 顕二, 菅野 道夫. “アクティブビジョンと GPS を用いた無人ヘリコプタの自動着陸に関する研究”. 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp. 94–102, 2000.
- [20] 中村 心哉, 佐藤 彰, 柴田 英貴, 菅野 道夫. “画像情報および GPS を用いた無人ヘリコプタによる自動探索, 追従システムに関する研究”. 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp. 261–269, 2000.

- [21] 白石 剛之, 細田 慶信. “無人ヘリコプタ RPH2A 観測システム”. 第 4 回 SICE システムインテグレーション部門 講演会 講演論文集 (SI2003), 3J5-6, 2003.12.
- [22] 森川 泰, 安達 弘典, 小森谷 清, 谷江 和雄. “災害様小型無人ヘリコプタの開発”. 第 3 回 SICE システムインテグレーション部門 講演会 講演論文集 III, pp. 21–22, 2002.12.
- [23] 森川 泰, 小森谷 清. “情報収集飛行ロボット”. 日本機械学会誌 Vol. 106, No. 1019,, pp. 16–19, 2003.10.
- [24] 森川 泰, 河井 良清, 小森谷 清, 富田 文明. “無人ヘリコプタによる三次元画像撮影”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 1P1-H-41, 2004.6.
- [25] 羽沢 健作, 辛 振玉, 藤原 大悟, 野波 健蔵. “危険作業支援のための小型無人ヘリコプタの自律制御”. 第 3 回 SICE システムインテグレーション部門 講演会講演論文集 I, pp. 161–162, 2002.12.
- [26] 辛 振玉, 藤原 大悟, 羽沢 健作, 野波 健蔵. “ラジコンヘリコプタの姿勢制御・ホバリング制御”. 日本機械学会論文集, 68 巻 675 号 C 編, 論文 No. 01-1297, pp. 3284–3291, 2002.
- [27] D. Fujiwara, J. Shin, K. Hazawa, K. Igarashi, D. Fernando, and K. Nonami. “Autonomous Flight Control of Small Hobby-Class Unmanned Helicopter, Report 1: Hardware Development and Verification Experiments of Autonomous Flight Control System”. *Japan Society of Mechanical Engineers, Robotics and Mechatronics Division, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15 No.5*, pp. 537–545, 2003.
- [28] K. Hazawa, J. Shin, D. Fujiwara, K. Igarashi, D. Fernando, and K. Nonami. “Autonomous Flight Control of Small Hobby-Class Unmanned Helicopter, Report 2: Modeling Based on Experimental Identification and Au-

- tonomous Flight Control Experiments”. *Japan Society of Mechanical Engineers, Robotics and Mechatronics Division, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15 No.5*, pp. 546–554, 2003.
- [29] 坂東 麻衣, 吉永 秀人, 中西 弘明, 井上 紘一, 佐藤 彰. “防災用インテリジェントエアロボットの開発”. In *Proceedings of the 47th Annual Conference of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, pp. 239–240, 2003.
- [30] 青木 創太, 中西 弘明, 井上 紘一. “災害対応用無人ヘリコプタのインタフェース設計”. In *Proceedings of the Human Interface Symposium 2003*, pp. 379–382, 2003.
- [31] M. Onosato and T. Watasue. “Two attempts at linking robots with disaster information: InfoBalloon and gareki engineering”. In *Advanced Robotics, Vol. 16, No. 6*, pp. 463–572, 2002.
- [32] 永富, 小野里, 竹内, 寺本, 石田. “InfoBalloon システムにおける鳥瞰カメラと GIS との連携手法に関する研究”. 第 4 回システムインテグレーション部門学術講演会論文集 (CD-ROM), pp. 1224–1225, 2003.
- [33] 小野里 雅彦. 被災地での情報収集・伝達のための分散型システムの開発 - 大特「情報収集グループ」の研究紹介 -. *日本ロボット学会誌*, Vol. 22, No. 5, pp. 558–561, 2004.7.
- [34] D. Kurabayashi, K. Noda, H. Asama, K. Kawabata, H. Kaetsu and H. Hashimoto. “Information Assistance for Search-and-Rescue by Intelligent Data Carriers and a Data Retrieval Blimp”. *Japan Society of Mechanical Engineers, Robotics and Mechatronics Division, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15, No.5*, pp. 521–527, 2003.
- [35] 神戸大学. “群制御レスキュー探索用ロボット (UMRS) の開発”. <http://www.r.cs.kobe-u.ac.jp/umrs/>.

- [36] 高島 雅之, 高森 年, 小林 滋. “人命探査用クローラ車群のマンマシーン制御-モニタ情報に基づく遠隔操作-”. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'02(ROBOMECH'02) CD-ROM 講演論文集, 2002.
- [37] 高森 年, 山本 雅彦, 小林 滋, 大坪 義一, 高島 雅之, 池内 彰博, 高島 志郎, 下中篤, 山田 雅俊. “移動ロボット群による大規模災害被災者の探査システムに関する研究”. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2002) 講演論文集, pp. 79–80, 2002.
- [38] 高森年, 小林滋. “特集「災害対応のためのロボティクス」災害における被災者発見とクローラ型ロボット”. 日本機械学会誌, Vol. 106, NO.1019, pp. pp.782–785, 2003.
- [39] R. Damoto S. Hirose, E. F. Fukushima and H. Nakamoto. “Design of Terrain Adaptive Versatile Crawler Vehicle HELIOS-VI”. In *IROS, Hawaii*, pp. pp.1540–1545, 2001.
- [40] 高山俊男, 広瀬茂男, 新井雅之. “瓦礫内推進連結クローラ走行車「蒼龍 III 号機」の開発”. ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集 2P1-2F-B5, 2003.
- [41] S. Hirose T. Takayama. “Development of Souryu I & II -Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space-”. *Robotics and Mechatronics, Vol15, No.1,*, pp. pp. 61–69, 2003.
- [42] 塚越秀行, 森庸太郎, 佐々木正志, 田中崇裕, 北川能. “瓦礫踏破能力を向上させる跳躍・回転移動体の開発”. 日本機械学会論文集 (C 編), 70 巻, 692 号, pp. pp.1068–1076, 2004.
- [43] A. Kitagawa, L. Zhang, T. Eguchi, and H. Tsukagoshi. “Development of a Mobile Robot with Wavy Movement by Rotating Bars”. *JSME International Journal, Series C, Vol.47, No.1,* pp. pp.218–224, 2004.

- [44] R. Azuma. “A Survey of Augmented Reality”. *Presense*, 6:4, pp. 355–386, 1997.
- [45] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre. “Recent Advances in Augmented Reality”. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), pp. 34–47, Nov 2001.
- [46] 威, 大井, 天野. “レスキューロボットの位置情報の可視化”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2004.
- [47] 小林清孝, 伴好弘, 上原邦昭. “動的優先度判定機能を備えたウェアラブル ar システムに関する研究”. FIT2003 講演論文集, pp. 97–98, 2003.
- [48] T. Höllerer, S. Feiner, T. Terauchi, G. Rashid, and D. Hallaway. “Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System”. *Computers and Graphics*, 23(6), pp. 779–785, 1999.
- [49] 興梠 正克, 蔵田 武志, 坂上勝 彦. “ウェアラブル拡張現実システムのための利用者のビューベースト位置・方位取得手法”. 日本 VR 学会論文誌, Vol.7, No.2, pp. 139–149, 2002.
- [50] R. Tenmoku, M. Kanbara, and N. Yokoya. “A Wearable Augmented Reality System Using an IrDA Device and a Passometer”. In *Proceedings SPIE Electronic Imaging*, 2003.
- [51] 中西 弘明, 井上 紘一, 佐藤 彰. “被災地における空からの情報収集技術の確立 - 大大特「空中移動グループ」の研究紹介”. 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.5, pp. 4–7, 2004.
- [52] 森川 治, 福井 幸男, 山下 樹里, 持丸 正明, 山内 康司. “認知モデルに基づいた情報提示方法発見の新原理”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp. 339–346, 1999.

- [53] James E. Cutting and Peter M. Vishton. “Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth”. *W. Epstein & S. Rogers (eds.) Handbook of perception and cognition, Vol 5, Perception of space and motion, San Diego, CA, Academic Press*, pp. 69–117, 1995.
- [54] 米田 美里, 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和. “全方位動画像からの両眼ステレオ画像生成による移動ロボットの遠隔操縦”. 信学技報, PRMU2000-107, November 2000.
- [55] 伊藤 良太郎, 升谷 保博, 関森 大介, 宮崎 文夫. “人間の行動知能の抽出を目的としたサッカーロボットの没入型遠隔操縦システムの開発”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス '02 講演会講演論文集, 1P1-C09, 2002.
- [56] 株式会社テムザック. <http://www.tmsuk.co.jp/>.
- [57] 株式会社テムザック T-52 援竜. <http://www.enryu.jp/>.
- [58] Y. Sugahara, T. Hosobata, Y. Mikuriya, H. Sunazuka, H. Lim and A. Takashi. “realization of dynamic human-carrying walking by a biped locomotor”. In *Proc. of the IEEE ICRA 2004*, pp. 3055-3060, New Orleans, USA, April, 2004.
- [59] トヨタ自動車株式会社 搭乗歩行型ロボット i-foot.  
[http://www.toyota.co.jp/jp/news/04/Dec/nt04\\_1201c.html](http://www.toyota.co.jp/jp/news/04/Dec/nt04_1201c.html).
- [60] Y. Matsumoto and A. Zelinsky. “An Algorithm for Real-time Stereo Vision Implementation of Head Pose and Gaze Direction Measurement”. In *Proceedings of Fourth International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 499–505, 2000.
- [61] 足立 佳久, 後藤 健志, 松本 吉央, 小笠原 司. “搭乗型ガイドロボットの走行支援システムの開発-視線と環境計測に基づくユーザの行動推定-”. SICE シ

ステムインテグレーション部門講演会 (SI2002) 講演論文集 (II), pp. 111–112, 2002.

- [62] 3rd Tech. Hiball. <http://www.3rdtech.com/>.
- [63] G. Weiss, C. Wetzler, and E. V. Puttkamer. “Keeping Track of Position and Orientation of Moving Indoor Systems by Correlation of Range-Finder Scans”. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 595–601, 1994.
- [64] Oxford Metrics. Vicon motion systems. <http://www.vicon.com/>.
- [65] 松本 吉央, 開 一夫. “ヒューマン・モデリングのための顔情報計測ソフトウェアの開発”. 2002 年度 IPA 成果報告集 第二版, 2002.
- [66] 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和. “高解像度全方位視覚センサを用いたテレプレゼンス”. 日本バーチャルリアリティ学会 研究報告, CSVC2001-15, July 2001.
- [67] 湊 小太郎, 太田 淳, 土居 元紀, 菅 幹生, 大城 理. “全方位カメラ (CMOS イメージセンサによる全方位カメラ)”. 特許出願番号:2001-091487.
- [68] 成松 英一, 小枝 正直, 上田 悦子, 松本 吉央, 小笠原 司. “全方位サーモグラフィを用いた不審者発見システムの開発”. 電子情報通信学会技術研究報告 パターン認識・メディア理解 (PRMU), Vol. 104, No. 447, pp. 19–24, 2004.