

財 団 法 人 J K A
平成 24 年度 機械工業振興補助事業(24-1)

平成 24 年度
救助ロボット搭載用
立体視機能の調査補助事業
報 告 書

平成 25 年 3 月
一般財団法人 デジタルコンテンツ協会

日本が生んだ世界のスポーツ



この事業は、競輪の補助を受けて実施したものです。

URL : <http://ringring-keirin.jp/>

目 次

第1章 調査補助事業の概要	1
1.1 事業の目的と活動概要	1
1.1.1 事業目的	1
1.1.2 活動概要	1
1.2 実施体制	2
1.2.1 実施体制	2
1.2.2 委員会名簿	3
1.3 委員会の活動状況	3
第2章 実態調査	5
2.1 災害対応ロボットの概要	5
2.1.1 主なロボット開発の経緯	5
2.1.2 主なロボット一覧	7
2.1.3 災害対応ロボットの要件	7
2.1.4 立体視機能搭載用災害対応ロボットの調査結果	8
2.1.5 東日本大震災時の対応ロボット	10
2.1.6 今後の災害対応ロボットの取組み	11
2.2 ニーズ調査と考察	12
2.2.1 ニーズ調査結果	12
2.2.2 考察	15
2.3 建設業界における遠隔操作システムの取組事例	17
2.3.1 建設業界における遠隔操作システムの概要と問題点	17
2.3.2 大林組の無人化施工技術における取組事例	20
2.3.3 3D 適用の可能性	24
2.4 3D 関連の製品動向	25
2.4.1 救助形ロボットに求められる 3D 映像技術のポイント	25
2.4.2 解像度に関する考察	26
2.4.3 ディスプレイの現状と今後	29
2.4.4 カメラの現状と今後	36
2.4.5 伝送系の現状と今後	41
第3章 遠隔操縦型ロボットにおける立体視機能の効果の検証	52
3.1 本章の目的	52
3.2 テレイグジスタンス	52
3.2.1 基本概念	52
3.2.2 視機能	53
3.2.3 臨場感を与える視覚提示装置の設計	55
3.2.4 操舵のための体性感覚の手がかり	57
3.3 実験の構成	58
3.3.1 実験目的	58

3.3.2	実験装置	58
3.4	両眼立体視効果と運動視差効果の比較	60
3.4.1	目的	60
3.4.2	実験環境	60
3.4.3	実験結果	62
3.4.4	考察	64
3.5	コントローラとマスタスレーブの比較	65
3.5.1	目的	65
3.5.2	実験環境	65
3.5.3	実験結果	66
3.5.4	考察	67
3.6	探索実験	67
3.6.1	目的	67
3.6.2	同一環境下での検証	69
3.6.3	走行環境変動時の習熟度維持効果	71
3.7	ユーザテスト	73
3.7.1	実験目的	73
3.7.2	体験の流れ	74
3.7.3	行動観察	74
3.7.4	体験コメント	81
3.7.5	考察	83
3.8	まとめ	85
3.8.1	両眼立体視と同程度に効果的な単眼運動視	85
3.8.2	上体運動追従の効果	85
3.8.3	習熟効果の維持される6自由度頭部運動	86
3.8.4	ユーザテスト	86
第4章	まとめ	88
4.1	立体視機能を搭載した遠隔操縦型ロボットの特徴	88
4.1.1	視覚情報による空間効果と空間知覚特性	88
4.1.2	立体視機能搭載ロボットにおけるレイグジスタンス効果	89
4.2	作業空間に於ける立体視機能搭載ロボットの効果	89
4.2.1	立体視機能搭載遠隔操縦型ロボットによる作業性の検証	89
4.2.2	立体視機能搭載型ロボットのユーザテストでの体感報告	90
4.3	遠隔操作型ロボットにおける今後の課題	90

第 1 章 調査補助事業の概要

1.1 事業の目的と活動概要

1.1.1 事業目的

本調査補助事業では、遠隔操作型救助ロボットのタスク達成度が、操作をする人間の目となるロボットの映像システムが、立体視機能を有するか否かによって、どのような差を生じさせるのかを検証し、立体視機能の効果調査と適用領域を明確にすることを目的とした。

本事業における立体視機能とは、3D カメラや複数台カメラによる距離計測機能を目的とした意味ではなく、遠隔操作する操縦者の目に相当する機能で、視覚情報を遠隔モニタ等に表示し、人間に立体感を与える機能を指す。

当協会では、昨年度まで安全で快適な立体視映像に関し、判り易い映像表現技術を調査してきたことから、本補助事業により、災害救助ロボットの遠隔操作が容易となり、災害現場における救助ロボットの導入が促進され、機械工業の振興に寄与することを目指す。

1.1.2 活動概要

今年度、以下の調査及び実験を行う。

- (1) 救助ロボットの開発従事者に対して、ロボットのニーズ調査や立体視機能搭載ロボットの開発ニーズを調査する。その結果を、第 2 章にて実態調査を報告する。
- (2) 遠隔操縦型ロボットによる立体視機能が操作性向上に役立つかなど検証を行う。本実験だけでは実用化に向けた課題まで踏み込めないため、本事業では、基礎実験による、立体視の適用における可能性について検証する。その結果を、第 3 章にて実験報告を行う。
- (3) 評価～調査結果に関する評価検証作業を行う。その結果を、第 4 章まとめにて報告する。

1.2 実施体制

1.2.1 実施体制

一般財団法人デジタルコンテンツ協会内に、外部有識者等からなる委員会を設置して、調査研究を実施した。また、調査業務及び事業業務は、当協会より、外部機関（慶應義塾大学、木更津高等専門学校）に委託を行った。本事業の実施体制は下記の通り。

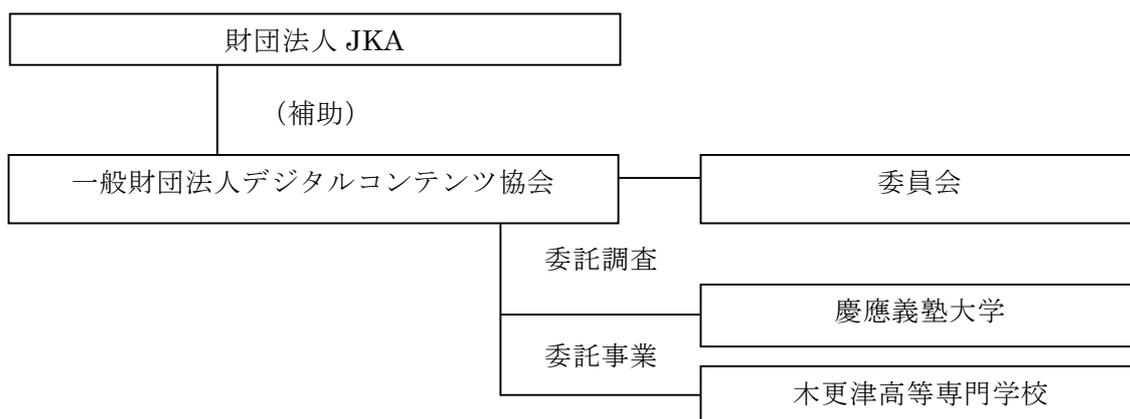


図 1.2-01 実施体制図

(1) 委託調査先 【災害実証現場における立体視機能の効果調査委託】

- ・ 研究の詳細計画の立案
- ・ 実験に用いる機材（遠隔操縦型ロボット，操縦システム一式等）の開発と提供
- ・ 実験用ソフトウェア（ロボットの操縦インタフェース等）の開発
- ・ 実験データの解析

(2) 委託事業先 【実験に関する業務委託】

- ・ 災害現場環境を簡略化した実験環境を構築する。
- ・ 環境条件に合わせた駆動ロボットのプログラム改修
- ・ 実験の実施と実験データの取得

1.2.2 委員会名簿

3D とロボットの有識者 5 名からなる委員会を一般財団法人デジタルコンテンツ協会内に設置、4 回の委員会を開催した。委員については下記のとおり。

表 1.2-01 委員会 委員名簿

役割	氏名	法人名	所属	役職
委員長	畑田 豊彦	東京眼鏡 専門学校		校長
委員	大場 省介	ソニーPCL 株式会社	3D 戦略室	3D クリエイティブ プロデューサー
委員	神田 真司	株式会社 富士通研究所	ヒューマンセントリック コンピューティング研究所	主管研究員
委員	栗生 暢雄	株式会社 大林組	機械部技術開発課	課長
委員	森口 拓雄	総合警備保障 株式会社	開発技術部	シニアエンジニア

1.3 委員会の活動状況

(1) 第 1 回委員会

1. 日時：平成 24 年 7 月 18 日 10:00～12:00
2. 場所：一般財団法人デジタルコンテンツ協会 A 会議室
3. 議案：
 - ① JKA 補助事業の概要説明
 - ② 自己紹介・委員長選出
 - ③ 実験概要・全体スケジュール説明
 - ④ 今回合意内容

本事業の調査実験範囲、全体スケジュール、委託調査先選定、委託業務仕様

(2) 第 2 回委員会

1. 日時：平成 24 年 10 月 3 日 15:00～17:00
2. 場所：慶應義塾大学 日吉キャンパス 協生館 6 階大会議室
3. 議案：

- ① 議事録確認
- ② 全体進捗状況の確認
- ③ 実験計画の確認
- ④ ニーズ調査の進捗状況

(3) 第3回委員会

1. 日時：平成25年1月21日 15:30～17:10
2. 場所：慶應義塾大学 日吉キャンパス 協生館6階大会議室
3. 議案：
 - ① 本事業の3D適用性の進め方について
 - ② ヒアリングポイント報告
 - ③ 実験結果の報告
 - ④ 実験報告における立体視機能の適用について

(4) 第4回委員会

1. 日時：平成25年3月7日 15:30～17:30
2. 場所：慶應義塾大学 日吉キャンパス 協生館6階大会議室
3. 議案：
 - ① 議事録確認
 - ② 体感報告
 - ③ 立体視機能の適用性について
 - ④ 成果報告セミナーについて

第 2 章 実態調査

本章では、既に開発が進んでいる情報収集用ロボットから搬送や復旧作業を行う重機までを対象とした災害対応ロボットの現在の開発実態を調査し報告する。

次にロボットに対する立体視機能のニーズに関して、開発関係者にヒアリングを行った結果を報告する。その後、建設業界における遠隔操作システムの取組事例を紹介し、最後に、立体視機能を構築する上で必須である、カメラ、ディスプレイ、及び映像伝送に関する最新の技術動向と今後の展望について報告する。

2.1 災害対応ロボットの概要

2.1.1 主なロボット開発の経緯

本格的な災害対応ロボット開発は、主に東京地下鉄サリン事件や阪神・淡路大震災、更に普賢岳噴火土砂災害等災害や事故が契機となって、関係省庁や所管機関で研究開発された。主な災害や事故を契機となったロボット開発の概要を紹介する。

(1) 東京地下鉄サリン事件

1995 年東京地下鉄サリン事件や 2001 年米国で発生した同時多発テロを始め、消防隊員のみでは安全に消防活動を実施することが困難な災害現場が多く発生した。総務省消防庁では、NBC テロ災害（核 [Nuclear] 生物剤 [Biochemical] 化学剤 [Chemical]）の救助資機材として、検知・探査災害対策用ロボットを開発し、東京消防庁に配備した。

一方、経済産業省所管（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という）では、2010 年度までの 5 年間で、戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトとして、閉鎖空間内高速走行探査群ロボット「Quince」を開発した。

(2) 阪神・淡路大震災

1995 年阪神・淡路大震災が契機となって、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・配信等を支援することを目的としたロボット等文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトにより、2002 年 8 月 1 日～2007 年 3 月末まで研究開発がされた。

[1]

研究開発された下記 4 つのミッションユニット（MU）を紹介する。

表 2.1-01 研究開発したミッションユニット

上空からの情報収集 MU	インテリジェントヘリ、飛行船、バルーンなどにより、上空からの情報収集を行う。
瓦礫内での情報収集 MU	ヘビ型ロボット、線状ロボット、アドバンスツールなどにより、瓦礫内に侵入しての情報収集を行う。
瓦礫上からの情報収集 MU	クローラ型ロボット、ジャンプ型ロボットなどにより、空間が大きく空いた瓦礫や地下街などの情報収集を行う。
広域情報収集のためのインフラ MU	マイクロサーバ、RFID タグなどを用いて、ユビキタス情報収集を行う。

(3) 普賢岳噴火

1990 年からの雲仙普賢岳噴火が契機になって、建設機械の無人化重機を遠隔操作する無人化施工の推進が開始された。

無人化施工に必要な遠隔操作仕様建設機械とそのロボット技術としては、ショベル系建設機械と運搬機械（ブルドーザ・ダンプ等）が挙げられる。

2000 年有珠山噴火や三宅島雄山噴火、2004 年新潟県中越地震、2008 年岩手宮城内陸地震等噴火や地震以外にも、砂防ダムに溜まる土砂の除去工事などに国土交通省が発注し、無人化施工が行われている。

(4) JCO 臨界事故

1999 年 9 月に発生した JCO 臨界事故後に、作業員に代わり原子力災害対応を行うロボットの必要性が認識され、文部科学省所管の原子力安全技術センターは屋外モニタリング用を、旧日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）では屋内情報収集用を、経済産業省所管の製造科学技術センターでは屋内作業用の、原子力災害ロボットが開発された。

(5) その他

総務省消防庁では、消防を目的とする消防防災ロボットと、これ以外の災害対策ロボットを開発している。消防防災ロボットとしては、放水型、水中探索型、偵察型、救助型に区分して開発している。

前述のサリン事件後開発した検知・探査災害対策用ロボットは、消防防災以外の探知・対策型災害対策ロボットとして位置付けされる。

2.1.2 主なロボット一覧

各省庁を含む公的機関を始め、学術機関や民間企業などでも災害対応ロボットの開発研究が進められ、実際の活用事例も多くなっている。その一部を次の表に示す。[2]

表 2.1-02 主なロボット一覧

ロボット区分	主 な 用 途	開発主務官庁
探知・探索型災害対策ロボット	NBC テロ災害の救助資機材	総務省消防庁
消防・防災型ロボット	放水・水中捜索等	総務省消防庁
原子力施設災害対策ロボット	事故被害抑制	文科省・経産省
大都市大震災軽減化特別プロジェクト	地震災害救助	文部科学省
閉鎖空間内高速走行探査群ロボット		経済産業省
無人化重機	噴火灰除去・災害復旧	国土交通省
無人ヘリ型情報収集ロボット	火山噴火対策	国土交通省・気象庁
無人航空機型情報収集ロボット	台風観測	気象庁
地雷除去ロボット	戦後復旧	外務省
爆発物処理ロボット	テロ対策	警察庁

2.1.3 災害対応ロボットの要件

(1) 産業競争力懇談会における要件

製造科学技術センターが事務局の産業競争力懇談会にて報告されている、災害対応ロボットの要件を引用して報告する。[3]

ロボットやロボット技術に期待される機能の1つとして、災害現場の情報収集がある。例えば、被害発生の覚知、要救助者の発見、被害の状況把握、被害調査・情報収集、復旧作業の計画手配、事前の老朽化調査、などがある。

これらにおいて、ロボット技術が必要な理由として、次の項目を挙げている。

- ① 狭所、高所、水中等で人間が入れない場所の状況を遠隔的に調べること
- ② 汚染、火災爆発の危険、安全が確認できない場所の状況を遠隔的に調べること
- ③ 長期や広域のモニタリングを自動化してコストを下げること、品質を上げること

また、2つ目の機能である、被害軽減・復旧活動としては、緊急医療、患者搬送、治療、応急修繕作業、被害構造物撤去、運搬、修繕作業、新構造物搬入設置などがある。

このロボットに必要な理由としても、情報収集と同様としている。

これら2つの機能要件から整理して、ロボットが必要な理由を次の3点に集約している。

- ① 人間や従来型の機器では不可能な場合
- ② 人間が行うには危険性が高い場合
- ③ 作業品質・能力・コスト等の点で優れている場合

(2) 東北大学大学院 田所教授

東北大学大学院田所教授は、1995年阪神・淡路大震災（当時神戸大助教授）が契機となり、大都市大震災軽減化特別プロジェクトの研究代表者となり、また、NPO 国際レスキューシステム研究機構の会長を務め、更に、福島原発の捜索に貢献した NEDO 閉鎖空間内高速走行探査群ロボットの研究代表者でもある。

田所教授が説明する、人間の身代わりとなって危険な場所に入る、ロボットの「負の理由」と「正の理由」を紹介する。

ロボット・機械にやらせた方が良い理由



- 負の理由
 - 危険な場所（崩落、爆発、酸欠、放射能、感電、転倒、天候不良、...）
 - 人間の能力では探せない（瓦礫内、土砂内、水中、狭い、壁の向こう、...）
 - 作業条件が劣悪（3K、気温、湿度、衛生、無理な姿勢、防護服、...）
 - 汚染されている、汚い（放射能、アスベスト、医療廃棄物、ヘドロ、汚物、...）
 - 心理的につらい（遺体、悲惨状況を見る、希望が持てない、エンドレス、...）
 - 人手が足りない（担当者が被災者、労働条件が劣悪、放射能、...）
 - 応用が要らない（単純繰り返し作業、判断不要、...）
- 正の理由
 - ロボットによって能力が向上（自動化、自律化、知能化、精度、迅速化、...）
 - 作業が楽に（疲労減少、単純作業減少、注意集中時間の減少、...）
 - 作業ミスの減少（ダブルチェック、思い込みの排除、相互連絡、...）
 - 作業記録（作業履歴、証拠データが残る、見える化、...）



図 2.1-01 災害対応ロボット要件

2.1.4 立体視機能搭載用災害対応ロボットの調査結果

災害発生時に人間が行動するには危険な捜索等初動作業に代わって、情報収集ロボットは前述の通り用途別に多数あるが、視覚情報を遠隔モニタ等に表示し、人間に立体感を与える立体視機能をもつ災害対応ロボットは、今回調査では見当たらなかった。

本項では、一般的に認知されている固定 3D カメラを搭載し、距離情報などを計測する災害対応ロボットを紹介する。[4]

表 2.1-03 災害対応ロボットの目的と特徴

保有機関	公益財団法人 原子力安全技術センター（主務官庁：文部科学省）
ロボット名称	防災モニタリングロボット A
目的	JCO 臨界事故を契機に、原子力防災ロボットの必要性を再認識し、2000 年度に防災モニタリングロボット（A 型・B 型）を製作。 両ロボットは、いずれもカメラ撮影・放射線計測・走行・軽作業を基本機能とし、A 型はサーモグラフィ、3D 映像等の映像取得を担う。 無線中継機を利用して 1.1km まで離れた場所から遠隔操作が可能。
特徴	全景カメラや赤外線カメラの他に、3D カメラを搭載し、周辺施設や障害物等の把握に必要な距離情報及び受光強度情報を取得し、操作盤上で画像表示する。また、距離情報を用いて周辺マップも作成する。 更に、放射線データを重ね合わせることで、周辺施設や障害物等の状況と放射線の値を周辺・線量マップに表示できる。

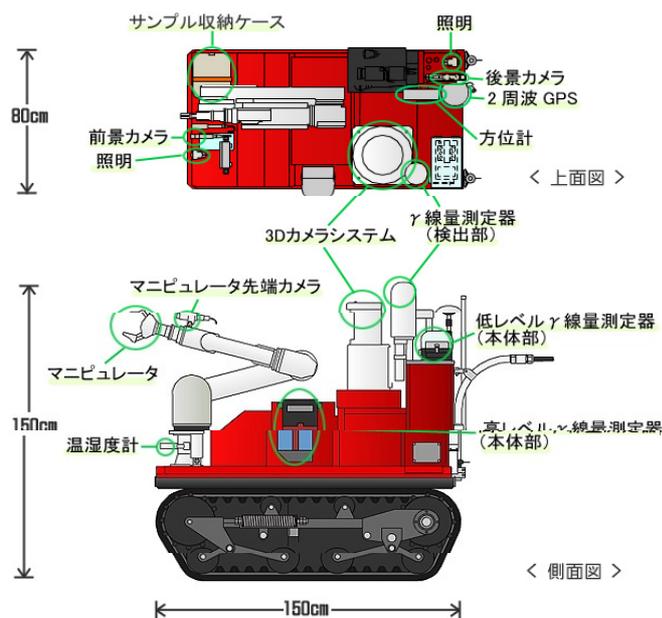


図-2.1-02 災害対応ロボット外観図

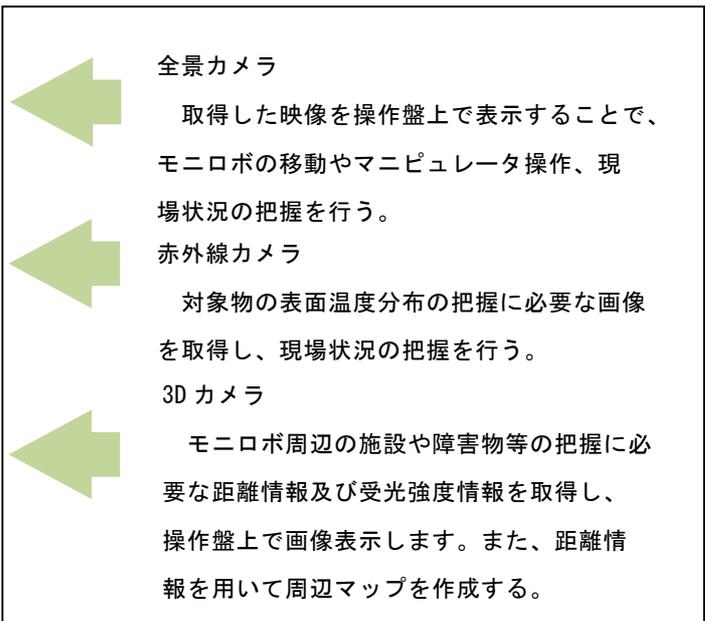
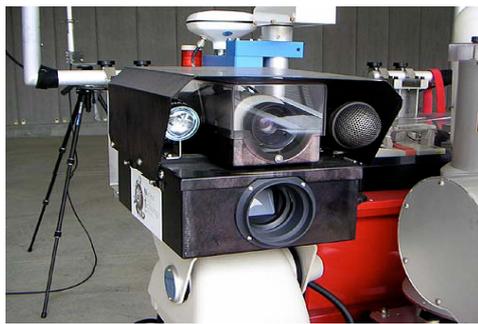


図-2.1-03 災害対応ロボットカメラ搭載図

2.1.5 東日本大震災時の対応ロボット

東日本大震災や東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故では、国内外の災害対応ロボットが投入された。その一旦を報告する。

(1) 港湾の被害調査

大学等の研究機関が開発した多数の水中ロボットが、自治体、海上保安庁、自衛隊と連携して、宮城県と岩手県の港湾周辺で、港湾の被害調査（海中撮影、堆積した障害物の位置の特定等）や、海中や海底の遺体捜索を行った。ダイバーに代わって海中に水没した建物の中を捜索する時、釘が多数刺さった木やガラス破片に邪魔されず、透明度も悪く、予測できない海流の速さの中、捜索するのに効果を発揮した。

また、航路の確保のために、海中の障害物の捜索や地図の作成にも役立った。

(2) 福島原発事故調査

(a) 写真撮影

米国製軍用ロボットによる原発3号機脇の屋外ガレキの写真撮影や、米国製の小型無人ヘリによる3・4号機の空撮が行われた。

(b) 敷地内瓦礫処理

原発敷地内で、ロボットが走行する経路などに散乱した高放射線量の瓦礫を除去し、整地する目的などに、国内外企業製の無人化重機が投入された。

(c) 建屋内搜索

NEDO 閉鎖空間内高速走行探査群ロボット「Quince」は、主に建屋内撮影や放射線調査、汚染水調査、バルブや配管調査等を行った。

日本原子力研究開発機構の対策ロボット（屋内ガンマ線可視化計測等用など）も改良が行われ投入された。一方、原子力安全技術センターの 3D カメラを搭載して計測を行う防災モニタリングロボット（2.1.4 参照）は、瓦礫の散乱で走行できず使用は見送られた。その他、汚染水調査など数多くのロボットが投入された。

2.1.6 今後の災害対応ロボットの取組み

東日本大震災や福島原発事故に対応したロボットを振り返り、初期投入の課題や、運用体制の未整備から、製造科学技術センターが事務局となり、産業競争力懇談会（災害対応ロボットと運用のあり方）を発足し、国策提言を行っている。また、総務省消防庁の消防防災科学技術高度化プラン 2012（2012-2016 年度）においても、災害対応ロボットの取組みが報告されているので、ロボットに絞ってそれぞれを紹介する。

(1) 産業競争力懇談会

2011 度、災害関連対応ロボットと運用体制について提言を取り纏め、原発事故対応ロボット関連については、第三次補正予算や 2012 年度予算で一部開発が行われた。

しながら、それ以外は予算化されなかったため、引き続き防災ロボット、無人化施工システムに加え、インフラ点検／メンテナンスロボットとの併用も含め、災害対応ロボットの技術的課題抽出と、産業競争力を高める開発戦略に関する提言をする予定である。

3D については、ロボット能力や適用可能性を検討する項目の内、情報収集・整理・提示能力項目にて、活用し易いセンサ情報で不足する場合の追加情報として掲載されているが、立体視機能まではとりあげていない。

(2) 総務省消防庁消防防災科学技術高度化戦略プラン 2012

2007 年改定した消防防災科学技術高度化戦略プラン（以下「前戦略プラン」という）の内、重点的に取り組むべき研究開発課題「先端技術を活用した、より高度な消防防災活動の実施」では、特殊災害時の情報収集ロボット（検知・探査災害対策用）などを実用化し

た。[5]

但し、前戦略プランが、消防防災科学技術の高度化による新技術等を導入することに主眼が置かれ、研究成果が必ずしも国民の安心・安全に繋がらないと課題認識した。

今回プランの分野別戦略では、ロボットを特殊災害ではなく救助として開発する。

東日本大震災で発生した津波浸水域や、電気自動車等による感電等危険性がある救助、消防隊員の侵入が困難な災害救助等にて、消防隊員の安全を確保しつつ、迅速かつ効果的な救助活動を実施するための対策が必要とし、取り組むべき課題として、以下の開発を挙げている。

但し、具体的な内容は確認できていない。

- ・ 高性能な救助資機材等の開発（ロボット技術の活用、津波浸水域での救助資機材の開発）

2.2 ニーズ調査と考察

2.2.1 ニーズ調査結果

災害対応ロボットの開発関係者に、現場ニーズや開発の考え方、立体視機能搭載ロボットの必要性などについてヒアリングした結果を報告する。

(1) 東北大学大学院 教授 田所諭 氏

田所教授は、NPO 国際レスキューシステム研究機構（IRS）の会長も務め、産業競争力懇談会のサブリーダーでもある。レスキューロボット開発の第一人者。

2011年3月11日、東日本大震災当日は、NEDO プロジェクト（閉鎖空間内高速走行探査群ロボット）の最終年度で、米国テキサス州 Disaster City にて実証実験を行っている最中で、急遽帰国し IRS メンバーと共に捜索活動を支援した。ヒアリング内容を報告する。

(a) 災害対応ロボットにおける現場ニーズについて

情報収集には大いに役立つ。但し、ユーザー側は、使ってみて初めて価値を判断する場合もあるので、どの程度意識しているかは判らない。例えば、ヘリコプターや固定翼機で、外観情報を収集することも重要と考える。

災害対応ロボットとして、3D カメラやレーザを使った 3次元形状計測には役立つ。例えば、閉鎖空間の中でガスが充満する場面や瓦礫の中で救助する場面にも、中の空間がどうなっているのかを把握し判断することが重要で、そうした箇所を 3次元計測ができ、見えるならばより判り易くなる。

映像情報だけでは、瓦礫の中で灰色が一色になるなどよく判らないこともあるが、知り

たいのは、トンネルの形がどうなっているかや、隊員の身体を空間の中で廻すことが出来るかなど。そういう 3次元形状の計測は非常に重要である。また地盤などがどの程度崩れやすくなっているかも知ることも重要である。

固定 3D カメラによる固定 3D 映像では、形状を良く把握出来ないので、今は多地点カメラで俯瞰して見ている。人間への見せ方が難しいので、そのあたりがポイントと考える。

また 3D 映像によって転送データ量が増加し通信ボトルネックになって、リアルタイムに変化を伝えることが難しくなる。それによって遠隔操作が困難になることもある。伝送量が少なくても、人間にリアルな情報を見せることが必要である。

私の研究は、狭い箇所に入ることを重点に取組んでいる。単なる 3D 映像では、瓦礫の中がどうなっているのかが未だ判らない。

(b) 立体視機能用災害対応ロボットの可能性について

今は立体視機能としては見せていない。その理由は、立体的に見えることにより、例えばロボットが穴を通り抜けできるか否かという情報の方が必要になる。

原発事故現場でも 3次元の形状計測機能を利用しているが、積極的に立体視機能を利用することにはなっていない。従来の固定 3D カメラで固定モニタに表示する 3D 映像を活用するのは結構難しい。災害現場で 3D 映像を観るために大きなブースを設置することも困難。また、遠隔操作機器も、もっとポータブルなものが災害現場で求められている。立体感視点を変えないと良く判らないので、覗き込んで見るインタラクティブ性が必要。もっとリアルな立体感が欲しい。私達は、立体的に見えることが欲しいのではなく、ロボットがそこに進んで大丈夫かが知りたい。どういったパスを通るかなどを判断する情報が得られるようになってもらいたい。

(2) (独) 日本原子力研究開発機構 福島技術本部 復旧技術部 技術主席 川妻 伸二 氏

川妻氏は、使用済み核燃料から有用なものを取り除いた高レベル放射性廃棄物を溶融ガラスと混合させ、ステンレス製容器に入れて固化する技術開発施設（ガラス固化技術開発施設）で、保守に使うためのロボット開発（セル内作業用両腕型バイラテラルサーボマニピュレーター）に関わった。今回、同ロボットの開発も含めてヒアリングを行った。

(a) 3D カメラ搭載ロボットについて

ガラス固化技術施設では、クレーン 2 台とマニピュレータ 2 台（ロボットアーム）を使って、1995 年から稼動し、完全遠隔操作を行っている。そのための研究開発段階で、走査線 525 本の NTSC カメラ、NHK が開発したハイビジョンカメラ、固定 3D カメラを試験

した。

オペレーターには、誰でも簡単に操作できるよりも、訓練して高度な操作を求め、1～5級まで資格制度で区別し、資格によって操作範囲を決めた。その時、オペレーターは、複数カメラによる複数モニタを見て、3次元マップを頭に描いて操作することが判り、逆に3Dカメラによる固定映像では疲労感や違和感を生じるため、最終的に利用しなかった。それよりも3次元情報を視覚的に与える方が有益と考えた。実際、1999年JCO事故後に開発された原子力災害ロボットでもカメラを複数搭載したが、それは3次元マップを頭の中で描く利用であって、固定3Dカメラは利用していない。JAEAの福島事故対応では、JCO事故後に開発したロボットを改造したものと新規開発ロボットを用意したが、固定3Dカメラは利用していない。今整備しているロボットも同様である。

(b) 開発の考え方

オペレーターが習熟し易いロボットという考え方もあるが、我々の指向するロボットシステムは、オペレーターも訓練することによって性能を最大限に引き出すことである。その理由の一つは、ロボット市場が非常に小さいので、メーカーも自己投資できずバージョンアップもあまりできない。そのため古いロボットでも、きちんと使いこなせるようにオペレーターを訓練し、必要な周辺機材も開発している。

オペレーターに臨場感を足せることは大事だが、正確に判断するための情報を与えることを第一に考えている。

最先端の技術よりは、枯れた技術を利用している方が多い。福島事故で大変だったのは、直せない部分が多かったこと。枯れた技術で直ぐに部品が手に入って、いざとなれば自分たちでメンテナンスできる方が現場に利用し易い。

(3) 総務省消防庁消防研究センター 主任研究官（救急） 久保田 勝明氏

久保田氏は、消防防災科学技術高度化戦略プラン2012を公表した際の担当窓口であり、神戸大学大学院工学研究科准教授も兼ねる。現在、内閣府の総合科学技術会議の科学技術重点施策アクションプランにも入り、水や瓦礫の滞留領域でも消防活動を可能とする消防車両の踏破技術と救助技術の開発する施策を取り纏めている。今回、消防車両の開発も含めて、ヒアリングを行った。

(a) 現場ニーズや開発の考え方

ロボットの専門家ではないが、いかに消防現場で使えるものかを考え、津波で浸水した地域向けの車両の開発を行っている。その中にはリモコン操作で動く車両もある。

開発の背景には、消防本部の要望による、瓦礫にはまっても人力で引っ張り出せる小型で、小回りが利き、メンテナンス性、運搬性を考慮して、走破性、救助、消火、救急搬送を研究ポイントとしている。

また、消防費は自治体予算なので、メンテナンス費が高いと使えない。殆どが人件費であり、装備費にコストがかけられないことを考慮している。

開発にあたっては、複数の現場の要望を聞いた上で、提案を繰り返して開発を行っている。現場の意見を聞かずに開発すると、結果的には活用されない。

(b) 3D カメラ搭載用災害対応ロボットについて

3D 映像を利用したことはないが、やはり通信容量がネックになると思う。3D 映像を観ながら操作するロボットや車両自体があったとしてもまだ少数だと思う。

消防活動の、消火と救助と救急のうち、無人化の可能性があるのは消火と救助。消火には奥行き情報が必要。救助のうち探索に、3D の可能性があるかもしれない。

また、土砂崩れなどを 3D 映像で撮影するというのも可能性はある。ヘリから撮った 3D 映像を消防署で見て、消防車を何台送る必要かを判断するのに役立つと考える。

消防で利用するには裸眼が前提で、将来裸眼で見ることが出来るなら、通信司令室モニタなどで利用される可能性はある。但し、絶対に 3D 映像の方が良いというのではなく、2D 映像と比べて 3D 映像の方が良い程度ではないか。

危険な場所に各種センサ搭載ロボットを早期投入したいので、3D 映像の可能性も考えられるかもしれない。但し、消防で 3D が活用できるかは、やってみないと判らない。また、3D 映像による操縦者が生じる悪影響の懸念もある。

2.2.2 考察

災害対応ロボットには、固定 3D カメラによる距離計測機能搭載ロボットなどはあったが、視覚情報を遠隔モニタ等に表示し、人間に立体感を与える立体視機能搭載の災害対応ロボットは見当たらなかった。

災害対応ロボットや車両を開発するヒアリング 3 名は、それぞれの立場が異なり、立体視機能以前に災害ロボットに対する開発スタンスも異なっていることが判った。また、固定 3D カメラによる試験実績もあったが、立体視機能については、覗き込みを行ってリアルな 3D メディアに対する将来ニーズはあるものの、直近の実用性にウエイトを置き、開発検討に至っていないのが現状と思われる。

ヒアリング内容の立体視機能や固定 3D カメラなどを、3 次元計測と視覚機能に区分すると以下の通りとなる。

表 2.2-01 機能区分

		3次元計測	視覚機能
立体視機能	ニーズ		覗き込みによるリアルな映像
	課題	通信伝送	通信伝送
固定 3D カメラ	用途	3次元計測など	
	課題	通信伝送	通信伝送 固定カメラでは状況把握が困難 瓦礫の中が灰色一色の場合では、 状況把握が困難
複数台カメラ	用途		多地点カメラにて俯瞰する 頭で3次元マップを描く
その他	ニーズ		裸眼

災害現場におけるインフラ強化は現状では困難なもの、将来インフラの充実などにより伝送課題が解決されていくと、立体視機能への期待は高まっていくものと思われる。

今後建設業界の遠隔操作システムにおいて、立体視機能の搭載ロボットが検討される可能性が高い。例えば、ショベル機の操縦席に立体視機能ロボットを設置して、そのロボットが見る映像を遠隔室の操作者がリアルに把握し、更に操作者の身体の動きにロボットが連動し、除去対象物を覗き込むことにより、対象物全体をよりリアルに把握することができるので、操作者の的確な操縦により、対象物を掴み上げ易くなると考える。次章では、現状の遠隔操作システムの取組事例について報告する。

更に、現状の立体視機能搭載ロボットとしては、慶應義塾大学で研究開発しているトレイグジスタンスにおけるロボットがあげられる。今回、災害対応ロボットに見立てて実験を行ったので、第3章にてトレイグジスタンスを含めて報告する。

2.3 建設業界における遠隔操作システムの取組事例

2.3.1 建設業界における遠隔操作システムの概要と問題点

建設業における遠隔操作システムとは、噴火災害や地震災害、更に砂防ダムに溜まる土砂の除去工事など、危険な復旧や整備作業を行う際に、操縦者が安全な場所から、ショベル系建設機械や運搬機械（ブルドーザ・ダンプ等）を遠隔操作するシステムのことで、業界用語としては、無人化施工という。以下、無人化施工に置き換えて報告する。

(1) 無人化施工技術の発展史

近年、特に災害復旧の初動段階において、二次災害等の恐れにより作業員が入れない場所や、人体に危険を及ぼす環境での作業の実施に対して、「無人化施工」のニーズがさらに高まりつつある。無人化施工は災害が多発する日本の建設業界において独自に発展した技術であり、今日さまざまな現場で活躍するに至っている。特に近年は東日本大震災をはじめとする大震災、ゲリラ豪雨、噴火災害など大規模災害が各地で発生し、それに対する対策に無人化施工が適用されている。

我が国の土木工事に無人化施工技術の基本原理である遠隔操作型の建設機械が導入されたのは、1969年の富山大橋の復旧工事であった。この時の遠隔操作は目視操作で行われたようであるが、水中作業を安全に行った技術は、その後の無人化施工技術の基礎になったと言える。その後、この技術が大きな進歩を遂げたのは、1993年の雲仙普賢岳噴火後の復旧工事への適用を目的とした「雲仙普賢岳試験フィールド事業」であった。この時に現在の機械技術、通信技術、情報処理技術が融合したシステムとしての無人化施工技術が確立したと言える [6] [7]。これ以降の無人化施工の技術の発展を図 2.3-01 に示す。

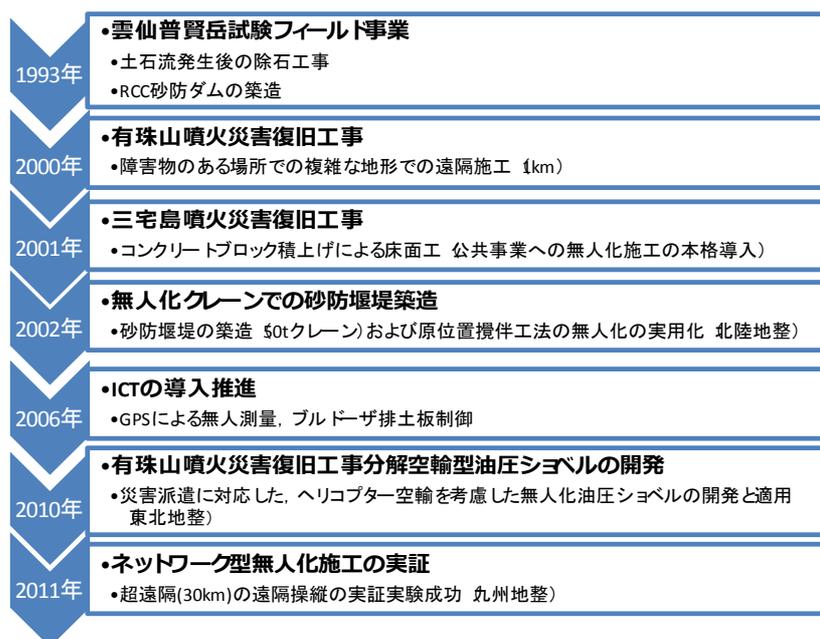


図 2.3-01 無人化施工技術の変遷（1993 年以降）

その後、我が国は不幸なことに、表 2.3-01 に示すような数多くの自然災害にさらされるとともに（1992 年から 2011 年まで記載）、多くの被害を受けている。これらの災害復旧や社会インフラの再構築にも無人化施工技術は大いに活躍している。

表 2.3-01 近年の我が国の災害と建設業を取り巻く動向

年	大規模災害と建設業と取り巻く動向
1992	➤ 建設投資ピーク 84 兆円、GPS を用いた転圧管理 実用化始まる
1993	北海道南西沖地震(7 月)平成 5 年 8 月豪雨(鹿児島県)(8 月) ➤ 無人化施工技術の開発(鹿島建設、大成建設、西松建設、熊谷組、フジタ)、無人化施工(試験開始：雲仙)
1994	北海道東方沖地震(10 月)、三陸はるか沖地震(12 月) ➤ 大型土木工事における遠隔制御システムー雲仙普賢岳無人化施工(大成建設、フジタ、大本組熊谷組、鹿島建設)
1995	兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)(1 月) ➤ GPS を用いた土工管理システム開発(大林組、鹿島建設、大成建設、住友建設、大日本土木)
1996	➤ 海外建設受注高史上最高(1 兆 5926 億円)
1997	鹿児島県出水市針原川土石流災害 ➤ 建設業就業者数ピーク 689 万人
1998	高知豪雨(9 月)
1999	6.29 豪雨災害(福岡・中国地方)(6 月)
2000	有珠山噴火(3 月～)、三宅島噴火：全島避難(7 月～)東海豪雨(9 月)、鳥取県西部地震(10 月)
2001	➤ 雲仙・水無川の導流堤完成
2002	➤ 3 次元データを用いたマシンコントロール実用化
2003	宮城県北部地震(7 月)、十勝沖地震(9 月) ➤ 国土交通省「TS・GPS を用いた盛土の締固め情報施工管理要領(案)」施行により、土工における情報化施工が進展しはじめる
2004	新潟・福島豪雨／福井豪雨(7 月)、新潟県中越地震(10 月) ➤ GPS を用いた締固め管理システムの開発(大林組、大成建設、鹿島建設、前田建設、住友建設、大日本土木)、国土地理院国内 1200 点の GPS データを配信サービス開始(7 月)
2005	➤ 「オフロード法」の公布(5 月)「改正廃棄物処分法」「公共工事品質確保推進法」施行

2006	平成 18 年豪雪(日本海側)、平成 18 年 7 月豪雨(九州・中部)(7 月)
2007	能登半島地震(3 月)、新潟県中越沖地震(7 月)、福岡県西方沖地震(9 月)
2008	岩手・宮城内陸地震(6 月)、平成 20 年 8 月末豪雨(紀伊半島～関東)(8 月)
2009	平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨(7 月)
2010	西日本豪雨災害
2011	東海地方太平洋沖地震(東日本大震災)(3 月)、紀伊半島豪雨災害(9 月)

(2) 無人化施工技術の抱える問題

このように無人化施工は災害復旧に対する活躍も大きいですが、一方、高度な技能や高い習熟度を有する作業員の不足に対しての技術的対応という面もある。例えば、図 2.3-02 に示すように建設業の就労者の高齢化と若年労働者の不足傾向は、他産業に比較して悪化しており、震災復興に関わる建設需要のほか、今後対応を迫られる国内の社会インフラの老朽化に伴う補修やリニューアルに対しての需要に答えられなくなる懸念もある。さらに、若年層の建設産業就労者の低下は、次世代への技術継承のみならず、ICT などの導入に向けてのリテラシーの向上といった観点からも憂慮すべき事態である [8]。

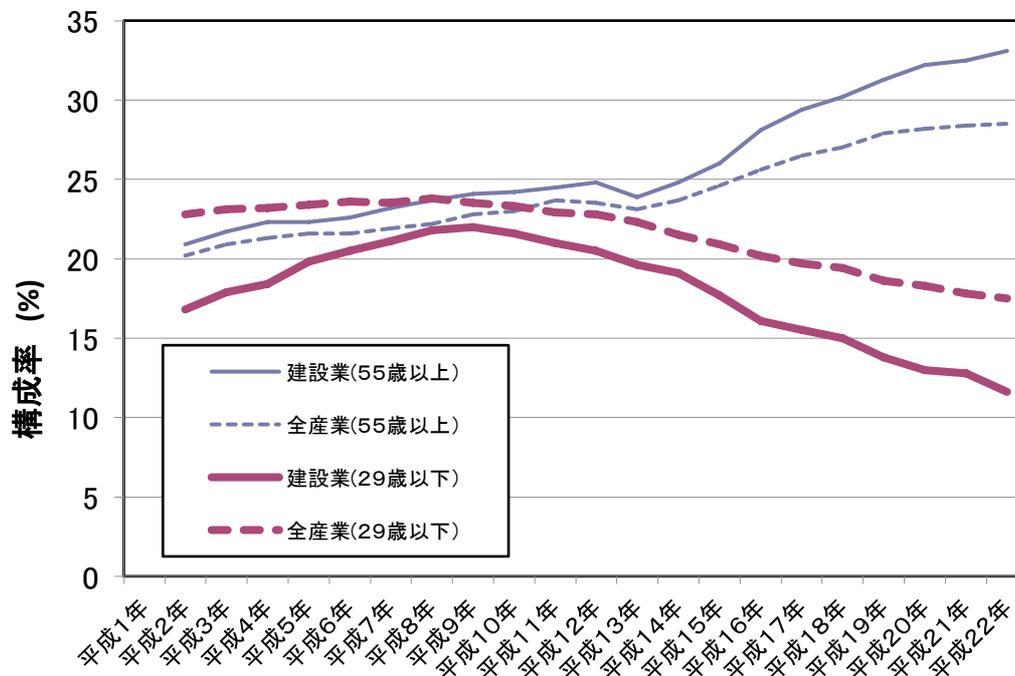


図 2.3-02 建設業における就労者の年齢構成 (資料：総務省「労働力調査」)

このような建設業を取り巻く環境の中で、無人化施工へのニーズは増えつつある。しかし、現状では無人化施工に対応できるオペレーターは少なく、新しいオペレーター育成は必要であるにもかかわらず、技能習得のチャンスが少ないといった状況である。また、無人化施工を必要とする災害復旧工事では、近年では特に難易度の高い作業が要求されることが多く、図 2.3-02 に示すような建設業の若年就労者不足にともない、無人化施工に対応したオペレーターを確保できないことも懸念されている。

2.3.2 大林組の無人化施工技術における取組事例

(1) 大林組の行った次世代無人化施工技術の実証実験

上記に述べた課題解決のために、筆者らは最新の無線通信技術、3D および体感型操作環境（簡易バーチャルリアリティ）の活用による「次世代無人化施工技術」を開発し、その効果に関する検証実験を行った。従来の無人化施工技術は、オペレーター席からの映像を映す車載カメラと、作業エリアを俯瞰して映し出すカメラの 2 系統の映像情報を用いて遠隔操縦を行うものであるが、今回開発したシステムは操縦性の向上およびそれに伴う作業効率の向上を目指し、さらに以下の技術を盛り込み、実用化に向けての実験を実施することとした。

(a) 3D カメラ等の活用

通常の遠隔操作に活用されているモニタリングカメラのほか、3D カメラ、全方位カメラを利用し、視覚情報を増大させることにより操作性能を向上させる。

(b) 体感型操作環境の導入

視覚情報のみならず現場での作業音、重機の振動・傾斜をセンサで取得し遠隔操作席で再現することにより、オペレーターに現場からの情報を実感的に与えることで、操作環境を通常の運転席に近づける。

(c) 大きな情報伝送量の試験

最新のデジタル無線システムを活用し、画像や動作環境など多くの情報を活用できる環境を実現する。また、長距離遠隔操作を視野に入れ、中継局を利用した遠隔操作も実施する。

(d) 遅延対策

映像系統と操作系統を分離し、各系統のデータ処理の遅延を最適化することにより、スムーズな操作を実現する。特に 3D カメラを搭載したバックホウでは、通常カメラと 3D カメラの系統を分離し、トラフィックを分散させることにより遅延を低減させる。

(e) フェイルセーフ

通信障害などの無線の一時的な不通においても、重機同士の接触が起こらないように、スタンドアロンで動作する衝突防止（接近）センサを装着し、安全性を向上させる。

これらのその効果を検証するために、大林組はバックホウ及びクローラキャリアを利用して、コンクリートがれきの破碎・積み込み・運搬・荷下ろしの重機動作の検証と施工効率を確認する実証実験を実施した。実験においては、施工効率の比較を行うために、通常の有人操作および有視界での無線操作による作業も行った。実験の状況を図 2.3-03 に示す。



図 2.3-03 大林組における 3D 映像を利用した次世代無人化施工技術の実験

(1) 実証実験の結果概要

(a) オペレーターへのヒアリング結果

今回のシステムでは図 2.3-03 に示すように、3D モニタを中心に 6 つのモニタからの情報を視覚で捉えながら、体感型操縦席に座り、重機の姿勢や周囲の音などを遠隔操縦室で体感しながら重機をコントロールすることとした。この際の 3D メガネ装着や体感装置の動きなどに対するオペレーターの感想をヒアリングし、システムの成熟に役立てることとした。

体感装置および 3D のハイビジョン画像はオペレーターに非常に好評で、今回の実験ではサイクルタイム計測のための遠隔操縦によるコンクリートブロックの移送・積上作業を行い、従来型の遠隔操縦に対しての情報量の多さと、臨場感に関してよい印象を述べる事が多く、このヒアリング結果より従来のシステムに対して当社が提案する次世代無人化施工技術の方が、操作性等が改善されたものとする。ただし、より良い作業性の実現にはさらに多くのオペレーターのサンプルの意見・感想が必要である。

(b) 作業効率の比較

従来型の無人化施工技術と、今回の 3D および体感装置を用いたシステムとの作業効率の比較を行うために、3 個のブロックをある場所で積み旋回し別の場所に積み重ねる作業を行いサイクルタイムの比較をした。この際、それぞれのシステムに対してオペレーターの慣れが生じるため、各 3 回の作業を交互に実施することとした。試験の結果を図 2.3-04 に示す。

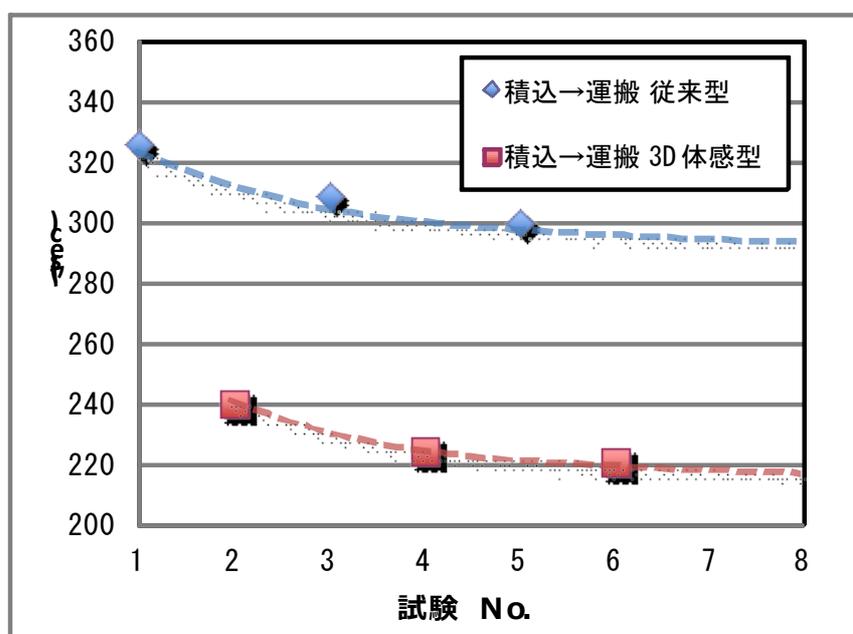


図 2.3-04 従来型と 3D 体感型システムとのサイクルタイムの比較

それぞれのシステムで、オペレーターの慣れにより、作業回数が進むにつれ作業時間は短くなっていくことが解る。また試験回数が各 3 回と少ないが、図 2.3-04 の実験結果から計算した外挿結果（図中の破線）から、作業にかかるサイクルタイムは収斂していくようである。

作業効率を、遠隔操作による作業時間を機上作業による作業時間で除して求めると、従来型の遠隔操作では 40～65%程度の作業効率であるのに対し、今回開発した 3D 体感型では 65～95%の効率となった。このように、無人化施工の作業効率は、一般的に言われているように、従来の施工に比べ 50～60%程度であるということが実験結果からも示されたとともに、今回開発したシステムの有効性が示された。

以上の結果から、作業効率は従来型の無人化施工に対して 20%以上の向上を達成出来たものとする。

2.3.3 3D 適用の可能性

(1) 無人化施工

近年、地震や大雨などを起因とする災害が多発しており、首都直下型や東南海地震、富士山の噴火などを想定した研究が多方面で実施されている。

国土交通省は災害時に必要となる、無人化施工の普及・拡大に向けた今後の取り組みの方向性をまとめ、提案している。「技術開発」「人員確保・育成」「無人化施工の継続的活用」の必要性であり、技術開発は作業効率向上が大きな課題である。無人化施工の遠隔操作におけるオペレーターの情報収集は、モニタに映し出される現場の状況であり、映像を 2D から 3D に変更し、作業効率を向上させることができれば、今後とも 3D は積極的に採用されると考える。

(2) 少子高齢化対策

建設業界も少子高齢化が進み、労働者不足が問題化しており、特に鉄筋工・型枠工に不足が目立ち始めている。そこで今後は、機械化・自動化施工が進むと考えており、センサ部分として 3D は活躍できると考える。

2.4 3D 関連の製品動向

本調査事業のロボットは、人間の眼に相当する機能を 2 眼式立体映像で代替しようとするものである。2 眼式立体映像（以下 3D 映像と記す）技術は、長い歴史を持つ理解しやすい技術であるが、安全で正確な運用を行うには、多くの守るべき事柄が多い。

この章では、本調査事業で運用した 3D 映像技術に焦点を当て、関連する製品や技術の現状と将来について述べる。

2.4.1 救助形ロボットに求められる 3D 映像技術のポイント

冒頭に記した通り、本調査事業のロボットは、3D 映像技術を用いて目の機能を達成している。この機能は、大きく分けると、操作する人間の左右の眼の代替としての左眼と右眼にそれぞれ対応する 2 台のカメラと 2 台のディスプレイ、及びカメラからディスプレイまで映像信号を伝達する 2 つの伝送系の 3 つに分けて考えることができる。それぞれについて技術的なポイントを以下に記す。

まず、カメラに関する技術的ポイントであるが、解像度とフレームレートが主要なものとして挙げられる。解像度は、ロボットの視力、引いては操作する人間の視力に相当する訳であるから、極めて重要な指標である。この事業のロボットの眼の視野は、基本的に裸眼と同等程度でないと操作が困難になるので、自ずと使用するレンズの画角と操作者から見たディスプレイの視野角も決まってくる。最終的に、視野に入ってくる物体の詳細がどこまで必要になるかによって、カメラの解像度が決まってくる。最近では、小型の FA 用カメラヘッドでもメガピクセルの製品が一般的になってきており、解像度という点では、選択肢は広がっていると考えられる。解像度は、静的な精細さであるが、フレームレートは動画の解像度に直結する。本事業のロボットに求められる動作、操作の早さによりフレームレートが決まってくる。一般の 2K 放送のフレームレートは 30 駒/秒であるが、映画も含めて解像度の向上に連動してフレームレートを上げる方向に進んでいる。2014 年に開始予定の 4K 放送は、当初から 60 駒/秒のフレームレートである。従って、今後は、よりフレームレートを上げたカメラが多く出現すると考えられるので、解像度と同様、選択肢は広がるものと思われる。

次に、ディスプレイであるが、解像度に関しては、カメラの解像度に対応したスペックが必要となる。ここで、問題になるのは、操作者とディスプレイの位置関係である。大型画面を見ながら操作する場合のディスプレイは、既に市販の家庭用ディスプレイが 4K 化されている事から考えると、選択に問題は生じないと考えられるが、本事業のロボット操作における HMD の様な場合は、ディスプレイそのものが小型になるので、解像度にも限界がある可能性があるため注意が必要である。ところで、3D 映像の場合、左眼と右眼に相当する 2 台のカメラの位置関係が極めて重要になる。2 台のカメラの位置関係が正規の位置からずれる、例えば、2 台のカメラの光軸が上下に異なる方向を向いている様な場合、

ずれが甚だしい場合、3D 映像として見る事が出来なくなる。従って、2 台のカメラを正規の位置に保持する機構は、外部からの振動等でも 2 台のカメラの位置が変化しない等、求められる機能は多くあり、注意が必要である。同様に、HMD の様に 2 台のディスプレイを左右別々に使用する場合も、それぞれのディスプレイは正規の位置に保持できる機構が必要になってくる。

最後に伝送系であるが、本事業の場合、有線で伝送したので、ケーブルの取り回しの問題はあっても、映像信号の劣化等の問題は基本的に発生しない。しかし、実用面から考えると、一般的には無線での伝送が主となると考えられる。その場合、使用する周波数により伝送帯域に限度があるため、通常は MPEG 等のデータ圧縮技術が利用されるが、画質劣化と伝送遅延の問題が避けて通れない。特に、遅延は操作性に大きく影響するため、本質的にはゼロが望ましいが、現実的には、現在利用されている様々な圧縮技術には必ず遅延がある。一般的な MPEG II CODEC や H264AVCCODEC 等では、フレーム単位の遅延があり、ロボットの視覚情報による遠隔操作の妨げになる。データを圧縮せずに伝送すれば、この問題を回避できるが、そのためには搬送波の周波数を大幅に高める等の対応が必要となる。

2.4.2 解像度に関する考察

カメラやディスプレイに関して詳細を述べる前に、系の視力を決定する解像度に関して若干の考察を行う。

視力が 1 と言うのは、1 分 ($1/60^\circ$) の角度に相当する白黒の縞を縞として判別できる視力という事である。視力検査で使用されるランドルト環は被検者から見た視差角が 1 分の黒色の円環のギャップを認識できれば、視力 1 と判定される。ランドルト環の例を図 2.4-01 に示す。

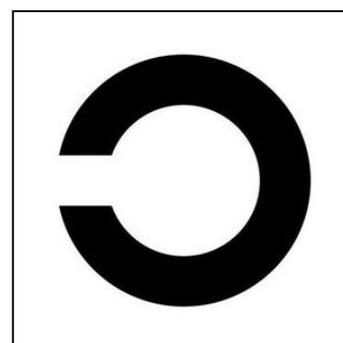


図 2.4-01 ランドルト環

本事業のロボットの場合、ロボットの頭部に当たる部分が、HMD の動きをトラッキングする事により同期して回転する構造となっているので、操作者は、あたかも裸眼で目視しているのと同等の視覚情報が得られる。この様な系の場合、視力 1 の操作者から見たディスプレイ水平画角がカメラレンズの水平方向の画角と同じで画素ピッチが 1 分以下であり、カメラレンズの水平画角をディスプレイの水平方向の総画素数、つまりカメラの水平方向の総画素数で割った値が 1 分以下であれば、系としての視力は 1 となる。図 2.4-02 の通り、簡略化して考えるため、ディスプレイや見る空間を円筒面として考えると、カメラとディスプレイの解像度が一般的な 2K の場合、水平画角は約 33° となる。裸眼で感じる奥行き感に近い画角のレンズは、35mm フルサイズのスチルカメラで焦点距離 50mm 程度の標準レンズと呼ばれる物で、水平画角は概略 40° 程度であるので、 33° はやや望遠系となる。仮に 40° の水平画角のレンズを 2K カメラに取り付けたと考えると、系としての視力は約 0.8 となる。

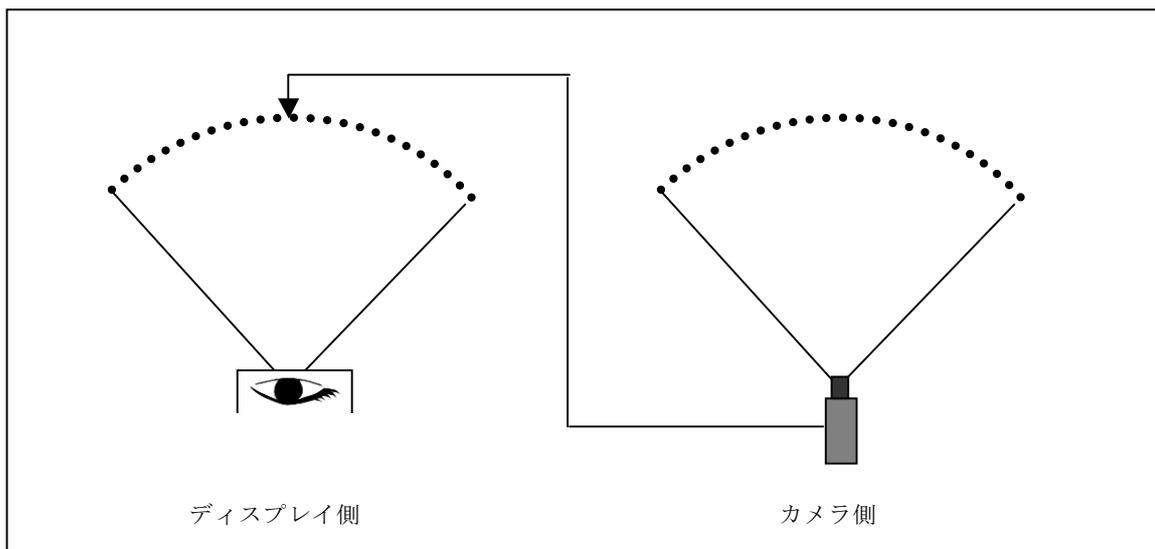


図 2.4-02 カメラとディスプレイの関係

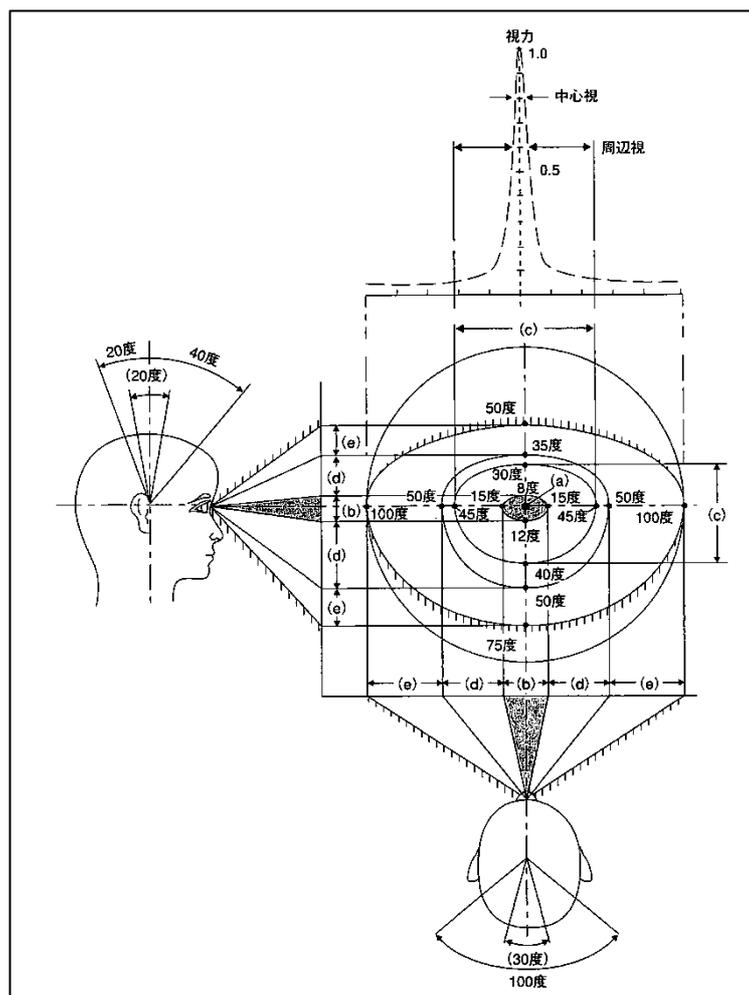


図 2.4-03 空間情報と視野の関係

図 2.4-03¹ に空間情報と視野の関係を示しているが、視力や色識別機能の最も高い領域である弁別視野は(a)の $\pm 2 \sim 2.5^\circ$ の狭い範囲である。視線を瞬時に移動して視認すべき物体を弁別視野内に入れる動作が起きる領域が、有効視野と呼ばれる(b)の範囲で、水平 $\pm 15^\circ$ 上側 8° 下側 12° の範囲で、これは 2KTV の映像範囲と重なる。

(c)は、安定注視野と呼ばれる領域で、頭部運動による有効視野部分の走査で、水平で $\pm 45^\circ$ 程度の広い範囲を快適に視認する事ができる。安定注視野の外側の領域は(d)が誘導視野で、水平 $\pm 50^\circ$ 程度もあり、臨場感の要因となる領域である。因みに、8K 映像はこの領域をカバーするために開発されている。(e)は補助視野と呼ばれ、鮮明な像ではないが視覚情報が得られる領域で危険回避等では重要な部分となる。

本事業のロボットの目的は救助であるので、視野が広ければ広いほど、安全、且つ迅速にタスクを達成できる事は明らかであるが、費用の面や技術的な面で限界がある事も明らかである。

探査ターゲットを正確に視認したりするには、上記の(b)の有効視野を、視力 1 でカバーする必要があると思われるが、より効率的な探索を行うには(c)の安定注視野をカバーできれば理想的であろう。

解像度に分布をつける事は、實際上不可能であるので、仮に水平視野を、安定注視野の約 70%カバーするとして、水平画角を 60° と考える。 60° は 3600 分なので、必要水平画素数は 3600 画素となり、最近開発が進んでいる 4K に近い。

そこで、4K カメラと 4K ディスプレイを利用する事にする視力 1 に相当する水平視野は 67° 程度となる。逆に視野を、安定注視野をカバーする 90° とすると、視力は 0.7 程度となる。

HMD の場合、操作者の眼球は回旋する事で、ディスプレイ上の注視点に視軸を向ける動作をするが、一般的に快適な回旋角度は $\pm 15^\circ$ ²以下といわれているので、ディスプレイの視野としては、更に 15° 以上余裕を持つことが理想である。

HMD ではなく、大型のディスプレイの前に操作者が位置する様な場合、解像度を 4K と考えると視野は 60° 程度となる。視野角を 90° にするには、少なくとも 6K 以上の解像度が必要になってくるが、映像の周辺部は操作者から見て斜めになるため、見かけの解像度は低下するので、平面ディスプレイのまま、むやみに視野角を拡大する事は無駄である。

この項では、最も重要な映像の解像度について若干の考察を試みたが、これらの内容を踏まえて、事項以下でディスプレイ、カメラ、伝送路の 3 項目について現状と今後について述べる事とする。

¹ NTS 「立体視テクノロジー」より転載

² SPIE フォーナルドガイド「視覚と眼の光学」より引用

2.4.3 ディスプレイの現状と今後

本事業に関連するディスプレイは、3D 映像を上映する方式として、面順次であるフレームシーケンシャル方式（通称、アクティブ眼鏡方式）、線順次であるライン・バイ・ライン方式（通称、パッシブ眼鏡方式）の 2 種類に大別される。

HMD の場合は、左右像を 2 台のディスプレイで別々に表示し、何らかの光学的手段で左右の眼に個別に投影する方法が基本であるので、これらの 2 方式は、操作者がその前に位置する場合の適当なサイズのディスプレイに適用されるものと考えられる。

一方、操作者が装着する HMD のコンポーネントとしての超小型のディスプレイに関しては、主としてサイズと解像度の関係やリフレッシュレート等が論点になると思われる。

なお最近話題の眼鏡なし 3DTV であるが、本事業の様な用途には未だ向かない部分も多く、将来に期待したい。

先ず 3D 方式を土台に、通常サイズのディスプレイに関して述べる。既に家庭用 3DTV を主として多数の機種がラインナップされているが、多くは、フレームシーケンシャルによるアクティブ眼鏡方式である。この方式の場合、映像面内の 2 次元の解像度は、ディスプレイ自体の解像度と同じになる点は有利であるが、時間軸上は左右像が交互表示となるため、動きの早い部分で破綻を生じやすい。各社、この左右像の切替え速度を高めたり、眼鏡やディスプレイ側に対策を講じたりして、フリッカー感の除去に努めており、一定の効果が上がっている。動きの早い部分での破綻は実用的には問題にならないが、本事業と言った特定の使用用途の場合は、対策が必要になる場合もあると思われる。

このフレームシーケンシャル方式によるこの問題は、本質的に撮影時のフレームレートに依拠するので、最近の 3D デジタルシネマでは、通常 24 駒で撮影し、72 駒で左右を交互に投影する方式から 48 駒で撮影する方式も登場している。

この方式では、眼鏡が、ディスプレイ側の左右像の切り替えのタイミングに応じて、左右の目の前のフィルターを透過と遮蔽に切り替える事で 3D 映像を得る。

これらの動作をさせる為の回路等が眼鏡側に組み込まれる為に、一般的に眼鏡は大きく、重くなりがちである。

図 2.4-04 に代表的なアクティブ眼鏡方式のディスプレイの例を挙げる。PC 用の 20inch 程度のものから家庭用の 50in を超えるものまで、多くのディスプレイが市販されている。常識的には、本事業の様な用途には業務用を利用すると考えられるが、家庭用製品も機能の高さの割には価格が大きく低下しており、視野角を広げる目的で大型化を計る場合には、充分選択肢になり得る。

一方、ライン・バイ・ライン方式は、2K の場合、1080 本ある走査線を奇数番目の走査線を左側映像に、偶数番目の走査線を右側映像に、それぞれ 1 本おきに左右像に振り分ける方式である。ディスプレイ表面に、走査線ごとに偏光方向が直交する特殊なフィルター

を貼る事で、視聴者は単に偏光フィルターを貼っただけのパッシブな眼鏡を通して見る事で 3D 映像を見る事が出来る。この方式の場合、眼鏡は軽く装着しやすいし、早い動きによる破綻も生じないが、垂直方向の解像度が半分になる事が大きな欠点である。又、この特殊なフィルターが高価で普及の妨げになっていたが、最近は価格が安くなってきており、ディスプレイの高解像度化と連動して、一般的な 3D ディスプレイの方式となりつつある。

その例が、4K モニタでライン・バイ・ライン方式を採用する製品で、2K の 3D 映像の場合、垂直方向の解像度もフル解像度となる。



図 2.4-04 アクティブ眼鏡方式の例



図 2.4-05 パッシブ眼鏡方式の例

図 2.4-05 にパッシブ眼鏡方式のディスプレイの例を挙げる。アクティブ眼鏡方式と同様、様々なサイズの物があるが、業務用の大型 3D ディスプレイは、殆どがパッシブ眼鏡方式である。それは、業務用大型 3D ディスプレイの場合、視聴者が多数になるケースが多く、アクティブ眼鏡方式の場合、眼鏡のコストと眼鏡への切り替え信号の伝達距離や範囲が障害となるためである。

日本では、2011 年に地上波デジタル化が完了し、家庭用のカムコーダーも含めて殆どが 2K 映像化されたが、今後、2014 年に 4K (60P 60 駒/秒) 放送開始、2016 年に 8K (120P 120 駒/秒の予定) 実用化実験放送開始、と高解像度化、高フレームレート化が加速しつつある。現在は高価な 4K ディスプレイも、1in 当たり 1 万円程度の価格になる見込みで、PC 用も含め安価な 4K ディスプレイが入手し易くなり、本事業の様な用途の選択肢も広がると思われる。仮に、8K ディスプレイを利用したと考えると、2.4.2 で述べた安定注視野の 90°をカバーする場合、視力は 1.5 程度に相当する。ディスプレイ面が曲面と想定すれば、視力を 1 と考えると、130°程度の視野角が得られる事になる、充分以上な性能を持つと考えられる。2.4.2 で記した様に、平面のままディスプレイの解像度を上げて、周辺部

は視線が斜めになり、見た目の解像度は低下するため、無闇にディスプレイを高解像度化しても効果は上がらない。視野角を拡大する為にディスプレイの高解像度化を有効活用するには、ディスプレイ面を曲面等にして、観察者の頭部の運動や眼球の回旋によって変化する視線に対して可能な限り直角に近い角度で位置する様にすることである。

図 2.4-6 にシミュレーターでの例を挙げるが、これは複数台のプロジェクターで曲面の映像をタイリングして実現しているもので、高価で大掛かりな装置である。

次世代のディスプレイとして脚光を浴びている OLED（有機 EL）は、薄型化やハイフレームレート化に有利な技術であるが、その薄い構造を生かして曲げる事の出来る OLED が、図 2.4-07 の通り開発されている。



図 2.4-06 シミュレーターでの例



図 2.4-07 曲げる事の出来る OLED



図 2.4-08 4K55inch の OLED

OLED だけでなく、曲げる事の可能な液晶パネルも試作されているが、構造上、明らかに OLED が有利である。大型ディスプレイは未定との事であるが、携帯電話向け試作品は来年度早々にも市販されるとアナウンスされている。

図 2.4-08 にあるように、OLED の大型化も進んでおり、将来的には、ディスプレイを円筒形に曲げて広い視野角を高解像度でカバーする事も可能になると思われる。

ここで、フレームレートについて述べる。フレームレートとは、動画 1 秒分を構成する画像の枚数の事であるが、通常のテレビ放送はインターレース (i と表示) と呼ばれる、一枚の映像を形作る走査線を半分ずつ分けて送る方式となっている。

このインターレース方式は、人間の眼が垂直方向の解像度低下には鈍感である事を利用して、伝送する走査線数を半分にすることで伝送系のデータ量を低下出来るメリットがある。

一方、プログレッシブ (p と表示) 方式は、一枚の映像を構成する全ての走査線を一度に送る方式で、インターレースに対して伝送するデータ量は倍となる。

一般テレビ放送では、伝送系の負担を減らすためインターレースが一般的であるが、最近では、映像信号処理に PC 系を利用する事が多い事や、チップの高速化が進んでいて処理の負担が減っているため、プログレッシブ映像が多くなっている。因に、先述した 4K/60P や 8K/120P の放送は、現状の 2K/60i に比べて、どの程度データ量が増えるか考えてみると、 $2K/60i=2K/30P$ だから、4K/60P は 8 倍、8K/120P は 64 倍となる。

フレームレートが高くなればなる程、時間軸上の解像度が高くなるので、動画の解像度は上がる。4K 映像を 60P に、8K 映像を 120P にフレームレートを上げるのは、カメラが静止している時と、カメラがパンした時との解像度感の落差を減らす為である。なお人間の眼の動画解像度の限界を調べると、概略 240P に相当するとの実験結果が得られている。従って、本事業の延長上で、より高速なインタラクションが必要となるケースでも、フレームレートとしては、240P 程度が最大値となる。現在、PC 用液晶ディスプレイでは 120P 対応が一般的であり、家庭用では 240P で動作をしている物が多い。これは、240P の映像信号に対応しているという事ではなく、60i の動画の滑らかさを追求したり、残像を減少させたりする目的で、240P でリフレッシュさせているという意味である。将来期待される OLED は高速動作が得意で、240P にも対応可能と思われるが、現在の所、240P の映像信号の伝送規格等は未策定である。最新のデジタルシネマ用カメラには 240P 撮影が可能なものもあるが、これは 240P で撮影し、例えば 24P (一般のデジタルシネマ) で再生して、10 倍の鮮明なスロー映像を得る事が目的であるので注意が必要である。

図 2.4-09 に 240P 撮影が可能なカメラの例を示す。次に、HMD のコンポーネントとしての小型ディスプレイについて述べる。

本事業では、3D 映像が基本であるから、HMD も左右像用の 2 枚のディスプレイがあり、光学的な手段で左右の眼にそれぞれの映像が結像する構造であると考えられる。この場合、当然装着性を考えれば、ディスプレイ自体は可能な限り小型である事が望まれる。



図 2.4-09 240P 撮影が可能なカメラの例



図 2.4-010 HMD の例



図 2.4-11 光学系



図 2.4-12 使用されている OLED

又、HMD 自体を実用的な大きさに収めようとする、ディスプレイと眼の距離は、明視の距離の 25cm より短いと考えられるので、間に介在する光学系の設計を考えても、ディスプレイは小さい程有利である。小型の OLED を利用して家庭用に商品化された 3D 対応の HMD の例を、図 2.4-10 に、図 2.4-11 に光学系、2.4-12 に OLED を示す。この HMD の画面の左右の視野角は約 45°で、解像度は横 1280 画素である。この OLED の実際のサイズは公表されていないが、仮に、横幅が 30mm だとすると、1 画素は 0.023mm 相当で、これを RGB に 3 分割すると、1 ピクセルは 7.8 μ 程度となる。

一方、最新の高精細液晶の代表格である Mac book Pro の Retina display の場合、1 画素は 0,078mm、更に、Ortus Technology 社製の最新型の液晶では、1 画素が 0,055mm である。この事は、液晶に比べて OLED が高精細化に有利である事を示している。

液晶の場合、図 2.4-12 の様に、多層構造であるため、各ピクセルを仕切る構造体の薄さに限界がある。そのため、微細化をすればする程、透過光を通す開口部が小さくなり輝度等で限界が生じる。因に、Retina display の画素ピッチを基に 4K ディスプレイを作ると考えてみると、その横幅は 312mm、2K としても 156mm となり、系の視力を高める目的

で高精細化すると、HMD に利用するには実用的でない事が分かる。

図 2.4-13 に液晶と OLED の構造の違いを示す。

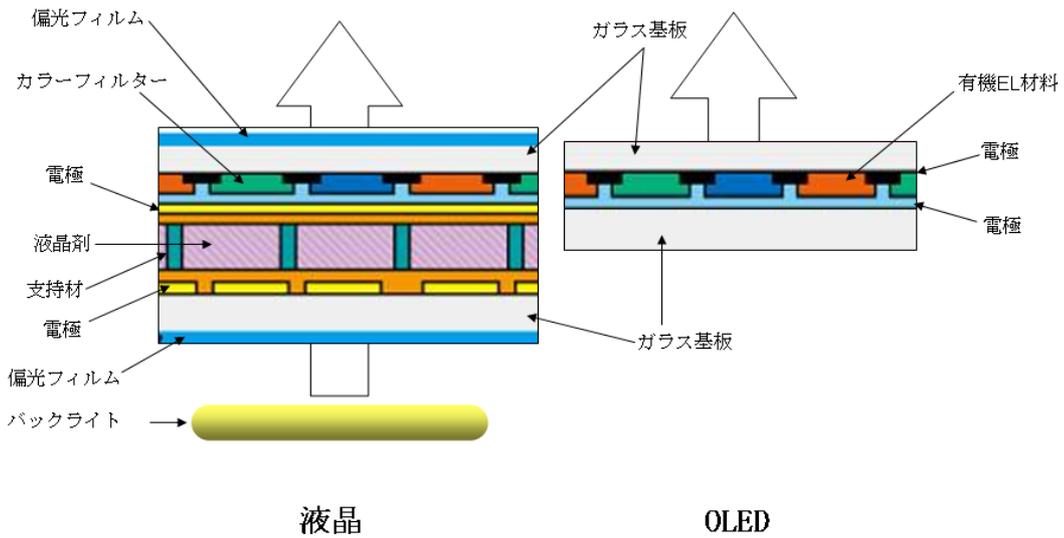


図 2.4-13 OLED と液晶の構造比較

HMD を構成するためには、何らかの光学系が必須であるが、図 2.4-12 の例は、ディスプレイと眼の間にレンズで構成された光学系が介在する形式である。この形式の場合、ミラー等で光学系の光軸を折り曲げる等の工夫をしないと、全体の長さが長くなりがちである。図 2.4-14 に、過去に販売された反射系光学系を利用した HMD の例を示す。



図 2.4-14 反射光学系を利用した HMD

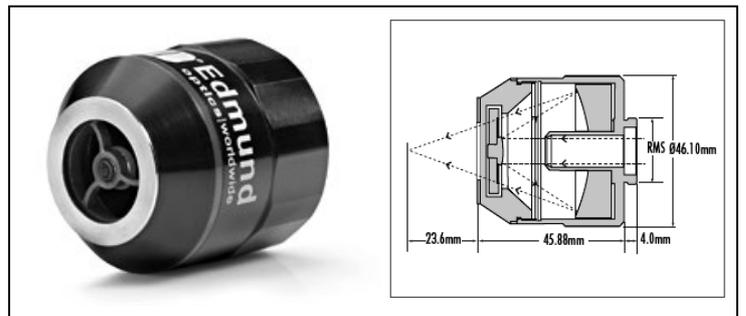


図 2.4-15 反射光学系 対物レンズの例

反射鏡を利用した光学系は、反射型天体望遠鏡等で一般的であるが、小型で大量に生産される商品に利用される事は、割合稀である。理由は、反射系の光学設計の難しさと大量生産設備がない事ではないかと推測される。スチルカメラの望遠レンズでは、長さを短くするために反射鏡を使用した例が散見されるが、特殊な例であろう。

図 2.4-15 に、反射系光学系を利用した高性能の顕微鏡用対物レンズの例を示す。反射鏡は、原理的に色収差が発生しないため、広い波長帯に渡って高い性能を発揮しやすい。

プロジェクターの世界では、投影距離を可能な限り短くするために、超単焦点の投影光学系を持つ物が多くラインナップされて来ているが、レンズで超単焦点系を実現する為には大口径のレンズが必要となるため、一部のメーカーでは反射光学系で実現している。

図 2.4-16 に反射鏡を利用して極めて短い投影距離を実現したプロジェクターの例を示す。

今後、反射光学系の技術と生産性が向上し HMD 等への利用が活発になり、より小型軽量で高性能な HMD が出現する事を期待したい。余談になるが、反射光学系のみでカメラレンズ機能を達成した例があるので、以下に記す。これは「Origami Lens」と呼ばれる物で、2枚の対向する反射鏡だけでカメラレンズの機能を果たしている。図 2.4-17 にその原理を説明した図を、図 2.4-18 に反射鏡を示す。詳細は以下の WEB サイトを参照されたい。

http://www.jacobsschool.ucsd.edu/news/news_releases/release.sfe?id=617

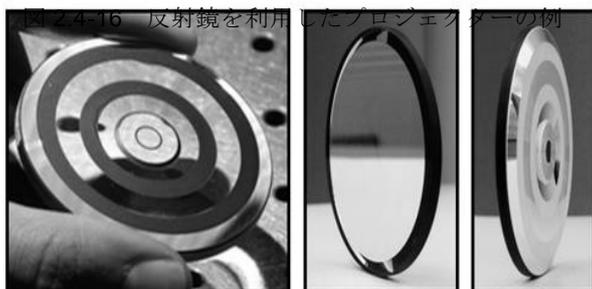
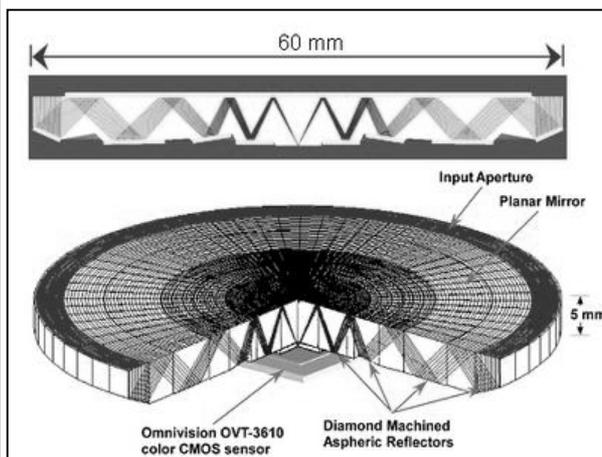


図 2.4-16 反射鏡を利用したプロジェクターの例

図 2.4-17 ORIGAMI LENS の原理

図 2.4-18 反射鏡

図 2.4-19 にアメリカで実用化されている眼鏡型ディスプレイの例を示す。これは、アメリカのバリアフリー法に準拠する形で映画館用に開発された商品で、聴覚障害者が利用するものである。一見すると眼鏡のようであるが、利用者には映画スクリーンの表面付近に字幕がある様に見える 3D 眼鏡型ディスプレイとなっている。



図 2.4-19 眼鏡型ディスプレイ

左右の端面にある黒い箱の中に文字を発生する小型のディスプレイが内蔵されているが、注目すべきは、網膜に文字を結像させる光学系にある。黒い箱の中にあるホログラムパネルで配向された光線は眼鏡のレンズにあたるガラスの厚みの中を全反射しながら網膜に文字を結像させる。ホログラムパネルを使用しているため、レンズや反射鏡等の光学系に比べて圧倒的にコンパクトに光学系が成立するのが特徴である。字幕データは文字コードとして無線で送られ、左右の眼には視差のある形で文字が投影されるため、あたかもスクリーン上に字幕があるように視認する事が出来る。現状では、文字だけであるが一般のカラーの自然画も同様に結像させる事は可能である。又、利用形態の関係でシースルー構造となっているが、勿論、通常の HMD の様にする事は可能である。

こういったホログラム技術を利用したディスプレイは航空機の HUD(Head Up Display) に早くから利用されていたが、最近ではカーナビにも利用されており、更なる技術進歩があれば、当事業の様な HMD にも採用される可能性は高いと思われる。こういった、新しい技術を利用する事によって、より装着性の良い HMD が出現すれば、操作者の操作性をより向上し、タスクの達成がより早く正確になる事が大いに期待される。

2.4.4 カメラの現状と今後

本事業に関連するカメラは、ロボットの頭部に取り付けられる物であるから、小型の物でなければならない。又、本事業の場合、3D 映像が必要であるが、最も実現し易い 2 眼式を採用している。2 眼式 3D 映像は、人間は、左右 1 対の眼の像の視差で奥行き間を認知している事を電氣的に実現しようとするものである。この 2 眼式の場合、人間の眼に相当する 2 台のカメラの光軸の配置の仕方、平行法と交差法と呼ばれる 2 種類に分けられる。映画等の立体感を演出する必要がある場合は、一般的に交差法が採用されているが、交差法の場合、映像で再現された空間が実空間と異なる奥行き間を持つ歪んだ空間になる事があるため、本事業の様な用途には向かない。

図 2.4-20 に交差法と平行法の違いを示す。

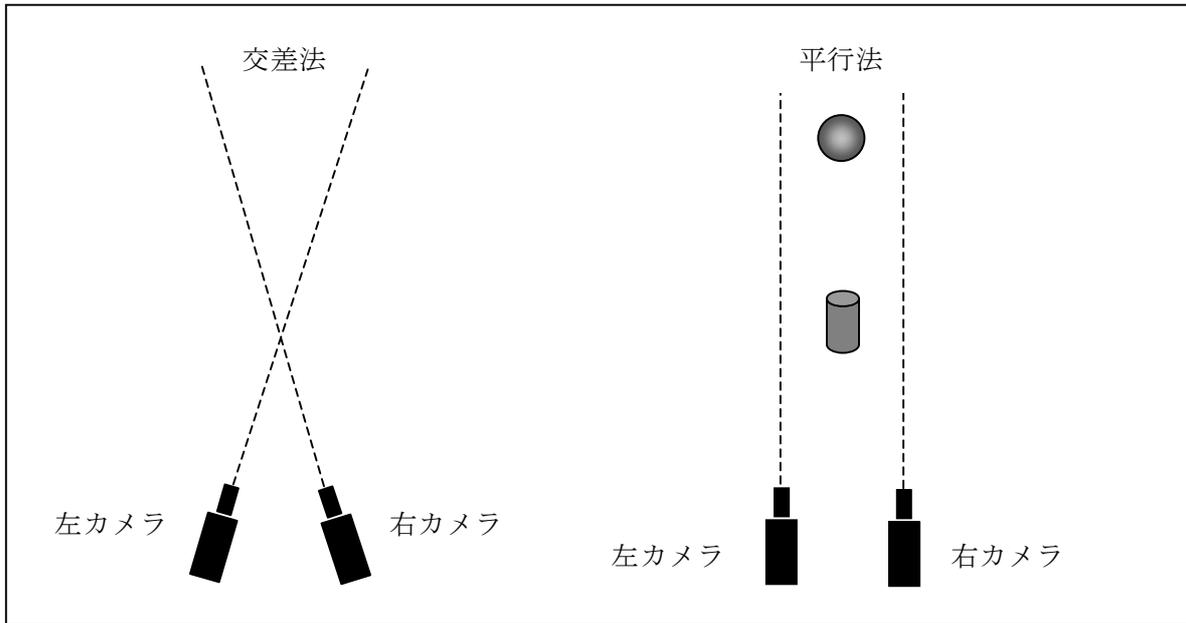


図 2.4-20 交差法と平行法

平行法は左右のカメラの光軸を平行に配置する方式で、観察者とディスプレイの関係等
 がある条件にすると、映像で再現された空間が、歪み無く実空間を完全に再現する事が可
 能である。この条件を無歪み条件といい、図 2.4-20 にそれを示す。

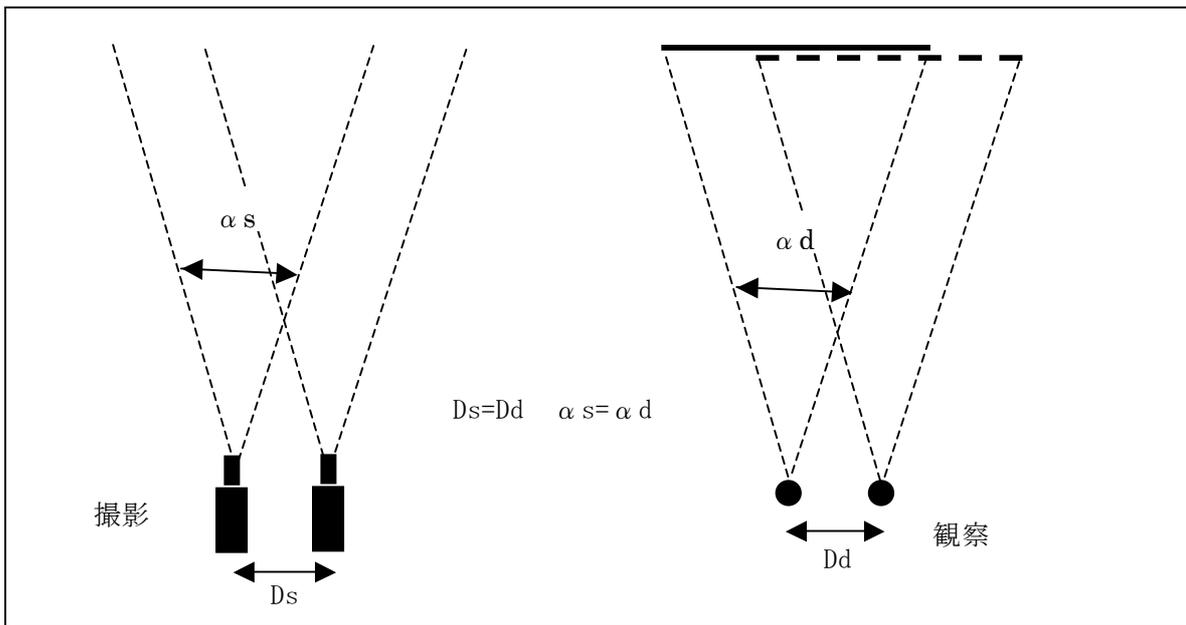


図 2.4-21 無歪み条件

ロボットの頭部に設置された 2 台のカメラが、操作者の両眼に相当すると考えると、無
 歪み条件に照らして、

- ・ カメラレンズの水平画角は、操作者が観察するディスプレイの視角と同じにする。

- ・ 2台のカメラの間隔、左右像の中心間距離と操作者の瞳孔間隔が同じになる。

という事になる。

本事業の様な場合、基本的にカメラレンズにズーム機能は不要と思われるので、レンズは単焦点レンズを2本用意する事になる。ここで、注意しなければならないのは、2台のカメラ、正確に記すなら2系統の光学系を正規の位置に設置しなければならないという事である。無歪み条件を満たす為に、2台のカメラの光軸は平行でなければならないが、観察者の眼に負担をかけずに快適に3D映像を見る為に、2台のカメラの位置合わせ等がどの程度の精度が必要かは、幾つかの指標がある。2台のカメラの映像の差異として、必要な精度を示したのが表2.4-01である。

図2.4-01 左右像の差異の許容値

※1 TAO実験：1997年通信放送機構（当時）の知見 ※2 DCAJ実験：2010年DCAJの知見

差異種類	TAO実験結果 ※1	DCAJ実験結果 ※2	備考
上下	15.7画素以下	20画素以下	下記注記参照。 TAO検知限：7画素
回転	1.14°以下	1.0°以下	下記注記参照。 TAO検知限：0.53°
サイズ	2.89%以下	1%以下	下記注記参照。 TAO検知限：1.21%
輝度	(60%以下)	80%以下	片側に比べ、輝度レベルを80%以下に下げると違和感あり
彩度		・・・	テスト映像の色が濃いと閾値が決まる可能性あり
色相		20°以下	片側に比べ、色相をベクトルスコープ上で20°以上回すと違和感あり
黒レベル	(2%以下)	10%以下	片側に比べ、黒レベルを10%以上上げると違和感あり

表2.4-01を見れば分かる通り、かなり高い精度が必要である。本事業の様な場合、タスクによっては長時間の作業となる可能性が高く、安全で精度の高い操作を継続するためには、この精度確保は極めて重要である。2台のカメラを、これらの精度を保って機械的に固定する事は、技術的にそれほど難しい事ではないが、ロボットに加わる振動や加速度によって、位置関係が変わってしまう様な強度では実用的ではない。カメラが小型軽量であれば、光学実験で利用されている汎用の光学ステージを利用するのも一つの方法である。

図2.4-22の様に、様々な軸で調整出来る製品がラインナップされているので、組み合わせる事で複雑な調整も可能となるが、多軸を調整するため、屋上奥を重ねる様に組み合わせると強度が低下し、振動等に弱くなる事には注意が必要である。

それ以外に注意しなければならないのは、レンズの焦点距離のばらつきである。レンズの焦点距離のばらつきは、左右像の大きさの差異となって現れる。使用するカメラによっ

て利用可能なレンズ類は変わるが、同一メーカーの同一レンズでも、量産による焦点距離のばらつきが散見されるので、利用する際は、多数の中から選別する事も有効である。

カメラの選択肢として最も考え易いのは、FA用のカメラであろう。画素数やフレームレートも、年々高性能になっており、選択肢は広い。図 2.4-23 にそれらの一例を示す。

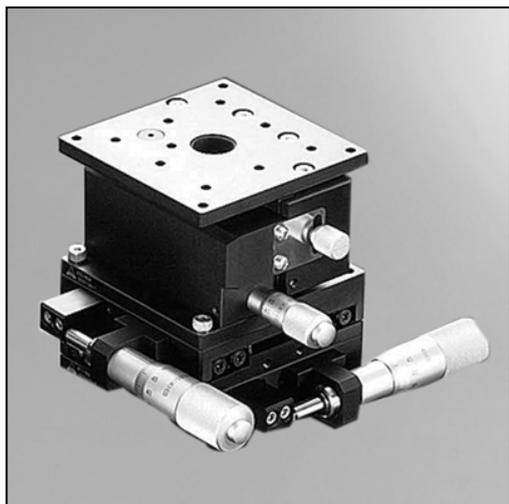


図 2.4-22 光学ステージの例



表 2.4-23 FAカメラの例

既にズームレンズと一体になった製品もあるので、先程の焦点距離のばらつきを回避するには有効かもしれない。これらのFA用のカメラの場合、ズームレンズ一体の物を除き、レンズはCマウント等の規格品を利用する事になるが、先述の焦点距離のばらつきには注意が必要である。又、周囲の明るさに応じて、全て電氣的にゲインをコントロールする事で露出を制御するカメラもあるが、探索現場の広範囲な明度変化に対応するには、レンズのアイリスの制御は重要と思われる。しかし、本来実写映像を撮影する目的では無いため、利用出来るレンズのアイリス制御は簡易的な物が多いので、この点にも注意が必要である。正しい色合い等で3D映像を撮影するためには、2台のカメラの電氣的な制御がどこまで可能かも大きなポイントである。

一般的に、FA用や監視用カメラは、むしろそういう制御を自動化しているので、2台のカメラが、それぞれ自立して個別に自動的に調整すると、左右像の色合いが異なったり、映像の明るさが異なったりして、表 2.4-01 の指標を守れなくなる可能性が高いので注意が必要である。最近ではFAや監視用途でも高画質化が求められているので、高画素化しており、それに対応した解像度の高いレンズも登場している。図 2.4-24 にズームレンズと一体型になったカメラの例を示す。



図 2.4-24 ズームレンズ一体型カメラ例

必ずしも大きなレンズが高性能という訳ではないが、小さな安価なレンズでもメガピクセル対応等と呼ばれているものがあるが、必ずしも十分な画質で無い場合もあるので注意が必要である。因に、光は波動であるので回折という現象により、回折限界という解像度の限界が存在する。このため、収差の全くない理論的な理想レンズであっても、平行光を完全な点（面積が 0）として像を結ぶ事が不可能で、ある大きさのぼけた円盤状に結像する。これをエアリーディスクといい、可視光の場合、その直径は大体 2~3 μ 位になる。

従って、カメラの CCD や CMOS といったイメージャーのサイズと画素数の関係には注意が必要で、小さなイメージャーの場合は画質確認が重要である。こういった画質に関する事柄以外で、最も重要な点は 2 台のカメラの映像信号の同期である。

カメラは、その内部で動画を撮影する場合の時間基準ともいえる基準信号を発生してイメージャー上の光学像を、その基準に従って電気信号に変換している。左右の 2 台のカメラの基準信号の周波数や位相が狂っていると左右の像の時間軸が合わなくなる、つまり左右の像の撮影時間が異なるので、3D 映像として破綻する。これは静止した映像では問題にならないが、像の動きが早くなれば成る程、3D 映像として認識出来なくなる。先述の表 2.4-01 にも或る通り、左右像の時間軸のズレは厳しく管理しなければならないが、ここまで紹介してきた FA 用や監視用のカメラで、複数台のカメラの同期を合わせる機能を持っているものは少ないので、利用にあたっては注意が必要である。これらのカメラは一般的に PC で制御するが、PC のグラフィックボードには外部の同期を受けて出力映像信号の同期を取る機能を持ったものがあるが、カメラで動画撮影した時点で左右像の時間軸が異なっていれば、もはや救済する事は出来ない。図 2.4-25 にメディカル用であるが、同期機能を持ったカメラシステムの例を示す。



図 2.4-25 同期のとれるカメラの例

以上述べた通り、個別に 2 台のカメラやレンズを調達して、2 台のカメラを固定する機構を設計するには様々な問題を解決しなければならないが、最近盛んになった 3D 撮影のための一体型カメラの利用が出来れば便利である。現在、幾つかのメーカーから家庭用、放送局用のものが複数ラインアップされているが、幾つかの機種は平行法で撮影しており、2 本のズームレンズの焦点距離差異や光軸のズレ等も自動修正しているので、取り扱いは極めて楽である。

勿論、同期も取れており、映像の防振機能を持っているものもあるので、ロボットの激しい動きに対しても、操作者は対応可能と思われる。仮に利用した場合、レンズは正しい画角で固定すれば良いが、カメラ間隔は固定であるので、操作者の両目の間隔と異なる事になるが、これはディスプレイと眼の間の光学系とディスプレイに入力する映像の切り出し位置等の調整で対応可能と考えられる。今の所、図 2.4-26 にある様な一体型 3D カメラのカメラ部分だけを工業用に販売している物は無いが、今後に期待したい。



図 2.4-26 一体型 3D カメラの例

2.4.5 伝送系の現状と今後

本事業では、カメラから HMD までの映像信号の伝送にはケーブルを使用したがる、実用性を考えると、一般的には無線による伝送が好ましい。系に要求される視力にもよるが、少なくとも 1280×720 画素程度以上の HD 程度の画質が必要と思われるので、それを前提に記述する。一般的に 2K と言われている 1920×1080 画素で 60i の TV 映像信号の場合、約 1.5Gbps のビットレートとなるので、常識的には何らかのデータ量の圧縮技術を利用しないと、無線伝送は困難である。

日本では、2011 年 7 月 24 日に衛星、地上双方ともアナログ放送を終了したが、これらのアナログ放送は、HD と言われる 2K に対して、凡そ 1/5 のデータ量の放送であった。地上波アナログ放送は、最も平易ではあるがノイズ等には弱い AM 変調で放送されており、その搬送波周波数は 100Mhz～700Mhz 程度である。一方、衛星アナログ放送は、より高画質の FM 変調で放送されていたが、搬送波周波数は 2Ghz 程度で、極めて高い周波数である。従って、2K の映像信号をそのままベースバンドのまま電波で伝送しようとしても、大雑把に言って 5 倍の周波数の搬送波が必要となり、利用しやすい周波数帯では不可能である。

無線通信速度は、搬送波周波数の 1/10 程度まで可能であるので、2k 映像の場合、15Ghz 程度の搬送波が必要になり、大体計算が合うことになる。そのため、デジタル技術を利用したデータ圧縮の技術が必須となっている。

現在の地上波デジタル放送、衛星デジタル放送では、MPEG2 という圧縮方式が採用されていて、圧縮率は約 1/50 程度で、地上波で 25Mbps 程度、衛星波で 30Mbps 程度のビットレートでデジタル放送されている。この圧縮率と画質はトレードオフの関係で、放送局間の素材伝送等、画質が求められる場合は、50Mbps 程度で伝送されている。

MPEG2 に比べ新しい圧縮方式である AVC (H.264) 方式では、MPEG2 に比べ同じビットレートではより高画質を実現できるので、Blue-Ray ディスクや家庭用 HD カムコーダー等は AVC を採用している。

図 2.4-27 に小型の放送局レベルの AVC エンコーダーの例を示す。



図 2.4-27 小型 AVC エンコーダーの例

入力信号をエンコーダーで圧縮して伝送されたものを受け取る側は、入力側に対応したデコーダーで、それを伸張して映像信号を出力する。この一連の圧縮伸張のシステムのことを CODEC と言う。これらの圧縮技術は、方式により違いがあるものの、元の映像信号を圧縮伸張して映像信号として出力されるまでに、無視できない遅延が発生する。これは、一般的に処理の過程で、動画 1 枚単位でメモリーに書き込み、読み出しを行うため、フレーム単位での遅延が発生する。又、符号化処理の過程で演算によるもの等の遅延が発生し、これらは画質とトレードオフの関係となる事が多い。ビットレート、圧縮方式による違い等があるが、通常、伝送による遅延は含まないで圧縮伸張の過程で、300ms~700ms 程度になる。

一方、本事業の様なロボット操作等のインタラクションのある場合、その系の視覚である映像伝送の遅延が大きいと、正確なインタラクションは難しくなり、タスク達成が困難となる。どの程度の遅延が許容されるかについては、様々な研究がなされているが、視覚呈示遅延に関しては、眼の残像の影響等があるのである程度は許容されるが、200ms を超えると極端に操作性が悪くなる事、触覚の場合は、50ms 程度でも極端に操作性が悪化する

る等の報告³があるので、先述の 300ms～700ms 程度という数値は許容範囲外という事になる。この遅延は、本事業の様な場合以外でも問題となっており、海外との生放送中のスタジオとの掛け合いで、それぞれの反応に微妙な遅れが生じて違和感を持つ事が多い。

そのため、最近では低遅延を謳う機器が登場しており、フレーム単位のメモリー処理を圧縮のブロック単位にしたりする方法で低遅延を実現している。

最新の低遅延 CODEC では、画質とトレードオフではあるが 10ms～120ms を実現したもの、画質に関係なく 50ms を実現したもの等がある。図 2.4-28 に JPEG2000 の圧縮アルゴリズムを採用して、広いビットレート範囲で遅延を 50ms に抑えた機器を示す。又、放送局用であるが遅延が 30ms 以下の AVC CODEC が発売予定である。これらの機器は、主として放送用で高価なものである。図 2.4-29 に低遅延で、より小型の伝送装置の例を示す。



図 2.4-28 低遅延 ENC の例



図 2.4-29 小型低遅延伝送装置の例

³ 慶応大学「視覚触覚フィードバック遠隔操作における装飾器の性能評価」より引用

これは、衛星放送や3G携帯電話の周波数と同等の2.4Ghzの電波を使った伝送装置で、圧縮方式はAVC(H.264)を採用しているが、遅延は100msと、割合低遅延である。選択可能な変調方式によっても異なるが、伝送距離は100m~500mとなっている。

本事業の様な用途に向けた低価格の物では、今の所、低遅延を謳ったものは見当たらないが、今後の技術の進展により安価な製品も出現する事を期待する。

遅延の問題を避けるには、映像信号をベースバンドのまま非圧縮で伝送する事であるが、先述した通り、AMやFMと言った単純な変調では、非常に高い周波数の搬送波が必要となり、技術的に難しい面がある。図2.4-30に示したのは、遅延が1ms以下という製品であり、受信側のアンテナを高利得アンテナにする事で500m以上の伝送が可能となっている。使用する周波数は、先の例と同じの2.4Ghzで、独自のデジタル空間変調方式を採用となっているが、詳細は不明である。



図 2.4-30 非圧縮伝送装置の例

最近の地上波デジタル放送や携帯電話では、AMやFMと言った単純な変調と異なるOFDMといった全く新しい変調方式が採用され、電波の効率的な利用が進んでおり、こう言った技術を利用する事で、非圧縮のままの伝送が安価に出来る可能性が高くなっていると思われるが、この製品が非圧縮かどうかは、現在の所不明であるが、遅延量が1msとの事であるので、非圧縮と思われる。AMやFMと言ったアナログ変調方式では、伝送路中のノイズ等の影響を受けるがOFDMと言ったデジタル変調方式の場合、伝送路中で発生する様々なエラーを訂正する機能を持たせる事が可能である。

建物の中を探索する様な本事業の場合、受信点からロボットが見通せない場合が殆どと推測されるので伝送路中のエラー訂正は重要な機能である。

一方、2Kの映像信号を伝送するには、圧縮、非圧縮に関わらずGHz帯の極めて高い周波数が必要となるが、周波数が高くなればなる程直進性が強まり、遮蔽物の反対側への電波の回り込みが難しくなるため、ロボットが、受信側から見通せない様な建物内部に入り込むと、安定した伝送が困難になり、高画質化と長距離・安定した伝送との間にトレードオフの関係が生じる。

3G携帯のサービスエリア拡大に各キャリアは腐心しているが、3G携帯の利用している電波は1.5GHzや2GHz帯で、極めて直進性が高く、携帯基地局から見て陰になるビルの裏側等で繋がりにくくなる。一方、CDMA等で利用していた800Mhz帯は、1.5GHzや2GHz帯に比べ直進性が低いので、多くの基地局を設置しなくても広いサービスエリアを確保する事が出来る事が、所謂プラチナバンドと呼ばれる所以である。

従って、本事業の様な場合の伝送系の場合、伝送すべきデータ量、つまりは系の視力（静的には解像度、動的にはフレームレート）と伝送距離と安定性の2つの面のバランスを、如何にうまくとるかが課題となる。伝送ビットレートが低くなれば、伝送する周波数も低く出来るので有利である。

先述したAVC(H.264)の次の規格として開発が進んでいるのがHEVC(High Efficiency Video Codec)である。これは、AVCの更に半分以下のビットレートでも同画質という最新型の圧縮方式であり、既に実験的に映像が公開されており、2014年開始予定の4K放送、2016年に開始予定の8K放送で採用予定である。2Kであれば10Mbps以下でも十分な画質が得られるので、IPTVやモバイル環境での映像配信に利用されると予測される。現在の所、このHEVCは、未だソフトウェアベースであるが、専用チップ化されれば、より高画質で低遅延のものが出現するものと思われる。

CODECに関しては、この様な新技術に期待が高まるが、電波の周波数に関しては、より高い周波数への取り組みが盛んになっている。その最先端とも言うべき取り組みがテラヘルツ帯無線通信である。テラヘルツ波とは、周波数が300GHz~3THzの電磁波で、光と電波の中間領域にあり、未開拓電波領域と言われている。日本では、電波法で電波の利用に様々なルールが定められているが、電波法の定義では、周波数が300GHz以下を電波と呼ぶ事になっているので、現状ではテラヘルツ波は、自由なニューフロンティアという事になる。テラヘルツ波は、その周波数の高さから、発信や測定する事自体が困難であったが、最近、MEMS技術の応用等で少しずつ実用化の目処が付きはじめている。

既に、542GHzのテラヘルツ波での伝送実験では、極めて単純な変調方式ではあったが3Gbpsの伝送に成功している⁴。図2.4-31に、542GHzのテラヘルツ波を発信する事に成功したトンネルダイオードを示す。

⁴ 「Electronics letters, vol48, no10」 東工大 浅田雅洋 他より 引用

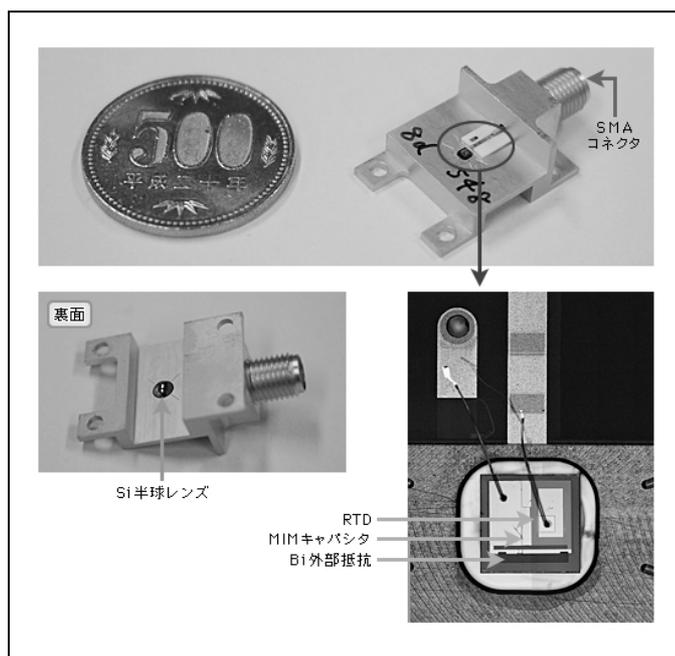


図 2.4-31 テラヘルツ波を発信したトンネルダイオード

理論的には、50Gbp 程度の伝送が可能な周波数であるので、今後、更に技術が進歩すれば、非圧縮のまま 2K 映像の電波による伝送は容易なるものと思われる。しかし、ここまで周波数が高くなると、先述した直進性以外にも、空気中の水分子等による吸収等の影響があり、必ずしも長距離の伝送には向かない。現在の所、最大でも数キロ程度と考えられている。一般的に、周波数が高くなる程、直進性やマルチパスと呼ばれる反射波と直接波の干渉等で、伝送距離や伝送安定性に問題が生じる。これらの対策として一般的に採用されている方法は幾つかあるが、直進性対策としてリピーターと呼ばれる再送信システム、マルチパス対策としてアンテナの狭指向性化やダイバーシティ受信等が挙げられる。

まず、リピーターであるが、これは 3G 携帯電話の地下鉄内部でのサービスエリア拡大等で採用されている方法で、電波が到達可能な場所に受信アンテナを設けて、有線で地下鉄構内まで引き込み、構内で再送信する方式である。

携帯電話の場合は、送受信の双方向であるので、送信側も同様に有線で延長する事になる。

図 2.4-32 は、図 2.4-29 に対応したリピーターである。

本事業の様な場合、最前線に位置するロボットと操作者の居るサイトとの間の最適な位置にリピーターを遠隔で持ち込む移動車や或いは別のロボットを用意すれば、理論的には伝送距離を伸ばす事が可能となる。



図 2.4-32 映像伝送装置用リピーターの例

次に、マルチパスであるが、これは、送信アンテナから発せられた電波が、直接、受信アンテナに届く経路と、地上やビルの外壁等に反射して受信アンテナに届く経路の長さが異なるために、受信アンテナに様々な方向から到達する電波の位相が異なる事で干渉が生じる。受信点での位相が関係するため、一般的に周波数が高い程、発生しやすい。図 2.4-33 にマルチパスの発生イメージを示す。送信側と受信側の位置が固定している場合は、受信アンテナを狭指向性にしたたり、アンテナの方向を調整する事で、ある程度回避可能であるが、図 2.4-33 の自動車と同様、送信側と受信側の相対的な位置が変化する本事業の様な場合、マルチパスによる影響は刻々と変化するもので、位置関係によっては、全く電波が受信できなかつたり逆に強くなつたりする。マルチパスの影響の受けにくい OFDM の様な変調方式もあるが、送信側と受信側の相対的な位置が変化する場合で有効な方法にダイバーシティがある。

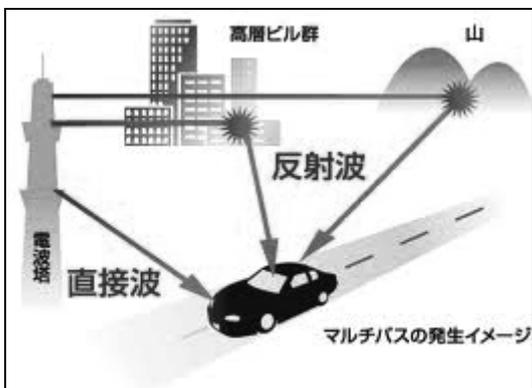


図 2.4-33 マルチパス



図 2.4-34 ダイバーシティの例

ダイバーシティとは、複数のアンテナで受信した同一の無線信号の中で、最も受信品質のよいアンテナが受けた信号を優先的に利用したり、複数のアンテナで受信した信号を合成してノイズを除去したりして、総合的に受信品質を向上させる技術である。

身近な利用例では、カーナビの地上デジタル受信アンテナをダイバーシティにする事は一般的になっており、純正カーナビでは、サイドウインドウやフロントガラス上に様々なダイバーシティアンテナの導体パターンを見る事が出来る。

図 2.4-34 にダイバーシティ受信の例を示す。これは、ワイヤレスマイクの受信機で、空間の異なる位置に 2 本の受信アンテナを設けて受信の安定性を確保している。一般的に、受信する電波の周波数の 1/2 波長よりも 2 つのアンテナが離れていれば、それぞれの受信状態は独立した別の状態となると考えられる。そこで、複数のアンテナから最良の状態の物を選択する空間ダイバーシティの場合で、例えば 2.4Ghz の電波を受ける場合、複数のアンテナの最少間隔は 125mm となるので、それほど大きなスペース必要としない。一方、波長が短くなると、マルチパスによる空間上の電界強度の変化分布も細くなるので、アンテナの本数とそれらをどの程度の間隔で配置するかは、検討を要する点であると思われる。

ここで、先述のテラヘルツ波とは異なるが、60Ghz の電波を利用した 2K 映像の非圧縮伝送装置の例について記す。現在、日本では 60Ghz 帯は無線局免許不要な帯域として認められた事により、実用化が進んでいる。最初の例は、2006 年トリノ・オリンピックの 2KHD 生中継のために NHK で開発⁵されたものである。スピードスケートの生中継では、コース横にレールカメラと呼ばれる、走行する選手の横を同じスピードで移動するカメラの映像が人気だが、このカメラの 2KHD 映像信号を非圧縮で伝送する目的で開発された。スピードスケートの様な高速の競技の場合、CODEC を使用した伝送器経由のカメラ信号と、直接、非圧縮のまま中継システムに接続されたカメラとの間で時間ずれが発生するため、実際にはゴールしているのに、CODEC を使用したカメラは未だ走行中という事になり、放送では使用できないので非圧縮による無遅延伝送は必須である。この例の場合、レールカメラ上に 60GHz 帯の送信機を置き、地上に置いた受信アンテナで受信する訳であるが、当然、直接波と床面等からの反射波の干渉でマルチパスが発生する。

この対策として、3 つの受信アンテナと受信機を設ける空間ダイバーシティ受信を構築している。図 2.4-35 は、ホームストレートの受信点の状況で、3 台のパラボラアンテナが見える。大き目のパラボラアンテナは、別の伝送器用である。

⁵ NHK 技研 技術解説「60GHz 帯非圧縮ハイビジョン無線伝送システム」より引用

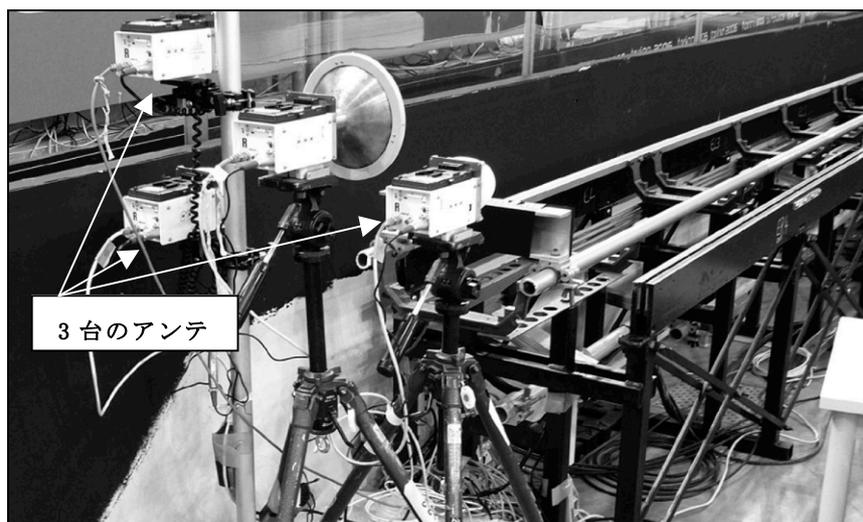


図 2.4-35 60GHz 帯伝送装置の 3 台のダイバーシティアンテナ

この開発例を基に各社で商品化が進み、次の例は、原則的に送信側と受信側の位置が固定している場合の利用を想定した製品である。使用している周波数は、58.5GHz または 61.5Mhz であり、図 2.4-36 の標準ホーンアンテナの場合、伝送距離は 100m、図 2.4-37 の高利得パラボラアンテナの場合は 500m となっている。非圧縮なので、伝送による遅延は伝送距離間の電波の到達時間となり、実用上 0 である。この製品は、原則的に送信と受信側が固定している場合を想定しているが、マラソン競技の生中継の様な場合、移動する中継車とコース周辺の受信点の位置変化は緩やかなので、受信アンテナを追尾する事も実際には行われている。何れにせよ、伝送に利用する電波の周波数を高くして、非圧縮のまま 2KHD と言った高画質の映像を伝送する技術は日進月歩であるので、ここで例示した様な高価な放送局レベルではない安価な製品の出現も間近と思われる。



図 2.4-36 60GHz 帯の伝送装置例 1



図 2.4-37 60GHz 帯の伝送装置例 2

先述の HEVC の様な新しい CODEC 開発は、どちらかと言うと 4K、8K 等のより超高画質映像を放送やネットという媒体を通して多数の人に伝達する事を目的としている。

一方、テラヘルツ波に象徴される高い周波数への挑戦は、大量のデータを 1 対 1 で割合短い距離で伝達する事を目的にしている。従って本事業の様な場合は、どちらかと言うと、非圧縮信号を短波長の電波で伝送する方向を目指すべきと考える。

尚、この伝送系の項では、系の視力となる映像信号のロボットから操作者への映像信号にフォーカスして記述したが、操作者からロボット側への操作信号に関しては、ビットレートが映像信号に比べて相当低いため、伝送がそれほど難しくないと考え、記述を省略した。この操作信号の無線伝送には、WiFi と言った、現在盛んに利用されている技術等が利用可能であるが、映像信号より低ビットレートと言っても、利用している電波の周波数は GHz 帯であり、マルチパス等の問題は、映像の場合と同様であるので、運用に当たっては様々な注意が求められる。

参考文献：

- [1] 大都市大震災軽減化特別プロジェクト
http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031203.htm
- [2] 総務省消防庁 平成 21 年度救助資機材の高度化等検討会報告書
http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h21/2112/01_houdou/02_houkokusyo.pdf
- [3] 産業競争力懇談会 2012 年度中間報告 災害対応ロボットと運用システムのあり方
<http://www.cocn.jp/common/pdf/thema50-s.pdf>
- [4] 原子力安全技術センター 防災モニタリングロボット
http://www.nustec.or.jp/japan/robot_pamphlet.pdf
- [5] 総務省消防庁 消防防災科学技術高度化戦略プラン（2012）
http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h24/2410/241018_1houdou/01_houdouushiryoku.pdf
- [6] 建設無人化施工協会：“技術委員会：雲仙普賢岳火山砂防事業における無人化施工の最新技術”，(2011)
- [7] 古屋 弘：“（総説）建設事業における情報化施工(ICT)の活用”，基礎工 Vol.40, No.5,pp.2-7,(2012)
- [8] 建設無人化施工協会：“技術委員会：無人化施工の推移と展望、建設の施工企画”，(2006)

その他参考文献として：

- ・ 猪原幸司他：“災害復旧における遠隔操作式建設機械の現状と最新の工事事例”，建設機械,(2005)

第3章 遠隔操縦型ロボットにおける立体視機能の効果の検証

3.1 本章の目的

前章で述べたように、災害救助や危険物の搜索を目的とした遠隔操縦型ロボットが必要とされており、既に多数のロボットが現地に導入されている。しかし、従来の遠隔操縦型ロボットでは、現場で必要となるような見回しや覗き込みなどの自在な探索行動を行うことが難しい。一方で、レイグジスタンスの概念を導入することにより、離れた場所にいながらにして現地にいるかのような高い臨場感を得られることが分かっている。そこで本章では、本概念に基づいて災害現場を想定した遠隔操縦ロボットを開発し、立体視機能の効果について実験的に検証することを目的とする。

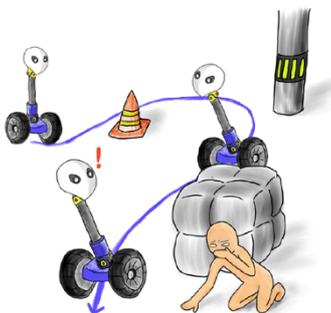


図 3.1-01 遠隔操縦型ロボットの探索行動

3.2 テレイグジスタンス

3.2.1 基本概念

現地に置かれているロボットを遠隔地から巧みに操るためには、操作者の行動意図を瞬時に理解し、ロボットの動作に反映させるだけでなく、高い臨場感を持って周囲の状況を的確に操作者に返すことが求められる。特に探索行動を目的とした遠隔操縦型ロボットにおいて、操縦者が周囲の環境を素早く把握できることで、探索能力の向上が期待できる。

臨場感を生じさせる手法としてまず図 3.2-01(a)に示すように、環境を伝送する方式が考えられる。つまり、遠隔地の空間で生じる物理現象の一部を閉曲面として切り取り、操縦者の身の回りを取り囲む空間に伝送し空間を再生するという考え方である。

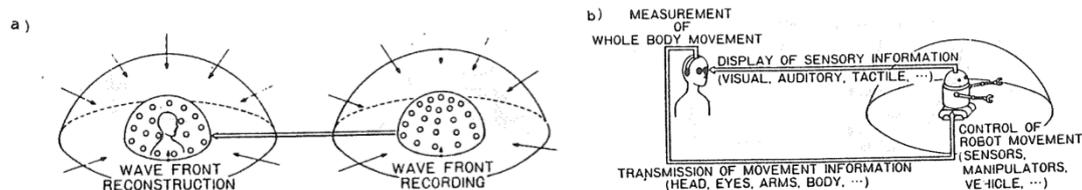


図 3.2-01 (a)環境の伝送 / (b)運動と感覚の伝送 [1]

これに対し図 3.2-01(b)に示すように、運動と感覚を伝送するという考え方があある。つまり、人間と同程度の運動・感覚自由度をもつロボットを作業空間内に置き、人間とロボットとの感覚器を、また人間の動きとロボットの感覚器の動きとを一対一対応させる方式である。このとき、ロボットが見たもの、聞いたもの、触れたものを、それぞれ遠隔にいる操縦者が見て、聴いて、皮膚上に感じられるような、等価な感覚情報を実時間で提示するのである。その結果、ロボットが置かれている空間に実際に存在しているかのような体験を操縦者にさせることができる。これがトレイグジスタンスの基本的な考え方である[1]。

トレイグジスタンスを成立させるための要件として、臨場感、実時間相互作用性、自己投射性の3つがあげられる。まず臨場感とは、自分の目の前に自然な3次元空間を感じ、そこに没入しているかのような体験を意味している。つまり平面的ではない、遠景は奥行き感をともなって遠くに感じられるような、自然な空間が得られる。

次に実時間相互作用性とは、目の前に広がる空間内を自由に行動できるだけでなく、空間内の環境に対して実時間で働きかけられることを意味する。相互作用性とは、眼の前に見えている作業環境そのものに働きかけ、操作できることを意味であり、例えば対象物を把持して移動するなどが該当する。つまり作業環境をただ眺めているだけではない、より高い実体感を得ることができる。

最後に自己投射性とは、自分の分身が遠隔環境内に存在しているかのように感じることである。自分も手が存在していると感じられる場所にロボットの手が存在し、自分の手と同様にロボットの手を操ることによって、見かけは全く異なるにもかかわらず、まるで自分の手であるかのように感じられる。これが自己投射性である。さらに、ロボットの目を借りて自分自身を外部の視点から観察すると、視点位置への自己投射により体外離脱体験が生じる。つまり自分の体は自分の身体側ではなく、ロボット側に存在しているかのように感じられる。

3.2.2 視機能

臨場感を与えるため立体映像提示が効果的であることが分かっており、既に前章のように様々な手法が提案されている。これらのディスプレイ据え置き型を前提とした立体映像提示手法は、頭部運動を伴わない条件では効果的である一方で、本事業が対象としている能動的な頭部運動を伴う探索行動への対応が困難である。そこで本章では、頭部運動に伴う広範囲の視界変動に対応可能な頭部搭載型ディスプレイ(Head Mounted Display : HMD)を用いる。これにより、リアルタイムに計測された操縦者の頭部運動に伴って変化する映像を両眼に提示することができ、操縦者の周囲にバーチャルな3次元空間を再構成できる[6]。

臨場感を与える視覚提示手法は、頭部と対象物との相対的な運動を必要としない両眼立

体視と、眼球と対象物の相対運動により得られる運動視に分けられる。

(1) 両眼立体視

視覚提示系設計において両眼立体視を成立させるために着目すべき機能は、輻輳と水晶体調節である。眼球は内外転することで、網膜上最も空間解像度が高い中心窩で対象物を捉える。この眼球の内外転を輻輳と呼び、眼球回転量から対象物までの距離手がかりを得ている。このとき視線が遠方にて交差する点と両眼が張る角を輻輳角と呼ぶ。水晶体調節とは、眼球内の水晶体を毛様筋が牽引することにより焦点距離を調節し、網膜上に鮮明な像を結ばせる機能を指す。毛様筋の調節量が対象物までの距離手がかりとして利用される[10]。

輻輳と水晶体調節はその定義から互いに独立の視機能ではないため、互いに大きな矛盾を生じさせない視覚提示系設計が求められる。水晶体調節に対応した接眼光学系設計は、HMDの大型化や複雑化を招くために経済的ではなく、水晶体調節を固定した提示系設計が主流である。既に舘、前田らの研究によって、輻輳への影響が最も小さい水晶体調節範囲が明らかにされている[3][6]。接眼光学系を用い水晶体調整を200[mm]に固定するとき、100~500[mm]の輻輳範囲で自然な両眼像の融合が生じ、水晶体調節を1[m]に固定すると200[mm]から無限遠までの輻輳範囲に対応できることが分かっている。

(2) 運動視

眼球と対象物の相対速度によって視差が生じることを運動視差と呼ぶ。主な手がかりとして、視点位置からの距離に依存した並進速度分布と、対象物の前後関係により生じる遮蔽があげられる[10]。両眼視差が輻輳角で表現されることになり、運動視差量は視点の並進移動により生じる2点が対象物まで張る角度で表した等価視差を用いて表現される[15]。

頭部が固定され対象物が運動する場合、運動視差を受動的に得ることとなり、体幹部の姿勢である体性感覚は奥行き知覚に利用されない。一方で、固定された対象物を能動的な頭部運動を伴って観察することで、能動的な運動視差が得られる。この時、視界変動が頭部位置姿勢と一対一対応するため、網膜像以外に体性感覚が奥行き知覚の手がかりに利用される。対象物の前後関係により遮蔽が生じるが、これは頭部の能動性にかかわらず対象物の前後関係を知ることができる。

遠隔操縦ロボットにおける運動視は、ロボット上のカメラが外界に対して相対速度を持つことにより生じ、ロボットの移動やカメラ雲台の運動により生じる。特に本章では、自在な覗きこみ動作を実現するため頭部6自由度を有するロボットヘッドを用いることから、次節では能動的な頭部運動の効果に着目し知見をまとめる。

(3) 能動的な頭部運動による等価奥行き知覚

Rogers らは 1979 年に、運動視における奥行き知覚において、頭部運動の能動性によらず視野内の相対的な速度分布により得られることを示した[14]。同実験では、視差として 10 分から 50 分の範囲、すなわち相対的な奥行きとして 0.7cm から 3cm の範囲が使われた。頭部運動はディスプレイに対し 15 度の振幅で被験者に頭部運動を行わせており、頭部を固定しディスプレイ運動条件との比較の結果、頭部運動の能動性によらず運動視差量に依存した奥行き知覚が行われたことが示された。さらに奥行き知覚感度が最も高い空間解像度が 0.2~0.4cycle/deg と、両眼立体視と類似した結果を明らかにしており、運動視と両眼立体視の類似性を指摘した[8]。長田らは、運動視差による奥行き弁別は運動視差の振幅ではなく、その変化速度に依存することを示し、数~10deg/s が最適視差速度であることが示した[7]。

3.2.3 臨場感を与える視覚提示装置の設計

館らは、裸眼と等価な奥行き知覚が可能な視覚伝送装置を開発し、頭部運動に両眼カメラの姿勢を追従させることで、頭部旋回運動と一対一対応する視覚提示を実現した[1] [3] [11]。HMD は水晶体調整を 1m に固定した接眼光学系をもち、撮像系・提示系ともに平行法を用いた無歪み条件で設計されている。

さらに館らは、図 3.2-02 の人と同程度の自由度配置をもつ人間型スレーブロボットを開発し、目と手の協調動作を用いたマニピュレーションにおいて、両眼立体視と能動的な頭部運動による運動視機能の効果を明らかにしている[2]。

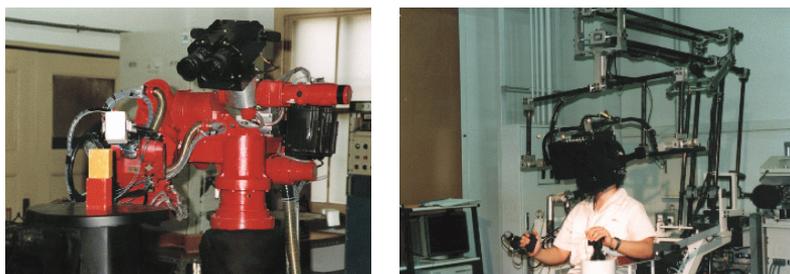


図 3.2-02 テレイグジスタンスロボット [2]

同研究ではまず、両眼立体視機能の効果を明らかにするために、片眼では不利な奥行き方向に移動する指標を設置し、マスタスレーブ装置を介した追従実験が実施された。追従特性をクロスオーバモデルで表すことで、クロスオーバ周波数および等価時間遅れを得た。その結果を図 3.2-03 左に示す。図 3.2-03 左は左上にプロットされるほど優れた追従特性を表している。まず、直接視による結果が図 3.2-03 内の「直接視」に、また HMD を介した結果が同図内の「両眼立体視」「単眼視」に、さらに CRT を介した結果が「ロボット搭載カメラ」「外部カメラ」に示されている。HMD を介した結果の差は、両眼立体視機能の

効果を示しており、両眼立体視条件の方が単眼視と比較し優れていることが示された。また「単眼視」と「ロボット搭載カメラ」はともに単眼視条件による結果であるが、これらの条件の差は、頭部運動がカメラに反映される運動視の効果を示している。単眼視は奥行き知覚に不利な条件ではあるが、HMD 条件は CRT 条件と比較し優れた結果が得られている。CRT 条件における結果の差は、視点位置の効果を示している。外部カメラから三人称視点を得ている一方で、ロボット搭載カメラ条件では単眼の一人称視点を得ている。

次に、つみ木の積み上げタスクを用いて視覚提示系機能の評価実験が行われた[2]。その結果を図 3.2-03 右に引用する。評価尺度はタスク遂行に要した時間であり、正規化し縦軸に示されており下にプロットされるほど優れた結果を表す。横軸は視覚提示条件であり、前段落の実験と同様 HMD と CRT 条件下で、また両眼(B)、単眼(M)、外部ディスプレイ(O)、ロボット上の単眼カメラ(H)で行われており、それぞれ横軸に示されている。本実験ではロボットの頭部を被験者の頭部並進運動に追従させることによる運動視効果を明らかにするために、両眼視(B)単眼視(M)にそれぞれ運動視を加えた条件(B+)および(M+)を条件に加え実験が行われた。その結果、両眼立体視(B)が積み上げタスクにおいても効果的であるだけでなく、単眼視(M+)であっても運動視を行うことで同程度の効果が得られることが示された。

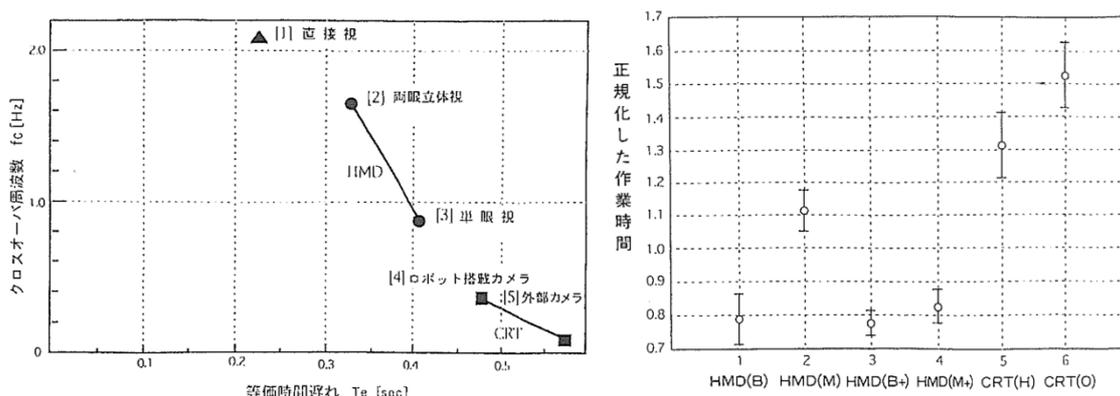


図 3.2-03 追従特性(左) / 作業時間(右) [2] より引用

非常に軽量に設計された 6 自由度ロボットヘッドである TORSO[4] [5] は、人間の頭部運動に整合した動特性を達成した。同装置は非常に高い追従性を持つだけでなく、見回しに加えて腰の運動に伴う頭部の並進運動が再現し、運動視差を効果的に得られることが示された。

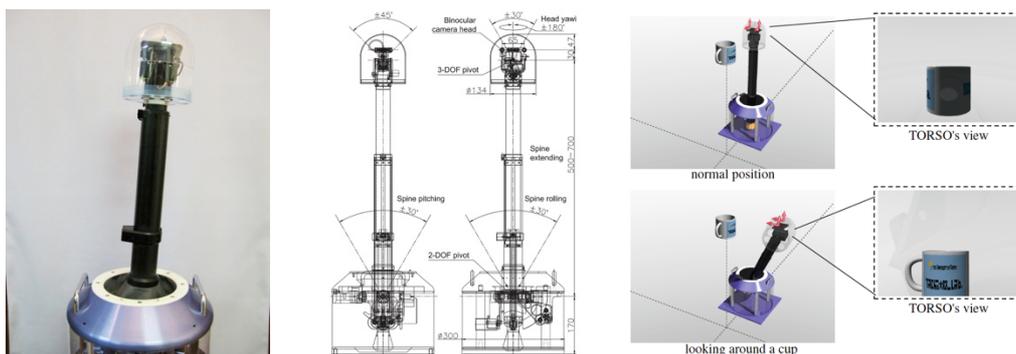


図 3.2-04 体幹部をもつ 6 自由度ロボット[5]

3.2.4 操舵のための体性感覚の手がかり

頭部運動自由度をもつ遠隔操縦ロボットにおいては、ロボット本体と頭部の相対姿勢が任意であるため、ロボット本体の移動にともなう視界変動が必ずしも一対一対応しない。例えば、カメラが本体に対して左を向いたまま本体が前進するとき視界は左に流れる一方で、カメラが本体に対して正面を向いていれば視界は視点中心から周辺部に向かって流れる。これは視線方向とロボットの進行方向が独立であることを示しており、常に頭部とロボットの相対姿勢を正しく知ることができなければ、視界を手がかりに正しい進行方向を決定できないことを示している。これを解決するために、館らは遠隔操縦ロボット本体とカメラとの相対姿勢を視覚的に提示した[13]。これにより視覚的手がかりから外界とカメラとの相対姿勢に加え、頭部とロボット本体と相対姿勢を得られるため、外界とロボット本体の相対姿勢を推定できることが示された。

また同事例ではトレイグジスタンスの概念に基づき、操縦者の頭部運動を直接ロボット上のカメラに再現し、HMD 越しにカメラ映像を観察することにより、まるでロボットが存在する場所にいるかのような高い臨場感を得ながら操縦が行えることが示されている[13]。障害物回避を伴う走行実験により効果を評価した結果、外部ディスプレイ観察時の走行条件と比較し、走行時間が半分以下に減少することが示されている。また、カメラ姿勢を頭部運動ではなく操舵入力に追従させる条件(図 3.2-05 中)や頭部固定条件(図 3.2-05 右)との比較の結果、いずれの条件よりも操舵入力と独立したカメラ姿勢を制御できる頭部追従条件(図 3.2-05 左)が優れていることが示されている。

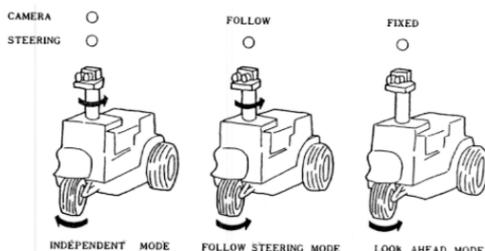


図 3.2-05 操舵と頭部運動の対応付け [13]

3.3 実験の構成

3.3.1 実験目的

本実験の目的は、遠隔操縦ロボットを用いた能動的な探索タスクにおいて、両眼立体視、体幹部の操縦方法、体幹部の自由度の寄与を明らかにすることである。前述の通り、遠隔操縦型ロボットを設計する際に、次の点を考慮することで、ロボットと操縦者が一体となったかのような高い臨場感を得ながら作業を行えることが示唆されている。

1. 両眼に対応するステレオカメラを用いた両眼視差の伝送
2. 操縦者とロボットとの頭部・体幹部運動を同期させた運動視差の伝送

従来の災害救助・危険物探索を目的とした遠隔操縦型ロボットは、伝送される映像は単眼カメラを用いた平面的なものや、またロボットに搭載されたカメラが首の運動を模した3自由度の回転軸のみに限定されるものが多い。特に、両眼視差、体幹部の運動が同期することで得られる運動視差の双方の特徴を満たすものは、実用化されていない。

そこで本実験では、両眼カメラを搭載し、体幹部を含めた能動的な探索行動が可能な遠隔操縦型ロボットを用いることで、ロボットを介して周りを見渡すなどの自在な能動的探索行動を実現し、その優位性を検証する。これにより、今後の災害救助・危険物探索用ロボットの開発に寄与する知見を得る。

つまり実験ロボットに求められる要件は次の通りまとめられる。まず、臨場感を得るために、自然な3次元空間を両眼視ができることである。さらに、操縦者の頭部運動に追従して外界の視覚情報が得られることである。特に本実験では6自由度頭部運動の効果に着目し、覗きこみ動作による探索範囲の拡張効果や運動視差による奥行き感度向上効果などに着目する。これらに加え、探索行動を実現するための運動性能を有することである。

3.3.2 実験装置

(1) 実験設備

実験設備は、遠隔操縦ロボット、操縦席、外部カメラから構成される。遠隔操縦ロボットは、体幹部自由度をもつ6自由度ロボットを中型全方位置動台車から構成される。コックピットは、頭部搭載型ディスプレイ(Head Mounted Display: HMD)、頭部姿勢計測装置、ジョイスティック、椅子から構成される。

図 3.3-01 に示した HMD は提示素子としてパネル 2 枚の LCD を持ち、解像度は 1024 × 768 pixel、水平視野角 46 度である。HMD は図 3.3-01 右に示すように、6 自由度頭部運動計測装置 ADL-1 に接続されており、操縦者の頭部運動と一対一対応を持つ視界をリアルタイムに提供する。



図 3.3-01 頭部搭載型ディスプレイ（左、中）・頭部運動計測装置（右）

遠隔操縦ロボットは前述の体幹部自由度をもつ 6 自由度ロボット[4] [5] および中型全方位置動台車から構成される。外観はおよび図 3.3-02 のとおりである。

6 自由度ロボットは、奥行き方向に歪みが生じない平行法を用い、人間の眼間距離に相当する 65mm 間隔で両眼カメラが設置されている。視野角は水平 46 度であり、視力換算で単眼 0.3 の解像度をもつ。

移動機構として、RoboPlus ひびきの株式会社製、中型全方位置動台車を用いている。モータ出力は 50 W を 4 機搭載しており、最高速度 0.5m/s、耐荷重 100kg、直径 585mm、高さ 206mm である。中型全方位置動台車の操縦はジョイスティックを用いて行う。



図 3.3-02 中型全方位置動台車（左）・遠隔操縦ロボット（右）

(2) 実験環境

全実験に共通して図 3.3-03 の環境を用いる。実験エリアとして 4×3m 程度の広さのエリアを用意し、そのうち、コックピットエリアとして 1×1m および遠隔操縦ロボットの走行エリアとして 3×3m を使用した。被験者の頭部運動は頭部姿勢計測装置で計測され、遠隔ロボットの頭部の位置は光学式モーションキャプチャシステムで計測した。視標として文字高 100mm の大型 7 セグ LED(豊電機株式会社製 A-100-UR)を利用する。また動作計測のために光学式モーションキャプチャシステム NaturalPoint, Optitrack S250e を用いた。また体験者が観察する一人称視点の映像やロボットおよび体験者の動作をビデオカメラで記録した。

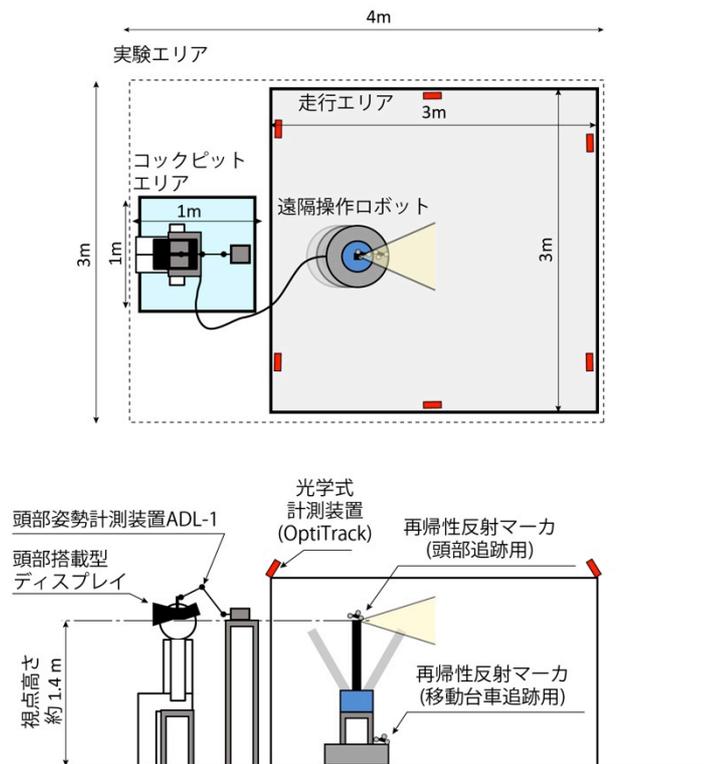


図 3.3-03 実験環境

3.4 両眼立体視効果と運動視差効果の比較

3.4.1 目的

遠隔操縦ロボットによる探索活動において、両眼立体視の寄与についてタスク達成度を用いて定量的に明らかにする。本実験の狙いは次の3つである。まず、遠隔操縦ロボットのカメラを単眼から両眼に変更した場合の奥行き認識効果の検証である。次に、頭部に運動自由度を付与した場合の単眼と両眼での奥行き認識効果の検証である。最後に、両眼カメラの片方が曇った場面の影響について検証する。

3.4.2 実験環境

実験環境を図 3.4-01 に示す。障害物の背景を統制するために、図 3.4-01 右上に示すように黒色パネルを設置した。単眼性手がかり (Monocular cue) を小さく抑えるために、基準指標は直径異なる 2 つの球を用いた。直径はそれぞれ 20mm、30mm であり、図 3.4-01 右下に示すように、テクスチャ手がかりとなる黒線を引いた。

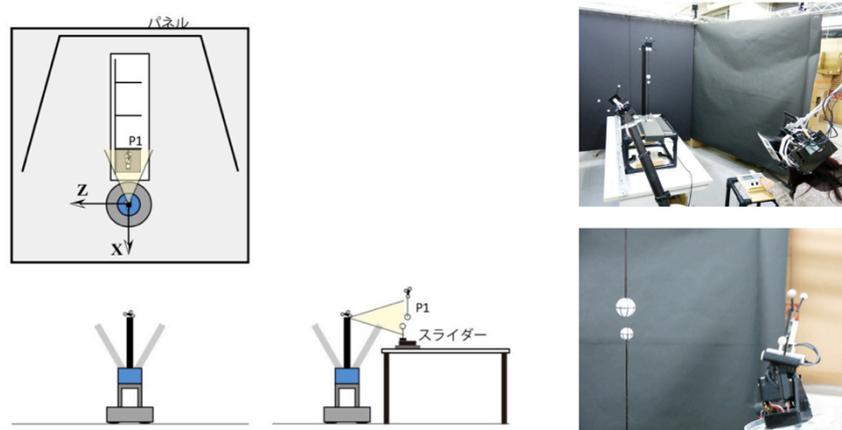


図 3.4-01 実験環境(両眼立体視効果と頭部運動による運動視差効果の比較実験)

(1) 実験条件

全方位移動台車は全条件を通して固定されている。予備実験の結果、単眼視において 3 自由度条件は 0 自由度条件と同等の結果が得られることがわかった。また理論的にも奥行き認識誤差の減少に寄与しないことから、本実験条件から 3 自由度条件を除外した。従って、本実験では、単眼・両眼の 2 条件と頭部運動自由度 0・6 自由度条件との総当りによる 4 条件で実験を行う。これに、頭部 6 自由度条件下において両眼視ではあるが片眼が不鮮明となる条件を加え、全 5 条件を設定した。

距離条件については、基準視標がロボットの頭部から 400mm、800mm、1200mm 前方の 3 条件とした。比較指標の初期位置は基準指標より前側と後側の 2 種類とし、試行において交互に実施する。調整において前後の微調整を許可する。映像提示・体幹自由度条件は被験者により順番を変更する。距離条件も被験者により順番を変更する。1 条件の試行は 6 回（前側 3 回、後側 3 回）とする。

被験者は 10 名（10 歳代～40 歳代、男性 6 名、女性 4 名）であり、眼間距離が平均 57mm、標準偏差 2.6 であった。

(2) 実験手順

ロボットの前方に宙吊りにされた基準視標と、1 自由度スライダーに乗せた比較視標を配置する。次に、被験者は HMD を被りロボットからみた映像を得る。このとき、被験者は調整法に従い、基準視標と比較指標が同じ奥行き位置となるようにスライダーの前後位置を調整する。その後、基準視標と比較視標の位置誤差を計測し評価する。

3.4.3 実験結果

実験結果を図 3.4-02 に示す。横軸は視距離を表しており縦軸は奥行き認識誤差を表している。プロット被験者の平均値を表し、エラーバーは標準偏差を示している。直線は最小二乗法による 1 次回帰直線を表す。

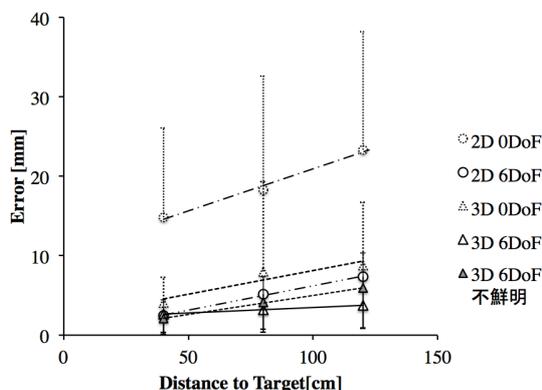


図 3.4-02 実験結果(両眼立体視効果と運動視差効果の比較)

(1) 0 自由度における単眼視・両眼視比較

0 自由度条件のみの実験結果を図 3.4-03 に示す。直線は最小二乗法による 1 次回帰直線を表す。2 要因(単眼・両眼視、視距離)被験者内分散分析を行ったところ、単眼・両眼視に主効果が認められた($F(1,9) = 36.44$, $**p < 0.01$)。視距離についても主効果が認められた($F(2,18) = 8.51$, $**p < 0.01$)。すなわち、両眼視差手がかりのない単眼視条件に対し両眼視条件の結果は、奥行き認識誤差が有意に小さいことを示している。これは両眼視差が手がかりとなり、奥行き認識誤差を減少させたと考えられる。

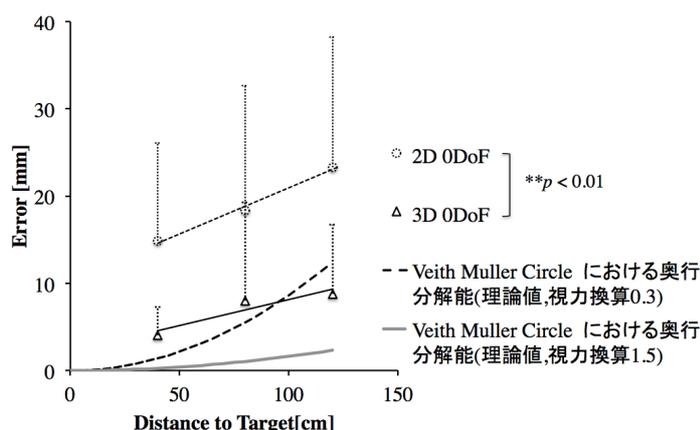
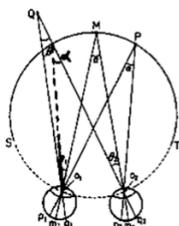


図 3.4-03 0 自由度における単眼視・両眼視比較

裸眼視力において奥行き認識誤差の理論限界値は、図 3.4-04 に示す Vieth-Müller Circle に基づいて導出できる。まず視距離 d_M である同円上点 M に対し視距離 d_Q をもつ注視点 Q を遠方に置くと、視距離の差 $\delta (= d_Q - d_M)$ を奥行き認識誤差とする。次に、これらの奥

行き異なる2点を注視した際の輻輳角 α および β の差 η を用いて、両眼視差の知覚閾が定義される。このとき $\delta \ll d_M$ ならば、図3.4-04に示す式が成立し、両眼視差の分解能を与える。ここで両眼視力3.0(単眼1.5)を持つとき、知覚閾 η が20秒程度となり、視距離 $d_M = 1\text{m}$ において $\delta = 1.6\text{mm}$ となることが知られている。同式において知覚閾 η を一定とみなすとき、奥行認識誤差 δ は視距離 d_M の2乗に比例して増加することがわかる。



$$\eta = \alpha - \beta \cong \frac{a}{d_M} - \frac{a}{d_Q} \cong \frac{a\delta}{d_M^2}$$

図 3.4-04 Vieth-Müller Circle

本実験で用いた提示系は、カメラの解像度水平768pixelおよび画角46度のため[5]、水平分解能3.6分/pixelとなり、この逆数を取り単眼視力0.3を得る。この視力において、視距離 $d_M = 1\text{m}$ における奥行認識誤差 δ は8.6mmに換算される。従って、各視距離 d_M において δ を求めると、奥行き認識誤差の理論限界値を示す曲線が得られ、図3.4-03中に太点線として示す。実験結果と理論値と比較した結果、頭部固定時の奥行き認識誤差は理論限界値に近い結果を示していることが分かる。

(2) 単眼視・両眼視における0DOF/6DOFの比較

実験結果を図3.4-05に抜粋する。直線は最小二乗法による1次回帰直線を表す。単眼視における頭部運動自由度の効果について、単眼視、両眼視それぞれについて2要因(頭部運動自由度、視距離)の被験者内分散分析を行った。その結果、単眼視において頭部運動自由度条件に主効果が $(F(1,9) = 108.05, **p < 0.01)$ 、視距離条件に主効果が認められた $(F(2,18) = 7.93, **p < 0.01)$ 。両眼視においては、頭部運動自由度条件に有意傾向が $(F(1,9) = 5.06, +p < 0.10)$ 、視距離条件に有意傾向が認められた $(F(2,18) = 3.25, +p < 0.10)$ 。

単眼・両眼において、頭部6自由度運動は奥行き認識誤差を減少させている。特に単眼視条件において効果的であることが分かる。

両眼視条件においては、奥行き認識誤差が図3.4-03に示した両眼立体視における理論限界よりも小さい値を示していることが分かる。視距離120cmにおいて頭部運動自由度が有意に効果的であった。これは、頭部6自由度条件における被験者の頭部運動を観察したところ、眼間距離65mmよりも大幅に大きな頭部運動が生じていることがわかった。すなわち、運動視差の等価視差[15]が眼間距離により得られる両眼視差を上回ったためと考えられる。従って、両眼立体視と運動視の併用が効果的であることが示された。

以上の結果は、前述した館らの結果[2]と同様の傾向を示している。

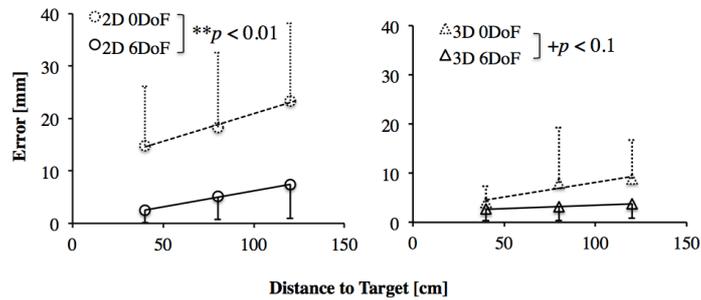


図 3.4-05 単眼・両眼視における頭部運動自由度 0/6 自由度条件

(3) 両眼視における片眼不鮮明条件

片眼不鮮明条件における結果を図 3.4-06 に示す。直線は最小二乗法による 1 次回帰直線を表す。同図は、頭部 6 自由度条件に片眼不鮮明条件を重畳してプロットされており、図 3.4-06 内の白抜き丸でしめした単眼視とほぼ同程度の成績が得られていることがわかる。これは、両眼視差を奥行きの手がかりとして利用することができなくなったためと考えられる。一方で、6 自由度の頭部運動自由度は確保されているため、運動視差を手がかりとした奥行き知覚が成立しているといえる。また片眼不鮮明条件であっても、奥行き知覚を著しく損なわせる結果ではないことがわかった。このことはすなわち、両眼カメラの一方の視界が汚れなどで不鮮明になったとしても、単眼視に相当する効果は維持されることを示している。つまり、遠隔操縦型ロボットの両眼カメラのどちらかを利用し続けることで、単眼視での探索行動を継続できるため、視覚伝送系として頑健性を持つといえる。

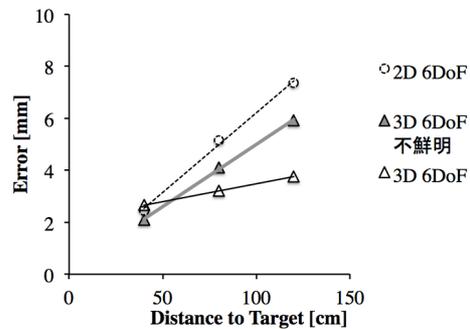


図 3.4-06 両眼視における片側不鮮明条件

3.4.4 考察

本節では、まず頭部固定時において、単眼視に対し両眼立体視は約 2 倍の精度で回答された。また両眼立体視の回答誤差量は、視力換算 0.3 の視覚伝送系において概ね理論限界に近い値を得ており、本実験ロボットの視覚伝送系が機能していることが確認できている。次に単眼視条件における頭部運動の効果については、頭部固定条件に対し 6 自由度条件において、約 4 倍の精度で回答された。最後に、両眼立体視条件における頭部運動の効果に

については、頭部固定条件と比較し 6 自由度条件において、約 2 倍の精度が得られることが示された。

片眼が不鮮明な条件で両眼視を行った場合は、単眼視と同等の結果となることがわかった。つまり、両眼カメラの一方の視界が不鮮明になっても、単眼視相当の性能を維持したまま探索行動を継続できる頑健性が得られることが示唆された。

3.5 コントローラとマスタスレーブの比較

3.5.1 目的

本節では、操縦形態の違いにおけるタスク達成時間を比較する。操縦形態として、ゲームパッドを用いたコントローラ条件と、操縦者の身体運動にロボット頭部運動を追従させたマスタスレーブ条件の 2 条件を設定する。

3.5.2 実験環境

実験環境を図 3.5-01 に示す。障害物を構築し、基準姿勢からは見えないように Q1～Q4 に視標を設置する。視標としては大型の 7 セグメント LED を使い、1 回の試行中に Q1～Q4 にランダムな数値を設定する。数値は試行毎に変更される。

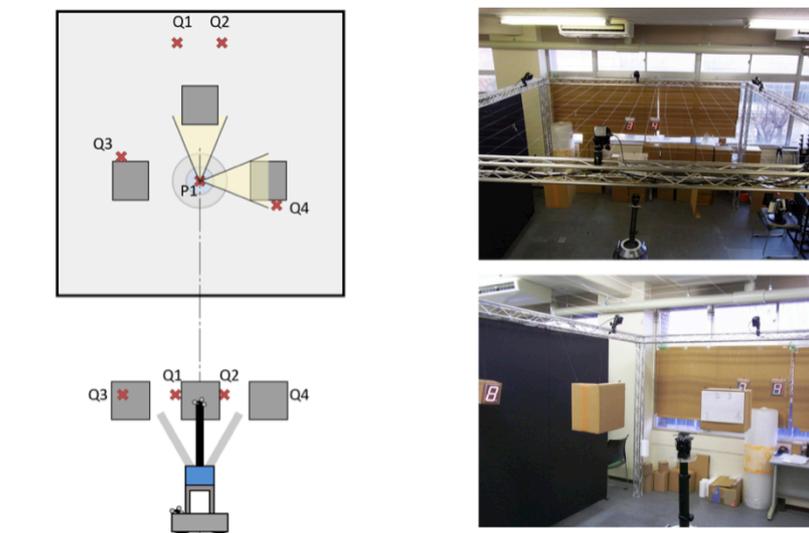


図 3.5-01 実験環境(探索時における体幹部自由度の比較実験)

(1) 実験条件

コントローラとマスタスレーブの両条件とも両眼視条件であり、体幹部は 6 自由度で制御される。被験者はコックピットエリアの椅子に座り、遠隔操縦ロボット上のステレオカメラの映像を HMD で観察した。このとき両眼にはそれぞれ独立に両眼カメラの映像が提

示され、被験者はコントローラを用いて遠隔操縦ロボットの動作を操縦できる。被験者には視標位置 Q1~Q4 を予め伝え、探索する視標の順番を試行直前に指示した。実験者は、各視標を発見したら実験者へ読み取った数字を報告するよう予め伝えた。コントローラ及びマスタスレーブの条件それぞれで、試行の直前に動作練習を行わせた。

(2) 実験手順

1 試行は、動作を開始してから最後の視標の数字を実験者へ伝えるまでの間とした。1名の被験者に対して2条件を1セットとして合計5セット実施した。各条件はランダムに与えられる。被験者は10名(20歳代~40歳代、男性6名女性4名)であり、眼間距離が平均56mm、標準偏差3.2であった。

3.5.3 実験結果

実験結果を図3.5-02に示す。横軸は試行番号であり、試行番号1は初回を示し右手方向に向かって試行が繰り返されたことを示している。縦軸は全指標を観察するまでに要した所要時間を示す。プロットは各条件における被験者10名分の所要時間の平均値であり、エラーバーは標準偏差を表す。

2 要因(操縦方式、試行番号)被験者内計画における分散分析の結果、操縦方式の違いが主効果を持ち($F(1,9)=15.67, p<0.01$)、マスタスレーブ条件はコントローラ条件に比べ所要時間が有意に短いことがわかった。またマスタスレーブ条件は、個人差による所要時間の分散が小さいことがわかった。また試行番号間の探索時間に有意差が認められなかった($F(4,36)=1.49, n.s.$)。このことから、学習効果は認められなかったといえる。

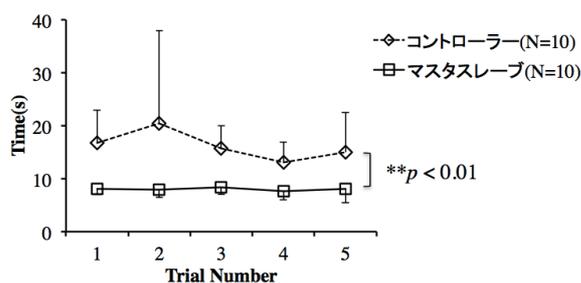


図 3.5-02 探索タスクの所要時間

次に、図3.5-03に代表的な頭部軌跡を示す。図3.5-03左・中は5試行目の被験者間の違いを示したものであるが、コントローラ操作に被験者間で顕著な習熟度差が見られた。マスタスレーブ条件においては、指標間の視線移動が素早く行えていることが伺える。

条件	コントローラ	コントローラ	マスタスレーブ
試行	5回目	5回目	5回目
時間	13.74 秒	8.37 秒(熟練者)	7.21 秒

図 3.5-03 頭部移動軌跡

3.5.4 考察

本実験の結果は、マスタスレーブ操作系を用いることで成立する自己投射性の効果を顕著に示している。すなわち、体性感覚との対応付けが成立するマスタスレーブ系において、視線方向は操縦者の頭部の位置と姿勢が即座にロボット側に反映されることで、操縦者にとって自然に周りを見渡す場合と同じ要領で周囲を観察することができたといえる。

3.6 探索実験

3.6.1 目的

本実験では、探索現場を想定した模擬環境内での遠隔操作ロボットの走行実験を行い、頭部運動自由度の効果を明らかにする。そこで頭部運動自由度条件として3自由度と6自由度条件の被験者間比較を行う。まず同一環境内で複数回の走行実験を行い、タスク達成度の推移から習熟過程を両条件において観察する。次に環境を変え、習熟効果を明らかにする。

(1) 実験環境

探索環境を図 3.6-01 および図 3.6-06 に示す。探索環境内に3つの指標を配置したが、これらは障害物を避けることで視認できる位置に設置されている。障害物として、視線高さ付近に白色円筒を天井から吊り下げた。

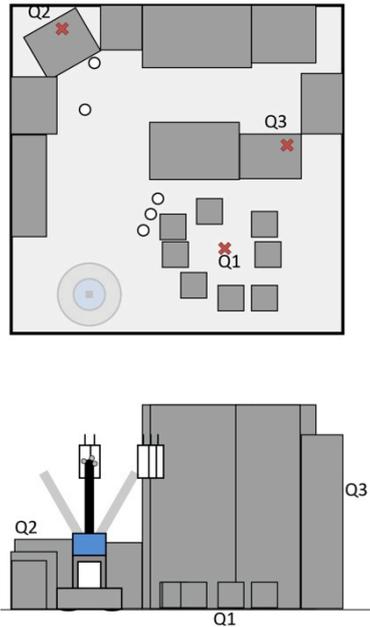


図 3.6-01 実験環境(探索実験)

(2) 実験条件

体幹部の自由度条件として3自由度と6自由度との2条件において被験者間比較を行う。両条件とも両眼視を行う。3自由度条件(図 3.6-02 左)においては、腰に相当する $\{R_1R_2T_3\}$ を固定し、首に相当する回転3自由度のみを利用し、被験者の頭部姿勢のみをリアルタイムに再現する。6自由度条件(図 3.6-02 右)においては、腰・首の全6自由度(回転5自由度、並進1自由度)を利用し、被験者の頭部姿勢に加えて位置をリアルタイムに再現する。



図 3.6-02 両眼・頭部3自由度(左)／両眼・頭部6自由度(右)

(3) 実験手順

事前準備として、試行直前に実験者は被験者に視標のおおよその位置を伝える。ただし、環境に関する事前知識は与えない。その後、被験者はHMDを被りジョイスティックと体幹自由度を利用して環境内にある視標を探す。このとき実験者は、被験者がスタートした時点から数字の表示されている視標3箇所全てを発見するまでの時間を計測する。障害物との衝突が生じた場合、実験者は被験者にその旨を伝え、被験者自身で修正行動を取るよう促す。

指標の数字は試行中に維持される。施行毎に視標の数字のみ変更するが、環境中にある

障害物や指標の配置は変更しない。



図 3.6-03 回り込み動作を用いた探索行動

3.6.2 同一環境下での検証

まず全 5 試行を同一環境下で実施し、体幹部の自由度条件である 3 自由度と 6 自由度との 2 条件において被験者間比較を行った。被験者一人あたり、試行数は 5 回とした。被験者数は 10 名（20 歳代～40 歳代、男性 6 名女性 4 名）であった。

(1) 結果

まず頭部軌跡の中から、代表的なものを図 3.6-04 に示す。これらは同一被験者の結果を示しており、実験条件の中でも最長、最短の所要時間を示した顕著な代表結果である。図 3.6-04 左に示した頭部軌跡から、何度も前進後退を繰り返したことが観察される。これは主に指標の位置を発見するまでに要した時間が長い事を示している。また衝突のために環境内に設置した障害物内に軌跡が重畳されている。一方で、図 3.6-04 右に示した軌跡からは、前後移動回数が極めて減少しており、探索動作が簡素化したことがわかる。また衝突していないため、頭部軌跡も障害物に重ならない。

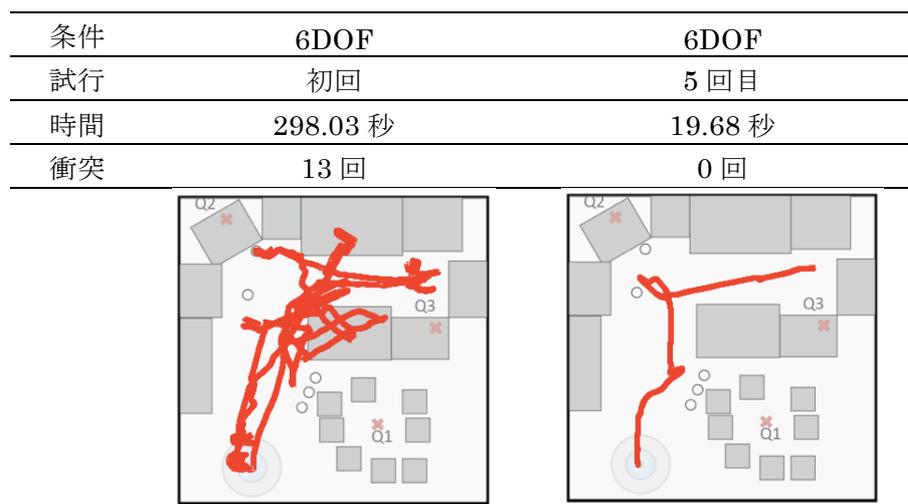


図 3.6-04 頭部移動軌跡

また、図 3.6-05 に探索所要時間及び衝突回数を示す。横軸は試行番号を表しており、試行番号 1 はすなわち初回を表す。縦軸は指標を全て見つけ出すために要した所要時間もしくは衝突回数を表している。プロットは各条件における被験者 5 名の平均値を表しており、エラーバーは標準偏差を示す。図中凡例の 3DOF は 3 自由度条件、6DOF は 6 自由度条件をそれぞれ表している。

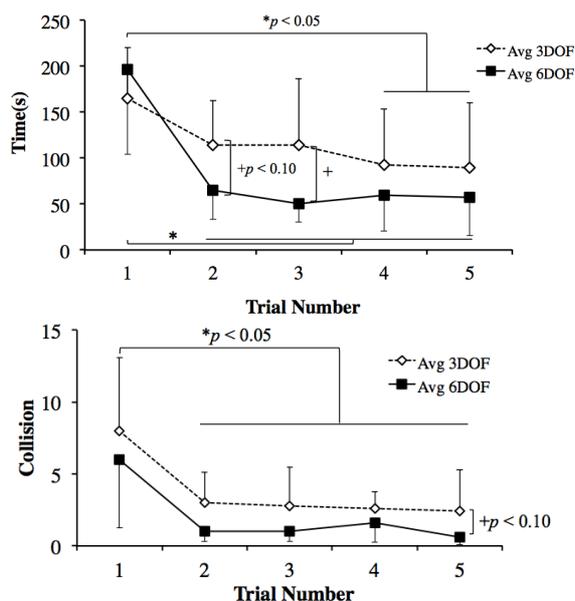


図 3.6-05 探索所要時間 / 衝突回数

2 要因(自由度条件、試行番号)被験者間計画における分散分析の結果、所要時間・試行回数の中で交互作用が認められた(+ $p < 0.1$)。試行開始から 2、3 回目において所要時間の差に有意傾向(+ $p < 0.10$)が認められた。コントローラ条件では試行番号 1 が 4、5 よりも有意に長いことがわかった(* $p < 0.05$)。

また、マスタスレーブ条件では試行番号 1 が他の試行よりも有意に所要時間が長いことがわかった(* $p < 0.05$)。衝突回数については、操作条件(+ $p < 0.10$)および試行回数(** $p < 0.01$)ともに主効果が認められた。多重比較の結果、衝突回数は試行番号 1 が他の試行番号よりも有意に衝突回数が多いことがわかった(* $p < 0.05$)。

試行を重ねる毎に所要時間が短縮し、また衝突回数が減少した。

(2) 考察

まず、頭部運動の自由度条件にかかわらず、いずれの条件においても学習効果が得られている。要因としては頭部 6 自由度運動への慣れと移動台車の操縦への慣れの 2 つが考えられる。前者については、第 3.5 節の結果が示す通り、頭部 6 自由度運動を用いたマスタスレーブ環境では学習効果は観察されなかった。このことから、本実験結果が示す学習効

果は移動台車の操縦への慣れが支配的であると考えられる。

まず一度も走行経験がない条件である初回試行時において、6自由度に対し3自由度では所要時間が約10%増加するものの、衝突回数が約25%程度低いことがわかった。所要時間については、統計的有意差が認められていないため、誤差の範囲内であるといえる。衝突回数の低さについては、操縦者の頭部運動の並進成分が遠隔操縦ロボット側でも反映されることで覗きこみ動作が実現されているため、より広範囲を探索可能であるためと考えられる。

次に、第2試行以降の結果について着目すると、頭部3自由度に対し6自由度の学習曲線が有意に急であることが分かる。特に第2、第3試行において両条件の差が顕著に観察されており、6自由度条件において所要時間が35～55%減少、衝突回数が35～75%減少するという結果を得ている。これはレイグジスタンスにおける自己投射性の観点から理解することができる。すなわち、頭部3自由度条件においては、操縦者の並進運動は無視され、姿勢のみが遠隔操縦ロボット側に反映される。従って、操縦者の頭部並進運動と視界変動との間に齟齬が生じうる。

一方で、頭部6自由度条件においては、操縦者の頭部並進運動と視界との対応関係も成立するため、操縦者の体性感覚情報と視界との間に齟齬を生じない。このことから、3自由度条件と比較し6自由度条件はより高い自己投射性を持つと考えられ、結果的に外界と自己との相対姿勢をより正しく得ることができたといえる。そしてこの差が探索所要時間の差、すなわち学習進度の差となって現れたといえる。これは6自由度条件において、個人によらず衝突回数が低く抑えられているという事実、ならびに、6自由度条件において第2試行以降の成績がほぼ一定で変化がないという事実からも支持される。つまり、3自由度条件において学習進度がより緩やかであったのは、操縦者の自己運動と視界との空間整合性が低かったためであると考えられる。

これらのことから、移動台車の操縦により早く慣れるためには、操縦者の体性感覚と視界との齟齬がより小さい6自由度頭部運動を再現することが効果的であるといえる。

3.6.3 走行環境変動時の習熟度維持効果

一度獲得した操縦系の慣れが新しい環境での探索行動においても維持されるのかを明らかにするために、追加実験を行った。そこで実験で用いた環境とは異なる環境を新たに構築し、同一被験者に対し1試行を追加で実施した際のタスク遂行時間を評価した。環境は図3.6-06のとおりに変更された。被験者数は計4名であり、3自由度条件においては20歳代の男女2名、6自由度条件においては10歳代の男性1名および20歳代の女性1名であった。いずれの被験者も第3.6.2節の実験に参加しており、5試行の操縦経験を有する。被験者毎の頭部自由度条件の割り当ては、第3.6.2節と同一とした。すなわち被験者にとって、環境は変化するが頭部運動自由度条件は維持される条件で実験を行った。



図 3.6-06 走行環境の変更（右：変更前、左：変更後）

(1) 結果

実験結果を図 3.6-07 に示す。横軸は横軸は試行番号を表しており、環境変更後の結果を同実験に参加した被験者のみを抜粋しその上にプロットした。図中凡例の 3DOF は 3 自由度条件、6DOF は 6 自由度条件を表しており、各条件において被験者 2 名ずつの平均値を表している。エラーバーは標準偏差を表す。

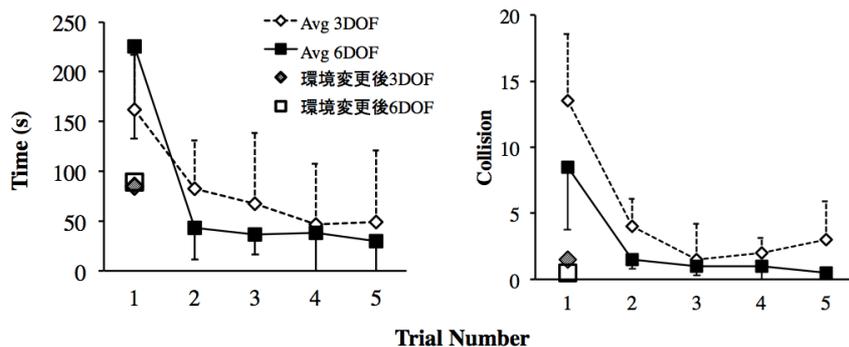


図 3.6-07 環境変更時の効果

(2) 考察

3 自由度条件と比較し、6 自由度条件が優れた結果を示している。これは、6 自由度の頭部運動を実現することで頭部運動と視覚との一対一の関係が維持され、自己投射性が成立したためと考えられる。習熟速度についても、6 自由度条件の方が優れているだけでなく、習熟度が同程度に維持されている。つまり、本実験ロボットの操縦は、操作を覚えるものではなく、体性感覚情報を手がかりとした自己投射によって成立していることを示している。

(3) まとめ

奥行き認識タスク実験の結果、立体視は平面視よりも奥行き認識精度が高いことが示された。また体幹 6 自由度は平面視・立体視に関係なく奥行き認識精度を向上させることがわかった。さらに、片目が不鮮明となっても平面視よりも認識精度が低下することはない

ことがわかった。次に、探索タスク実験の結果、コントローラに対してマスタスレーブ方式はタスク遂行速度が早く、個人間の分散も小さいことがわかった。最後に、探索実験の結果、体幹部の自由度が3自由度よりも6自由度は習熟速度が早く、個人間ばらつきも小さいことが示された。また新規の走行環境に対し、習熟度が維持されることが明らかになった。

以上のことから、立体視は平面視よりも奥行き認識精度が高く有効であること、さらに、体幹6自由度による運動視差は奥行き認識精度を向上させることが実験ロボットにおいても示された。また、頭部3自由度のみの条件と比較し、体幹部6自由度を利用することで操縦の習熟速度が向上することが分かった。

3.7 ユーザテスト

3.7.1 実験目的

有識者・現場担当者による体幹6自由度をもつ遠隔操作ロボットの主観的評価を行った。特に、無人化施工システムの操縦経験を持つ現場担当者から、据え置き型ディスプレイと比較した際の主観的な体験の違いについてヒアリングすることを目的としている。論点は主に、両眼立体視と体幹部を含む頭部運動による運動視差とを同時に得られる効果についてである。後日、主観的印象をまとめ、本節に掲載した。

体感実験の開催概要は下記のとおりであった。また体感実験の様子を図3.7-01に示す。

1. 日 時： 2013年2月5日(火) 10:00~12:00 / 15:00-16:00

2. 場 所： 慶應義塾大学 協生館6階大会議室

3. 出 席：

(委員) 神田 真司 (株式会社富士通研究所)

栗生 暢雄 (株式会社大林組)

森口 拓雄 (総合警備保障株式会社)

(オブザーバ) 上條 宏明 (株式会社大林組)

清板 直純 (株式会社大林組)

川口 恭輔 (株式会社深沢工務所)

藤中 裕幸 (株式会社深沢工務所)

(委託調査機関) 舘 暲 (慶應義塾大学)

南澤 孝太 (慶應義塾大学)

古川 正紘 (慶應義塾大学)

MHD Yamen Saraiji (慶應義塾大学)

(事務局) 村田 雅俊 (一般財団法人デジタルコンテンツ協会)



図 3.7-01 ユーザテスト実施状況

3.7.2 体験の流れ

現場経験者および本事業の委員が、2回以上遠隔操縦型ロボットの操縦した。現場環境を模擬的に再現した走行エリアを予め用意した。体験者はHMDを装着することで遠隔操縦型ロボットの視野を得られる。この時、前述のとおり体験者の頭部運動は直ちに遠隔操縦型ロボットに反映される。また操縦席に設置された操縦桿を用い、全方位移動台車を操縦できる。体験時間は1名あたり1回およそ5分程度であり、希望に応じ複数回の体験を行なっている。

3.7.3 行動観察

(1) 結果

代表的な体験者を選定し行動観察を行った結果のなかから一例を以下に示す。

表 3.7-01 体験者 A(初回)

時間	キャプチャ	観察結果
0'00"		(A1-1) HMD を装着する
0'09"		(A1-2) 実験者から指標がフィールド上に4つ存在する旨の説明が行われる

0'25"



(A1-3) 遠隔操縦ロボットと操縦者とを接続する（図左のロボットが立ち上がる）

0'29"



(A1-4) 操縦者は左手で HMD を支えながら左右を見渡す。



0'39"



(A1-5) 操縦者は左手で HMD を支えながらロール軸方向に首を傾ける。



0'47"



(A1-6) 操縦桿の操作方法について再度説明を行う。操縦者は顔面を正面に向けたまま向けたまま、操縦桿を前に倒す。遠隔操縦ロボットは前進する。7秒後停止。

0'56"



(A1-7) 操縦者は顔面を正面に向けたまま向けたまま、操縦桿を左に倒す。遠隔操縦ロボットは左に向かって走行する。走行方向を視認するよう指示を受けると、操縦者が操縦桿をニュートラルに戻し一旦停止する。

1'11"



(A1-8) 右に90度旋回直後、操縦者は顔面を正面に向け前方を確認しながら、操縦桿を前に倒す。遠隔操縦ロボットは正面に向かって走行する。指標を発見した後、車体前方が障害物に接触し数cm前進した時点で停止する。その後、頭部を大きく動かし足元を注視する。



1'16"



(A1-9) 旋回することなく後退する。6秒後に実験者が「後ろは(道が)そこまで」という合図を行い、体験者は後退を停止。

1'22"		(A1-10) 前方および左右を見渡す。
1'57"		(A1-11) 再度前進する。指標を再度発見する。その後、体験を終了する。

表 3.7-02 体験者 B(初回)

時間	キャプチャ	観察結果
0'00"		(B1-1) HMD を装着した後、実験ロボットと体験者を接続する。
0'09"		(B1-2) 実験者から周りを見渡すよう案内を受け、左右および足元を見渡す。

0'19



(B1-3) 実験者から、左を見るように案内を受け左を向く。体験者は自分の姿を後ろから見る。

0'24"



(B1-4) 操縦開始。操縦方法について説明を受けた後、走行開始。体験者は右下を見ながら走行する。ロボットは正面を見たまま、前進する。一旦走行停止し、再度前進する。

1'19"



(B1-5) 操縦桿を右に倒し、右に走行。

1'24"



(B1-6) 「そちらに行かないように」と指示を受け、即停止。その後、周囲を見渡す。

1'30"



(B1-7) 実験者が走行方向について質問がある。実験者は操縦方法である「前に倒せば前に進む」旨を再度説明する。実験者は実験ロボットのパン軸のズレを発見する。一旦ロボットを停止し、校正を行う。

2'42"



(B1-8) 再度体験者とロボットを接続する。体験者ロボット共に正面を向いたまま前進。

2'44"



(B1-9) 体験者は見回した後、左下側を視認。足元を注視しながら前進の後、停止。再度左下を視認。その後、左に10度程度旋回。

3'02"



(B1-10) 右手方向に並進移動の後。直ぐ停止。前進後停止

3'09



(B1-11) 左に旋回し、足元を視認。周囲を見渡確認。

3'24"



(B1-12) 足元注視しながら前進。

3'30"



(B1-13) 前方に伸び上がる。移動台車を停止させたまま、頭部を右手方向に並進移動させる。体験者は「缶が見えました」と発言。

3'40"



(B1-14) 左に 180 度旋回。実験者は走行開始地点に戻ることができる旨を口頭で案内。その後、前進。

4'01"



(B1-15) 右に 45 度旋回。

4'19"



(B1-16) 初期位置に帰還。

3.7.4 体験コメント

当日のユーザテストを基に、各委員のコメントを取りまとめた。ソニーPCL 大場氏は別日程にて実施した、頭部 6 自由度のみを用いた体験に基づくコメントを掲載する。

(1) 株式会社富士通研究所 神田 真司 氏

本テストで使用した HMD システム（HMD：頭部位置姿勢検出器）を装着した時、特に、立体感が増すような感じはなく、自然な感じで周囲を見回すことができた。姿勢変化と視野変化の連動性がよく、体の傾きに対してレスポンスよく、遠隔側の視野も変化し、通常のディスプレイで見たような違和感がなかった。HMD システムと操作用レバーでロボットを遠隔移動させて、物陰に隠れている対象物を探索したが、かなり早くロボット操作を習熟できた。対象物を探索するときは、いかにも自分自身で探索しているように姿勢を変化させ、視野を移動させることができたので探索が容易であった。また、本 HMD システムを使用した後、眼の疲れなどは感じず、通常の 3D 映像を見たときに比較して楽な感じであった。

今後、このような HMD システムを実用化するうえでの課題としては、①視野角が向上、②画面解像度の向上が、まず必要である。また、かなり早く操作を習熟できたが、身体とロボットとの大きさの関係性が判りにくい、足元の状況が判りにくいといった課題がある。これらの対応として、例えば、状況によってロボット側のカメラ位置を高くして俯瞰したような画像を提示し、ロボットの周囲を簡単に見回せるようにすると操作が容易になると考える。さらに、実現場の場合、常に滑らかな路面の状態ではなく、また、ロボット自体も傾く場合があるので、リアルタイムでロボットの姿勢等を体性感覚にフィードバックできると、ロボットの操作性、安全性を向上させると考える。実際の災害現場等に適用する場合、本システムは、リアルタイム性が重要であるので、画像伝送などの通信に対する課題もあり、検討が必要である。

テストを通し、本 HMD システムのように遠隔側の映像を自然に 3 次元提示する方法、さらに、操作者の姿勢変化に連動させてロボット視点をリアルタイムに変化させることで

得る運動視差による立体感提示法が、ロボットの操作性向上に有効であることが判った。

(2) 株式会社大林組 栗生 暢雄 氏

建設業界における機械の遠隔操作作業は、災害復旧初期段階の土砂掘削、地中大深度高気圧化での地山掘削、長大急斜面での地山掘削等である。機械は建機と呼ばれ、最も汎用的な油圧ショベルを用いて作業する。

これまでの遠隔操作での問題点は、複数設置したカメラから送られる映像は 2D 映像であり作業に慣れる必要があった。また、短時間であるが人間が危険を冒してカメラを設置する必要があった。この問題を解決するべく弊社は昨年度、3D 映像を用いた無線伝送システムの実験を実施している。3D 映像についてはいくらかの知識があり、実験結果も 2D 映像に比較して良好な結果を得ていた。今回、初めて立体視を体験することにより、さらにオペレーターが必要とする画像データを感覚として取込む事ができると感じている。オペレータヒアリングも、TORSO を建機運転席に搭載し、HMD を使用することで、通常のオペレーターが運転席で直接運転する作業と比較して、作業効率の低下は小さくて済むのではないかと意見であった。ただ、カメラの視野が狭く、位置関係をつかみにくいことが問題との意見もあり、全体を俯瞰できる位置に、さらにカメラを設置し切り替えることで対応できるのではないかと考える。

立体視を使用した「のぞき込み」は、遠隔操作におけるオペレーターの感覚を現実に近い付けている。オペレーターは遠隔操作に短時間で慣れることができ、また、危険を冒してカメラ設置しなくても、作業に着手できる方向性が見えてきたのではないかと考える。

(3) 総合警備保障株式会社 森口 拓雄 氏

本システムでの立体視は、実際に自身の目で見ている感覚に非常に近く、観察対象との距離の把握、周囲環境の把握に関して、違和感を生じなかった。特に近距離での周囲環境把握に関しては、両眼視差による立体視以上に、首・上半身の動きと連動することで実現された運動視差による立体視が、効果的であると感じた。このことは、今後、アーム等の作業が付随するシステムが構築された際は、作業効率向上に大きく貢献すると考える。

反面、視覚の全てがロボット視点となることにより、操作者自身の正対姿勢がつかみにくい。そのため、今回のシステムの移動操作方法（ジョイスティックによる操作）がうまくいかないことがあった。また、ロボットの操作を考えると、現状の視界では、ロボットの姿が見えず、車体感覚がつかみにくいため、もっと視界が広ければと思う。

総じて、環境認識手段としての本システムは優れたものと考え。今後は、利用の用途に応じた周辺システム（コクピット等）の向上を期待する。

(4) ソニー PCL 株式会社 大場 省介 氏

普段、制作者の意図で切り取られ並び替えられた映像を、固定したモニタで見る事に慣らされているので、このロボットの「目」は新鮮な驚きであった。体感当初は、大掛かりな HMD が装着されている意識が強かった。

しかし、自分の頭部と精緻に連動するロボットの両目を通して撮影された空間が、現実で自分の両目で知覚している空間と区別できなくなるまで、僅かな時間しか要さなかった。次第に HMD を装着している事を忘れてしまうほどである。

又、頭部の動きによる視覚情報の拡大については理解していたものの、腰の関節の動きがこれほど効果的であるとは思ってもよらなかった。

今後、遠隔操作ロボットの作業範囲拡大や精度向上を目指す際、その「目」の解像度や視野といった性能指標は勿論重要であるが、ロボットの「目」自体が本事業の様に多関節で回旋出来る事が、総合的な視覚能力の向上につながり、結果的に遠隔操作ロボットの能力拡大に最も寄与するのではないかという印象を強く持った。

3.7.5 考察

(1) 自己投射性

走行開始前に、遠隔操縦型ロボットを介して周囲を見渡すという体験は、自己投射性を確保する上で有効であった。このとき、頭部の 6 自由度を生かして、左右だけでなく上下も広く見渡すことで、自然な奥行き感覚が得られたとの回答を得ている。このことから、両眼立体視機能による空間把握が成立していると考えられる。さらに、頭部運動を生かした能動的な運動視差を体験することで、従来のパン・チルト・ロー軸を有する遠隔操縦型ロボットと比較し、自然に周囲を見渡すことができるとの回答を得ている。この過程で、自分自身を遠隔操縦ロボット越しに眺めるよう促したが、その結果、ロボットの位置に自分の存在を感じられるとの回答を得た。すなわち、臨場感、実時間相互作用性、自己投射性が成立しており、トレイグジスタンス体験が成立したことが確認できた。

(2) 頭部運動自由度

走行開始後には、衝突することも少なくなかった。しかし、これは走行初回時に多く見られた一方で、2 回目以降には衝突が起きることは稀であった。走行中に左右を見渡しながら走行することで、壁面との距離感を得ながら、衝突を回避しつつ指標の探索行動が行えていることが確認できた。逆に、車体を旋回させることにより左右を観察する被験者も稀に見られた。しかし、一度左右を見回す効果を実感した後は、車体の旋回よりも頭部の

旋回の方が有効であることに気づき、頭部の旋回だけでなく覗きこみ動作も含めて積極的に頭部運動を用いて探索行動を行っていた。

(3) 頭部と移動台車との相対姿勢

また、一旦左右を見渡してしまうと、走行しながらどちらが車体の正面であるかがわからなくなる、という意見も報告された。これは、いわゆる空間失調に相当し、体幹部と頭部との相対姿勢が体性感覚によって補われていないことが原因であると考えられる。これは、頭部が操縦者の頭部運動に実効的に等価に追従する一方で、移動台車はジョイスティックにより姿勢及び走行速度が制御されるため、何ら体性感覚と一対一の対応関係を持たないことに起因する。すなわち、遠隔操縦型ロボットへの頭部の自己投射は成立しているが、体幹部の自己投射が不足していたために、車体正面の向きがわからなくなったといえる。このことは、既に 1985 年に発見され、視野内に自分の体幹部を表示することで解決することが分かっている[14]。今回は実装が間に合わず体験に際して同様の現象を起こすことになったが、この場合、車体から視野に向かって見えるように垂直に棒を立て、頭部と体幹部すなわち移動台車との相対姿勢を視覚的に補うことで解決できる。

(4) 視野の狭さ・頭部可動域

走行開始後の主なコメントに、視野の狭さが挙げられた。特に足元が見えないという意見が多数であった。これは、頭部搭載型ディスプレイの視野を拡大することでも解決可能であるが、解像度とのトレードオフを考慮する必要がある。もしくは 6 自由度頭部の可動域を拡大することにより解決可能である。

一方で、視野の狭さは気にならないという意見も得られた。これは、無人化施工システムを日々利用する現場担当者からの意見である。具体的には、視野の狭さよりも、周りを自由に見渡せることの効果は極めて高く、現場への導入を強く望む、という意見であった。これは 6 自由度の頭部運動による見渡し範囲が広く、効果的であったことを端的に示している。それだけでなく、探索行動における運動視差による空間認識効果が、両眼立体視効果に加えてさらなる臨場感を与えていることを明確に示している。

(5) 運用上の課題

他の観点からの意見としては、頭部搭載型ディスプレイを装着した後に手元が見えなくなるため、手元のジョイスティックなどを把持するまでが難しいとの報告があった。これはビデオシーズル型 HMD を用いることで解決ができると考えられる。

3.8 まとめ

本章では、災害現場で探索作業を担う遠隔操縦型ロボットの操作性において、立体視機能の効果を実験的に明らかにした。そこで、本章を実用化に向けた課題を明らかにする前段階と位置づけ、遠隔操縦型ロボットへの立体視適用の可能性について検証することを目的とした基礎実験を行った。

本章の動機は両眼立体視機能の適用可能性を明らかにすることである。そこで本章では、基礎実験として次の3項目について実験的に検証し、さらにユーザテストとして本事業の委員並びに現場担当者を対象とし、実験ロボット体験時の主観的な回答を集めた。

まず、奥行き知覚における両眼立体視と運動視差との精度の比較を行った。次に、操縦方式の違いを明らかにするために、頭部追従を前提としたマスタスレーブ方式とコントロールパッドとの比較を行った。さらに模擬探索現場を用いた探索実験を通して、従来の3自由度に対する6自由度頭部運動の効果を検証したことに加え、新規探索現場における習熟の維持程度を明らかにした。ユーザテストは、両眼立体視、6自由度頭部運動、移動機能の全てを有する実験ロボットを用い、探索空間を模擬した実験場での走行実験を行った。

3.8.1 両眼立体視と同程度に効果的な単眼運動視

単眼・両眼視および運動視比較実験の結果、単眼視と比較し両眼視の奥行き回答精度が高だけでなく、6自由度頭部運動が単眼視であったとしても両眼視に相当する奥行き知覚が可能であることが示された。これは運動視差が両眼立体視と同程度に効果的であることを示している。これらの条件の相互作用についてまとめると、両眼立体視かつ6自由度頭部運動条件が最も効果的であった。単眼視6自由度条件は両眼立体視頭部固定条件と同程度の効果を得ているが、今回の実験条件の範囲内においては、両眼立体視よりも運動視差の効果がやや支配的と解釈できる結果を得ている。更に行った実験からは、両眼カメラの一方の視界が不鮮明になっても、単眼視相当の性能を維持したまま探索行動を継続できる頑健性が得られることが示唆された。

3.8.2 上体運動追従の効果

操作系の比較を行った結果、コントロールパッドに対し、マスタスレーブ構成は明らかに効果的であることが示された。実験ロボットの移動を伴わない第二実験において、習熟効果が得られなかったことから、マスタスレーブ構成をとることにより練習が不要で即座にコントロールパッドよりも優れた効果を発揮することが示された。

3.8.3 習熟効果の維持される 6 自由度頭部運動

探索実験の結果、実験場に配置された指標発見までの所要時間を評価尺度としたとき、従来の遠隔操縦型ロボットに採用されている 3 自由度と比較し、6 自由度の頭部運動は有意に効果的であることが示された。実験ロボットの移動を伴う第三実験において習熟効果が確認されたが、6 自由度条件の方がより早く習熟できることが分かった。特筆すべきは、6 自由度の頭部運動の習熟度は、新たな実験上に実験ロボットを投入したとしても維持されることが示唆された点である。これは実験ロボットへの自己投射性が維持されたことを示しており、トレイグジスタンスの概念に基づいた設計が効果的であることを示している。

3.8.4 ユーザテスト

本事業委員及び現場経験者によるユーザテストの結果、自然な距離考えられる両眼立体視が行え、6 自由度の頭部運動は探索範囲を広げるための見回し動作を行う際に有効であるだけでなく、運動視差を得るために効果的であることが確認された。課題としては、視野の狭さと頭部と本体との相対姿勢の可視化であるが、いずれも既に得られている知見にもとづき、解決できるものである。

以上のことから、遠隔操縦型ロボットにおける両眼立体および運動視差による立体視機能、ならびに 6 自由度頭部運動により実現される自在な見回し動作の有効性が示された。

[参考文献]

- [1] 舘暲, 阿部稔. 1980. “レイグジスタンスの研究 第1報 -視覚ディスプレイの設計-”, 第21回 SICE 学術講演会, p. 167-168.
- [2] 舘暲, 安田賢一, レイグジスタンスマニピュレーションシステムの設計と評価, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), 115 巻, 2 号, 1995, 172-181
- [3] 舘暲, 荒井裕彦. 1989. “レイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価.” 日本ロボット学会誌 7(4): 314-326.
- [4] Kouichi Watanabe, Ichiro Kawabuchi, Naoki Kawakami, Taro Maeda and Susumu Tachi: TORSO -Completion of Egocentric Telegnosis System-, 34th Int. Conf. On Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2007), Emerging Technologies, San Diego, USA (2007.8)
- [5] Watanabe, Kouichi, Ichiro Kawabuchi, Naoki Kawakami, Taro Maeda, and Susumu Tachi. 2008. “TORSO: Development of a Telexistence Visual System Using a 6-d.o.f. Robot Head.” *Advanced Robotics* 22(10): 1053-1073. (February 24, 2013).
- [6] 前田太郎, 荒井裕彦, 舘暲. 1992. “頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価.” 日本ロボット学会誌 5(10): 655-665.
- [7] 長田昌次郎. 1977. “視覚の奥行距離情報とその奥行感度.” *テレビジョン* 8(31): 649-655.
- [8] Rogers, Brian, and Maureen Graham. “SIMILARITIES BETWEEN MOTION IN HUMAN DEPTH PARALLAX AND PERCEPTION.”
- [9] 安田稔. 1979. “立体視と大きさの恒常性.” *テレビジョン学会誌* 33(12): 972-977.
- [10] 大山正 (編集), 今井省吾 (編集), 和気典二 (編集), 1994. “新編 感覚・知覚心理学ハンドブック”, 誠信書房, 775-776,
- [11] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya and M. Kaneko: Tele-existence (I) :Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence, Proceedings of RoManSy'84 The Fifth CISM-IFTToMM Symposium, pp. 245-254, Udine, Italy (1984.6)
- [12] Tachi, Susumu, and Ken-ichi Yasuda. 1994. “Evaluation Experiments of a Telexistence Manipulation System.” *Presence* 3(1): 35-44.
- [13] S. Tachi, H. Arai, I. Morimoto and G. Seet: Feasibility Experiments on a Mobile Tele-existence System, Proceedings of The International Symposium and Exposition on Robots, pp. 625-636, Sydney, Australia
- [14] Rogers, B, and M Graham. 1979. “Motion parallax as an independent cue for depth perception.” *Perception* 8(2): 125-34.
- [15] 齋田真也. 1988. “運動視差が奥行き知覚に果たす役割.” *光学* 17(11): 565-571

第4章 まとめ

4.1 立体視機能を搭載した遠隔操縦型ロボットの特徴

本調査補助事業では、遠隔操縦型救助ロボットの探索作業効率を向上させるために、操縦者の目となる映像入出力システムに、3次元空間把握に欠かせない立体視機能を適用することで、遠隔操縦作業での有効性と適用可能な範囲を見出すことを目的としている。

これまでの遠隔操縦型ロボットの映像入出力システムは、単眼カメラによる2D映像観視システムが主で、2台のカメラを併置した3D(2眼式)カメラを搭載したタイプも見られるが、操縦者が要求する観視探索動作を反映したシステムには達せず、作業上の熟達度が要求され、作業負荷をもたらしているのが現状である。

この現状を解決するために、本報告実験では、トレイグジスタンスの概念を導入し、操縦者の空間立体視と探索動作を反映した立体視機能搭載遠隔操縦型ロボットを用いて、操縦者にとって円滑かつ効率良く操作できる遠隔作業観視環境を作り出し、探索作業での改善効果を検証している。

4.1.1 視覚情報による空間効果と空間知覚特性

人間の立体視機能を満足させる機能をロボットに装備するためには、実空間における人間の視覚受容特性と視覚情報提示の整合性を検討し、自然な空間知覚を成立させるのに必要な視覚情報提示条件を見出すことが重要である。

人間の空間立体視機能と空間情報を結びつける視覚情報提示技術は、1)固定観察状態で、視力などの視機能弁別閾以上の高精細・高密度映像を提示し、実物・自然感、2)眼球運動による注視動作を含む人間の視野特性に適合した状態で、広視野(大画面)映像を提示し、再現空間への没入・臨場感、3)両眼視情報を満足させる立体映像を提示し、立体感・操作性を生み出す段階にまで達し、日常生活で見慣れた映画やテレビの映像技術では、2)の状態から3)の状態へと移りつつある。今後は、デジタル映像表示・伝送技術の急速な進歩から、安定した3)の状態を生み出す4K・8Kの超高精細映像によるスーパーハイビジョンテレビと超高密度映像による裸眼式3Dテレビへの進展が予想される。

このような映像観察環境は、映像空間に対して観察者は受動的な観察状態で映像効果を楽しむ状況にあるが、新しい情報端末の出現やVRシステムの実用化に伴い、観察者が操作者になる観視環境も出現し、能動的に操作できる多方向観察可能な映像で探索・操作性を高める空間再現が要求され始めている。

立体視機能搭載ロボットを使用した本実験では、単なる受動的観察状態での3D映像の効果と比べて、能動的な観察状態における空間立体視がどのような効果をもたらし、3D映像の特徴をより有効的に活用できる使用環境条件を見出す実験結果にもなっている。

4.1.2 立体視機能搭載ロボットにおけるレイグジスタンス効果

遠隔操縦型ロボットシステムの基本となるレイグジスタンス状態を成立させる要件としては、1) 臨場感、2) 実時間相互作用性、3) 自己投射性 が要求される。

今回の実験で使用されたロボットでは、これらの要件を満足させるために、2 台のロボット搭載カメラに両眼立体視機能を持たせ、操縦者が観視する HMD モニタには操縦者の頭部運動に加えて体幹部の自由度に応じた映像が連動して表示され、能動的な運動視差による空間知覚を向上させる遠隔操縦型ロボットシステムになっている。

操縦者の動作と連動した HMD 映像表示により、固定型ディスプレイ観察よりも、自然で高い臨場感が体験できることが示されている。さらに、これまでの遠隔操縦型ロボットでは、微妙な運動視差情報は得られず、人間の自然な探索動作を完全には再現できていなかったが、操縦者の注視動作に連動する頭部運動、微妙な観察位置移動を生み出す頭部・体幹運動、観察方向を大きく変える走行移動を可能にして、運動視差情報をより効果的に得られるシステムとして実現されている。

4.2 作業空間に於ける立体視機能搭載ロボットの効果

単眼視(2D 映像)または固定型 2 眼(3D)カメラを装備した既存の遠隔操縦型ロボットと比較して、両眼立体視(両眼視差)と操縦者の頭部・体幹部 (6 自由度) 運動に追従して探索範囲の拡張と運動視差情報が提示できる立体視機能を持った映像入力系を搭載した遠隔操縦型ロボットによる作業性について、奥行き距離検出精度、障害物空間での能動的探索作業に於ける所要時間・軌跡・衝突回数などを尺度にしてその優位性が検討されている。

4.2.1 立体視機能搭載遠隔操縦型ロボットによる作業性の検証

- ① 2D 映像の観視状態と比べ、3D 映像(両眼視差情報提示)では奥行き認識精度、特に前後距離差の確認が優位になる。それに操縦(観視)者の体幹部 6 自由度による運動視差情報が加わると、2D、3D 映像観視に拘わらず奥行き認識精度が向上することから、探索動作などでは両眼視差+運動視差情報が得られる立体視機能搭載型ロボットの有効性が示されている。
- ② 頭部運動によって生じる運動視差情報は、両眼間距離よりも大きな視差量が得られる状態で効果を示すことから、両眼固定観察状態では回避できない遮蔽状態にも対処できるシステムの有効性を示している。
- ③ 両眼立体視が安定して見えるためには、両眼への入力情報に大きな差が生じないことが要求されるが、立体視機能搭載型では片眼情報が不鮮明な条件でも、運動視差情報から作業効率の低下を補う効果が見られ、視覚的に悪条件下でも効果的

に使用できるシステムであることが示されている。

- ④ ロボット本体操縦形態による課題探索作業に関しては、操縦者の動作と同期したマスタスレーブ条件の方がコントローラ使用条件より遂行速度が速く、個人差も少ないが、学習効果の差は見られ無かった。しかし、体幹部自由度を変化させた各種条件では、所要時間や衝突回数を評価尺度としたタスクパフォーマンスや頭部移動軌跡などからは、学習効果が顕著で、探索動作が効率的で円滑化する傾向が見られた。
- ⑤ 遮蔽状態での探索動作を調べると、習熟速度、動作ばらつきが少ないことから、体幹部 6 自由度が設定されている本システムの有効性が見られ、更に、異なった空間作業での探索動作状態から操縦習熟度が維持されることも示されている。

4.2.2 立体視機能搭載型ロボットのユーザテストでの体感報告

立体視機能を持つ遠隔操作型ロボットの作業体感実験からは、これまでの開発過程での検討条件の確認や今後への展開課題が示されている。

- ① 既存の固定モニタ観視条件と比べて、ロボット操作とその習熟度は良好で、通常の 3D 映像鑑賞での違和感や疲労は生じず、ロボットの位置に操作者が存在するような自己投射性が確保でき、レイグジスタンス効果の有効性が得られた。
- ② 近距離での周囲環境の把握に関しては、両眼視差よりも、体幹部運動との連動によって生じる運動視差がもたらす立体視効果が有効であった。
- ③ 観察視野が狭いために、同時に空間を把握するのに若干の制約を感じる場合もあるが、頭部+体幹部運動の自由度の増加から、周囲を無理なく見渡せ、観視範囲を拡張できる効果は有効である。
- ④ 本体位置を移動させる程ではない微妙な観察位置移動による運動視差が、空間把握に有効であるが、急速で大きな位置移動によって生じる空間失調などを補うために、視野内に基準となる座標軸情報の提示が望ましい。

4.3 遠隔操作型ロボットにおける今後の課題

遠隔操縦型ロボットに立体視機能を付加したことによる作業性の向上や有効性を示す作業状況が見出されたが、作業体感報告も参考に、技術進歩に応じて本ロボットシステムの改善課題を整理し、より効率よく快適に使用できる遠隔操縦型ロボットシステムへの更なる展開を期待したい。

- ① 本体移動面の凹凸や障害物の存在によってカメラ映像が上下変動や揺れなどが生じる環境下では、2D 映像に比べて 3D 映像観視時の生体への影響（映像酔い、眼精疲労など）が発生し易いため、救助現場などでの実用化に向けては、無作為な

外力による映像揺れ防止や俯瞰観視可能な機構が要求される。

- ② 現行のロボットカメラと HMD の性能から、視野角と解像度がやや不十分な表示画質になっているが、より臨場感を高めるためには、視野拡張による空間座標系の安定化と高精細化した映像入出力系が要求される。ただ、人間の視線と頭部運動の特性から、空間全体を無理なく注視できる安定注視野を再現し、表示解像度を視力 1.0 相当にまで向上させると、4K～8K テレビシステムが必要になる。さらに、高速移動対象や操作速度などから生じる映像の不安定さを取り除くために、画面切り替え周波数も 90～120Hz が必要となる。これらの表示条件を満足させるためには映像信号伝送容量が大きくなり、現状では実現が困難であるが、将来的には高精細・高密度で安定した映像入出力系を装備することが期待される。
- ③ 今回の検証実験では、主に作業効率に関する評価項目で検証されているが、体感報告での主観的印象でも触れられているように、操縦者への負荷、特に、眼精疲労と操縦時に発生する疲労などの観点からの評価を行うことで、立体視機能搭載遠隔操縦型ロボットをより快適な遠隔操縦システムであることを示すことが期待できる。

財 団 法 人 J K A
平成 24 年度 機械工業振興補助事業(24-1)

平成 24 年度
救助ロボット搭載用
立体視機能の調査補助事業
報 告 書

発 行 平成 25 年 3 月

発行者 一般財団法人デジタルコンテンツ協会
〒102-0082 東京都千代田区一番町 23-3
日本生命一番町ビル LB
TEL.03(3512)3900
FAX.03(3512)3908

不許複製 禁無断転載