

遠隔作業指示のための
胸部搭載式ウェアラブル端末の研究

システム情報工学研究科
筑波大学

2007年3月

酒田 信親

概要

物理的にお互いの声や視界が及ばない離れた2地点に居る人間が、テレコミュニケーション技術を用いた端末で音声や映像を伝え合い協調して作業を進めることを遠隔協調作業という。特に、本論文ではある人間が工場・発電所・災害現場・工事現場などの作業場所に作業者として存在し、もう一方の人間が遠隔地から指示者として作業者に対して作業の指示を送る遠隔協調作業を遠隔作業指示と称する。本研究が支援する作業は、作業場所が荒地や災害現場に代表される不整地であったり、はしごなどの垂直移動や乗り物での高速な移動を要求される現場で、実世界に置かれた実物体を取り扱うといったものである。本論文では、そのような現場における、移動・運搬・組み立て作業に対する遠隔作業指示を支援するための端末には、以下の条件が重要な要素であることを提案する。

- 装着型であること
- 両手が自由であること
- 頭部に機器を装着しないこと
- 胸の周囲にカメラを取り付けること
- 指示者が遠隔から作業空間を見渡せること
- 映像のスタビライズ機能があること
- 実世界作業環境上に共有ポインタを用意すること
- 作業者へ指示に関する映像を提供すること

この条件に従ってウェアラブル端末である WACL、及び CWD を設計した。WACL は2軸制御の小型のアクティブカメラにレーザを取り付けた上記の最後の条件以外を満たす小型デバイスである。CWD は、WACL が揃える条件を損なうことなく、「作業者へ指示に関する映像を提供すること」が可能なデバイスである。これら2つのデバイスを用いたシステムで遠隔作業指示のユーザテストを実施し、WACL と CWD の利点と限界を明らかにする。

その結果、WACL を利用した遠隔作業指示のユーザテストから、作業対象や場所を識別するのにレーザスポットは HMD に表示される作業者と指示者の共有ポインタの代用として十分効果的に機能した点、作業効率が従来型の頭部搭載式端末と比べ遜色がない点、端末の装着感で優れていた点が示された。さらに WACL を付けた作業者へ指示に関する映像を提供する付加ディスプレイとして CWD または HMD を使用したユーザテストより、CWD は HMD と比べ遜色がない作業効率を装着感の優位性を失うことなく発揮できたことが示された。

これらの結果から、CWD と WACL で構成される胸部搭載式ウェアラブル端末は、HMD で構成される既存の頭部搭載式装着型端末と作業効率は遜色なく、むしろ装着感の面で快適に、移動・運搬・組み立てを伴う遠隔作業指示を行えることを実証した。

目 次

第 1 章	はじめに	6
1.1	本研究の背景	6
1.2	提案端末の重要要素の決定	8
1.3	胸部搭載式ウェアラブル端末を用いた関連研究	12
第 2 章	WACL	13
2.1	設計	13
2.2	映像のスタビライズ機能	16
2.2.1	画像処理による移動量推定	18
2.3	CWD による視覚的アシストの提供	19
第 3 章	WACL ユーザテスト	22
3.1	WACL を用いた遠隔作業指示システム	22
3.1.1	HMD/HMC ベースの遠隔協調作業ヘッドセットシステム	23
3.2	タスク	24
3.3	被験者	26
3.4	実験結果	26
3.4.1	作業完了時間	27
3.4.2	会話解析	28
3.4.3	主観評価（アンケート&インタビュー）	29
3.5	考察	30
第 4 章	WACL/CWD ユーザテスト	34
4.1	CWD による視覚的アシストの提供	34
4.2	WACL/CWD システム	35
4.3	実験設定	35
4.4	タスク	36
4.5	被験者と作業手順	37
4.6	結果	37
4.7	考察	38
4.8	ビジュアルリンク	40
4.8.1	タスク	41
4.8.2	作業手順	42
4.8.3	結果	42

4.8.4	考察	43
第 5 章	全体の考察, 展望	47
5.1	8 つの重要要素	48
5.2	提案端末で可能な遠隔作業指示の範囲	49
5.3	端末改良の示唆	50
5.4	指示者システムの設計	55
第 6 章	おわりに	57

表 目 次

2.1	WACL3 世代の性能比較	15
2.2	作業別の作業者の動作の平均角速度の値	18
2.3	約 1.5 秒後の目標点とレーザスポットの距離の平均と標準偏差	20
3.1	各セクションでのタスク	29
5.1	WACL システムとヘッドセットシステムの特徴	47
5.2	WACL/CWD システムと WACL/HMD システムの特徴	48
5.3	8 つの重要な要素に関する考察	49

目 次

1.1	提案ウェアラブル端末による遠隔作業指示	7
2.1	WACL の外観	14
2.2	WACL1 (左, 100g) WACL2 (中央, 131g) WACL3 (右, 247g)	15
2.3	着席した状態で工作作業を行った場合の、各軸の角速度の大きさ	16
2.4	着席した状態で工作作業を行った場合の yaw 軸周りの角速度の分布	17
2.5	映像のスタビライズ機能の流れ図	19
2.6	指示画像・更新画像間の特徴点移動量と LMedS 推定による外れ値除去の結果	20
2.7	CWD の外観	21
3.1	指示者が使用した WACL 用 GUI ソフトウェアインタフェース	24
3.2	指示者が使用した HMD 用 GUI ソフトウェアインタフェース	25
3.3	HMD/HMC ベースのヘッドセット (左) と WACL(右)	26
3.4	本ユーザテストの作業空間	27
3.5	合計作業完了時間 (左)、セクション別作業完了時間 (右)	28
3.6	ブロッククラスタの選択・組み立ての指示に関する単語数 (左) と作業者の位置・視点の指示に関する単語数 (右)	30
3.7	絶対評価 (Q1-Q6 : ヘッドセット、Q7-12 : WACL) と相対評価 (1 : ヘッドセット、7 : WACL)	31
3.8	WACL の映像のスタビライズ機能 (WACL の回転角センサのみ) を有効にした場合、WACL がモニタを撮影し続ける例 (この映像は、視点映像収集タスクで録画された)。最も右側の画像は、作業者がまだブロックを組み立てている時に、指示者は目的のブロッククラスタを探していることを示している。上は WACL (指示者) の視野、下は作業者の視野。	32
3.9	WACL/CWD システム	33
4.1	WACL/HMD システム	36
4.2	指示者用 GUI	37
4.3	CWD また HMD 上に表示される視覚的アシスト	38
4.4	WACL/CWD と WACL/HMD のシステム図	39
4.5	ベースブロックとブロッククラスタの詳細	40
4.6	作業完了時間	41
4.7	作業完了時間	42

4.8	「作業空間（実世界）は見やすかったどうか？」の絶対評価	42
4.9	「視覚的アシストはみやすかったどうか？」の絶対評価	43
4.10	「身に付けて違和感がなかったか？」の絶対評価	43
4.11	「指示されているブロックや場所は簡単にわかったか？」の絶対評価	44
4.12	相対評価	44
4.13	WACL/CWD の場合の左右の手の使用頻度	45
4.14	WACL/HMD と WACL/CWD システムを使ったビジュアルリンク効果のユー ザテストの実験設定	45
4.15	作業完了時間	46
4.16	相対評価	46
5.1	新しい WACL システム	51
5.2	周辺視野の獲得に魚眼レンズを用いたシステム	52
5.3	WACL3 の首振りによるレーザ描画	53
5.4	投影型デバイスの特徴による機器非装着者の投影情報認知の概要図	54
5.5	ウェアラブルインタフェースを身につけた複数の作業（上）と指示者用タ ンジブルテーブルトップインタフェース（下）	56

第1章 はじめに

物理的にお互いの声や視界が及ばない離れた2地点に居る人間が、テレコミュニケーション技術を用いた端末で音声や映像を伝え合い協調して作業を進めることを遠隔協調作業という。さらに、本論文ではある人間が工場・発電所・災害現場・工事現場などの作業場所に作業員として存在し、もう一方の人間が遠隔地から指示者として作業員に対して作業の指示を送る遠隔協調作業を特に「遠隔作業指示」と称する。

本研究が支援する作業は、作業場所が荒地や災害現場に代表される不整地であったり、はしごなどの垂直移動や乗り物での高速な移動を要求される現場で、実世界に置かれた実物体を取り扱うといったものである。本論文では、そのような現場における、移動・運搬・組み立て作業に対する遠隔作業指示を支援するための端末を提案、設計、実装そしてユーザテストによる検証を行う。

本論文は6章から構成され、各章の概要は以下のとおりである。1章では、本研究の背景に加えて遠隔協調作業の関連研究と本研究で支援する遠隔作業指示の範囲について述べる。また、ウェアラブル端末が本研究で支援する遠隔作業指示に適している理由を述べた上で、既存のウェアラブル端末の問題点を整理し、本論文で提案するウェアラブル端末の設計条件を決定する。2章では、1章で挙げた設計条件を満たすウェアラブル端末を提案し、実装について述べる。3章では、提案した端末と、典型的なHMDとHMCからなるヘッドセットインタフェースとの間での作業効率やユーザビリティの違いを、主観的、客観的に評価するための移動・運搬・組み立ての遠隔作業指示を含むユーザテストとその考察について述べる。4章では、3章で明らかとなった「説明が複雑な場面での問題」を解決するための「指示に関する映像を提供する」付加ディスプレイとして、提案したディスプレイとHMDのどちらがWACLとの組み合わせにより適切かを比べる。そのために、組み立ての遠隔作業指示のユーザテストを実施し、その考察をおこなう。5章では全体の考察と提案したコミュニケーション端末によって可能となる遠隔作業指示について述べる。6章で本論文のまとめを述べる。

1.1 本研究の背景

この節では本研究の背景について述べる。

本研究で支援する遠隔作業指示の現場は、作業場所が荒地や災害現場に代表される不整地であったり、建物内であっても廊下だけではなく、はしごや階段などの垂直移動を要求される現場であったり、エレベータや車などの乗り物での高速な移動または運転を要求される現場である。その様な現場で作業員は、ディスプレイに表示されたバーチャルな画像や映像に対し、タッチパネルやマウスを通じて作業を行うのではなく、自身の手などを用いて、例え



図 1.1: 提案ウェアラブル端末による遠隔作業指示

ば、物を運んだり、物を切断したり、バルブを回したり、ねじを回したり、物を組み立てたり、計器を確認したりといった図 1.1 の様に実世界に置かれた実物体に対して作業を行う。

このような作業現場における遠隔作業指示に使用される端末は、既存のビデオ会議システムと異なり、作業現場を動き回る作業者に対して遠隔地の熟練者の指示を円滑に提供するために設計されている必要がある。このような要求に対して従来の研究や事例では、ウェアラブル端末が実際の作業現場 [11] で多く用いられていた。また、それらのウェアラブル端末の多くは、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) と、ヘッドマウントカメラ (HMC)、作業者間無線ネットワークから成るシステムで構成されていた [30][16]。また、このようなウェアラブルインタフェースを用いた遠隔作業指示システムは、ウェアラブルコンピュータ [1] や無線ネットワーク技術の発達により、徐々に一般的になりつつある。機器の装着者である作業者周囲の状況を知らせるために、実作業空間の音と映像は、HMC とマイクを通じて遠隔地の指示者に送られる。また、HMD を通して作業者は、指示者が作成する注釈に代表される視覚的支援を得ることができる。さらに、作業者と指示者は音声による意思疎通を図ることが可能である。このようなウェアラブル端末は、「人間に装着して使う」、「端末の使用者が両手を自由に使える (ハンズフリー)」という 2 つの大きな特徴があった。両手が自由にな

る特徴は、「物を運ぶ」、「物を切る」、「バルブを回す」、「ねじを回す」、「物を組み立てる」、「計器を確認する」といった作業に代表される実世界に置かれた実物体に対して手などを用いて作業を行う場合に有利である。また、人間に装着し使用する特徴は、乗り物を使用したり、はしごで移動したり、不整地を移動したりしても、人間が移動可能な場所であれば様々な作業現場で使用できる点で有利である。そこで本研究で支援する遠隔作業指示には、ハンズフリーで人間に装着して使用するウェアラブル端末を用いることにした。

1.2 提案端末の重要要素の決定

この節では、本研究で支援する遠隔作業指示に用いるハンズフリーなウェアラブル端末の重要要素の決定について述べる。

頭部に機器を装着しないこと

前節で述べた HMD と HMC からなるヘッドセットシステム [30][16] は、作業者が HMD に表示された視覚的支援と作業空間を、視点や焦点を頻繁に変えて見るため眼が疲れる問題 [10] や、頭部に機器を装着するため装着時に違和感を感じる問題や、作業中に HMD の装着位置を保てない問題があった。

現在の技術では、高解像度の HMD を眼鏡程度に軽量化し、移動する装着者に違和感を感じさせずに頭部に固定することは難しい。たとえ軽量化できたとしても、現在の眼鏡の様に装着者が動作すると、固定位置からずれてしまうことは容易に想像できる。さらに、過去の多くの研究で行われている様に、頭部へ頑強に固定しても、作業中の装着者の発汗や動作などで、HMD が元の固定位置からずれることも少なくはない。

焦点を変えることで目が疲れる問題に対して、装着者がどの距離に焦点を当てているかを計測し、計測した焦点位置に合わせて映像を出力するには、大規模な装置が必要となり、現時点で装着型にするには難しい。そこで本研究では、装着者が違和感を感じる重量・容積・装着方法を要求する機器を頭部に装着しない胸部搭載式インタフェースが重要な要素であると決定する。

指示者が遠隔から作業空間を見渡せること

HMC による遠隔地の状況把握では、指示者の視界は作業者が何を見ているかに依存してしまう。例えば、作業者が作業中に、遠隔地の指示者が作業者に先だって次の作業場所を確認したい場合、作業者の頭部姿勢から独立して画像を取得できるほうがよい。また、カメラの姿勢を遠隔地から操作できないと、現場の作業者にカメラの撮影位置を変えるためだけに指示を出し協力を仰がなければならず、作業場所が分散している現場では非効率であると考えられる。

また、Fussell らは、固定作業空間での遠隔作業指示では、HMC よりも広角の固定設置カメラの方が効果的であると報告した [19]。この結果は驚くにはあたらない。なぜなら、指示

者が一度に作業空間全体を見渡せるカメラは状況把握能力を向上させるからである。これら二つの理由により、指示者が作業者の協力無しに遠隔地からある程度自由に動かせる、作業空間を見渡せるカメラは、指示者の状況把握能力を向上させる可能性が高く重要な要素の一つであると決めた。

胸の周囲にカメラを取り付けること

従来の研究で多くのシステムは、遠隔地の状況把握のために、HMCの撮影映像を指示者に提供していた。しかし、HMCを用いると前述の様に指示者の視界は作業者が何を見ているかに依存してしまう。これを解決するために、例えばHMCに遠隔から動かせるパン・チルト機能を持たせると、作業者の首の姿勢に依存することなく有る程度作業環境を見渡すことが可能になる。だが、作業者は作業のためだけでなく、高速で頻繁に首を動かすので、指示者がカメラを通じて同じ場所を観察し続けるのは難しく、カメラ姿勢のスタビライズ機構が必要となる。しかし、前述の様に首は高速・高頻度で動くので、高速・高精度のスタビライズが要求され、その結果、機器の重量が作業者の頭部への負担として避けられないものとなり、装着型としては現実的ではない。

まず、頭部以外のカメラ装着場所として、胴体が考えられる。胴体への装着を考えた場合、カメラの視点位置と作業者の視点位置が大きく異なる場合もあり、指示者が現在どの場所を指示しているかを作業者が見失う問題が発生する可能性が増す。つぎに、例えば腕にカメラを装着した場合、歩行時や作業時にはカメラ映像が大きく変化するというカメラ映像の安定性の問題もある。さらに、頭部以外にカメラを取り付ける場合、頭部に取り付けた場合に比べ、腕、足、胴体によるオクルージョンが発生することが多い。これら装着部位によるオクルージョンやカメラ映像の安定性を、Mayolらは1800ポリゴンからなる人間の多関節モデル[34]を用いたシミュレータによって明らかにした[35]。さらに、蔵田らは評価項目として、視界の広さ(field of view)、作業領域の見易さ(handling space)、動作中における安定性(stability)を評価し、胸の周囲にカメラを装着することは、他の部位に装着する場合に比べ優れていると評価した。そこで本論文では、遠隔地の状況を撮影するカメラを作業者の胸の周囲に取り付けることは重要であると考えた。

映像のスタビライズ機能があること

ウェアラブル端末の共通の問題に、装着者の動作によって、遠隔地の指示者に送信する映像に影響を及ぼしたり、指示した点が全く映像中に映らなくなることで、遠隔地からの状況把握や的確な指示に支障をきたす場合がある。そこで、装着者の動作を推定し、装着者の動作によらず常に同じ場所の撮影や指示ができる映像のスタビライズ機能が必要となる。

胴体にカメラを取り付ける場合の定点撮影・指示機能を考えると、要求されるカメラヘッドのスタビライズの精度や速度は、前述の様に頭部に搭載する場合に比べて、非常に高性能である必要は無い。例えば、現場で実物体に対してなんらかの作業をする場合、椅子に座った状態や起立状態で作業が行われることが多い。この場合、目視による作業場所の確認や工

具箱から工具を手を取る場合など、胴体は大きく動かない。しかし、頭部に関しては高速・高頻度で動いていることが多い。また、移動中でも頭部は、例えば行き先の確認のため、地図を見たり、看板を見たりするため頻繁に動くと考えられるが、胴体に関してはそれほど回転はしない。このように作業を行うほとんどの場合で、頭部は胴体に比べ高速・高頻度で回転する。一方、胴体は、作業中に頻繁に大きく動くことは考えにくい。なぜなら、胴体が頻繁に動いてしまうと、それに伴い手や足も動き、細かい作業や組立作業を行えないからである。そこで、胴体に装着しても装着者に違和感を感じさせることの無い重量や大きさの機器を使用して映像のスタビライズ機能が実装可能であると本研究では結論付け、さらにこの要素は重要であると考えた。

実世界作業環境上に共有ポインタを用意すること

遠隔作業指示に用いるインタフェースの最終的な目標は、遠隔地に分散したユーザ同士の共有理解の確立を支援し、“grounding”[2]と呼ばれるプロセスによって、コミュニケーション基盤の共有を支援することである。grounding プロセスとは、共有知識・信念・目的など、コミュニケーションを円滑にする共有基盤を確立する過程のことである。また、実作業環境に関する遠隔協調作業では、作業は主に”対象物・場所の識別”、“手順の説明”、“理解の確認”の3段階に特定される[17]と報告されている。従来のTV会議に代表される対面的なコミュニケーションでは、視線、表情、ジェスチャ、音声、非言語音などの多種多様な手がかり(cue)が、共有基盤の確立に使われている。様々なデバイスが利用可能な固定設置型の遠隔会議システムに関する研究では、これら複数のデバイスによってさまざまな手がかりを効果的に伝達する方法が提案されている。また、対面的なコミュニケーションでは、言語的、非言語的な手がかりに加えて、実物体や実環境とのインタラクションが重要な役割を果たしている。例えばSuchmanは、非言語的な手がかりと同様に、描画行動が会話の順番取り(turn taking)を支援することを見出した[3]。一方、MehanとWoodは、実世界にある”物”が、共有理解の確立に利用されていると報告した[4]。このように従来の研究では、ノンバーバルなコミュニケーションによって共有基盤を確立することは重要であると報告されている。

しかし、本研究で提案するのは装着型であり、共有基盤の確立のために、固定設置のTV会議システムの様に複数のデバイスを使ってさまざまな手がかり(cue)を使うことは重量や容積の問題で現実的ではない。

装着型の端末での共有基盤の確立に焦点を当てた研究に、葛岡のSharedviewがある[20]。この研究では、ユーザがHMDとHMCを装着し、装着者周囲の作業空間の映像を遠隔地の指示者に伝送する。この研究では、ウェアラブルコンピュータは用いられていないものの、3次元空間タスクにおいてHMDやHMCが、どのように協調作業を支援するかが示されている。このシステムで、指示者は、HMCで得られた遠隔作業空間の映像に手振りを重ね合わせて作業者のHMDに表示させることができる。このような直感的な指示により、非言語的な手がかりを双方向に伝達することを可能にした。葛岡は、指示者の手振り映像が指差し動作を遠隔地に伝えるのに効果的であることを示し、装着型であっても対面と遠隔地間の両方においてコミュニケーション形態が類似していることを見出した。また、British Telecom

が開発した CamNet システム [21] も HMC と HMD を用いたシステムであり、遠隔地の医者から救命士が指示を受けられる。医者は、事故現場の映像を見ながら、救命士の HMD に表示されている画像の一部分をマウスによるポインタで指し示せる。これら 2 つの研究は、多くの場合、音声、映像を指示者と作業者が共有し、さらに指示者の意志を示すポインタや手振りに代表される何らかの共有オブジェクトがあれば、円滑な遠隔作業指示を十分に行える可能性があることを示している。

また、実世界作業環境上に共有オブジェクトを投影することで遠隔作業指示を行った研究として、GestureCam[22] や Telepointer[15] がある。これらのシステムは、HMD 上の共有画像や映像に対するポインティングで作業箇所を示すことで、意思疎通をはかるのではなく、現実の物体にレーザスポットを投影することでお互いの共有理解を促進した。この投影されたレーザスポットをみることで、作業者は指示者がレーザポインタ周辺を観察していることがわかる。さらに、レーザスポットが動き回っていると、作業者が何かを探索しているといった意図を推測することも可能である。このように実世界に投影されたレーザスポットは、作業者への指示だけでなく、指示者の意志をある程度伝えることができる。

これら過去の関連研究から、作業者と指示者が互いの身体が見えない遠隔作業指示において、お互いの共有理解を深めるためには遠隔地の共同作業者である指示者が、機器を装着している作業者とその周囲の視界を共有し、作業者が今何を行っているかを把握することが挙げられる。本研究では前述にあげた重要要素の中で、作業者の胸の周囲にある程度自由に作業環境を見渡せるカメラを取り付けることにした。従って指示者はある程度作業者が何を行っているのかを観察することができる。しかし、逆に「指示者は何をしているのか」「指示者は何をしようとしているのか」といった指示者の意志を作業者へ伝達することが難しい。そこで本研究では過去の事例から指示者の意志をある程度伝えるために実世界投影型の共有オブジェクトをシステムに用意することは重要な要素の一つであると決めた。

作業者へ指示に関する映像を提供すること

指示者の遠隔支援の有無、及び「指示者の遠隔支援有りの場合での映像の有無」における作業効率を比べた Kraut らの研究がある [16]。この例では、HMD と HMC からなるインタフェースを用いて、自転車の修理タスクにおいて指示者が初心者（作業者）に対し遠隔作業指示を行った。作業者は HMD と HMC を着用し、電子マニュアルと指示者の顔映像、作業空間映像を含む共有デスクトップを見ることが出来た。Kraut らは、指示者の遠隔支援の有無、及び指示者の遠隔支援有りの場合での映像の有無における作業効率を比べた。指示者の遠隔支援がある場合、作業者は 50% 早く作業を完了することができたが、映像の有無は作業完了時間に影響を与えなかった。ただし、音声のみと音声と映像がある場合とではコミュニケーション形態が大きく異なっており、映像がない場合、作業者は作業状況をより明示的に言葉で説明した。Kraut らは、協調作業者間で利用可能な技術が、作業中のコミュニケーション形態に影響を及ぼすと報告した。

この研究では作業者が口頭で作業現場の状況を説明しているが、指示者が周囲の状況の変化に合わせて作業を行ったり、複雑な図面などを元に複雑な組み立て作業の指示を行う場合

など、言葉で明示的に説明し作業時間が長くなる恐れがある。そこで、本論文では、他の重要な要素を損なわない方法で、作業員へ指示に関する映像を提供することにした。

1.3 胸部搭載式ウェアラブル端末を用いた関連研究

ここでは、頭部に機器を装着しないウェアラブル端末を用いた他の研究を紹介する。

HMD に代わるものとして、視覚的支援を実物体上に直接投影するインタフェースが数多く提案されている。例えば、葛岡の GestureCam インタフェース [22] では、パン・チルト可能なサーボ制御のカメラの上にレーザポインタが搭載されており、遠隔地の指示者はこのレーザによって対象物体を強調できる。ただし、GestureCam は固定設置型または移動後に設置する形態で考えられており、ユーザが着用できるようには設計されておらず、また着用した場合のユーザテストに関しても報告されていない。

ビデオプロジェクタを使うことで、ポインタはもちろん映像、文字などの視覚的支援も実物体上へ投影できる (例えば [24][25])。狩塚と佐藤のウェアラブルプロジェクタシステム [26] は、頭部への機器の装着を強いることなく、視覚的支援を実世界に投影する。しかし、そのプロジェクタシステムはまだ遠隔作業指示には応用されておらず、また、他のプロジェクタベースのシステムと同様、重量、電力消費、屋外での光量不足など多くの問題が残されている。

CTerm[23] はそれぞれ独立してパンチルト可能なサーボ制御のレーザとカメラを組み合わせたもので、可搬性の良いインタフェースである。移動時は携帯可能で、使用時は現場にいる作業員の傍らに固定設置する。遠隔地の指示者はカメラとレーザポインタを独立に制御しつつ、映像を見ながら音声とレーザポインタで指示を送れる。ただし、CTerm を装着した状態での遠隔作業指示とそのユーザテストについては報告されていない。

Mann の Telepointer[15] の場合、照射方向の制御が可能なレーザと固定カメラを着用して遠隔作業指示を可能にしている。しかし、Telepointer のユーザテストは報告されていない。

パンチルト可能なカメラとジェスチャや指差し用に使われる小さな腕を持つロボットを肩に装着し、装着者との円滑な対面的コミュニケーションを実現するものに妻木らのテレコミュニケーション [27] がある。しかし、このロボットは対面的コミュニケーションを支援するもので、実作業空間や作業対象への指示を通しての円滑な遠隔作業指示を目的とはしていない。

第2章 WACL

2.1 設計

前章では、移動・運搬・組み立て作業に対する遠隔作業指示を支援するための端末には、下記の条件が重要な要素であると決定した。

- 装着型であること
- 両手が自由であること
- 頭部に機器を装着しないこと
- 胸の周囲にカメラを取り付けること
- 指示者が遠隔から作業空間を見渡せること
- 映像のスタビライズ機能があること
- 指示者と作業者の共有オブジェクトを用意すること
- 作業員へ指示に関する映像を提供すること

従来の研究では、上記 8 つの条件を満たした端末は存在しなかった。先に述べたように、CTerm[23] は、可搬性の良い端末であり、移動時は携帯可能で、使用時は現場にいる作業員の傍らに固定設置する。指示者は、カメラ、レーザポインタを、それぞれ遠隔地より独立に動かせる。しかしながら、パン・チルト機構が必ず 2 つ必要となり、装着型にすると重量の問題があると考えられる。また、カメラとレーザポインタを両方動かせる点は利点であるが、一方で指示者に複雑な操作を要求することも予想される。また、Telepointer[15] では、レーザのみ遠隔地より自由に動かせるが、カメラは固定なので、作業場所を見渡すためにカメラ視点を変えるには作業員の協力を仰がねばならず、指示者が遠隔から自由に作業空間を見渡すことは難しかった。この場合、機構は単純なため装着型に適しているが、カメラから得られる映像が装着者の動きに依存する上、映像のスタビライズ機能を持っていないので、その動きによりレーザポインタの指示が安定しないといった問題点があると考えられる。

そこで上記の 8 つの重要要素を満たす端末として、装着型の小型アクティブカメラ (WAC: Wearable Active Camera) [28] のカメラヘッドの光軸とレーザ光軸をほぼ平行の方向で、さらにレーザスポットが撮影映像の中心付近に来る様に固定したものを提案する (図 2.1)。これにより、装着者の頭部の動きとは独立して映像を取得でき、さらにレーザで指示を出すこ

とが可能な新しいインタフェースモジュールとなる。このような簡素な機構を持つモジュールは、小型軽量化が容易なため、装着型インタフェースの構成要素として適している。また、レーザとカメラの操作が一体となるため、遠隔地の指示者は簡単な操作でレーザとカメラを動かせる。さらに、本研究では撮影映像の画像処理によるビジュアルサーボにより、レーザポインタの指示位置と映像の安定化を実施する。この新しいインタフェースモジュールを、WACL(Wearable Active Camera with Laser Pointer)[5] と呼ぶ。

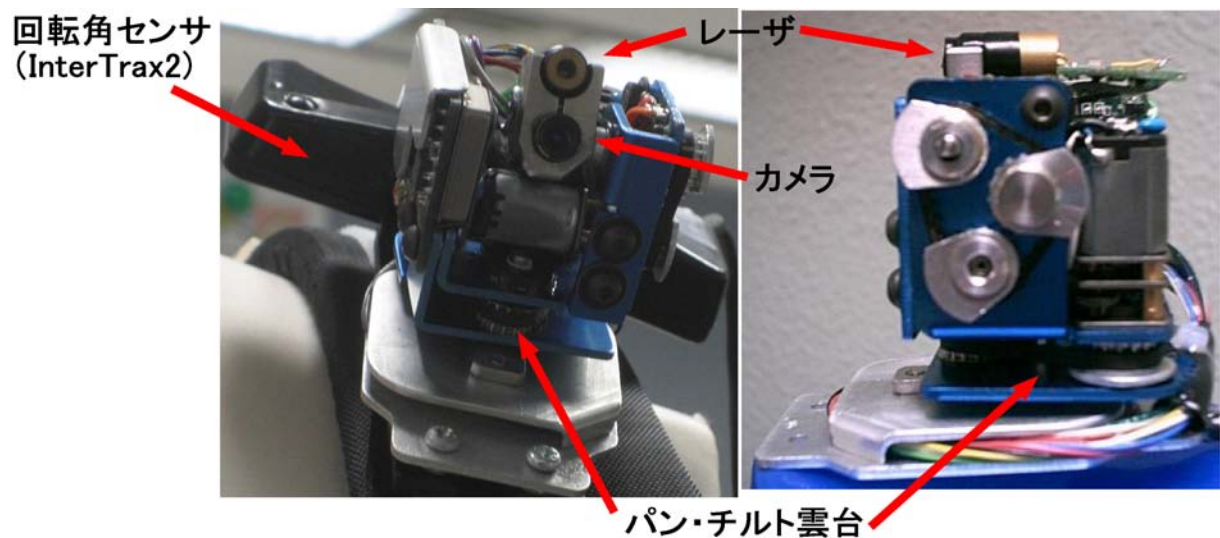


図 2.1: WACL の外観

この WACL は十分小型 (100g ~ 250g) で装着型として胸の周囲に取り付けることで、両手が自由になる。また、パンチルト機能を有するので、作業者の協力を仰がなくても指示者が遠隔から自由に作業空間を見渡せる。さらにレーザポインタは、指示者がどこを見ているかといった意志を伝えるための指示者と作業者の共有オブジェクトとして機能することで、共有基盤の確立を促進させる。このように WACL を使うことで、本研究で決定した移動・運搬・組み立て作業に対する遠隔作業指示を支援するための端末の重要要素である「両手が自由であること」「頭部に機器を装着しないこと」「胸の周囲にカメラを取り付けること」「指示者が遠隔から作業空間を見渡せること」「映像のスタビライズ機能があること」「指示者と作業者の共有オブジェクトを用意すること」を充足できる。

本研究の過程で、WACL を改良し続け合計で 3 世代の WACL を作成した。第 1 世代の WACL の雲台のパンチルト機構は DC モータを PWM 駆動し、ベルトとギアを用いて PID 制御している。第 2 世代の WACL は、DC モータとギアのみで構成し、第一世代のベルトによるバックラッシュの問題を解決した。さらに第 3 世代は、モジュール化された信頼性の高い高トルクのサーボモータをパンチルト機構に用いた。これにより、ユーザテストによる知見から得られた十分な小型化と重量を維持しつつ、第 2 世代に比べパン・チルト機構の速度の向上と制御の安定性とメンテナンスビリティを高めたものとなった。3 世代の比較を、表 2.1 にまとめる。第三世代の WACL の角回転速度は、水平面の頭部の最高回転速度 200 (°/sec) [38]

に対して十分に速いので、ネットワークでの制御遅延を入れても動作するレーザスポットに対して作業者の首の運動が追い付くことはなくなった。また、首の動作の97%が30[deg/sec]以下の角速度であるという報告[38]にもあるように、第一世代のWACLでも作業者の首の運動が、WACLに追い付くことはなかった。これらのことにより、全世代のWACLにおいて作業者はレーザスポットによる指示に対して遅延を感じることはない。また、当初は、作業空間を広く見渡すためにWACLを肩の上に装着していた。しかし、組立作業を行う場合、作業者の頭がオクルージョンになり作業指示を行うことができなかった。この問題を解決するためにWACLを胸の前に取り付けた。胸の前に取り付けると、作業指示で多く見られる卓上で組立作業をする場合、作業者は前傾姿勢になる。これらの設定で実験を何度か行い、移動・運搬・組み立てを伴う遠隔作業指示に使うWACLに要求されるパンチルト角は、パン方向は約140度、チルトは約140度あれば十分なことが経験的に判明した。さらに、WACLに搭載するカメラは、搭載するのに十分小型で、作業者の動作の邪魔にならず、レンズ歪が小さくなり、映像を転送する回線とのトレードオフから、適切な画角と大きさと重量のカメラを選んだ。

表 2.1: WACL3 世代の性能比較

	WACL1	WACL2	WACL3
パンチルト速度 (°/sec)	約 40	No Data	359
パンチルト範囲 (°)	pan:270 tilt:-41 ~ 41	pan:140 tilt: -30 ~ 30	pan:180 tilt: -64 ~ 70
サイズ (mm)	53x35x45	50x55x0	80x80x60
重量 (g)	100	131	247
機構	ベルト & ギア	ギア	ギア

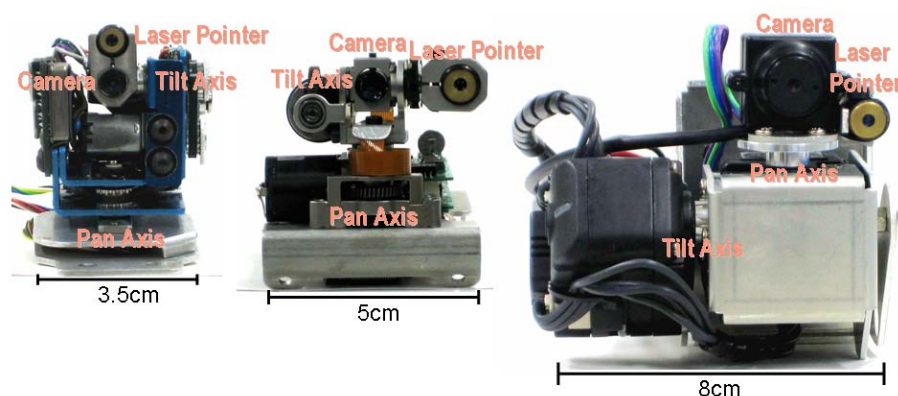


図 2.2: WACL1 (左, 100g) WACL2 (中央, 131g) WACL3 (右, 247g)

2.2 映像のスタビライズ機能

ここでは、本研究で決定した移動・運搬・組み立て作業に対する遠隔作業指示を支援するための端末の重要な要素である「映像のスタビライズ機能」の実装について述べる。

装着者の動作には、平行移動と回転が存在する。特に、回転に関しては少量発生したとしても撮影画像に大きな変化を引き起こす。そこで、装着者の動作を推定し、それに合わせて WACL を制御し、装着者の動作によらず WACL が常に同じ場所を撮影・指示ができることを目的とした映像のスタビライズ機能は遠隔作業指示において有用である。この機能が未実装だと、装着者の動作が、遠隔地の指示者に送信する映像に影響を及ぼし、指示した点が全く映像中に映らなくなる場合もあり、遠隔地からの状況把握や的確な指示に支障をきたす。

そこで、装着者の身体の回転を回転角センサにより計測する。この回転角度から動作前に WACL が向いていた方向に WACL を向ける。しかし、回転角センサでは平行移動を計測することができない。そこで WACL の撮影映像からの画像処理によって、画像中の移動量を推定し WACL の制御を補正する。この処理が一定間隔ごとに行われていて、映像のスタビライズ機能を実現する。

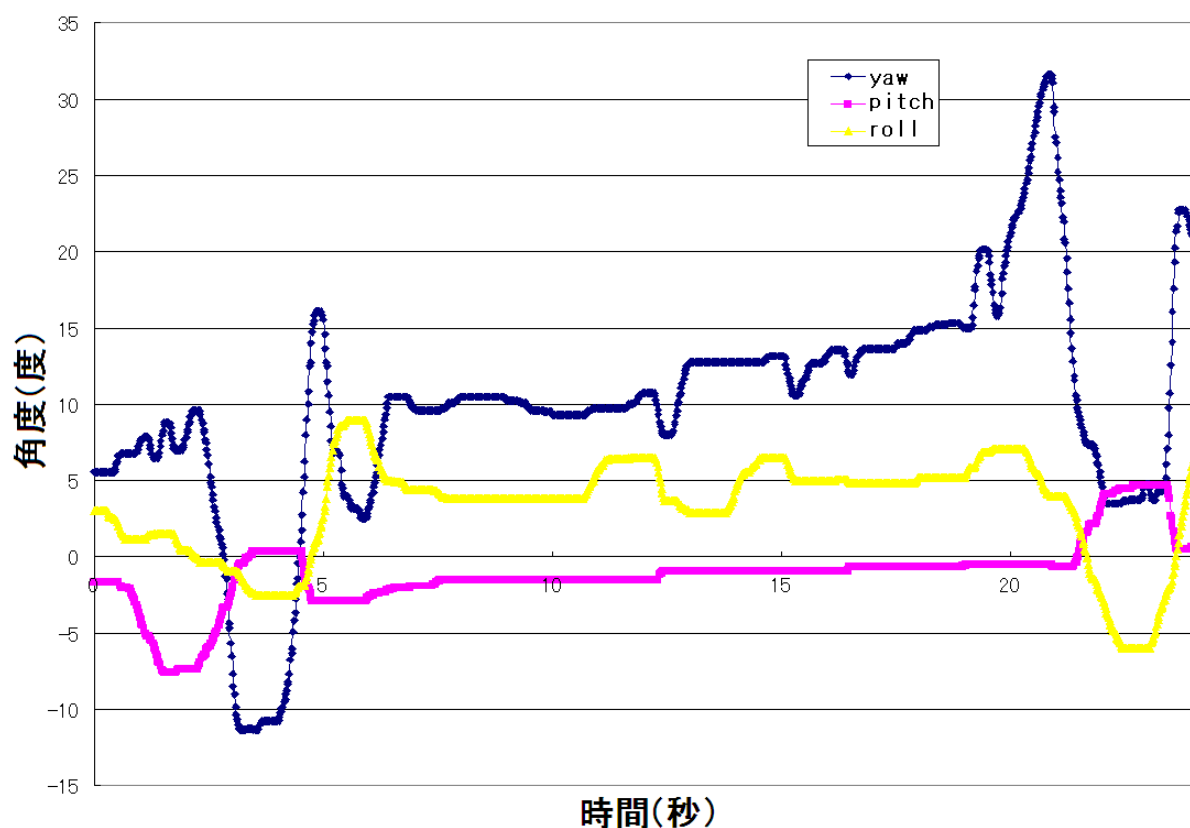


図 2.3: 着席した状態で工作作業を行った場合の、各軸の角速度の大きさ

図 2.3 は、着席した状態で工具箱からハサミを取り出し、A4 の用紙から直径 12cm の円をハサミで切り出す作業を行った場合に、左胸の前に取り付けた角速度センサから得られた

各軸の角速度の大きさをグラフで表している。これらのデータをフーリエ解析すると、ほぼ1Hz以下の周波数成分で構成されていることがわかった。また、図2.3の作業を行った場合の、yaw軸周りの角速度の分布を表したものが図2.4になる。但し、図2.4は、静止していると判断された角速度0の状態を取り除いたグラフになっている。この分布のグラフから取り除いた角速度0の状態は、データ全体のほぼ8割であった。また、着席した状態と立った状態で、様々な作業を行った場合の平均角速度を、表2.2にまとめた。このように、各軸の平均角速度の大きさは、作業に依存しており、また、作業によっては、胸の周囲がそれほど動かず作業をしている場合も多いとわかった。

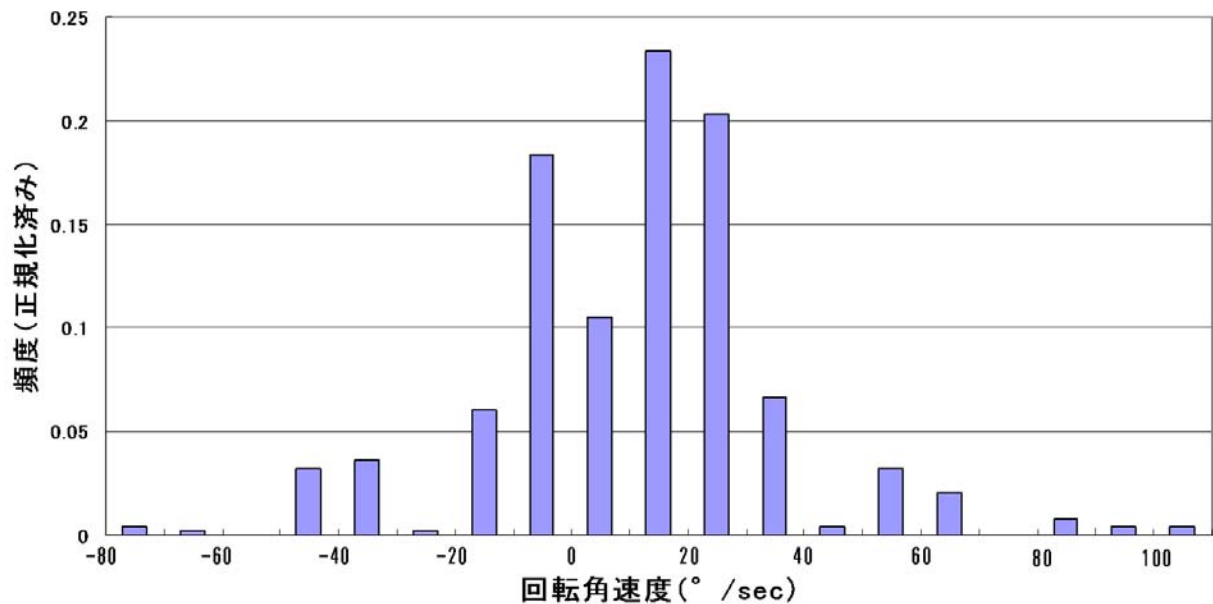


図 2.4: 着席した状態で工作作業を行った場合の yaw 軸周りの角速度の分布

図2.5は、映像のスタビライズ機能を実現するのにウェアラブルコンピュータ上に実装した3つのタスクを示している。WACLに取り付けた回転角センサ（InterTrax2:分解能0.02度、サンプリングレート256Hz）の値を取得するセンサタスク、画像処理を行うビジョントラッキングタスク、及びWACLに制御値を送信するコントロールタスクから成るこれら3つのタスクはスレッドで実装されている。他のタスクより計算コストを要求するビジョントラッキングタスクが、全体のスループットを低下するのを防ぐため、3つのタスクは互いに非同期で動いている。

センサタスクのスループットはビジョントラッキングタスクより遥かに高いので、画像処理によって検出できない大きな相対回転角 R_s を回転角センサでは検出可能である。よって、 $R_s a_t > \cos \theta_T$ の時（ a_t は現在の目標制御角ベクトル、 θ_T は閾値） R_s をキャンセルするためにセンサタスクのデータがコントロールタスクによって制御に適用される。本実装では、閾値 θ_T は経験的に5度に設定した。また、センサタスクのみでスタビライズ制御をおこなった場合の無駄時間は実測で0.2秒であった。本研究で実装したセンサタスクでは立った場合や着席時の激しい動きにはスタビライズが追従できないが、立ったまま工具を取る作業や着席状態での半田付けや工具を取っての工作作業では、スタビライズが十分に追従可能であった。

表 2.2: 作業別の作業者の動作の平均角速度の値

単位: ($^{\circ}$ /sec)

		yaw	pitch	roll
着席	半田付け	0.97	0.2	0.08
	工具を取り、工作作業	1.95	0.041	0.125
	シャドウボクシング	127	28	35
立ち作業	工具をとる作業	14.1	1.59	3.5
	シャドウボクシング	123	33	46

しかしながら、回転角センサの計測値には誤差が有る上、装着者の平行移動成分は含まれていない。そこで、2.2.1 節で解説する画像処理により取得した相対回転角行列 R_v を使い、新しい目標制御角ベクトルとして $R_v a_t$ を設定する。また、画像処理の計算コストとシステムの消費電力を低減するため、WACL のアクチュエータの角度 a_p と a_t が $a_t^T a_p > \cos \theta_T$ の時、ビジョントaskは停止している。

このアルゴリズムを用いることで、装着者の大きな動きによって撮影画像に指示対象物やその周辺が映っていないと判断した場合は、回転角センサの計測値 R_s を使う。一方、映っていると判断した場合は、画像処理による移動量推定の値 R_v を用いる仕組みになっている。

2.2.1 画像処理による移動量推定

ここでは、回転角センサの計測値の誤差と装着者の平行移動成分を考慮にいたった映像のスタビライズ機能を実現するための画像処理について述べる。あらかじめ定点撮影をしたい対象を写した画像（以後、指示画像と呼ぶ）から、複数の特徴点を抽出しておく。そして、各時点で撮影された画像（以後、更新画像）に対して、指示画像で抽出された特徴点の移動量を特徴点追跡処理により計測し、外れ値の除去を行う。その結果を用いて2 画像間の2 次元アフィン変換パラメータを推定し、画像中心の移動量を計算することにより、WACL の回転角度を決定する。なお、特徴点の抽出と追跡には、Lucas-Knanade 法 [7] を用い、得られた各特徴点の移動量から外れ値を除去するために LMedS 推定 [6] を行う。図 2.6 左上は指示画像、左下は更新画像を表しており、図 2.6 右上は、LMedS 推定前の指示画像と更新画像間での対応する各特徴点の移動を表している。図中の緑の点が抽出した指示画像の特徴点で、それに対応する更新画像の特徴点が赤の点になっている。図 2.6 右下は、外れ値を除去のための LmedS 推定適用後の画像間の特徴点の移動を表しており、図から外れ値が除去されている様子が読み取れる。

図 2.7 は、画像処理による補正の有り無しで、映像のスタビライズ機能の性能がどの程度

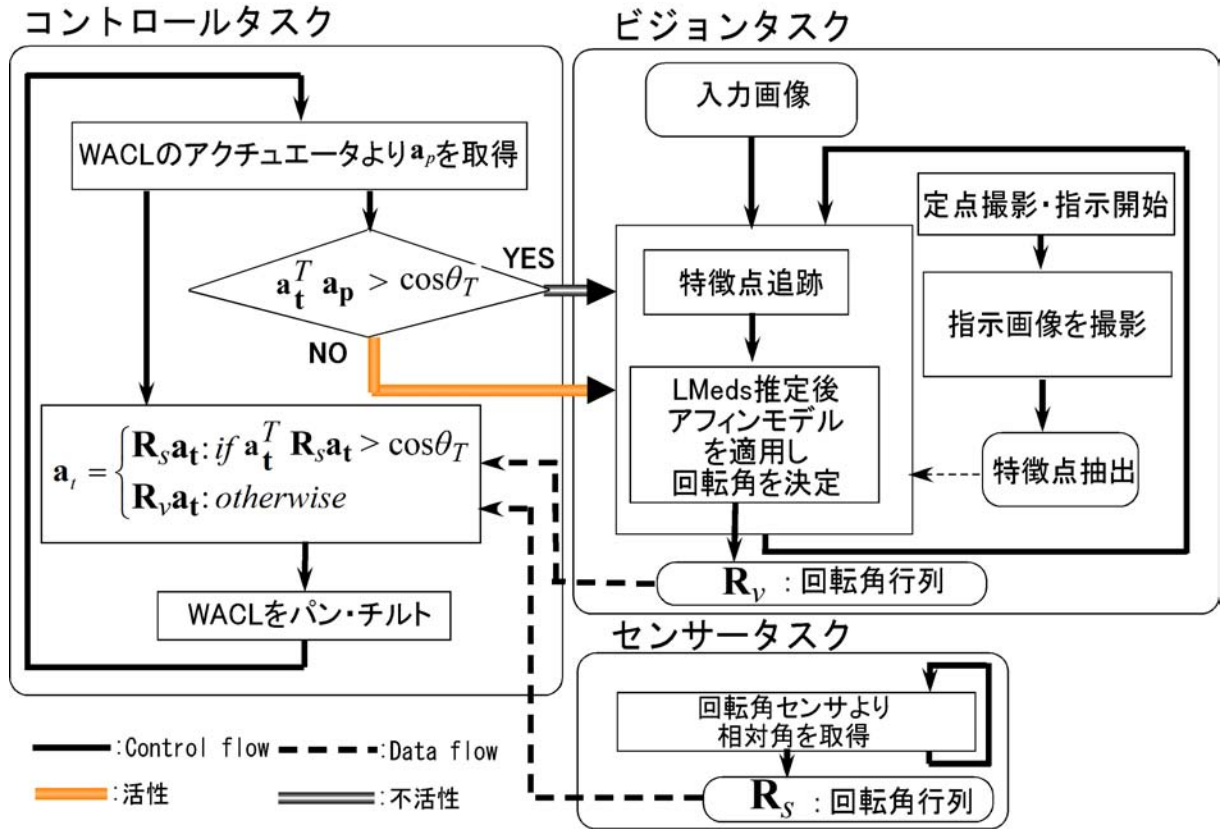


図 2.5: 映像のスタビライズ機能の流れ図

異なるかを評価した実験結果の一例を示している。この実験では、WACLの土台を0.8秒前後で約40度パンし、レーザポイントが指すべき目標点と実際のレーザポイントの位置との距離を更新画像上(320x240画素)で目視で計測後、角度に変換した。尚、カメラの水平画角は約49度である。

表2.3は、パンをしてから約1.5秒後におけるレーザスポットと目標点との位置ずれを図2.7と同じ実験を10回実施して計測し、その平均と標準偏差を示したものである。尚、WACLのPIDゲインは画像処理による補正の有り無しに関わらず一定とした。このように画像処理有りの場合は無しの場合に比べ、目標に対しより接近していることが判る。ただし、この実験は、小型・軽量化を重視し小型DCモータや小型ギアを内蔵した第一世代のWACLを用いたため、制御に問題があり指定した角度には静止しない。よって、表2.3や図2.7からわかるように、収束しきってはいない。

2.3 CWDによる視覚的アシストの提供

指示者が周囲の状況の変化に合わせて指示を行ったり、複雑な図面などを元に複雑な組み立て作業の指示を行う場合など、指示内容を言葉で明示的に説明し作業時間が長くなる恐れ

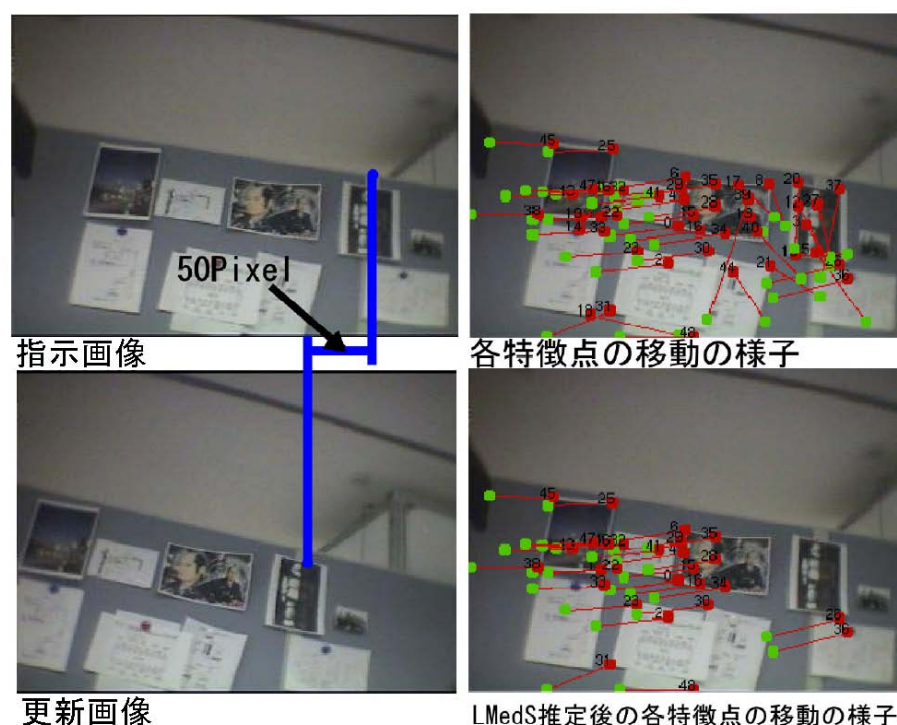


図 2.6: 指示画像・更新画像間の特徴点移動量と LMedS 推定による外れ値除去の結果

表 2.3: 約 1.5 秒後の目標点とレーザスポットの距離の平均と標準偏差

単位 (角度)	回転角センサと画像処理	回転角センサのみ
平均	3.50	5.95
標準偏差	2.42	3.67

がある。そこで、本研究では、WACL で充足した他の重要な要素を損なわない方法で、作業者に指示者からの指示に関する映像を提供することにした。

これを実現するために現在での現実的な手法として、WACL ユーザに、レーザスポットに比べより高度な視覚的アシストを提示できるディスプレイ装置を付加することにした。CWD (Chest Worn Display) はハンズフリー、アイフリー、ヘッドフリーに代表される WACL が満たした 7 つの重要な要素を維持したまま、作業者に高度な視覚的アシストを提供するために考案された。CWD は、使用者の胸の前にディスプレイをとりつけるもので、図 2.8 のように使用者はディスプレイを見下ろすかたちで閲覧し使用する。

本研究では、WACL の持つレーザスポットによる直接・直感的な指示機能や視野の制御性がもたらす状況把握機能を活かしながら、レーザスポットの点による表現力では説明しづらい複雑な組立作業などの場面で、CWD による動画や線画など高度な視覚的アシストを作業者に適切に提供し、遠隔作業指示をスムーズに行えるシステムを目指す。

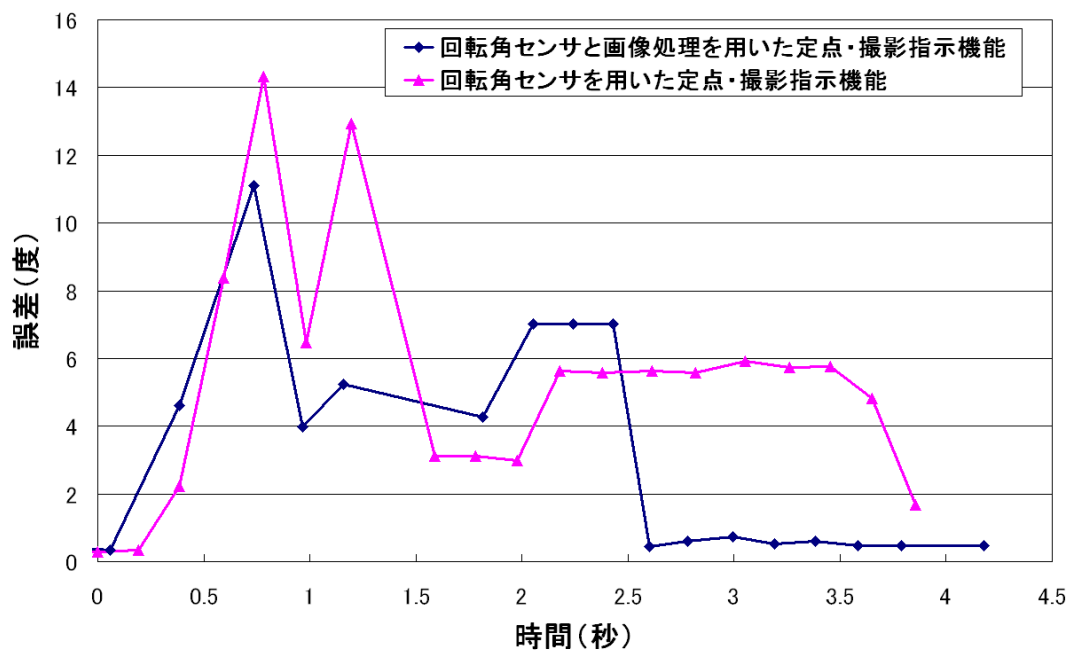


図 2.7: 映像のスタビライズ機能の実験結果 (画像処理の補正有り・無し)



図 2.8: CWD の外観

第3章 WACLユーザテスト

この章では、WACLを用いた遠隔作業指示システムの利点と限界の調査を行ったユーザーテストについて述べる。

本章のユーザテストでは、遠隔協調作業において、WACL インタフェースを用いた場合と、HMD 及び HMC から成るヘッドセットインタフェースを用いた場合とを比べる。本実験のシナリオとして、筆者らは、移動の必要がある現場作業者と遠隔地の指示者との協調作業に関心を持っている。具体的には、複数地点を移動し作業を行うネットワーク技術者が、遠隔地に居る工事監督者から、どの部屋に行き、どの端子に対し作業をするのかなどの指示を受ける例などが考えられる。この種のシナリオでヘッドセットシステムを用いた実験例（[[30][31]] など）はこれまでも数多く報告されているが、ヘッドセットシステムと、WACL のようなウェアラブルアクティブカメラ・レーザとの比較はまだ成されていない。このユーザテストの最終目的は、作業完了時間、使いやすさ、コミュニケーションの仕方やユーザの嗜好において、WACL システムとヘッドセットシステムとの間でどのような違いがあるかを評価することにある。

ヘッドセットシステムと WACL システムの間には、機能面で多くの重要な相違点が存在する。ヘッドセットシステムでは、遠隔地の指示者が遠隔地の状況を、作業者の HMC で撮影された映像によって把握する。これは、“作業者の目を介して”映像を見ているようなものである。一方、WACL システムでは、遠隔地の指示者は作業者の動きとは独立して視点を制御できる。また、ビデオシースルー HMD システムでは、実世界の映像の上に視覚的支援が重畳されるが、WACL システムではレーザスポットで実物体を直接指し示すことができる。さらに、WACL の視覚的支援は、基本的にレーザスポット（点）のみであるが、HMD では映像上に線画を描くなどのより高度な視覚的支援を提供できるという違いもある。

従って、筆者らは遠隔制御可能なカメラは遠隔地の指示者に効果的な状況把握能力を持たせることができ、さらに、作業者が HMD に映された視覚的支援付きの作業場所の映像を見るよりも、実作業空間上に投影されたレーザスポットを見る方が、作業者を作業空間に集中させ続けられるだろうという仮説を立てた。また、手順の説明を要する場面では、指示者は WACL を装着した作業者に対しより多く発話し、視点の変更が要求される場面では、ヘッドセットを装着した作業者により多く発話するであろうという仮説も立てた。

3.1 WACL を用いた遠隔作業指示システム

本ユーザテストで利用した WACL を用いた遠隔作業指示システムについて述べる。作業者は、図 3.3 右に示すように、WACL、回転角センサ（InterTrax2）、マイク、ヘッドホン、およ

びサブノート PC(Pentium-M 1GHz RAM:256MB 重量:約 1kg Panasonic Let's note CF-R2) 入りのバックパックを着用する (重さ約 2kg)。また、図 3.4 上に示すように第一世代 WACL からの映像 (JPEG、320x240、15Hz) とマイクからの音声 (16bit、48000Hz) はサブノート PC でキャプチャされ、WACL のパン・チルト角情報と共に、無線ネットワーク (IEEE802.11b) を介して遠隔地の PC に送られる。カメラの水平画角は約 49 度、WACL のパン・チルト角の限界は、それぞれ 84 度、82 度に設定されている。第一世代のパンの限界は、200 度だが左肩の下に取り付けており 90 度付近では作業者の胴体のみを撮影してしまうので、この角度に設定をした。

遠隔地の PC には図 3.1 に示すような GUI が実装されている。GUI の左上にはライブ映像が表示されている。また、GUI 下側には WACL の姿勢を容易に確認しながら素早く広範囲に渡って操作できる仮想パノラマ機能 (Pseudo-panoramic View) が実装されている。ライブ映像や仮想パノラマ上で左クリックすると、クリックした位置が映像の中心およびレーザースポットが照射される中心になるように WACL が制御される。レーザーのオン・オフは右クリックによりトグルで切り替えが可能である。また、仮想パノラマは、最後に撮影された画像が、仮想パノラマの領域上に表示され続けるようになっており、装着者が椅子などに座って静止して作業する場合は、指示者に状況把握能力を大きく向上させる。

WACL の映像のスタビライズ機能はマウスの中クリックにより起動する。その際に、GUI の右上にクリックした時点の指示画像が表示され、どの目標に対してスタビライズしているのかを確認できる。なお、画像を用いた映像のスタビライズ機能は対象の見え目が大きく変化する状況では正常に機能しない場合があるため、本章のユーザテストでは回転角センサのデータのみに基づいた映像のスタビライズ機能を使用した。これら WACL の制御データ (パン・チルト角、レーザーのオン・オフ) と指示者の音声は、やはり IEEE802.11b で構成された無線ネットワークにより作業者のサブノート PC へ送信される。

これらの機能によって、指示者は、遠隔地の協調作業者は装着者の動作や視点移動の影響を受けずに、実作業環境を観察し、音声とレーザーポインタで的確に指示を送ることができる。

3.1.1 HMD/HMC ベースの遠隔協調作業ヘッドセットシステム

ヘッドセットシステムの作業者の外観は図 3.3 左に示す通りであり、作業者は HMD(MicroOptical SV-6、640x480 画素)、HMC、マイク、及びヘッドホンを備えたヘッドセットとサブノート PC (Pentium-M、1GHz) 入りのバックパックを着用する (重さは WACL システムと同じく約 2kg)。なお、カメラは WACL に装備されているものと同じカメラを用いた。

図 3.4 下に示すように、カメラ映像とマイクからの音声はサブノート PC でキャプチャされ、無線ネットワークで遠隔地の PC に送られる。図 3.2 に示す指示者側の GUI の左上にはライブ映像が表示されており、ライブ映像中を中クリックすると、その時点の静止画が右上に表示される。ヘッドセットシステムは、DOVE[13] と似たような機能を持っており、左クリックによりライブ映像と静止画に線画を描くことができる。また、このような遠隔地の撮影映像に対して指示内容を書き込むことは、多くの過去のヘッドセットシステムを用いた研究では一般的な方法である。遠隔地のカーソル表示のオン・オフは右クリックにより行う。

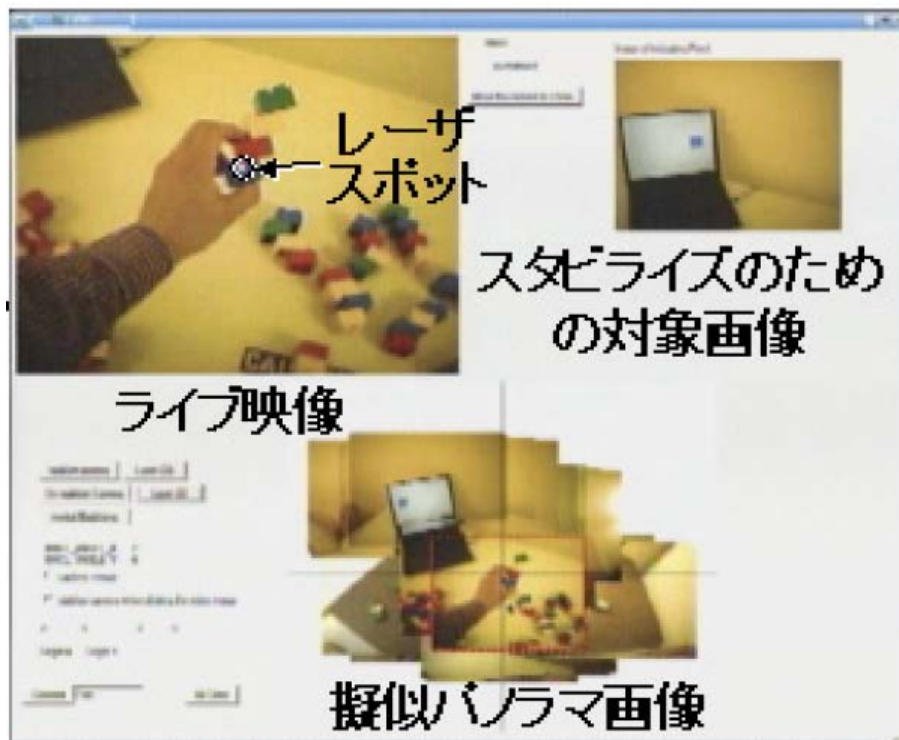


図 3.1: 指示者が使用した WACL 用 GUI ソフトウェアインタフェース

また、作業者の HMD にはマウスカーソルが上に載っている方の画像が表示される。つまり、カーソルを動かすだけでどちらの画像を作業者に見せるかを選択できる。このような操作で、作業者はライブ映像や静止画、カーソルの動く様子、線画を HMD で見ながら、指示者の音声聞くことができる。

3.2 タスク

本ユーザテストでは、前述のようにウェアラブル端末が重要な役割を果たすと考えられる遠隔作業指示として、移動を伴う作業を実施する作業者と、遠隔地からその作業者に指示を送る熟練指示者との協調作業を想定し、そのような作業の構成要素を多く含むタスクを設定した。そのタスクを実施する作業者側の実験環境は、図 3.5 のように、A、B、C、HOME の 4 セクションから成る。A、B、C 各セクションには数個のブロックを組み合わせて作った複数のブロッククラスタを散らばらせて置き、HOME セクションには全長約 67cm のベースブロックを配置した。遠隔地の熟練指示者は隣の部屋に隔離され、指示者と作業者はネットワーク越しでしかコミュニケーションが取れない状態とした。作業者は、各セクションで表 3.1 のようなタスクを行う必要があった。

セクション C の PC モニタには”0”、“1”を示す単純なアニメーションが繰り返し提示されており、約 12～15 秒観察すると”000”から”111”までの組み合わせが判明し、指示者はどの

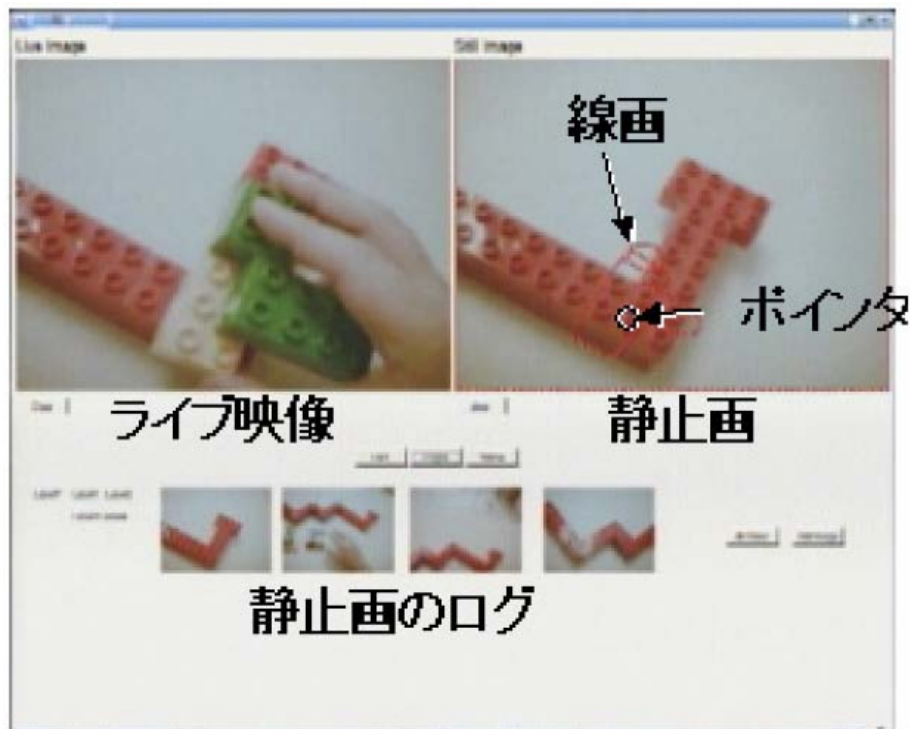


図 3.2: 指示者が使用した HMD 用 GUI ソフトウェアインタフェース

ブロッククラスタを取るべきかを知ることができる。

一方、作業者は、そのブロッククラスタを取る前に、単純なブロック組み立て作業をする必要があり、この作業が PC モニタを見続けることを困難にさせている。例えば、実際の作業においても、キーボードを打ちながらモニタを見たり、配線などの作業を行いながらインジケータや機械の挙動を確認する場合のように、指示者が見たい場所と作業者が見たい場所が異なることがあり得るため、本実験ではこのようなセクションを設定した。

HOME セクションは、各タスクから取ってきたブロッククラスタを、ベースブロックの要求された場所・方向で取り付けるため、細かい場所や向きの指示が必要となった。ユーザテストの各試行は、必ず HOME セクションの椅子に座っている状態から始まり、HOME セクションの椅子に座った状態でのブロッククラスタ取り付けタスクで終了した。その間、セクション A、B、C は各 1 回ずつ立ち寄る必要があり、また、途中必ず 1 度 HOME セクションに戻り、その時点で保持しているブロッククラスタを HOME に置くことになっていた。各セクションに立ち寄る順番、取ってくるブロッククラスタ、PC モニタに表示されるコード、HOME セクションのベースブロックのどの部分にどのブロッククラスタを取り付けるかは、試行ごとにランダムに設定された。また、各試行では、すべてのブロックを十分な解像度で 1 画像中に捉えることができないように、空間的に分散させて配置した

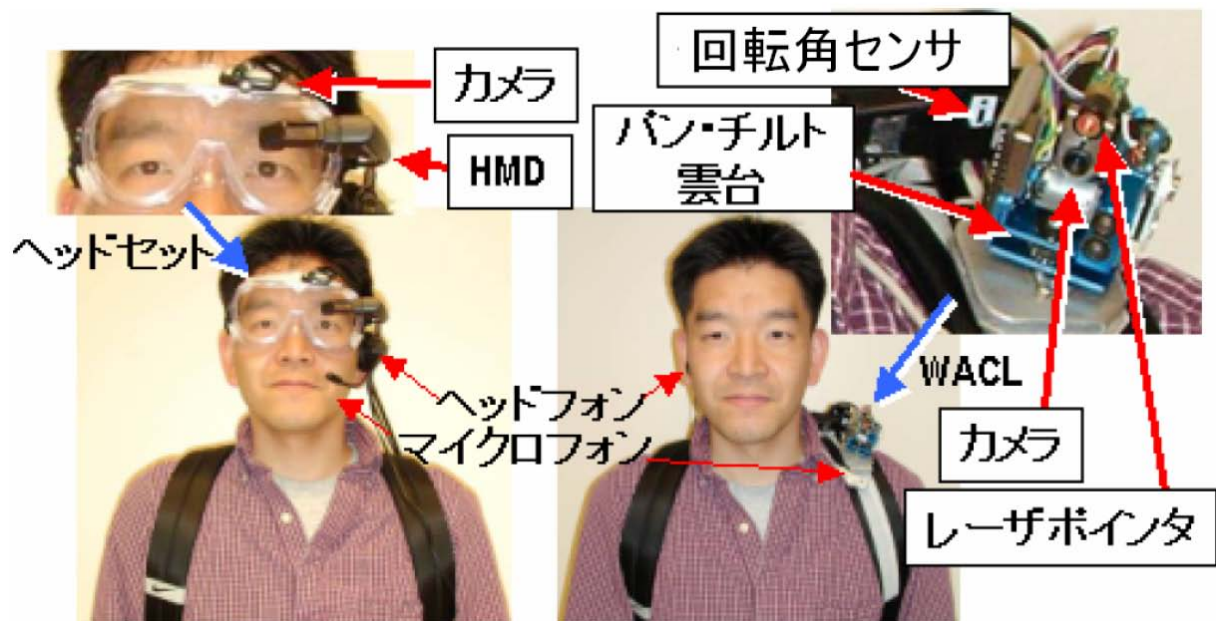


図 3.3: HMD/HMC ベースのヘッドセット (左) と WACL (右)

3.3 被験者

本ユーザテストでは、16 名 (24 歳から 38 歳、男性 9 名女性 7 名) を作業者とした。2 名の熟練指示者 (24 歳と 33 歳の男性) は、おののお 8 名ずつとペアを組んで指示を担当した。ヘッドセット、WACL を用いたシステムそれぞれで、トレーニングのための試行を 1 回、実際の試行を 1 回実施した。持ち越し効果を分散させるために、8 組は、ヘッドセット、WACL の順に試行を行い、残りの 8 組は WACL、ヘッドセットの順とした。また、各組は最後に、WACL とヘッドマウントカメラの両方 (HMD はつけない) を装着し、作業者視点映像と WACL 視点映像の両方を収集するための試行を 1 回実施したため、1 作業者あたりの実験の試行回数は 5 回となった。

ユーザテストへの動機付けのため、試行を開始する前に各作業者には、最も早く正確に試行を完了した者には賞品を進呈することを告げた。指示者に関しては、実験の途中で指示者の学習効果が表れないように、パイロットテストを含め事前に何度もこの試行をこなした。

3.4 実験結果

このユーザテストの実際の試行 (トレーニングのための試行ではない) のビデオログに基づいて、作業完了時間を計測し、手動でトランスクリプトを作成した。そのトランスクリプトから、モーラ (日本語の音節の単位) の数、ブロッククラスタの選択・組み立ての指示に関する単語数、及び作業者の位置・視点の指示に関する単語数を、セクションごとに作業者・指示者別で数え上げた。また、各作業者にはアンケート、及びメールや口頭での追加インタ

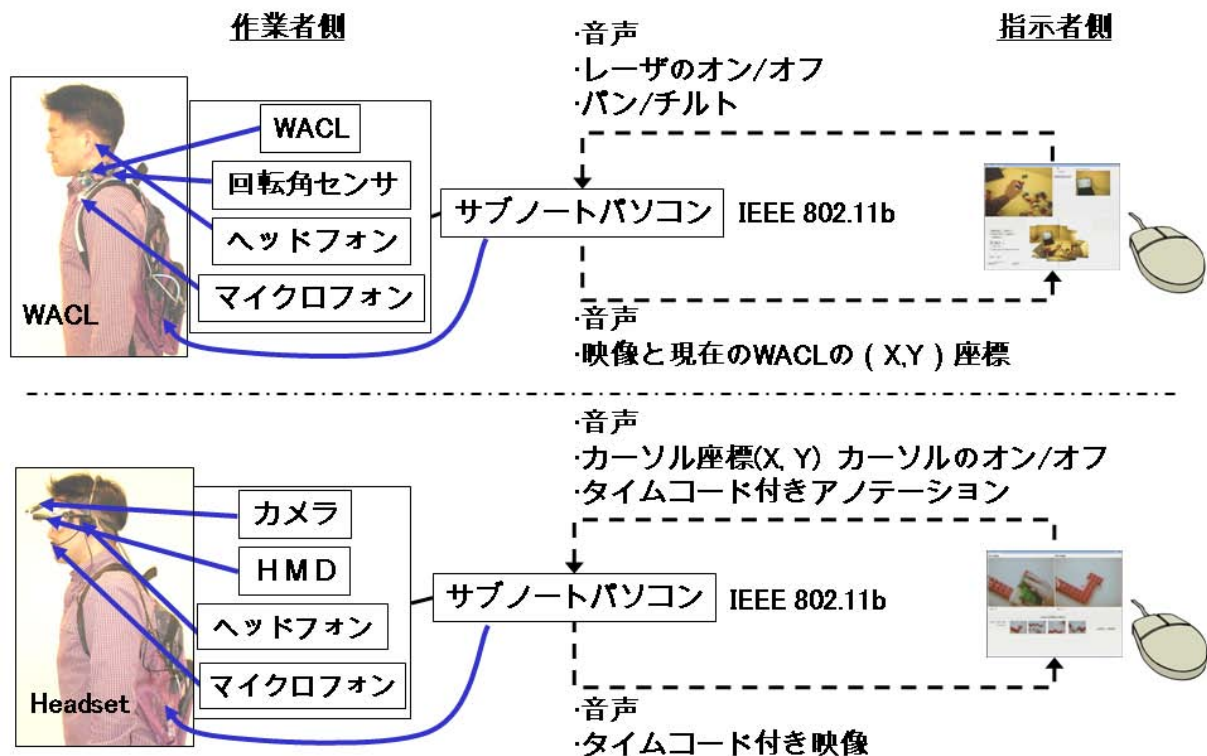


図 3.4: 遠隔協調作業システム (上: WACL、下: ヘッドセット)

ビューにより、ヘッドセット及びWACLの印象、疲労度、使いやすさを絶対・相対評価してもらい、統計的解析を行った。

3.4.1 作業完了時間

前述のように、本実験ではビデオログデータを用いて、各セッションでの作業完了時間と移動時間を含めた合計作業時間を計測した。まず、図 3.6 左に合計作業完了時間の箱ヒゲ図を示す。縦軸の Headset1、Headset2、WACL1、WACL2、WACLHMC は、それぞれ、ヘッドセットのトレーニングのための試行・実際の試行、WACL のトレーニングのための試行・実際の試行、作業者視点及び WACL 視点映像を収集するための試行を示す。ヘッドセットの実際の試行 (Headset2) と WACL の実際の試行 (WACL2) の作業完了時間に関してウィルコソンの符号順位和検定を行ったところ、2 つの作業完了時間の間に有意な差は見られなかった ($p=0.5$)。また、性別、指示者、身長、コンピュータの使用頻度との相関も特に見られなかった。

図 3.6 右は、ヘッドセット、WACL の実際の試行におけるセッションごとの作業完了時間の箱ヒゲ図である。縦軸の Headset2、WACL2 はヘッドセットの実際の試行か WACL の実際の試行かを示し、A、B、C、HOME、MOVE は、それぞれ、セッション A、B、C、HOME、およびセッション間の移動時間を示している。ヘッドセットと WACL の各セッションでの作

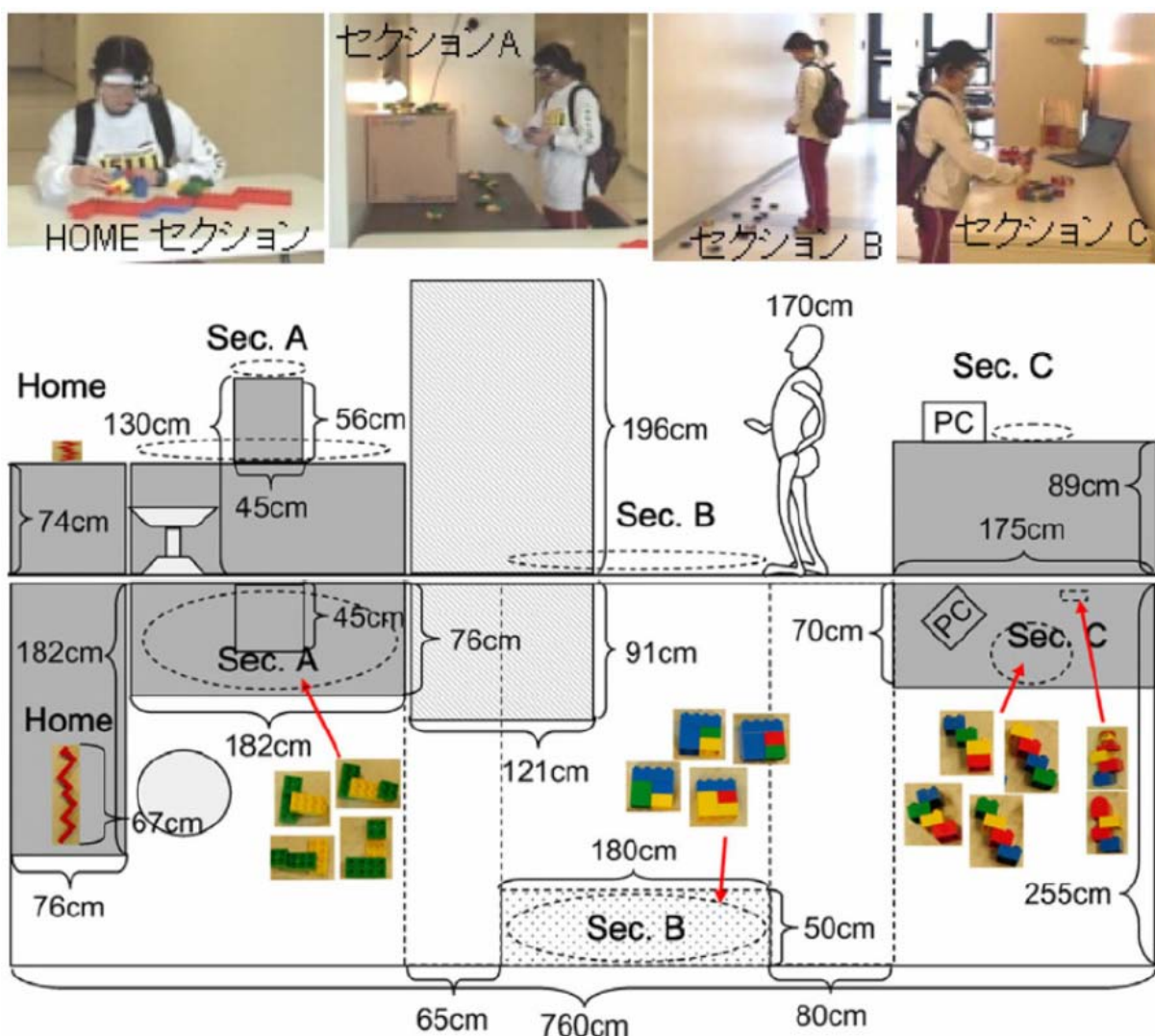


図 3.5: 本ユーザテストの作業空間

業完了時間に関してウィルコクソンの符号順位和検定を行ったところ、セクション C で有意な差が見られた (セクション A : $p=0.21$ 、セクション B : $p=0.48$ 、セクション C : $p=0.007$ 、HOME セクション : $p=0.12$ 、移動時間 : $p=0.38$)。

3.4.2 会話解析

WACL システムとヘッドセットシステムのどちらの場合においても、指示者の発話によるモーラ数は全体の約 90% を占めていた。ヘッドセットシステムでの指示者のモーラ数は、WACL システムのそれよりも有意に少なかった (ウィルコクソンの符号順位和検定: $p=0.03$)。しかし、作業者のモーラ数は WACL システムとヘッドセットシステムとで統計的に違いがなかった。そこで単語数については指示者に絞って詳しく解析した。図 3.7 は、選択・組み

表 3.1: 各セッションでのタスク

セッション	タスク
A	12個のブロッククラスタから指示者が要求する2個を取る。各ブロッククラスタは、緑と黄色のブロックからなり、 <u>形状が異なる</u> 。
B	12個のブロッククラスタから指示者が要求する2個を取る。各ブロッククラスタは、同じ形をしているが、 <u>色の組み合わせが異なる</u> 。
C	(1-a) 指示者にPCモニタを十数秒間見せる。 (1-b) 単純なブロック組立作業を8回繰り返す。 (2) 11個のブロッククラスタから指示者が要求する1個を取る。 <u>指示者は、PCモニタの表示からどれを選ぶべきかを知ることができる</u> 。各ブロッククラスタは、異なる形状をしており、色の組み合わせも異なる。
HOME	各セッションから運んできた計5個のブロッククラスタから指示者が要求する2個を、ベースブロック上の <u>要求される位置に要求される向き</u> で取り付ける。

立ての指示に関する単語数と作業者の位置・視点の指示に関する単語数を、それぞれのセッションごとに比べたものである。選択・組み立ての指示に関する単語数は、セッション A と HOME では、WACL システムに比べ、ヘッドセットシステムを用いた場合の方が有意に少なかった(図 3.7 左)。しかし、セッション B と C では2つのシステム間で単語数に違いはなかった。また、すべてのセッションにおいて、位置・視点に関する指示者の単語数は WACL の場合の方が有意に少なかった(図 3.7 右)。

3.4.3 主観評価 (アンケート & インタビュー)

各作業者には、アンケートやメールや口頭での追加インタビューにより、ヘッドセット及び WACL の印象、疲労度、使いやすさを絶対評価、相対評価してもらった。まず、ウィルコクソンの符号順位検定により両デバイスの絶対評価の結果(図 3.8 左)を比較した。”各デバイスを用いた指示がわかりやすかったかどうか”(図中の Q1 と Q7、 $p=0.43$)、各デバイスを用いて指示者になにか確認をするといった”コミュニケーションは簡単だったかどうか”(Q6 と Q12、 $p=1.0$) について違いはなかった。

次に、”各デバイスによる視覚的な支援(ヘッドセット：画像や画像上のカーソルおよび線画 WACL：レーザスポット)は見やすかったかどうか”(Q3 と Q9、 $p=0.13$)、”各デバイスの視覚的支援で指示されたブロックや場所と実作業空間のそのブロックや場所とを対応付けることは簡単だったかどうか”(Q4 と Q10、 $p=0.11$) については、統計的には有意な差は見ら

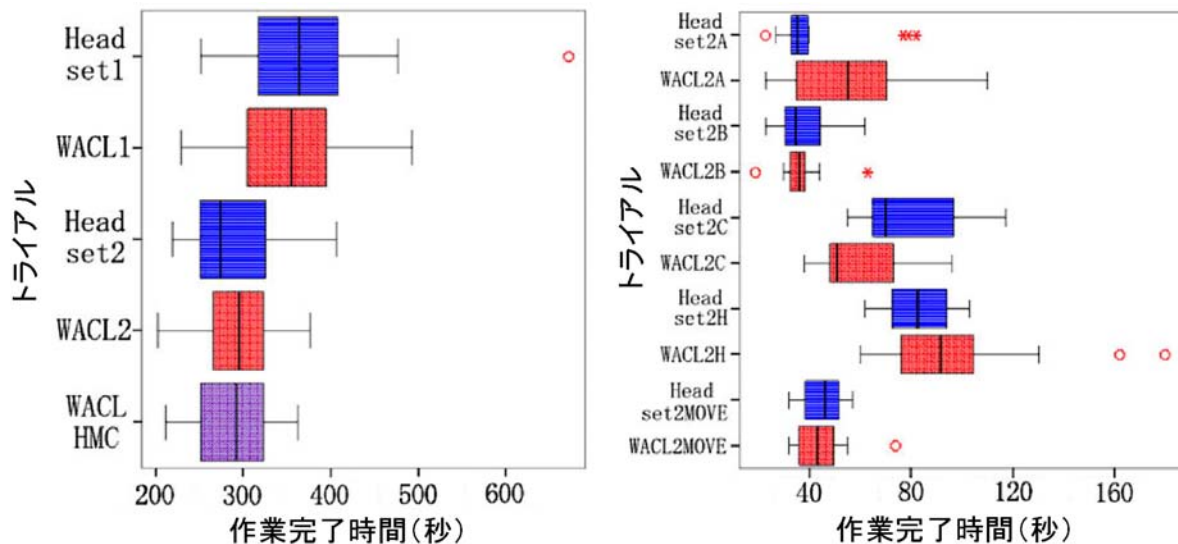


図 3.6: 合計作業完了時間 (左)、セクション別作業完了時間 (右)

れなかったが、図からもわかるように WACL の方がよい評価を得た。また、“各デバイスを身に付けて違和感はなかったかどうか”(Q2 と Q8、 $p=0.002$)、“各デバイスを使っているときに実作業空間は見やすかったかどうか”(Q5 と Q11、 $p=0.003$)については、有意な差が見られ、WACL の方が統計的に良い評価を得た。

ヘッドセットと WACL との各相対評価 (図 3.8 右) について、1 サンプルの t 検定 (検定値 = 4) を行ったところ、“作業をして疲れたのはどちらですか?”(Q14) という設問のみ有意な偏りが見られた ($p=0.016$)。つまり、ヘッドセットの方がより疲れたという評価であった。“トレーニングによって、いち早く慣れることができたと感じるのはどちら?”(Q13、 $p=0.173$)、“どちらが作業をしやすかったですか?”(Q15、0.787)、“指示者を身近に感じたのはどちらですか?”(Q16、 $p=0.304$)、“どちらのほうが早く作業を終えたと思いますか?”(Q17、 $p=1.0$) の各設問では、特に有意な偏りは見られなかった

3.5 考察

作業完了時間

今回のユーザテストでは、ヘッドセットと WACL との間で合計作業完了時間に有意な差はなかった。しかし、セクションごとの作業完了時間において、セクション C では、WACL の方が早いという有意な結果が得られた。これは、指示者が装着者の動作や視点移動をあまり受けずに視点を選べる WACL の利点によるものと考えられる。具体的には、ヘッドセットを着用した作業者はブロック組立作業をしながら、PC モニタを指示者に見せ続けるというのが非常に困難であったが、一方、WACL の場合、指示者は作業者の視点とは関係なく、PC モニタに WACL を向けることができるため、作業者が組立作業をしている間も PC モニ

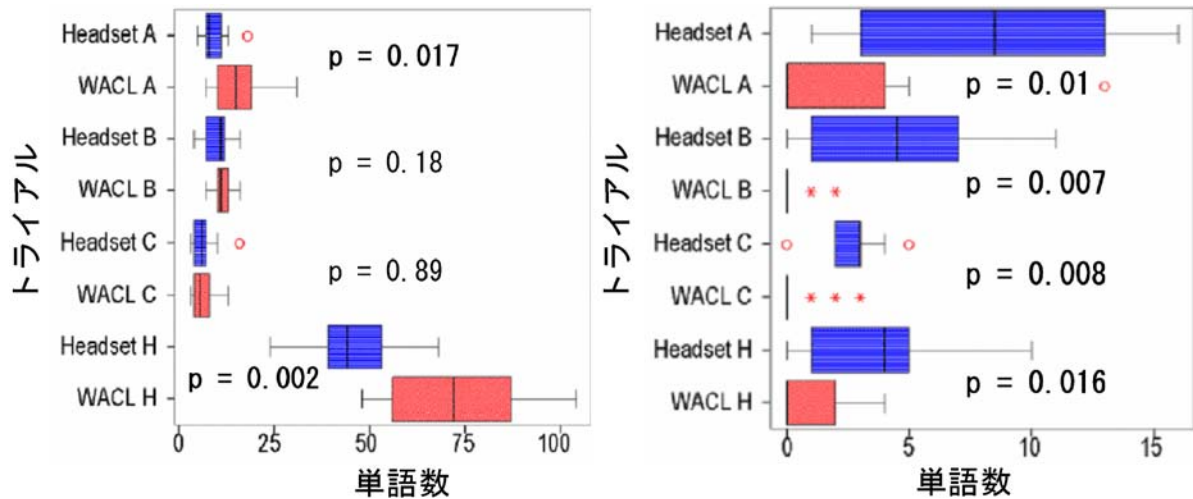


図 3.7: ブロッククラスタの選択・組み立ての指示に関する単語数（左）と作業者の位置・視点の指示に関する単語数（右）

タを観察することができた。ほとんどの作業者は組立作業によって上体を揺らしたり肩を左右にひねったりしたが、スタビライズ機能を作動させることで比較的安定して PC モニタを観察し続けることができた。さらに、いくつかのケースでは、作業者が組立作業をしている間に、指示者は PC モニタの表示を見終わりブロックを探し始めることができた（図 3.9）。この例は、作業者と指示者が、ほぼ同じ場所を見ているが、実際は違う目標を注視している場面でも、WACL の視点制御が有利なことを示している。

他のセクションでは統計的に有意な差はなかったが、HOME セクションとセクション A では、ヘッドセットの方が早いという傾向があった。HOME セクションでは、ベースブロックにブロッククラスタを取り付ける際に、指示者はどこにどう取り付けるかについての細かい説明をする必要があったが、ヘッドセットの場合、静止画像上へ線画の描画が可能であったため、言葉での詳細な説明はあまり必要ではなかった。一方、WACL では、パン・チルト機構の位置決め精度の不足や、作業者の体の動きによるレーザの位置ずれのため、ポインティングの操作を繰り返すことが多かった。また、ブロックをどのように回転させるかといった指示をレーザだけで行うのは難しく、言葉での詳細な説明を伴う指示となった。これらの要因により、HOME セクションではヘッドセットの方の作業完了時間が早いという傾向が出たものと思われる。これを裏付けるように、作業者からは、HMD の線画による指示は非常にわかりやすかったという多くの意見を得た。

また、対象物体の画像上の解像度の高さは、色（セクション B）を見分けるよりも、形状（セクション A）を見分けるのにより必要となる。ヘッドセットでは、HMD で対象がどのように写っているかを確認しながら能動的に作業者に見せることが容易であったが、WACL では、画像にどのように対象が写っているかを確認する手段がなかったため、指示者がブロック形状を判断しづらい場面があった。このような要因がセクション A での完了時間の差になって表れたものと思われる。

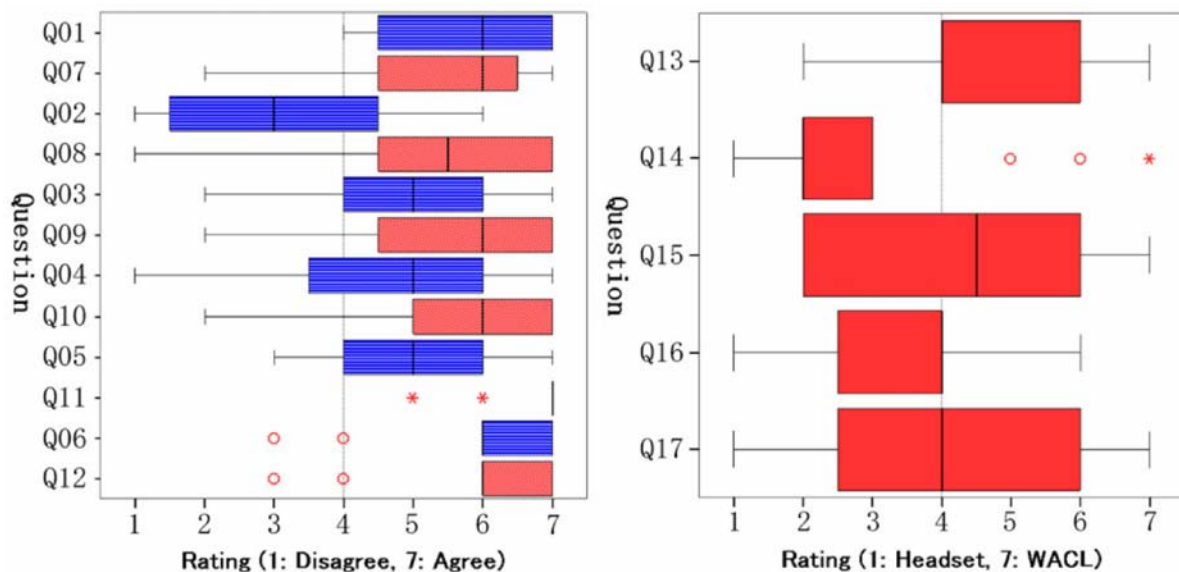


図 3.8: 絶対評価 (Q1-Q6 : ヘッドセット、 Q7-12 : WACL) と相対評価 (1 : ヘッドセット、 7 : WACL)

会話解析

今回の会話解析は指示者 2 名のみのデータに基づいているため統計的価値が高いとは言えないものの、手順の説明を要する場面では、指示者は WACL を装着した作業者に対しより多く発話し、視点の変更が要求される場面では、ヘッドセットを装着した作業者により多く発話するという結果を得た。セクション A、B、C における作業者の主な仕事は、指示者が要求したブロッククラスタを取ることであった。WACL のレーザによる視覚的支援は、ブロッククラスタを特定する段階では有用だったが、HOME セクションでの組み立て作業の様に詳細な手順の説明を必要とする段階ではあまり有用ではなかった。ヘッドセットの場合、前述のように指示者は静止画に線画を描画できたため、ブロッククラスタを付ける位置や方向を詳しく口頭で説明する必要はなかった。そのため、指示者は 2 名とも、HOME セクションでのブロック組み立て作業において、「WACL の場合に発話の負担をより強いられた」という印象をもった。

前述のように、WACL では、時折、映像中のブロッククラスタの形状が不明瞭で、指示者が間違った指示を作業者に送ることがあった。これにより、セクション A での選択・組み立てに関する単語数が増加した。この問題は、ズーム機構やより高解像度のイメージセンサを用いることで軽減できるかもしれない。

また、全てのセクションにおいて、指示者は全ての物を一度で見渡すことが困難だった。ヘッドセットの場合、指示者は作業空間を思い通りに見ることができるよう、しばしば言葉で作業者に協力を仰がなければならず、それが各セクションにおける位置・視点の指示に関する単語数を増加させる原因となった。この問題は魚眼レンズに代表される広角な光学系



図 3.9: WACL の映像のスタビライズ機能 (WACL の回転角センサのみ) を有効にした場合、WACL がモニタを撮影し続ける例 (この映像は、視点映像収集タスクで録画された)。最も右側の画像は、作業者がまだブロックを組み立てている時に、指示者は目的のブロッククラスタを探していることを示している。上は WACL (指示者) の視野、下は作業者の視野。

を用いることで解決する場合もないとは言えない。ただし、画像を十分な解像度で取得するには、高解像度カメラの小型化や遠隔地間での通信帯域の確保が必要となる。また、もしこれらの課題が解決し、例えば魚眼レンズを用いたとしても、作業対象の詳細を知りたい場合は、作業者に協力を仰ぐ必要は依然としてあると考えられる。

主観評価

アンケートやインタビューの結果より、着用時の違和感、視覚的な見易さ、疲労感の面で WACL の方が使用者に優れた印象を与えるという結果が得られた。これは、WACL の持つ遠隔作業指示における有用性を示していると言える。ヘッドセットに対する作業者のコメントとしては、「画像と実世界のどちらを見ればよいが混乱した」、「眼が疲れた」、「作業中に少しずつ装着位置がずれてしまうのが気になった」、「装着して違和感があった」などがあった。最初の 2 つは網膜投影型の HMD などによってある程度解決できるが、後者の 2 つは頭部着用型デバイスに必ず伴う問題点である。

指示者のコメント

指示者 GUI を使ったコメントとして、HMD、WACL 用の GUI 共に、すぐに慣れて使いやすく指示も素早く正確にできるという意見を指示者から得た。また、仮想パノラマ機能は状況把握能力を向上させ、WACL を的確にすばやく動かせたという意見を得た。ただし、今回の実験では指示者は 2 人だけであり、統計的価値は乏しい。

第4章 WACL/CWDユーザテスト

4.1 CWDによる視覚的アシストの提供

前章では、WACLと、典型的なHMDとHMCからなるヘッドセットインタフェースとの間での作業効率やユーザビリティの違いを、主観的、客観的に評価した。作業効率の目安になる作業完了時間に関しては、両者の間に統計的な違いはなかったが、ユーザビリティに関してはWACLのほうが、装着時に快適であり、アイフリー・ヘッドフリーで装着者に眼や頭部への負担が少ないという結果が得られた。

一方、WACLで提示可能な視覚的アシストであるレーザスポットによる指示は、作業対象や場所を識別するには十分効果的であった[32][8]。しかし、レーザポインタの表現能力の低さから、協調作業での主な手順（”対象物・場所の識別” ”手順の説明” ”理解の確認”[17]）のうちの一つである“手順の説明”が複雑な場面で、線画を描いた映像を提示できるHMDを用いた場合に比べ、指示者の発話数が多くなり、それに伴い作業時間も長くなるという問題が判明した。

これを防ぐための現実的な解決法として、前述のようにWACLユーザにより高度な視覚的アシストを提示できるディスプレイ装置を付加することを提案した。この章では、WACLの持つレーザスポットによる直接・直感的な指示機能や視野の制御性がもたらす状況把握機能を活かしながら、高度な視覚的アシストを作業者に提供する場合、胸部に装着するCWDと、一般的なハンズフリーディスプレイであるHMDのどちらがWACLとの組み合わせにより適切かをユーザテストを実施し比較した。次に、実世界の作業場所とHMDまたはCWD上に表示される高度な視覚的アシストとを、WACLのレーザスポットがどの程度効果的に対応付けるのかについても調査を行った。

本研究では、HMDやCWDに表示する高度な視覚的アシストとして、作業空間の映像に作業内容を示す線画を描いた画像を用いることにした。遠隔協調作業において特に詳細な手順の説明を必要とする場合、作業空間の映像に指示者が作業場所や作業内容を線画で重畳して描いた画像を作業者に提供するのは、有用であることが以下の研究で報告されている。Ourらの提案したDOVE[13][17]では作業空間の映像に対して、指示者は線画が描けるうえ、ペンの軌跡からあらかじめ登録されたジェスチャーを認識し、その結果によりカメラをパンチルトまたはズームすることで遠隔の指示者が作業空間に設置したカメラを動かし作業空間の状況を把握できる。また、前章のユーザテストより、高度な視覚的アシストとして遠隔地で録画された作業空間の映像に対して指示者が線画を重畳して描いた画像を作業者に提供するのは、特に詳細な手順の説明を必要とする場面では有効であると報告されている。

4.2 WACL/CWD システム

図 4.1 は、作業者が WACL、CWD、マイク、ヘッドフォンで構成された WACL/CWD システムを作業者が装着した図である。また、PDA (640x480 画素、画面サイズ 8x6cm) を作業者の右胸の前に CWD として取り付けた。図 4.3 は、WACL の制御や CWD または HMD に提示する画像 (図 4.4) に線画を描くための指示者用 GUI である。WACL で撮影されるライブ映像は GUI の左上に表示される。その映像上で右クリックすると、その時点でのライブ映像が静止画として GUI 右上にコピーされ、その静止画上に重畳して線画を描くことができる。この線画が描かれた静止画は、線画を書き終えた段階で HMD や CWD に表示するのではなく、線画を描画している最中も同様に CWD や HMD に表示されている。GUI 下側には指示者に、状況把握能力を向上させると共に、WACL を素早く大きく回転させることが可能な仮想パノラマ機能が実装されている。ライブ映像や仮想パノラマ上で左クリックすると、そのクリックした位置がライブ映像の中心になるようにカメラ・レーザヘッドが制御される。図 4.5 のように音声、映像、WACL のパンチルト制御データなどは WiFi(IEEE802.11b) で送受信される。

4.3 実験設定

本研究では、ハンズフリーアイフリーヘッドフリーの特徴を有する CWD が、WACL の付加ディスプレイとしてどの程度効果的なのかを調べるため、比較対象として既存の一般的なハンズフリーディスプレイである HMD を WACL の付加ディスプレイとして選んだ。

WACL/HMD システム

図 4.2 は、作業者が、WACL、単眼 HMD (MicroOptical SV-9, 640x480 画素)、マイク、ヘッドフォンで構成された WACL/HMD システムを装着した図である。作業中でも HMD をできるだけ固定するために、HMD を取り付けた透明なゴーグルを使用した。また、HMD を自然に閲覧するため、ユーザテストを始める前に各作業者の効き目を調べた。図 4.1 は、作業者が WACL、CWD、マイク、ヘッドフォンで構成された WACL/CWD システムを作業者が装着した図である。また、PDA (640x480 画素、画面サイズ 8x6cm 24bit フルカラー) を作業者の右胸の前に CWD として取り付けた。

両眼の HMD を選ばず単眼の HMD を選んだ理由には、現在のビデオシースルの両眼 HMD では重量が重く作業中に装着位置がずれてしまうことが避けられない点、ずれてしまうと視界がみえず移動中に危険が生じる点を考慮した。また、オプティカルシースル型単眼 HMD を用いた予備実験では、背景と線画を描いた静止画が非常に見づらく、また投影スクリーンを支える枠が視界の邪魔になっていた。これらの理由より、本実験では軽量の単眼 HMD を用いることにした。

図 4.3 は、WACL の制御や CWD または HMD に提示する画像 (図 4.4) に線画を描くための指示者用 GUI である。WACL で撮影されるライブ映像は GUI の左上に表示される。その

映像上で右クリックすると、その時点でのライブ映像が静止画として GUI 右上にコピーされ、その静止画上に重畳して線画を描くことができる。この線画が描かれた静止画は、線画を書き終えた段階で HMD や CWD に表示するのではなく、線画を描画している最中でも同様に CWD や HMD に表示されている。GUI 下側には指示者に、状況把握能力を向上させると共に、WACL を素早く大きく回転させることが可能な仮想パノラマ機能が実装されている。ライブ映像や仮想パノラマ上で左クリックすると、そのクリックした位置がライブ映像の中心になるようにカメラ・レーザヘッドが制御される。図 4.5 のように音声、映像、WACL のパンチルト制御データなどは WiFi(IEEE8802.11b) で送受信される。



図 4.1: WACL/CWD システム

4.4 タスク

各作業員（被験者）は机（120x70cm、図 4.2 と図 4.1）の前に座り、机の上に置いた 21 個のブロッククラスタの中から遠隔の指示者が指定する一つを取り、それを卓上の固定されたベースブロックに、指示者が指定する位置・方向で取り付けた。各作業員は一回の試行でこのタスクを 4 回実施した。このユーザテストで使用したブロッククラスタとベースブロックは、図 4.6 に示すとおりである。

WACL の作業効率やユーザビリティの違いを調べた前章のユーザテスト [8][9][18] では、作業員が立った状態や座った状態で移動や作業を行う一般的なシナリオを調査していた。本論では、調査された一般的な作業のシナリオの一部から、詳細な指示が要求される場所で選択・取り付けを座ったまま行う作業を抜き出しユーザテストを行っており、すべての作業を座って行う遠隔作業指示だけを想定しているわけではない。

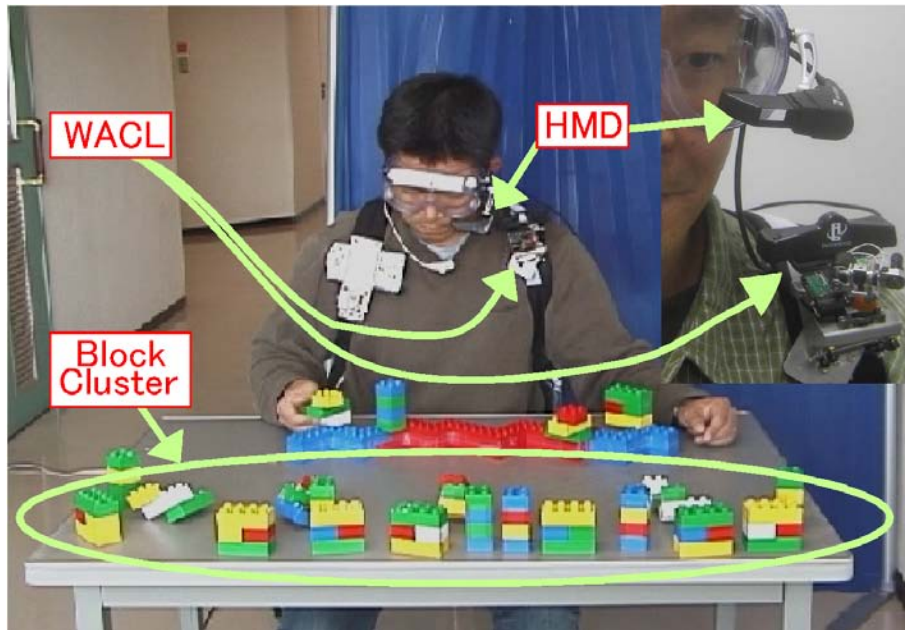


図 4.2: WACL/HMD システム

4.5 被験者と作業手順

本ユーザテストでは、20 歳代 7 人 30 歳代 1 人の男性 8 人の被験者が作業者となり、1 名の熟練指示者とペアを組んでタスクを実施した。各組は、「WACL のみ」、「WACL/HMD」、及び「WACL/CWD」という三種類の状態のそれぞれにおいて、トレーニング試行と実試行を実施した。本論では CWD と HMD との違いを検証するため、まず、全ペアとも「WACL のみ」での試行を行った。その後、順序効果を分散させるために、4 組のペアは「WACL/HMD」での試行を、残り 4 組のペアは「WACL/CWD」での試行を先に実施した。また、「WACL のみ」の試行は、被験者が WACL とタスク自体に慣れるために実施した。

ビデオログから各試行の完了時間を調べ、また、全試行終了後の被験者へのアンケートにより、各システムの印象、疲労度、使いやすさを絶対・相対評価してもらった。

我々は、HMD の方がユーザの視線移動が少なくなり効率よく視覚的アシストを見ることができるが、HMD による頭部の拘束や視野闘争 (binocular rivalry)[10] に関する疲労感が CWD よりも強くなるという仮説を立てた。

4.6 結果

作業完了時間をウィルコクソンの符号順位和検定で統計的に解析すると、「WACL/HMD」と「WACL/CWD」の間 ($p=0.208$) では違いはなかった (図 4.7)。次に作業完了時間をブロッククラスタの選択と取り付けとに分けて解析した。その結果、取り付け作業時間と選択作業時間においても、全体の作業時間の場合と同様に有意な差はなかった。

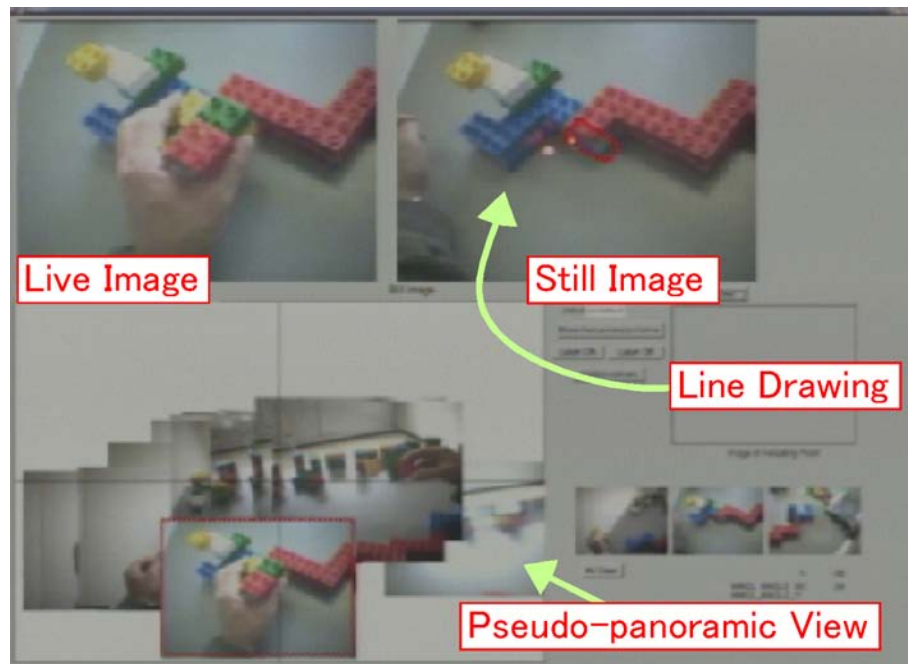


図 4.3: 指示者用 GUI

7段階の絶対評価結果（1：同意しない、7：同意する）をウィルコクソンの符号順位検定で解析し、「作業空間（実世界）は見やすかったか？」（図 4.8）、「視覚的アシストは見やすかったか？」（図 4.9）、「身に付けて違和感がなかったか？」（図 4.10）、「指示されているブロックや場所は簡単にわかったか？」（図 4.11）という各問いに対して、「WACL/HMD」よりも「WACL/CWD」の方が良い評価を得た。

一方、「指示はわかりやすかったか？」、「ブロッククラスタの取り付け位置や方向はわかりやすかったか？」、「指示者に何か確認したりするときに自分の意思を伝えるのは簡単だったか？」に関しては両者の間で違いはなかった。

「WACL/HMD」と「WACL/CWD」との相対評価（7段階）について1サンプルのt検定（検定値=4）を実施したところ、「トレーニングによっていち早く慣れたのはどちら？（Q1）」、「どちらが作業をしやすかったですか？（Q3）」の問いに対して「WACL/CWD」の方により早く慣れ、作業をしやすかったという有意な結果がでた（図 4.12）。また、「作業をして疲れたのはどちら？（Q2）」の問いには、「WACL/HMD」のほうがより疲れたという有意な結果がでた。一方、「指示者を身近に感じたのはどちら？」、「どちらの方が早く作業を終えたと思いますか？」の問いに関しては両者に違いはみられなかった。

4.7 考察

CWD と HMD との間に作業効率の違いは特に見られなかった。一方、主観評価からは、HMD と比べ CWD の方が、作業空間も視覚的アシストも見やすく、身に着けた際の違和感

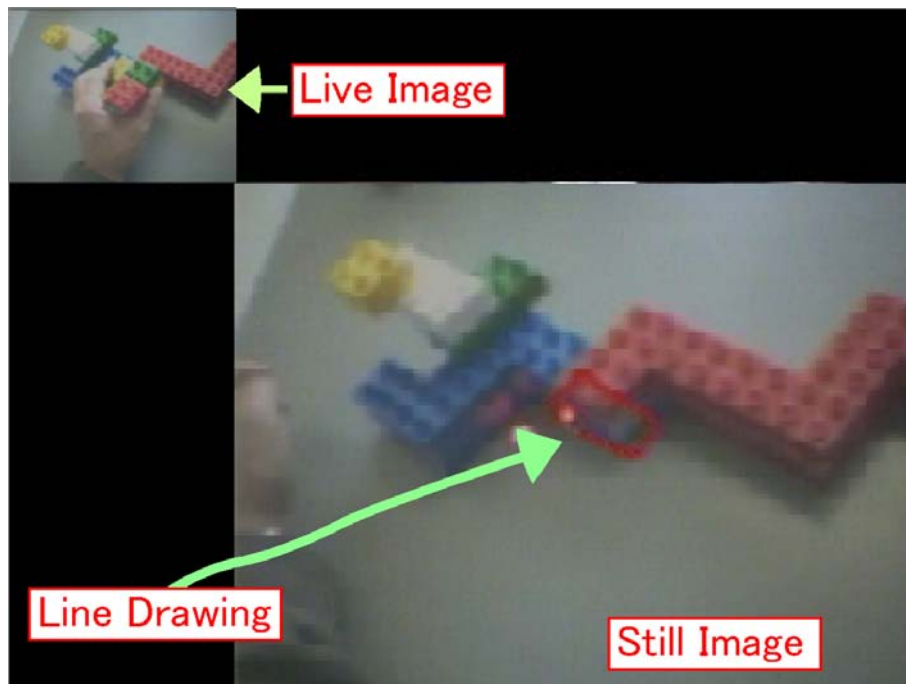


図 4.4: CWD また HMD 上に表示される視覚的アシスト

もなく、さらに疲れにくく作業もしやすいなど、CWD に有利な結果が得られた。

ただし、設定したタスクでは、視線や頭の向きを少し変えるだけで CWD を見ることができ、場面も多くあり、実験設定が CWD に有利に働いた可能性がある。そこで、CWD から近いベースブロックの右側である図 4.1 の “*” を打った場所（CWD からの視線移動小）と、CWD から遠い左側の “#” を打った場所（視線移動大）に対しての取り付け作業時間の差を調べたが、有意な差はなかった。

このように CWD の装着位置は作業時間には影響を与えなかったが、図 4.13 に示すように左右の手の使用頻度には影響を与えていた。CWD を身に付けた際の違和感は少ないという主観評価結果が得られているが、実際には使用する手を制限することがあったことになる。

視覚的アシストが見やすいという印象については、CWD と HMD に表示される画像の解像度が同じ (640x480 画素) であるにもかかわらず、その網膜への投影面積が CWD の方が広いことや、CWD では両眼視が可能であるという要因が結果に影響しているものと思われる。実験で使った HMD と CWD の両方を身に付けた状態で、両方を重ねて凝視し、HMD の表示幅と CWD の表示幅を比べると、CWD の方が約 1.5 倍広かった。HMD の画角をより広くすることは困難ではないが、視野闘争や焦点調整の問題がより深刻になり、移動や作業を繰り返す場合に眼精疲労や安全性の面でさらに不利になることが容易に想像できる。

作業者がシステムを装着する際、HMD では画面の位置や焦点距離などの調整にある程度の時間を要した。また、HMD を長時間安定して固定することは難しく、実験中も再調整を要する場合があった。一方、CWD ではあまり調整の時間を必要とせず、作業前の時間コストという点でも有利であった。

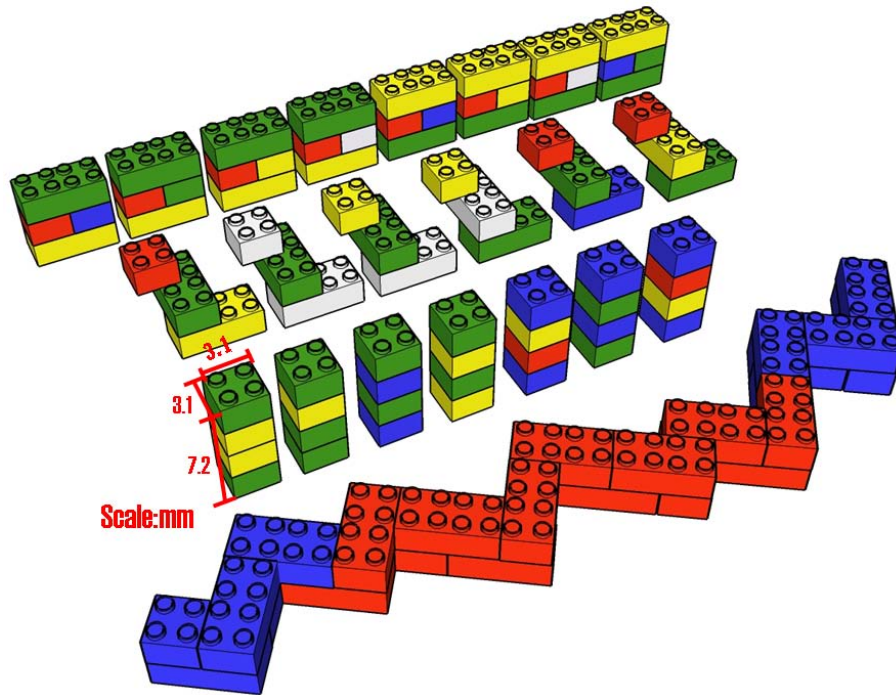


図 4.6: ベースブロックとブロッククラスタの詳細

になると予測することで、作業場所が絞入りこめて視覚的アシストと作業場所の対応を簡単に行えていると思われる。

本研究では、投射されたレーザスポットが、実世界の作業場所と視覚的アシストの対応付けを作業者に提供することをビジュアルリンクと呼ぶ。この節では、WACL と共に CWD または HMD を作業者が使用している状態で、ビジュアルリンクがどの程度効果的なのかを検証するための追加のユーザテストについて述べる。

4.8.1 タスク

このユーザテストでは図 4.14 にあるように、作業者（被験者）の視線方向を垂直水平両方向に大きく動かすために壁に大きな正方形のベースブロックを配置した。このベースブロックは、作業者が容易に模様を記憶できないように、赤・青・黄・緑色の様々な形をしたブロックを用いて模様を複雑にして構築した。各作業者を、実験開始前に机の前に座らせ、手にブロッククラスタを持たせた。実験開始後、タスクとして作業者にブロッククラスタを指示者が要求した位置と方向で取り付けさせた。このタスクを 10 回行い 1 試行とした。

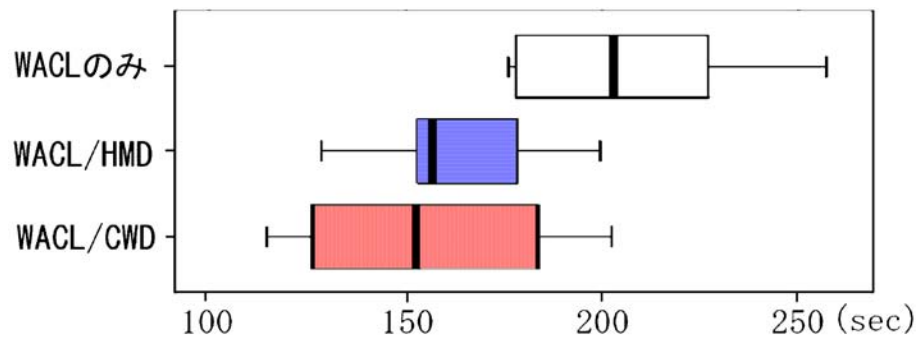


図 4.7: 作業完了時間

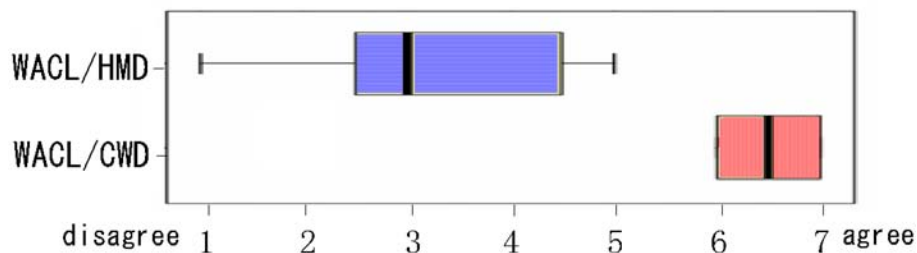


図 4.8: 「作業空間（実世界）は見やすかったかどうか？」の絶対評価

4.8.2 作業手順

各ペアは、「WACL/HMD」、「WACL/CWD」、「WACL/HMD レーザ無し」、「WACL/CWD レーザ無し」の4つの状態でトレーニング試行と実試行をおこなった。「WACL/HMD」と「WACL/CWD」の2つの状態は、4節で解説したものと同一である。「WACL/HMD レーザ無し」、「WACL/CWD レーザ無し」の2つの状態では、WACLはレーザスポットを射出せずに、ただのアクティブカメラとして使われる。順序効果を最小にするため、各被験者（ペア）は異なった順番で、4つの状態を実施した。各作業完了時間をビデオログから計測し、また、全試行終了後の被験者へのアンケートにより、4つの状態での各印象を相対評価してもらった。

4.8.3 結果

作業完了時間をウィルコクソンの符号順位和検定で統計的に解析し、「WACL/CWD」と「WACL/CWD レーザ無し」($p < 0.001$)、「WACL/HMD」と「WACL/HMD レーザ無し」($p < 0.001$)、「WACL/CWD レーザ無し」と「WACL/HMD レーザ無し」($p=0.040$)の間に有意な差がみられた。一方、「WACL/CWD」と「WACL/HMD」の間には有意な差はみられなかった($p = 0.221$)(図 4.15)。

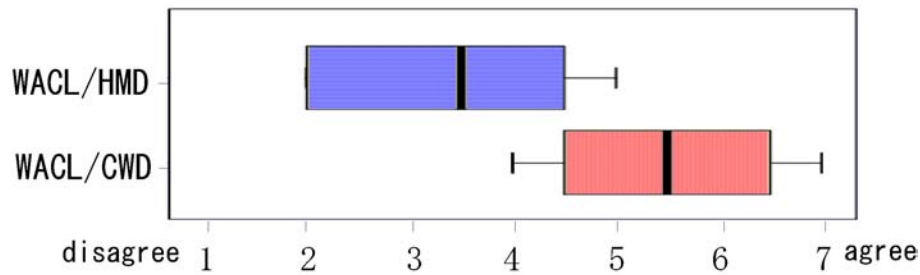


図 4.9: 「視覚的アシストはみやすかったかどうか？」の絶対評価

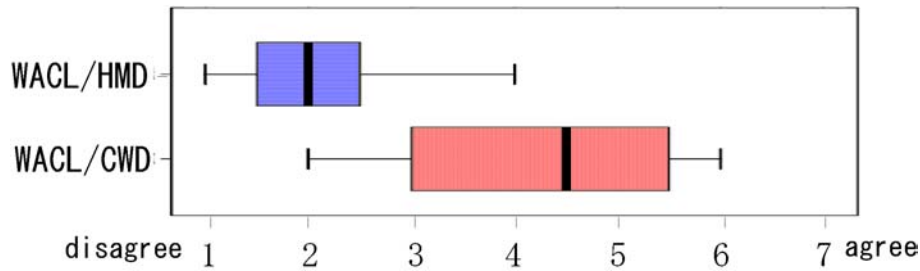


図 4.10: 「身に付けて違和感がなかったか？」の絶対評価

「レーザあり」と「レーザ無し」との相対評価（7段階）について1サンプルのt検定（検定値=4）を実施したところ（1:レーザあり、7:レーザ無し）、「どちらのほうが疲れましたか？」（Q1）と「どちらのほうがディスプレイ（HMD か CWD）を頻繁に見ましたか？」（Q2）の問いに対して「レーザ無し」のほうがより疲れ、ディスプレイを頻繁に見たという結果がでた（図 4.16）。また、「どちらのほうが早く作業を終えたとおもいますか？」（Q3）と「映像中（HMD か CWD）の取り付け場所と、実際の取り付け場所との対応を付けるのは、どちらが簡単でしたか？」（Q4）と「どちらが取り付け位置を捜しやすかったですか？」（Q5）の問いに対しては、「レーザあり」のほうに有利な結果がでた。

4.8.4 考察

この節のユーザテストにおいて、「レーザあり」と「レーザ無し」の間で作業効率に違いがみられた。また、レーザありの条件の方が作業者は快適に作業を行うことができた。ベースブロックを壁に取り付けたことで、作業者は視線を垂直・水平方向に大きく移動させる必要があったが、「WACL/CWD」と「WACL/HMD」の間に違いはなかった。これは、作業視点が様々に変化する遠隔作業指示においても、CWD が WACL への付加ディスプレイとしては、HMD と遜色がないことを示している。

「WACL/HMD レーザ無し」の作業効率は、「WACL/CWD レーザ無し」の作業効率より良い結果となった。「WACL/CWD レーザ無し」のビデオを解析すると、作業者は実作業環境のベースブロックを見るためだけに首を動かすだけでなく、CWD 上の視覚的アシストを見るた

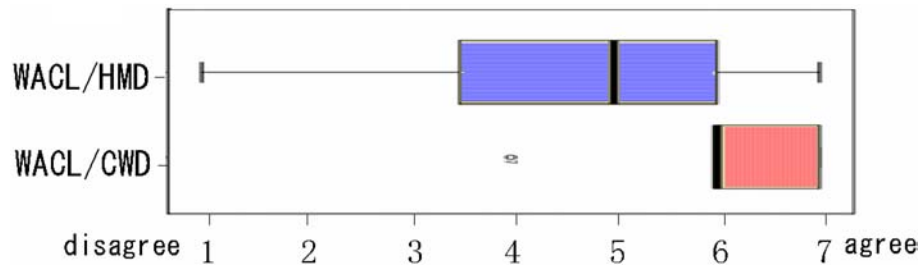
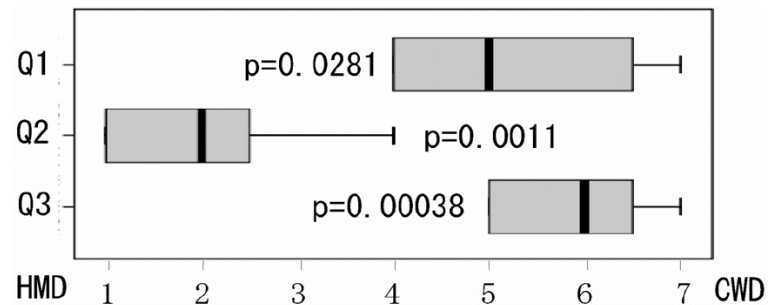


図 4.11: 「指示されているブロックや場所は簡単にわかったか？」の絶対評価



- Q1: トレーニングでいち早く慣れたのはどちら？
 Q2: 作業をして疲れたのはどちら？
 Q3: どちらが作業をしやすかったですか？

図 4.12: 相対評価

めにも首を頻繁に動かしていた。一方、「WACL/HMD レーザ無し」の状態では、作業者は眼球を動かすだけでHMDを見られるので、実作業環境の視点を変更するためだけに首を動かしていた。これにより、「WACL/HMD レーザ無し」の作業完了時間は、「WACL/CWD レーザ無し」の状態に比べ短くなったと思われる。対照的に、レーザ有りの場合である「WACL/CWD」と「WACL/HMD」の間には有意な差は見られなかった。これらの結果からレーザスポットによるビジュアルリンクは、HMDとCWDにとって効率よく視覚的アシストを見るために有用であった。また、CWDでは特に効果的なことがわかった。

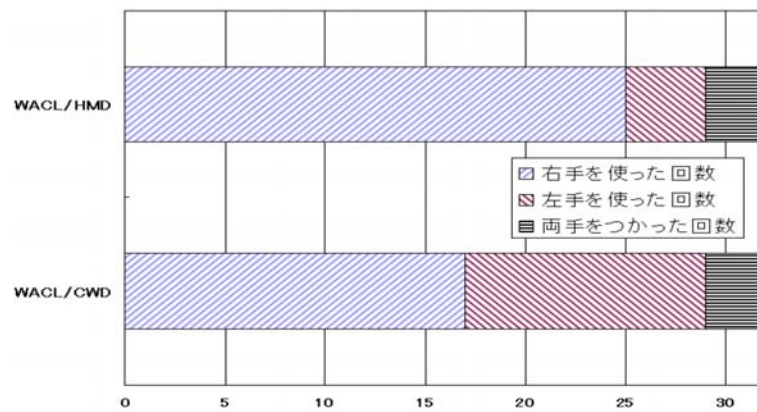


図 4.13: WACL/CWD の場合の左右の手の使用頻度

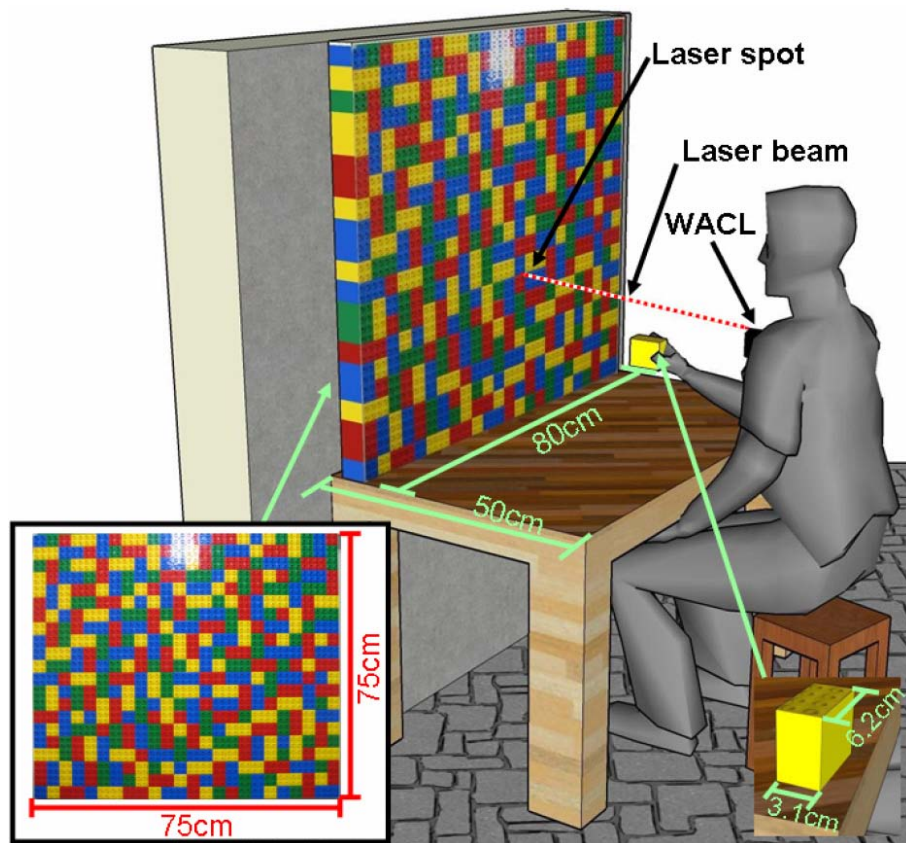


図 4.14: WACL/HMD と WACL/CWD システムを使ったビジュアルリンク効果のユーザテストの実験設定

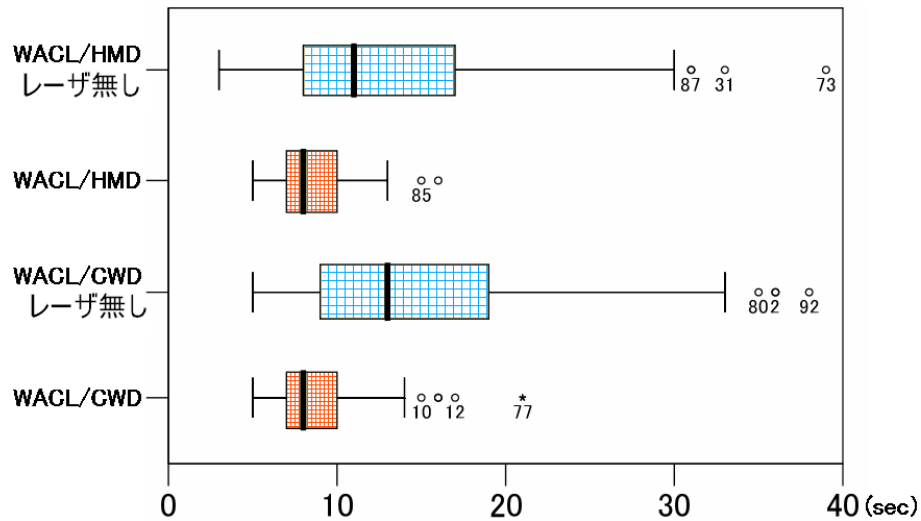
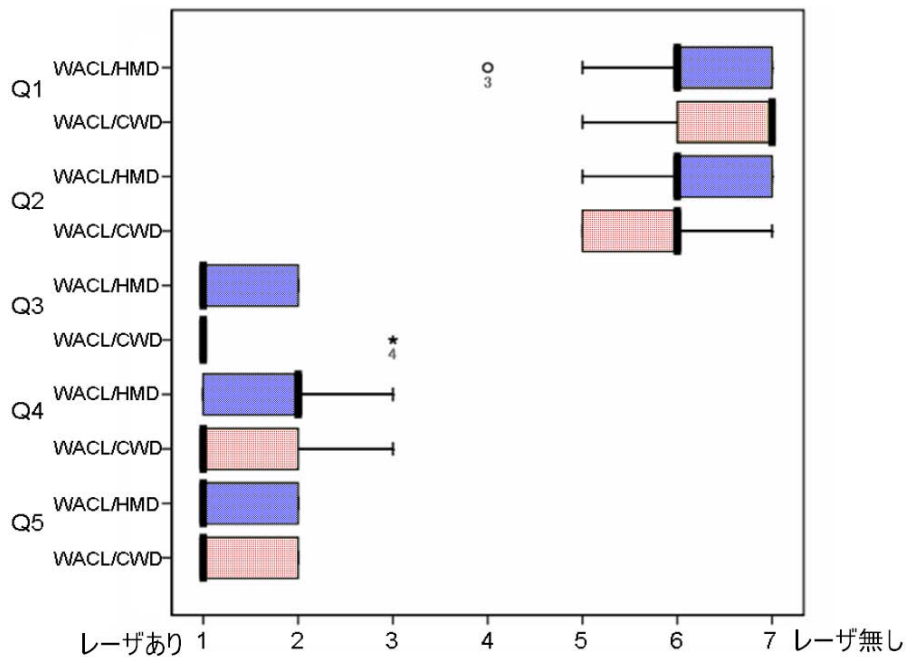


図 4.15: 作業完了時間



- Q1: どちらのほうが疲れましたか？
 Q2: どちらのほうがディスプレイ（HMDかCWD）を頻繁に見ましたか？
 Q3: どちらのほうが早く作業を終えたとおもいますか？
 Q4: HMDの映像中の取り付け場所と、実際の取り付け場所との対応を付けるのは、どちらが簡単でしたか？
 Q5: どちらが取り付け位置を捜しやすかったですか？

図 4.16: 相対評価

第5章 全体の考察, 展望

表 5.1: WACL システムとヘッドセットシステムの特徴

	ヘッドセット	WACL
入力デバイスとして	ヘッドマウントカメラ(HMC) 指示者にとって ・ <u>作業者がどこに注目しているかを知ることが容易</u> ・視点を変える為に発話が増える 作業者にとって ・作業者の注視したいものを見続けるための身体的負担あり	肩載せバンチルトカメラ 指示者にとって ・ <u>手の動きから作業者がどこに注目しているかを知ることが可能</u> ・ <u>視点を制御することに遠隔地の状況を把握しやすい</u>
出力デバイスとして	ヘッドマウントディスプレイ(HMD) 指示者と作業者にとって ・ <u>豊富な視覚的アシスト(ポインティングや線画を伴う映像)</u> 指示者にとって ・ <u>詳細な指示を送るのが容易</u> 作業者にとって ・ <u>ビューファインダーとしてのHMD(視覚的なフィードバック)により作業者は積極的に作業</u> ・視覚的アシストと実作業空間との対応を取るための認知的負担あり ・眼が疲れる	肩載せバンチルトレーザ 指示者と作業者にとって ・単純すぎる視覚的アシスト(ポインティング) 指示者にとって ・詳細な指示のために発話が増える 作業者にとって ・視覚的なフィードバックが少ないため作業者は比較的受動的に作業 ・ <u>実作業空間へ直接ポインティング</u> ・ <u>指示者がどこに注目しているかを知ることが容易</u>
全体として	作業者にとって ・ <u>ハンズフリー</u> ・着用時に違和感 ・作業中にずれ易い	作業者にとって ・ <u>ハンズフリー、アイフリー、ヘッドフリー</u> ・ <u>着用時にあまり違和感がない</u>

3 節のユーザテストでは、HMD/HMC ベースのヘッドセットシステムと WACL システムを比較することで、遠隔協調作業における WACL の利点と問題点について調査した。このユーザテストにより明らかになった WACL システムとヘッドセットシステムの特徴を表 5.1 にまとめた。

注目すべきは、WACL システムが、作業者に優れた印象を与える一方で、詳細な説明が必

要な場面では、指示者に発話の負担を強いるというコミュニケーションの非対称性 [30] を引き起こしている点である。

そこで、この非対称性を緩和するために、WACL ユーザに高度な視覚的支援を提示できるディスプレイ装置を付加することにした。4 章のユーザテストでは、CWD か HMD のどちらが WACL の付加ディスプレイに適しているかを調査した。その結果、表 5.2 にあるように、CWD は WACL の持つヘッドフリー、ハンズフリー、アイフリーといった特徴を維持したまま、HMD と遜色が無い視覚的アシストを提供できることが判った。さらに、WACL/CWD システムは WACL/HMD システムに匹敵する作業効率を発揮できることが判った。

表 5.2: WACL/CWD システムと WACL/HMD システムの特徴

	WACL/HMD	WACL/CWD
指示者	<input type="checkbox"/> 作業者がどこに注目しているかがわからない <input type="checkbox"/> 手の動きから作業者がどこに注目しているかを知ることは可能 <input type="checkbox"/> 視野制御性が高い <input type="checkbox"/> 詳細な指示を送るのが容易	<input type="checkbox"/> 作業者がどこに注目しているかがわからない <input type="checkbox"/> 手の動きから作業者がどこに注目しているかを知ることは可能 <input type="checkbox"/> 視野制御性が高い <input type="checkbox"/> 詳細な指示を送るのが容易
	<input type="checkbox"/> 同じ操作性で指示可能 (作業者が CWD か HMD のどちらを装着しているのかを意識することはなかった)	
作業者	<input type="checkbox"/> 作業対象を見続けなくてよい <input type="checkbox"/> 実作業空間へ直接ポインティング <input type="checkbox"/> 指示者がどこに注目しているかを知ることが容易 <input type="checkbox"/> 豊富な視覚的アシスト <input type="checkbox"/> ビジュアルリンクで視覚的アシストと実作業空間との対応が容易に付けられる <input type="checkbox"/> ハンズフリー <input type="checkbox"/> 目の疲労を伴う <input type="checkbox"/> 着用時に違和感 <input type="checkbox"/> 作業中にずれ易い	<input type="checkbox"/> 作業対象を見続けなくてよい <input type="checkbox"/> 実作業空間へ直接ポインティング <input type="checkbox"/> 指示者がどこに注目しているかを知ることが容易 <input type="checkbox"/> 豊富な視覚的アシスト <input type="checkbox"/> ビジュアルリンクで視覚的アシストと実作業空間との対応が容易に付けられる <input type="checkbox"/> ハンズフリー、アイフリー、ヘッドフリー <input type="checkbox"/> 着用時にあまり違和感がない

5.1 8 つの重要要素

本研究では移動・運搬・組み立て作業に対する遠隔作業指示を支援するための端末には、8 つの条件が重要な要素であると提案した。本研究を通して判明した 8 つの重要な要素がもたらした特徴や頭部搭載式 (ヘッドセット型) 端末に比べて有利な点を表 5.3 にまとめた。提案端末は、指示者にとって、視野制御性が高いため、遠隔地の状況把握能力を著しく向上

表 5.3: 8つの重要な要素に関する考察

要件	指示者	作業者
装着型であること	移動指示が容易	両手が自由 移動・運搬・組立てが容易
両手が自由であること	運搬・組立ての指示が容易	運搬・組立てが容易
頭部に機器を装着しないこと	視野制御性が向上	装着時に快適、目に優しく、疲労を引き起こさない
指示者が遠隔から作業空間を見渡せること	視野制御性が向上	作業対象を見続けなくてよい
胸の周囲にカメラを取り付けること	視野制御性が向上	装着時に快適、目に優しく、疲労を引き起こさない
映像のスタビライズ機能	定点撮影・指示が可能 作業者が作業中であっても先だって作業の確認が行える	撮影される映像の質を気にせず、ある程度の動作が可能
実世界作業環境上に共有ポイントを用意すること	作業者に意図を伝えやすい	ビジュアルリンクを提供 指示者の意図を容易に把握
作業者へ指示に関する映像を提供すること	豊富な情報を送信可能	豊富な情報を取得可能

させていることがわかる。一方、作業者にとっては、胸部搭載式であるので、頭部搭載式に比べ身体への負担が低下していることがわかる。

5.2 提案端末で可能な遠隔作業指示の範囲

本研究で提案した胸部搭載式ウェアラブル端末が適用可能な遠隔作業指示の範囲について具体的に述べる。本研究で、実施した3章の遠隔作業指示のユーザテストでは、作業内容について指示者は熟知しており、作業手順はランダムであるが、作業場所での作業内容は固定して指示者は作業場所を知っていた。このことにより、提案端末で支援できる遠隔協調作業は、「作業場所と作業内容の対応が取れていること」や「作業場所を知っていること」など遠隔地の状況を有る程度把握し、作業内容を熟知している指示者による遠隔作業指示といえる。具体的には、発電所のコントロールルームにいる指示者から現場作業者に対しての遠隔作業指示が挙げられる。

しかし、例えば、メーカーのカスタマーサポートから指示者が修理の指示を遠隔の現場に対して行うといった、遠隔地の状況が殆どわからない遠隔作業指示も想定される。このような

遠隔作業指示を円滑に行うためには、「作業場所はどこか?」「作業者はどこにいてどちらを向いているか?」「作業者周囲の状況はどうか?」といった作業者の位置・姿勢情報と、指示者の作業環境周囲の状況把握能力の向上が必要と考えられる。

次に、本研究で提案した胸部搭載式ウェアラブル端末を遠隔作業指示で用いる場合、適用できる作業内容や作業対象に関して具体的に述べる。本研究では、3章と4章の遠隔作業指示のユーザテストでは、いずれの場合でも作業対象は、作業者に対して相対的に静止しており、実世界に設置され静止している実物体であった。もし、高速で動く物体が作業対象であった場合、提案端末のレーザスポットのポインティングでは指示点を指し続けることができないため、的確な指示が行えないと予想される。

今回のユーザテストでは工具などの道具を使わず素手で作業をおこなった。もし、ねじ回しや半田ごてに代表される、大きく体を動かさずに使え、また、静止した状態で使用する簡易な工具を用いた場合は、提案端末を用いれば素手の場合と同様に作業指示を行えると予想される。

これらのことから、提案端末が遠隔作業指示可能な作業内容の範囲は、作業対象は静止しており、素手、または簡単な工具を用いた作業と考えられる。具体的には、オフィスでのコピー機の修理、飛行中の飛行機の中で配電盤の修理などは指示可能な作業内容である。一方、現在の提案端末では、スポーツでの遠隔作業指示のように、作業者であるプレイヤーだけでなくボールなどの作業対象も静止していることが少ない状況では、指示者である監督が的確に作業指示を行える可能性は著しく低いと考えられる。

提案端末を作業者が移動時のナビゲーション端末として使う場合、作業者が静止している場合は、提案端末でも目的地までの道のりを順々にポインティングすることで遠隔作業指示が可能である。しかし、例えば、「作業者が車に乗っており、車外の対象物に対してポインティングして行き先を命じる」といった指示は、現在の提案端末では困難である。このように、作業者に対して高速で動作する物体に対しての指示を可能にするには、作業者の位置・姿勢の情報が必要で、さらにレーザスポットと撮影映像の高速・高精度のスタビライズ機能が必要と考えられる。

5.3 端末改良の示唆

作業者にかかるシステム重量の負荷を取り除くために、図5.1に有る様に現在新しいWACLシステムを構築している。新しいシステムでは、ノート型のコンピュータ(約1kg)のかわりに、ビデオキャプチャとエンコーダを有する小型の組み込みコンピュータ(130g)を使っている。システムの総重量は3時間分のバッテリーを含み1kg以下になっている。しかし、コンピュータの小型化は現在においても尚進行中であり、装着者にかかる重量の負担は年々少なくなることが期待される。



図 5.1: 新しいWACL システム

作業環境周囲の視野の拡張

4章と3章のユーザテストにおいて、WACLを素早く広範囲に操作するためと、指示者の状況把握能力を向上させる仮想パノラマは、指示者にとって非常に効果的であった。特に、最後に撮影された画像が、仮想パノラマの領域上に表示される機能は、指示者にとって作業者の周りにどのような環境が広がっているかを把握させ、作業者があまり動かなければ指し示したい対象物を一度のクリックで指し示すことができた。また、たとえ作業者が動いたとしても過去の画像と現在の撮影画像を見比べることで、どの程度作業者が動いたかを推測できた。WACLを操作するとき、この推測した分を見越して動かすことで、指し示したい対象物に一度でWACLを向けることもできた。もし、仮想パノラマの領域が過去の画像を表示するのでなく、リアルタイムの画像を表示すると、更に指示者の状況把握能力が上がると思われる。そこで、図5.2のように、広角または魚眼のカメラを雲台には載せずにWACL付近に取り付けることで、リアルタイムに広範囲の遠隔地の画像を指示者に提供できる。しかし、高解像度の画像を高いフレームレートで作業者側から指示者に提供すると回線の帯域を占有する。そこで、WACLのカメラは従来どおりの高いフレームレートで取り込み、魚眼による高解像度の画像は、回線の状況に合わせてWACLのカメラに比べ低フレームレートで指示者側に転送する機能が必要と思われる。さらに、魚眼を使った場合は、中心画像に比べ周辺画像の解像度が低いため、高度な視覚的アシストを作成する際の画像はWACLで撮影したものをを用いる可能性が高い。また、照明環境が均一ではない工場や屋外などの作業環境

において、魚眼カメラは、広い範囲を撮影するため、ある一点の明るさに合わせてカメラの「しぼり」を絞った場合、画像の別の部分が暗くなり、指示者に送信する画像としては意味を成さない可能性が高い。これらの想定される問題点からも、やはり WACL のアクティブカメラは必要である可能性が高い。ただし、照明環境が一定で、撮影映像の歪みが問題にならない場合は、アクティブカメラの必要性は低いかもしれない。

また、前述のように、今回の実験設定では作業内容や作業手順はランダムであるが、指示者は遠隔地の作業場所をある程度知っている。しかし、現実の遠隔作業指示では、指示者は修理・組み立てなどの作業内容に熟達しているが、周辺の作業環境に関して熟知しているとは限らない。例えば、修理すべき機器が置いてある場所、工具が置いてある場所、最適な道順などである。これらを指示者にとって問題にしないために、WACL 自体の改良として前述のように魚眼レンズを取り付ける方法や、装着者の位置・姿勢を推定する PP システム [39] を作業者に取り付けする方法や、WACL のカメラと魚眼カメラの撮影映像中の自然特徴点やタグから装着者の位置・姿勢を推定するアルゴリズム [40][41] を実装する方法が考えられる。



図 5.2: 周辺視野の獲得に魚眼レンズを用いたシステム

レーザ描画

詳細な説明が必要な時に WACL ユーザに提供する視覚的アシストに、本研究のように付加ディスプレイを提供するのではなく、実世界環境に視覚的アシストを直接投影する方法も考えられる。第三世代の WACL では制御が高速・高精度になったことで、ベクタースキャンによる単純な図形を描くことができる(図 5.3)。そこで、第 3 世代の WACL に用いたサーボ

モータの軸にミラーを取り付けレーザを反射させることで、小型で高速なジャスチャーレーザ [22] を構築することができる。これを WACL に取り付け、線画などの高度な視覚的アシストを実世界作業環境に投影する。これにより、付加ディスプレイを使用する際の負担、例えば情報を閲覧するために首や眼球を動かしたり、焦点を合わせたり、また頭部への負荷は発生しない。しかし、投影情報を作業者に対して歪みなく見せる機能やベクタースキャンでは文字などの複雑図形を表示できない問題があり、技術的課題は少なくはない。また、ラストスキャン表示するデバイスも開発中であるが、現在は単色表示のため動画などの視覚的アシストを表示する際は RGB 表示できる場合に比べ表現力に問題がある。

どのタスクに対してどのような形で適切に作業者に対して情報を表示するのかについても研究の余地がある。例えば、ブロックの選択に代表される単純な作業に対して動画を用いて説明した場合、動画を用いずに説明した場合に比べて作業時間が長くなることが容易に想像できる。このように、文字、動画、映像を投影できるリッチな情報投影デバイスを使用する場合、遠隔作業指示でタスクに応じてどの方法で情報を表示するかを決定する手法は、重要になってくる可能性が高い。

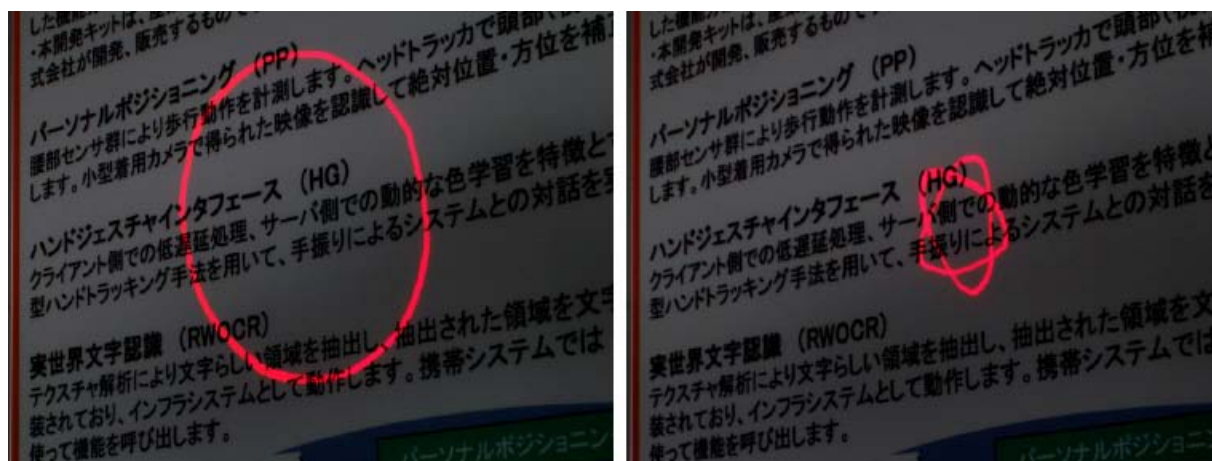


図 5.3: WACL3 の首振りによるレーザ描画

作業者間インタラクションの拡張

WACL を装着した 2,3 人の作業者が現場において連携して作業を行うといった複数作業者間でのコミュニケーションや連携作業にも研究の余地がある。例えば、ある作業者 A が、何らかの組み立て作業を指示者の指示によって完了する。この間、WACL は作業者 A の手元の周辺画像を録画する。その後、作業者 B が同様の組み立て作業をする場合、作業者 B が指示者に指示を仰ぐ前に、前回記録した作業者 A が作業中の記録映像を作業者 B の CWD や HMD に表示する。これにより、もう一度指示者が指示を行うのではなく、過去の指示コンテンツを使いまわすことで、指示者の負担を減らせる可能性がある。また、ビデオだけでは作業者 B が作業を遂行できなかったとしても、作業者 A が現場にて手伝うことができる。

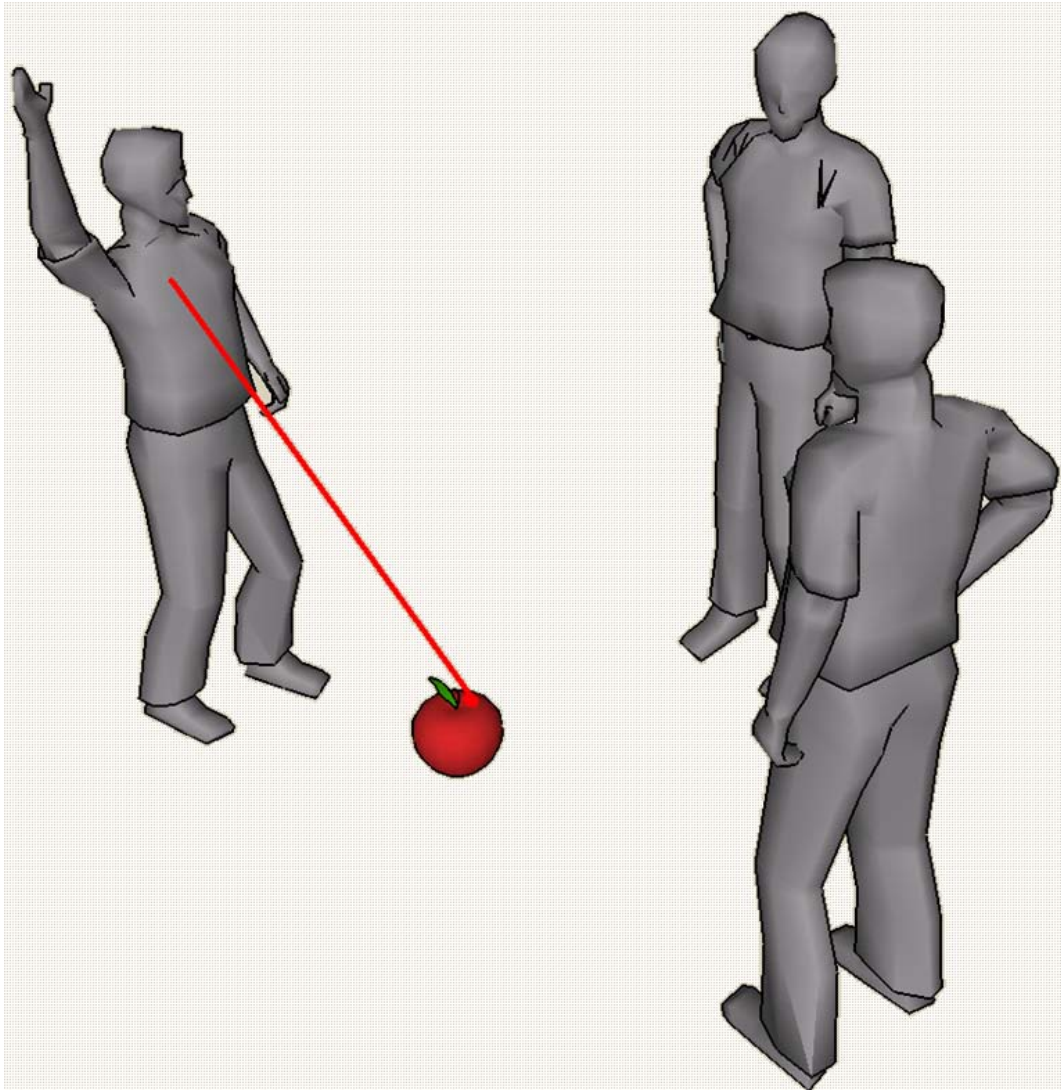


図 5.4: 投影型デバイスの特徴による機器非装着者の投影情報認知の概要図

WACL を装着した一人の作業者と機器を装着しない複数作業者間の連携作業も今後の研究課題の一つである。HMD を用いる場合と大きく異なる特徴として、図 5.4 の様に実環境への投影型デバイスは、装着した本人だけでなく周囲の人間も情報を閲覧可能な特徴がある。この特徴により、WACL が投影した情報を、WACL を装着している人間とは別の人物が閲覧することで、同時に一つの作業を行う遠隔作業指示などが可能になる。この際、HMD や CWD に代表される一人用閲覧デバイスを使う場合と多人数が同時に閲覧可能な投影型の WACL を使う場合とで、作業効率やユーザインタラクションの間に明らかな違いが出現すると予想される。

5.4 指示者システムの設計

多人数指示への拡張

少子高齢化が進むにつれ、熟練作業者不足が社会問題として顕在化しつつあり、図 5.5 のような少数の指示者と多数の作業者との間の遠隔作業支援技術も今後ますます重要となることが予想される。指示者が多数の作業者との対話や作業指示に対処するには、各作業者の状況を把握したり作業指示コンテンツを加工・送信したりする必要がある。従来型の WIMP 型インタフェースでもそのような機能を実現することは可能であるが、ディスプレイが大型化し多機能化していくと、精神的作業負荷の増加や誤操作誘発などが問題となる。そこで、ポスト WIMP 型インタフェースとして、実物体とデジタル表現とを結合したタンジブルユーザーインタフェース (TUI)[37] を応用することで指示者の負担軽減を図る遠隔指示用インタフェースを構築している [12]。

WACL の特徴として、作業者が作業中に先だって次の作業の確認を行うことができた。しかし、作業は単純であるが長時間に及ぶ場合、指示者は次の作業の確認を行った後、単純な作業の監視を続けなければならない。もし、この長時間の単調な作業中に、指示者は何手順か先の作業の確認や指示コンテンツの作成ができれば、作業者は作業が終わり次第、次の作業に取り掛かれるため、作業効率が向上する可能性がある。このような指示を可能にするために、5.3 節で述べた周辺視野を広く取得できる魚眼レンズを使い、パノラマ画像を表示している領域に次の指示コンテンツをポストイットのように貼り付けていくインタフェースを構想している。このインタフェースを用いることで、指示者は次々と指示コンテンツを作り、作業者は指示者のつくった指示コンテンツを元に流れ作業を行えるシーケンシャル指示が可能になると考えている。

熟練指示者の負担が WACL や HMD や CWD などのデバイスによりどの程度軽減されるのかを、指示者の被験者数を増やし会話解析や主観評価などにより統計的に解析することも今後の重要な研究課題の 1 つである。

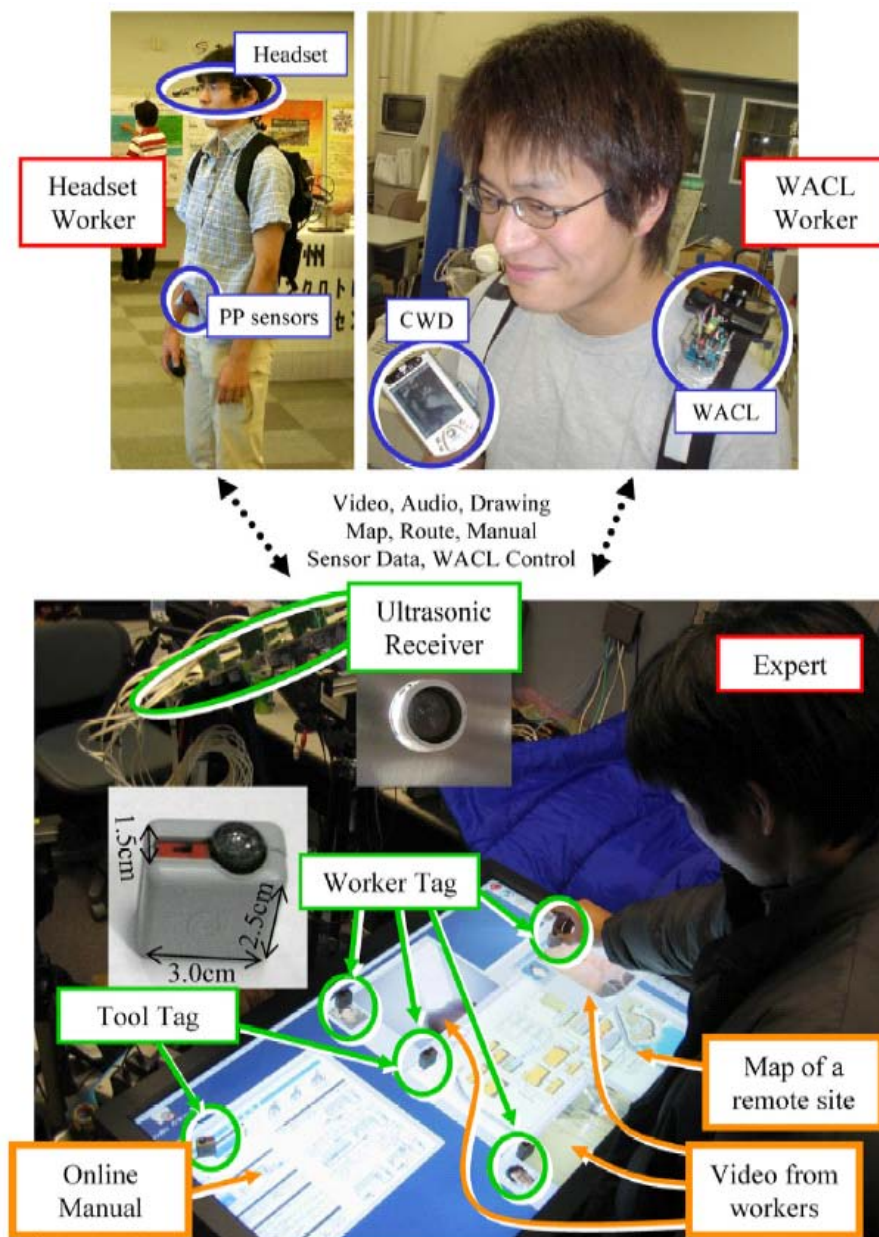


図 5.5: ウェアラブルインタフェースを身につけた複数の作業者（上）と指示者用タンジブルテーブルトップインタフェース（下）

第6章 おわりに

本論の1章では、本研究の背景に加えて遠隔協調作業の関連研究と本研究で支援する遠隔作業指示の範囲について述べた。また、ウェアラブル端末が本研究で支援する遠隔作業指示に適している理由を述べた上で、既存のウェアラブル端末の問題点を整理し、本論文で提案するウェアラブル端末の8つの重要な要素を決定した。2章では、1章で挙げた7つの重要な要素を満たすウェアラブル端末として開発したWACLの提案と実装について述べた。また、作業者に指示者からの指示に関する映像を提供するデバイスとしてCWDについても提案と実装について述べた。3章では、WACLと、典型的なHMDとHMCからなるヘッドセットインタフェースとの間での作業効率やユーザビリティの違いを、主観的、客観的に評価するための移動・運搬・組み立ての遠隔作業指示を含むユーザテストとその考察について述べた。作業効率の目安になる作業完了時間に関しては、両者の間に統計的な違いはなかったが、ユーザビリティに関してはWACLのほうが、装着時に快適であり、アイフリー・ヘッドフリーで装着者に眼や頭部への負担が少ないという結果が得られた。一方、WACLのレーザスポットによる指示は、作業対象や場所を識別するには十分効果的であった。しかし、レーザスポットの表現能力の低さから、説明が複雑な場面で、線画を描いた映像を提示できるHMDを用いた場合に比べ、指示者の発話数が多くなり、それに伴い作業時間も長くなるという問題が判明した。4章では、3章で明らかとなった「説明が複雑な場面での問題」を解決するための「指示に関する映像を提供する」付加ディスプレイとして、CWDとHMDのどちらがWACLとの組み合わせにより適切かを比べた。そのために、組み立ての遠隔作業指示のユーザテストを行い、その考察をおこなった。また、実世界の作業場所とHMDまたはCWD上に表示される高度な視覚的アシストとを、WACLのレーザスポットが対応付けるビジュアルリンクについて、どの程度効果的なのか調べるユーザテストを行い、そしてその考察も述べた。考察として、CWDとHMDとの間に作業効率の違いは特に見られなかった。一方、主観評価からは、HMDと比べCWDの方が、作業空間も視覚的アシストも見やすく、身に着けた際の違和感もなく、さらに疲れにくく作業もしやすいなど、CWDに有利な結果が得られた。レーザスポットによるビジュアルリンクは、HMDとCWDにとって効率よく視覚的アシストを見るために有用であった。また、CWDでは特に効果的なことが判った。5章では全体の考察と提案したコミュニケーション端末によって可能となる遠隔作業指示やシステム改良の示唆について述べた。

本論は、移動・運搬・組み立てを伴う遠隔作業指示に用いるCWDとWACLで構成された胸部搭載式ウェアラブル端末を提案し、この胸部搭載式端末を用いたユーザテストを実施した。これらの結果から、CWDとWACLで構成される胸部搭載式ウェアラブル端末は、HMDで構成される既存の頭部搭載式装着型端末と作業効率は遜色なく、むしろ装着感の面で快適に、移動・運搬・組み立てを伴う遠隔作業指示を行えることを実証した。

謝辞

本研究で御指導、御鞭撻を賜りました指導教官 葛岡英明教授（筑波大学システム情報工学研究科）に深く感謝いたします。本研究の全般に渡り御指導、御鞭撻を頂いた蔵田武志先生（産業技術総合研究所）に深く感謝いたします。研究室配属後、特にハードウェアをご指導していただいた山下淳先生（筑波大学大学院システム情報工学研究科）に深く感謝いたします。

本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員制度の支援による。

参考文献

- [1] A brief history of wearable computing: <http://www.media.mit.edu/wearables/lizzy/timeline.html>
- [2] H. H. Clark and S. E. Brennan. Perspectives on socially shared cognition, chapter Grounding in communication, pages 127-149. APA Books, Washington, DC, 1991.
- [3] L. Suchman. Representation in scientific practice, chapter Representing practice in cognitive science, pages 301-321. MIT Press, Cambridge, MA, 1990.
- [4] H. Mehan and H. L. Wood, editors. The reality of eth-nomethodology. Wiley, New York, 1975.
- [5] Nobuchika Sakata, Takeshi Kurata, Takekazu Kato, Masakatsu Kourogi, and Hideaki Kuzuoka: WACL: Supporting telecommunications using wearable active camera with laser pointer; In Proc. International Symposium on Wearable Computer 2003, pp.53-56.
- [6] R.J Rousseeuw and A.M. Leroy, Robust Regression and Outlier Detection, John Wiley Sons, 1986
- [7] B.D. Lucas and T. Kanade, An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, In Procc. DARPA Image Understanding Workshop, pp. 121-130, 1981
- [8] Takeshi Kurata, Nobuchika Sakata, Masakatsu Kourogi, Hideaki Kuzuoka, and Mark Billinghurst.: Remote collaboration using a shoulder worn active camera/laser; In Proc. International Symposium on Wearable Computer 2004, pp.62-69.
- [9] 酒田信親, 蔵田武志, 興梠正克, 葛岡英明, マーク・ビリングハースト: 遠隔協調作業における肩載せアクティブカメラ・レーザの利点と限界; 第30回HI学会研究会・日本VR学会ウェアラブル/アウトドアVR研究委員会第6回研究会, Vol. 6, No. 5, pp. 17-22, 2004
- [10] 泉博之, 戸上英憲, 佐藤教昭, 神代雅晴: 単眼HMD使用時の作業負担に関する研究; 日本人間工学会九州支部第23回大会、2002.
- [11] B. Hestnes, S. Heiestad, P. Brooks, and L. Drageset.: Real situations of wearable computers used for video conferencing and implications for terminal and network design.; In Proc. ISWC2001, pages 85-93, 2001

- [12] Takeshi Kurata, Takahiro Oyabu, Nobuchika Sakata, Masakatsu Kourogi, and Hideaki Kuzuoka: Tangible Tabletop Interface for an Expert to Collaborate with Remote Field Workers; In Proc. CollabTech2005, pp.58-63, 2005.
- [13] J. Ou, X. Chen, S. R. Fussell, and J. Yang.: DOVE: Drawing over video environment.; In Proc. MM'03,pages 100-101, 2003.
- [14] Cheng, L., Robinson, J.: "Dealing with Speed and Robustness Issues for Video-Based Registration on a Wearable Computing Platform"; In Proc. of ISWC 98, pp.84-91, 1998.
- [15] S. Mann.: Telepointer: Hands-free completely self contained wearable visual augmented reality without headwear and without any infrastructure reliance.; In Proc. ISWC00, pages 177-178, 2000.
- [16] R. E. Kraut, M. D. Miller, and J. Siegal.: Collaboration in performance of physical tasks: Effects on outcomes and communication.; In Proc. CSCW 96, pages 57-66, 1996.
- [17] S. R. Fussell, L. D. Setlock, E. M. Parker, and J. Yang.: Assessing the value of a cursor pointing device for remote collaboration on physical tasks.; In Proc. CHI 2003, pages 788-789, 2003.
- [18] Takeshi.Kurata, Nobuchika Sakata, Masakatsu Kourogi,and Hideaki Kuzuoka and Mark Billinghurst. The Advantages and Limitations of a Wearable Active Camera/Laser in Remote Collaboration, In Conference Supplement (Interactive Poster), Computer Supported Cooperative Work 2004, 2004.
- [19] S. R. Fussell, L. D. Setlock, and R. E. Kraut.: Effects of head-mounted and scene-oriented video systems on remote collaboration on physical tasks.; In Proc. Conference on international Conference for Humancomputer Interaction 2003, pp. 513-520, 2003.
- [20] Hideaki Kuzuoka. Spatial workspace collaboration: A sharedview video support system for remote collaboration capability.; In Proc. CHI 92, pages 533-540, 1992.
- [21] BT Development. Camnet videotape. Suffolk, Great Britain, 1993.
- [22] H. Kuzuoka, T. Kosuge, and M. Tanaka. Gesturecam: A video communication system for sympathetic remote collaboration. In Proc. CSCW 94, pages 35-43, 1994.
- [23] 三河, 辻村, CTerm を用いた遠隔作業コミュニケーション支援システムの開発 ビジュアルサーバによるレーザポインタ制御 , 第40回 SICE 学術講演会 205 A-3, 2001.
- [24] H. Hua, A. Girardot, C. Gao, and J. Rolland. Engineer-ing of head-mounted projective displays. Applied Op-tics, 39(22):3814-3824, 2000.

- [25] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi. Visuo-haptic display using head-mounted projector. In Proc. IEEE VR 2000, pages 233-240, 2000.
- [26] T. Karitsuka and K. Sato. A wearable mixed reality with an on-board projector. In Proc. ISMAR 2003, pages 321-322, 2003.
- [27] 妻木, D. N. Nenchev, 内山, テレコミュニケーター, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, No. 2CI3-6, 1998.
- [28] T. KATO, T. Kurata and K. Sakaue, Viz-Wear-Active:Distributed Monte Carlo Face Tracking for Wearable Active Camera, In Proc. ICPR2002, Vol. 1, pp.395-400, 2002
- [29] 蔵田武志, 酒田信親, 興梠正克, 大隈隆史, 大田友一, BOWL ProCam による手前と奥の投影面を用いたインタラクション, 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会
- [30] M. Billinghurst, S. Bee, J. Bowskill, and H. Kato. Asymmetries in collaborative wearable interfaces. In Proc. ISWC99, pages 133-140, 1999.
- [31] D. Gobert. Designing wearable performance support: Insights from the early literature. Technical COMMUNICATION,49(4):444-448, 2002.
- [32] 酒田, 蔵田, 興梠, 葛岡, M. Billinghurst: "肩載せアクティブカメラ・レーザによる遠隔協調作業", DICOMO2004, pp.377-380, 2004.
- [33] Maeda, T., and Ando, H. Wearable scanning laser projector(WSLP) for augmenting shared space, Proceedings of the 14th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, pp.277-282, 2004.
- [34] Nancy h-anim humanoid under Matlab, <http://www.robots.ox.ac.uk/~wmayol/3D/nancy matlab.html>.
- [35] W.W. Mayol, B. Tordoff, and D.W. Murray. Designing a miniature wearable visual robot. In Proc. ICRA, pp.3725-3730, 2002.
- [36] 蔵田, 酒田, 興梠, 大隈, 大田: "BOWL ProCam による手前と奥の投影面を用いたインタラクション", 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集, 1C2-2, 2006.
- [37] H. Ishii and B. Ullmer. Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proc. ACM CHI '97, pp.234-241, 1997
- [38] 北林一良, 加納浩行, 木島竜吾, "日常生活における頭部運動の解析", 日本バーチャルリアリティ学会第 8 回大会論文集, pp. 135-136, 2003

- [39] Masakatsu Kourogi, Nobuchika Sakata, Takashi Okuma, and Takeshi Kurata: "Indoor/Outdoor Pedestrian Navigation with an Embedded GPS/RFID/Self-contained Sensor System", In Proc. 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2006), pp.1310-1321 (2006)
- [40] Masakatsu Kourogi, Takeshi Kurata, Katsuhiko Sakaue, and Yoichi Muraoka: "Improvement of Panorama-based Annotation Overlay Using Omnidirectional Vision and Inertial Sensors", In Proc. International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2000) in Atlanta, USA, pp.183-184 (2000)
- [41] Masakatsu Kourogi, Takeshi Kurata, Katsuhiko Sakaue, and Yoichi Muraoka: "A Panorama-based Technique for Annotation Overlay and Its Real-time Implementation", In Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME 2000) in New York, USA, pp.657-660, TA2.05 (2000)