

遠隔協働作業における空間的動作の
半自動化に関する研究

2022年 3月

鈴木 雄介

遠隔協働作業における空間的動作の
半自動化に関する研究

鈴木 雄介

理工情報生命学術院
システム情報工学研究群
筑波大学

2022年 3月

目次

図表目次	iii
第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 遠隔協働作業	2
1.3 物理空間を参照する遠隔協働作業	3
1.4 本研究の目的	5
1.5 本論の構成	6
第 2 章 関連研究	9
2.1 ロボットを用いた研究	9
2.2 CG を用いた研究	11
2.3 空間的動作	13
2.4 空間的動作の分類	13
2.5 空間的動作の課題	17
第 3 章 遠隔協働作業における空間的動作の半自動化	19
3.1 オフィス内での遠隔協働作業	19
3.1.1 関連研究	21
3.1.2 筆者らが体験した事例	22
3.2 ロボットによる注意喚起能力評価実験	25
3.2.1 仮説	25
3.2.2 遠隔会議支援ロボットシステム構成	25
3.2.3 システムの詳細説明	26
3.2.4 実験	29
3.2.5 実験結果	35
3.2.6 注意喚起能力評価実験の考察	38
3.2.7 注意喚起能力評価実験のまとめ	39
3.3 空間的動作の半自動化	39
3.3.1 空間的動作の半自動化の設計指針	41
3.3.2 半自動システムの全手動、全自動システムとの比較	46
3.3.3 遠隔会議支援ロボットシステムの半自動化例	48
3.4 考察	49
3.5 まとめ	51

第 4 章 空間的動作の半自動化による遠隔操作ロボットイ ンタフェース	53
4.1 状況のウェアネス取得に関する問題	54
4.2 ロボット動作の予測に関する問題	55
4.3 操作の煩雑さに関する問題	57
4.4 インタフェースの特徴	57
4.5 実験用システム	58
4.5.1 実験に利用したロボット	59
4.5.2 動作の制限と AR による制限の可視化	60
4.6 評価実験	63
4.6.1 実験概要	63
4.6.2 比較対象のインタフェース	64
4.6.3 カメラ操作のインタフェース	65
4.6.4 実験環境	67
4.6.5 実験参加者と実験手順	69
4.6.6 分析方法	70
4.6.7 実験結果	71
4.7 考察	76
4.8 まとめ	78
第 5 章 空間的動作の半自動化による遠隔作業支援システ ムの実装例	80
5.1 ウェアラブルデバイスを用いた遠隔協働作業支援システム	81
5.2 Manicon による作業指示	85
5.2.1 プロトタイプ実装	85
5.3 半自動化による効果	87
5.4 考察	90
5.5 まとめ	91
第 6 章 考察	92
第 7 章 結論	102
謝辞	106
参考文献	107

図表目次

図 1	日本の生産年齢人口	2
図 2	ウェアラブルデバイスを用いた遠隔協働作業支援システム	3
図 3	本論で扱う空間的動作の分類	15
図 4	オフィスでの遠隔協働作業観察の事例	23
表 1	オフィス間遠隔会議の状況	23
図 5	遠隔会議を支援する小型ロボットシステム	27
図 6	遠隔会議支援ロボットの外形	28
図 7	移動と姿勢変更の説明	29
図 8	単語復唱課題の概略	30
図 9	注意喚起実験配置条件	32
図 10	注意喚起実験環境模式図	32
図 11	注意喚起実験環境外観	33
図 12	ロボット配置毎の平均反応時間	35
図 13	ロボット配置毎の平均反応エラー率	35
図 14	ロボット配置毎の音声課題正答数	36
図 15	注意喚起実験主観評価値グラフ	37
図 16	半自動による選択肢の制限	44
図 17	空間的動作の半自動化を採用した遠隔作業支援の例	45
図 18	全手動、全自動、半自動システムの関係	46
図 19	提案する半自動システムによる注意喚起インタフェース	49
図 20	インタフェースの操作の向きと動作方向が一致しない例	56
図 21	小型ロボットによる遠隔協働作業支援システム	59
図 22	小型移動ロボットの外形	60

図 23	オブジェクト選択による動作制限のスクリーンショット	62
図 24	動作制限の模式図.....	63
図 25	実験に利用したブロックの例.....	66
図 26	カメラ操作インタフェースのスクリーンショット	67
図 27	ロボットインタフェース実験環境.....	68
図 28	ロボットインタフェース実験 実際の実験風景.....	69
図 29	平均課題実施時間（インタフェース条件）	72
図 30	平均課題実施時間（順序条件）	73
図 31	平均課題実施時間の交互作用.....	74
図 32	ロボットインタフェース操作に関する主観評価値.....	75
図 33	片手で操作しながらブロックを回転させている実験参加者の例 .	76
図 34	製造業での遠隔協働作業の例.....	80
図 35	ウェアラブルデバイスを用いた遠隔協働作業システム	83
図 36	ハンドジェスチャ CG による作業指示	84
図 37	ハンドジェスチャの合成イメージ.....	84
図 38	ルービックキューブに対する Manicon での作業指示	86
図 39	Manicon による作業指示詳細.....	87
図 40	対象物に正対していない場合の Manicon 表示.....	88
図 41	バルブに対する作業指示のイメージ.....	89
図 42	遠隔協働作業の導入によるポジティブな効果.....	92
図 43	多様な空間的動作を利用できるシステムでの課題.....	94
図 44	AI による半自動システム実装のフロー	98
図 45	ドローン操作に半自動化を応用したイメージ.....	101

第1章 序論

1.1 背景

近年、日本国内では高齢化の影響で、生産年齢に属する労働者が産業現場から減少する傾向が顕著である(図 1)。伝達すべき技術や知見をもつ熟練者は高齢であることが多く、熟練労働者が今後少なくなっていく状況の中、熟練者の移動に関する身体的な負担を削減しつつ、技能の伝達を実現する仕組みが必要とされている。また、2020年以降は新型コロナウイルス禍で移動制限が課せられる中、熟練者が長距離の移動をせずに、業務の遂行に必要なコミュニケーションを行うためのしくみが必要とされている。特に日本の製造業の中には、実際の製品生産を海外の工場で行っている企業も多いが、日本に在住する技術者が、現地工場が発生したトラブルの対応等を行う場合に、電話等によるコミュニケーションでは問題の解決が難しいため、それを支援するシステムが必須となる。コロナ終息後も、今後同様の事態が発生した場合に備える BCP（事業継続計画）の手段として、こうした技術に対する関心は継続するものと思われる。

単位:千人

%

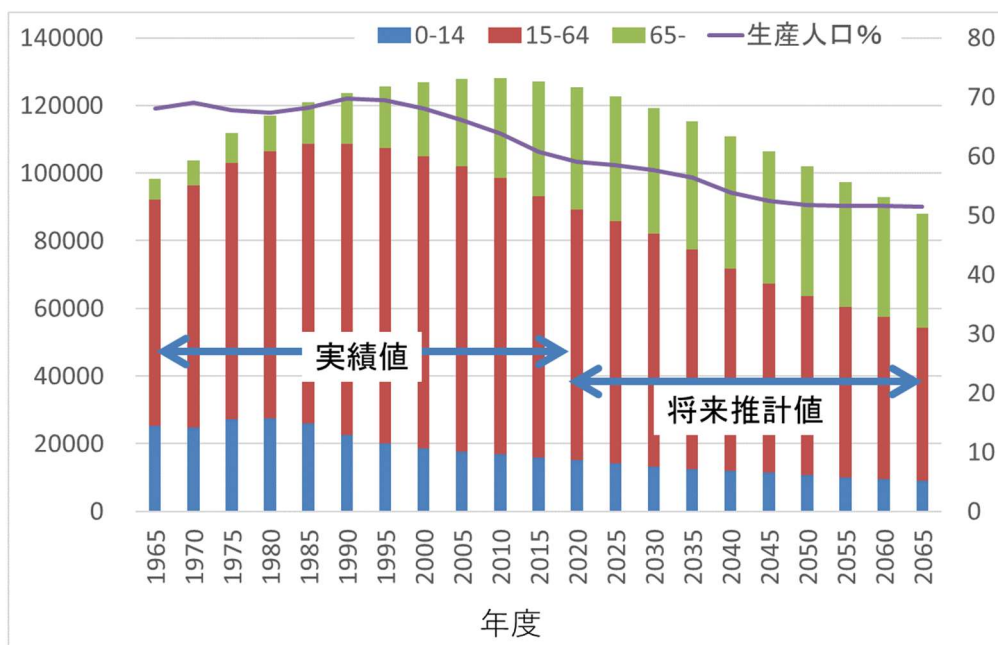


図 1 日本の生産年齢人口^a

1.2 遠隔協働作業

前節で述べたような背景から、遠隔協働作業を支援する技術への注目が高まっている[1]。遠隔協働作業とは、地理的・空間的な距離を隔てた二人以上の参加者が、目的を共有して作業を行うことであり、遠隔協働作業システムはこの作業目的の達成のために技術による支援を行う。利用される分野によってシステムに必要とされる要素は当然異なるが、典型的な実現例を図 2 に示す。ウェアラブルデバイス（カメラ、ディスプレイ）を身に着けた現場の作業者と、現場から離れた空間にいる熟練技能者がシステムを用いて通信し、作業者のウェアラブルカメラで撮影した映像をネットワーク経由で遠隔地の熟練技能者に送る。熟練技能者は送られてきた映像を見て作業情報を確認し、遠隔地の作業現場に指示を伝達する。指示は音声で行われたり、また作業員が身に着けるウェアラブルディスプレイに映像を送付することで行われたりする。このようなシステム

^a 総務省統計局 人口ピラミッドデータから著者作成 出展：総務省統計局「国勢調査」及び「日本の将来推計人口（平成 29 年推計）」（出生中位・死亡中位仮定による）

によって、熟練技能者が空間を移動することなく、持つ知見や技能を現場の作業者に伝達することができる。

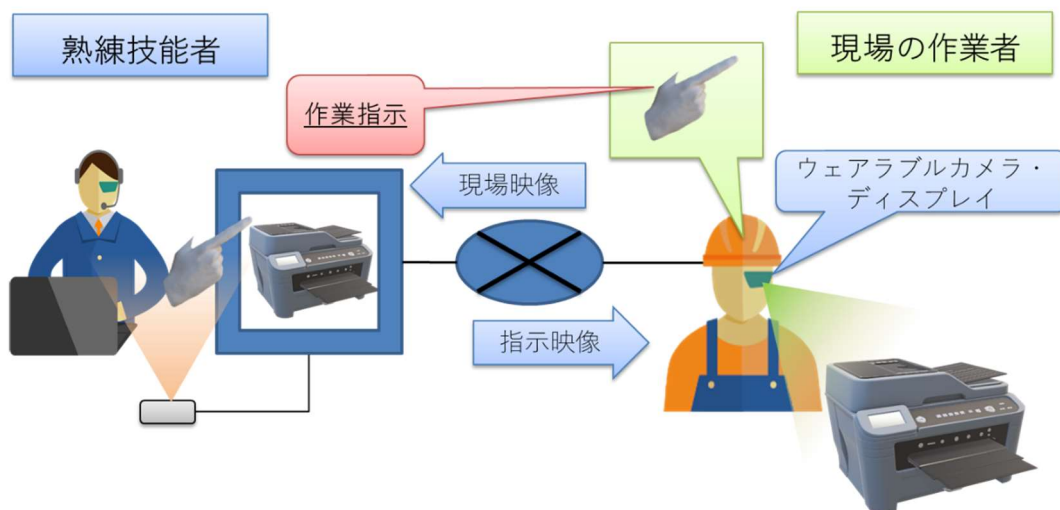


図 2 ウェアラブルデバイスを用いた遠隔協働作業支援システム

1.3 物理空間を参照する遠隔協働作業

遠隔協働作業を可能とする具体的なシステムとして、Zoom や Microsoft Teams のようなビデオ会議システムが企業、大学等で普及しているが、これらは主に机に着席するなどの静的な状態で、電子化された文書などを共有しながらコミュニケーションすることを想定している。これに対して本研究では、実際の空間に存在する 3 次元的な物体を扱い、必要に応じて実際の空間の中で移動しながら遠隔地の人と協働で作業を進める必要があるような産業用途での作業に、遠隔協働作業システムを導入することを考える。このようなシステムでは、遠隔地に分散した対話者同士が、空間内の物体に対して注意を誘導したり、その物体に対して行ってほしい作業を指示したりするなど、物体と関連付けられる情報を伝達することが必要となる。このような情報の伝達行為を本論文ではこれ以降「参照」と呼ぶ。

ビデオ会議システムは、一般に PC やタブレットなど、2 次元の画面を有する情報端末上で動作する映像・音声の通信システムとして構成されるため、電子化された文書や描画を共有しながら進められる対話には有効である一方、空間内の物体に対する参照を要する対話に対しては、物理的な実体を扱えない、ビデオ

で表示される 2 次元画面の中で、物理空間をうまく参照できない、参加者の注意を喚起できないなどの課題があることが指摘されている[2][3]。

製造業の事例に基づき、通常のビデオ会議では問題が生じる具体的な状況を考える。新製品の製造に関するレビューを行う時に、遠隔地から参加する製品設計者が、工場など製造現場の担当者に、製造の際の注意点や、作業方法を指示する必要があっても、製品を遠隔から直接動かさない、詳細作業位置を指定しづらい、作業内容について、空間を共有する際には自然に利用される身振りを交えて伝えることが難しい、などが問題となる。

これらの問題に対しての解決方法として、遠隔地からユーザの操作によって動かすことができるロボットを利用して、ロボットの物理的な動きによって 3 次元的な表現をさせたり、また、送受信されるビデオ映像に、描線や、矢印などの記号、立体的な身体の一部を CG (Computer Graphics) で重畳して表示したりすることによって、それらの問題を解決する試みが提案されている。本論文では、こうした遠隔協働作業を支援する目的で利用される、3 次元空間における動的な表現を「空間的動作」と呼ぶ（「空間的動作」については第 2 章 で詳細に論ずる）。遠隔協働作業で空間的動作を利用できるシステムは多数提案されているが、現場での作業は多様であるため、作業対象を増やし、多くの作業内容に対応して、遠隔協働作業システムが利用可能な状況を拡大するためには、多種多様な空間的動作を扱える必要がある。しかし、単純に空間的動作の種類を増やしても問題は解決しない。空間的動作の利用、具体的な操作は困難であり、また、複数ある空間的動作の中から、有効な空間的動作を適切に選択できず、伝達すべき意図を適切なタイミングで伝えづらくなるなどの課題、さらに操作や伝達に関する利用者の負担が増加して、遠隔協働作業に影響があるなどの課題がある。これらの課題のため、空間的動作を利用可能な遠隔協働作業システムは十分普及するには至っていない。

以上を整理すると、多様な作業に対応するために、多様な空間的動作を利用できる、遠隔協働作業システムの実現に対して、解決すべき課題を以下の 3 つに集約することができる。

課題 1. 空間的動作の遠隔操作が困難である：遠隔操作ロボットでは、UI (User Interface) による操作が難しいことが指摘されている [4][5][6]。

課題 2. 空間的動作の伝達が困難である：手振り等による情報の伝達は空間共有条件でも難しいことが知られている[7][8]。

課題 3. 課題 1、2 で生じる認知的負担によって遠隔協働作業に悪影響がある：

空間的動作の操作、伝達が利用者にとって難しく負担が生じると、遠隔協働自体に悪影響がある可能性がある[9]^b。

1.4 本研究の目的

本研究の目的は、前節の課題を解決し、空間的動作を必要とする遠隔協働作業を支援するシステムの設計指針を提案することである。このために本論文で「空間的動作の半自動化」という概念を提案する。これは、システムの利用者に、関心の対象となる、参照すべき「もの」を選択させるが、その選択対象に適した種類の空間的動作の提案や、不要な空間的動作選択肢の削減、空間的動作の方向や経路の制限といった支援をシステムが提供する、という枠組みである。空間的な情報の表現である「空間的動作」と「半自動化」という二つの組み合わせによる提案に本研究の貢献がある。

本研究では小型ロボットによる、遠隔参加者の注意を喚起する効果を検証する実験後の考察から「半自動化」の着想を得て（3章）、遠隔操作ロボットのUI実験（4章）で検証した後に、利用範囲を拡大し、CGを用いる遠隔作業支援システム（5章）でも応用可能であることを示す。「半自動化」により、システムがユーザの利用可能な空間的動作を制限するため、不要な入力が減り操作が容易になる効果、システムが空間的動作を変更して、ユーザの意図を伝達しやすい内容にできる効果、そして、これらの操作や伝達の容易化によって、利用者の認知的負担が低減されるという効果が期待できる。また、遠隔協働作業を円滑に進めるために利用できる空間的動作が複数ある場合に、ユーザが作業中の状況に応じ選択し使い分ける必要があり、また、選択後に適切に操作しないと期待される効果を得ることは難しいという課題も存在した。本研究で提案する「空間的動作の半自動化」こうした課題の解決を目指したものである。本研究の主張を整理すると、半自動化の導入によって、システムはユーザが利用すべき空間的動作を一部選択、動作を制限、変更するなどして支援する。これにより

- ユーザに対して、利用すべき適切な空間的動作を推奨、制限を加える等で操作を支援できる。
- 空間的動作を推奨、また必要に応じて変更することで伝達を適切に行

^b 遠隔参加者が空間的動作を操作しながら、遠隔協働するのは二重課題と見做すことができ、二重課題では、一つの課題が困難だと他の課題のパフォーマンスに悪影響があることが知られているからである。

うことができる。

- 上記に関係する認知的負担を減らすことができる。これによって、遠隔協働作業自体に注力できる可能性がある。

などの効果を得ることができ、遠隔協働作業を円滑に進められるようになり、目的とする作業を短時間で終了することができたり、作業の中で利用者が感じる負担が減るなど、コミュニケーションの質を高めることができると考えられる。本研究では提案に基づいて開発したシステムや、評価実験によって、上記の提案の妥当性を主張する。

1.5 本論の構成

本論文は以下の 7 章から構成される。

第 1 章 序論

本研究の背景として、実空間に存在する実物体を参照する遠隔協働作業の重要性を述べる。広く普及している、2 次元映像を利用するテレビ会議システムと比較することによって、物体を参照する伝達行為と、伝達行為に関係するコミュニケーションを支援するために、ロボットや CG で実現される、遠隔から操作可能な空間的動作が重要であることを確認する。空間的動作を単純に導入しても、その操作が困難であったり、適切な動作を行えず、伝達すべき意図を伝えづらくなったりするなどの課題が発生する。操作や伝達に課題があると、協働作業自体に影響が発生することもある。また、遠隔協働作業支援システムをより広く活用するために、多種多様な空間的動作を扱えるようにすると、動作の選択が問題となる場合もある。本研究ではこれらの課題解決のために「空間的動作の半自動化」という方針を提案する。

第 2 章 関連研究

実空間を参照する遠隔協働作業支援の先行研究についてまとめ、特に空間的動作という観点から、ロボット技術や、CG を用いた遠隔協働作業支援システムとシステムに関連する研究について述べる。

また本研究で扱う空間的動作を情報収集動作と情報伝達動作の 2 つに大きく分類し、情報伝達動作に関しては、Ekman らのノンバーバルコミュニケーションに関する分類を用いて整理する。多様な空間的動作を利用し、遠隔協働作業をさらに広い分野で活用するためには、解決すべき課題があることを

示す。

第3章 遠隔協働作業における空間的動作の半自動化

実際の遠隔会議の観察から、遠隔会議システムに移動動作が可能な小型ロボットを導入することで得られる「注意喚起」の機能に着目し、情報伝達動作である小型ロボットの注意喚起能力を評価した実験について述べる。注意喚起はその後の空間的動作による伝達のきっかけを作る基本的な機能であり、また遠隔会議の観察結果から、比較的単純な機構で実現できる可能性があるが、空間的動作の利用に共通する課題も含んでいるため、まず検証すべき機能として適切である。

実験結果から、小型ロボットによる移動動作の注意喚起に関する効果を確認した後に、ロボットをただ移動可能にするだけでは、遠隔協働作業を支援する効果を得ることが難しいことを、1章で述べた課題と関連付けて議論する。その後に課題に対して、先行研究等から着想を得た「空間的動作の半自動化」という設計指針で対応可能であることを主張する。さらに、遠隔協働作業における半自動化の意義について、全自動、全手動の遠隔協働作業支援システムとの比較によって論ずる。

第4章 空間的動作の半自動化による遠隔操作ロボットインタフェース

半自動化の他の応用事例として、遠隔操作ロボットの操作に半自動化を導入した研究について述べる。カメラを搭載した小型ロボットの情報「収集」動作を、参加者が興味を持ち参照する対象物によって、半自動的に制限するというシステムの実装による実験結果を基に、その有効性を議論する。

第5章 空間的動作の半自動化による遠隔作業支援システムの実装例

第3章、第4章で述べたロボットへの応用以外に半自動化が応用可能な、遠隔協働作業支援システムとして、CGを利用する遠隔作業支援システムの実装について述べる。

まず、ハンドジェスチャによる情報「伝達」動作を伝送可能なウェアラブルデバイスを用いた遠隔作業支援システムについて述べる。次に、その発展事例として、Manicon と呼ぶ 3DCG の作業指示手段、すなわち空間的動作のうち、情報伝達動作を対象にあわせて半自動で選択して提示可能なシステムについて、ルービックキューブに対する作業指示を伝達可能な実装システムの概要と、その有効性について議論する。

第6章 考察

第3章、第4章、第5章、各事例の結果について考察し、本研究で提案する「空間的動作の半自動化」という設計指針が、遠隔協働作業支援システムの改善に有用であることを述べる。また、本提案の課題や、遠隔協働作業以外に「半自動化」を応用する事例についても述べる。

第7章 結論

本研究の結論と、展望について述べる。

第2章 関連研究

本章では遠隔協働作業を扱った関連研究を概観し、遠隔協働作業における課題と、それらを解決する手段である空間的動作について、主にロボット技術とCG技術を用いたものに大別してまとめる。また本研究で扱う遠隔協働作業を支援する要素である空間的動作について Ekman らによるノンバーバルコミュニケーション、中でも身体動作に関する分類を用いて整理する。

Zoom や Microsoft Teams などに代表されるビデオ会議など、通常の映像、音声のみを通信経由で伝達する遠隔コミュニケーションシステムでは、参加者が物理的に空間を共有している場合には発生しない問題が生じることが知られている[2][3]。空間共有時には自然に伝達される、参加者間での視線を一致させて共同的な注意を向けるという行為が、遠隔会議の状況では、視線が正しく伝達できないことによって達成されなくなる[10]。手を上げることによって、注意を喚起したり、作業者が複数ある作業対象のうち、どの対象に興味を持っているかを参加者の身体の位置姿勢、頭部、視線の方向[11][12]によって自然に示したりするというコミュニケーションも同様に行いづらくなる。さらに、参加者の身振り手振りを交えながらの「こうやって、このように」といったような対象を参照する指示が適切に伝達しづらくなる、それによって円滑なコミュニケーションができなくなるなどが具体的な問題の例である。

これらの問題の解決を試みた研究の中には、情報表現などを代替するための要素をシステムに追加する、という手段を用いたものがある。つまり、コミュニケーションへの参加者が自然に行う身体的表現や、協働作業の対象である空間に存在する物体に対する情報表現、物体や空間に関連する情報を取得する動作を可能とする要素を追加するものである。

以下本章では、関連する先行研究について、通常の遠隔コミュニケーションシステムに、本論で「空間的動作」と呼ぶ情報を表現するための要素として代表的な、ロボットを追加する場合と、CGを追加する場合についてそれぞれまとめる。次に、空間的動作をシステムで利用する際の課題について述べる。

2.1 ロボットを用いた研究

遠隔地に存在するロボットを遠隔操作して、ロボットに搭載されたカメラで空間や対象の情報を取得したり、人間の体が持つ存在感等を遠隔地に伝達する目的でロボットの要素を利用する研究はレイグジスタンスや、テレプレゼン

ス技術とも呼ばれる。これらの研究の先行例として、Fisher[13][14]らによるシステム、Tachi らによるシステム[15]や、Kuzuoka らによる GestureCam[16]、GestureMan[17]がある。葛岡らによる研究は、カメラをロボットで移動させ撮影範囲を広げるだけでなく、参加者の身体の動きを作業空間に配置されたロボットの動きとして再現し、作業空間を共有する作業者がロボットの動きを遠隔参加者の身体情報表現として理解するという効果でコミュニケーションが改善される。

Fisher らによるシステムは、宇宙ステーションでの利用を念頭に提案されたものであり、システムの利用者が HMD (Head Mounted Display) とデータグローブを利用して仮想空間に没入し、実際に手を動かすことで遠隔のロボットを操作して、ロボットと同じ空間に存在する物体に対する作業を行うことができた。このシステムでのロボットはシステムによる自動動作、自律的動作を前提とし、重要な作業を行う場合、必要に応じて利用者が介入して手動操作するというものであった。詳細は後述するが、本研究の提案する「半自動化」は、ユーザによる手動で対象物を選択させ、その後にシステムが自動化して支援する、という点で Fisher らの提案とは異なっている。しかし、システムの自動化と手動化の適切な切替えに着目していた、という点で彼らの研究は重要な観点を含んでいる。

Paulos らは PRoP[18]とよばれるシステムを開発している。飛行船や移動台車にディスプレイやカメラを搭載し、遠隔コントロール可能な物理的な実体であるロボットを利用する利点について報告している。Jouppi[19]も同様の観点から移動車両にディスプレイやカメラを搭載して、コミュニケーションを支援するシステムを開発している。渡辺ら[20]は InterRobot と名付けられた、身体を持つロボットがうなずき・瞬きや身振りなど身体全体で反応することで、対話者が円滑に話せるようになることを示している。Nakanishi[21]らはロボットが前後方向に移動する機能が、ロボット操作者が強い社会的プレゼンスを感じるのに有効であることを主観評価実験によって示した。森田[22]らはロボットを介してプレゼンテーションを支援するという枠組みの中で、ロボットの身体動作からロボット利用者の興味を推定することができるかを、主観評価や、注視頻度を指標として検討している。このように、遠隔コミュニケーションで生じる問題をロボット技術で解決しようとする研究は多く行われており、また一定の効果を挙げている[23][24]。

近年では、一例では Tachi ら[25]による研究のように、ロボットの機構を複雑

化し、動作の自由度を増やして、人間に近づけることで、多様な作業や表現等を可能とする方向で継続して発展が進んでいる。また、ウェアラブルロボット、人間拡張という研究の枠組みの中で、現場の作業者が、遠隔から操作可能なロボットアームなどの機構を装着して、遠隔地の参加者が物理空間にも働きかけることを可能として、共同で作業を行うことを可能とするシステムも複数提案されている[26][27][28]。

また機構を人間と同様に複雑化する方針ではなく、Adalgeirsson ら[29]による、単純な機構を採用して卓上等で利用できる遠隔会議支援ロボットの提案も行われている。同様の観点から Kawanobe[30]ら、長谷川[31]らはスマートホンをもロボットの要素として構成される、遠隔会議等を支援する小型ロボットについて報告している。Kawanobe らはロボットを使って身を乗り出すしぐさを表現可能にし、またロボットに搭載した小型プロジェクターによる実空間への映像投影を可能としている。長谷川は、小型ヒューマノイドの身体による無意識の身振りの伝達効果について検証している。これらの研究のように、システムを小型化、単純化することで、システムを利用できる環境や条件を拡大するという方針でも多くの研究が提案されている。

2.2 CG を用いた研究

遠隔協働作業で、撮影される実空間の映像の上に CG を重畳する技術は拡張現実感技術 (AR: Augmented Reality)、複合現実感技術 (MR: Mixed Reality) の一つとみなすことができる。遠隔協働作業はこれらの技術の主要アプリケーションの一つであるとされ、以前から複数の提案がなされている[32][33][34]。

Chang ら[35]は、リアルタイムのビデオ映像に対して物体認識を行い、ビデオに映っている対象を音声で指定しやすくするための文字列をタグとして映像に付加することによって、音声コミュニケーションを支援するシステムを提案した。また作業対象の位置や形状と関連付けて、作業手順や注意点などのノウハウを AR 技術でタグとして空間に貼り付けて、その内容を複数人の作業員間で共有、編集可能として、非同期コラボレーションを支援する試み[36]も提案されている。Fussel ら[37]は、ビデオ映像の上に、彼らの研究の中では **Gesture** と呼ぶ描線、スケッチのアニメーションを提示可能なシステムを遠隔協働作業に応用している。より実際の現場作業に近い AR 活用の事例では、小型タブレットをもちいて、遠隔地と、CG によるアノテーションを共有することにより、車の修理を共同で行う作業を対象に検証した研究がある[38]。また近年では、スマート

ガラス上で、リアルタイムに撮像された映像上の特徴点を利用して、遠隔地の指示者からの手書きスケッチ描線を映像の動きに合わせて追従させ、あたかも遠隔地の空間上にそのままスケッチを行ったような効果を得ることができるシステムも提案されている[39]。

ビデオ会議システムで、遠隔協働作業を行う場合に、単純に映像を送受信するだけでは、作業効率等が改善されず[40]、身振りの伝達が行いづらいことが課題となっていることは、以前から指摘されてきた[41][42]。スケッチのような単純な描線ではなく、身体による身振りを伝達、表現可能としたものでは、Kuzuoka[43]によるシステムで、指示者が身振りで対象物に対して指差ししている映像を、遠隔地の作業側から見るようにした事例、Kirkら[44][45]によるビデオカメラとプロジェクターで、指示者の手による身振りを作業空間の物体に投影する事例などが先駆的な取り組みである。Tang[46]らは同様の観点で、プロジェクターではなく、大型タッチパネルディスプレイと、テーブルトップディスプレイを利用する構成で、タッチパネルディスプレイに対しての、手による作業内容が、遠隔地のテーブルトップディスプレイ上に表示されるシステムを構築し、実証実験によって評価を検証している。

ウェアラブルシステムで映像によるハンドジェスチャの合成と表示表示を実現したHuangら[47]は研究を進展させ、指差し等の身振りを表現する3DのCG表現をディスプレイ上に表示することが遠隔協働作業に有効であることを確認している[48]。近年では、Kimら[49]によるヘッドマウントディスプレイ（以下HMD）とジェスチャセンサーを用いてHMD内に遠隔地から送信される、ハンドジェスチャを表示するという内容も報告されている。映像内の物体に対する指差しによる指示や、物体に対する手を用いた作業の内容などを、実際に空間を共有している場合と同様に、詳細に伝達することができる。

CGによる身体的な情報表現の有効性はハンドジェスチャの表現に限らない。檀原ら[50]はInterRobot[20]と同様の機能をCGアバターによって実現し、CGによる視覚的な身体表現でもInterRobot同様の会話への引き込み効果が得られることを確認している。Wang[51]らは人間の全身を表現するCGアバターを用いて作業指示を行い、腕と手先のみ、手先のみという3つの条件による実験を行って、身体を表現するアバターは、ユーザビリティの点で効果が高いことを確認している。樋口ら[52]はハンドジェスチャに加えて、指示者の視線を検出し、その表示を作業側に行い、視線提示によって、高速なポインティングを実現できること、作業側が指示者の意図を推測するのを助けることができることを報

告している。

また、情報の提示に HMD を利用する構成以外にも、酒田ら[53]による WACL という肩乗せ式のアクティブカメラ・レーザシステムでは、レーザプロジェクタを用いて、作業空間や対象上に作業指示を重畳して表示することが可能となっている。

2.3 空間的動作

前節では遠隔コミュニケーションにおける課題の解決を試みた関連研究を示した。これらの研究では

- 空間共有時にコミュニケーションの参加者が自然に行う身体的表現
- 協働作業の対象である空間に存在する物体を参照する情報表現
- 協働作業対象や作業空間に関する情報を取得するために行われる物理的な動作

をそれぞれ代替、実現するための要素がシステムで利用されていた。ロボットを用いたシステムでは、実空間に存在するロボットを遠隔から操作することで、ロボットに搭載されたカメラの撮像範囲を変更して空間や作業対象に関する情報を得たり、またロボットの実体による存在感や視線方向などを提示したりするものがあった。また、CG を用いるシステムは実空間を撮影した映像を表示するディスプレイ上に CG を重畳する、もしくは実空間にプロジェクター等で直接 CG を投影するものであった。本研究ではこれらの要素で実現される、主に遠隔協働作業の中で物体を参照するために用いられる 3次元空間での動的な表現や、参照する物体に関する情報を取得するための動作を「空間的動作」と呼ぶ。本研究では、ロボットを具体的に動作させることもこの動作の中に含まれるものとする。

2.4 空間的動作の分類

前節までにロボット、CG を用いた遠隔協働作業に関連する研究を引用したが、本研究ではロボットや 3DCG による動的な表現を「空間的動作」として、それらの要素による空間的な情報表現や空間での実際の動作を統一的に扱う。これらの要素は多種多様であるが、遠隔協働作業支援という観点で統一的に分類、整理するために Ekman らによるノンバーバルコミュニケーションにおける、身体

動作の機能分類を利用した[54,55,56]^c。Ekman らが具体的な対象としているのは身体動作の機能分類ではあるが、ノンバーバルコミュニケーション全般において有用な分類方法として、一般的に利用されている。

Ekman らの分類を利用した情報表出のために使われる動作を、本研究では情報伝達動作と呼ぶ。さらに、Ekman の分類の中には含まれない、空間の中で撮影する空間の範囲を変えるためにロボットカメラを動かすなど、情報の収集のために行われる動作を情報収集動作と呼ぶ。図 3 に本論で扱う空間的動作の関係をまとめて示す。四角の枠をつけて表示された内容が、本論で具体的に扱う動作である。

^c Ekman は 1969 年の論文で提案した内容を 1980 年、2004 年に自身で更新しており、用語が一部変更、削除されている。

空間的動作

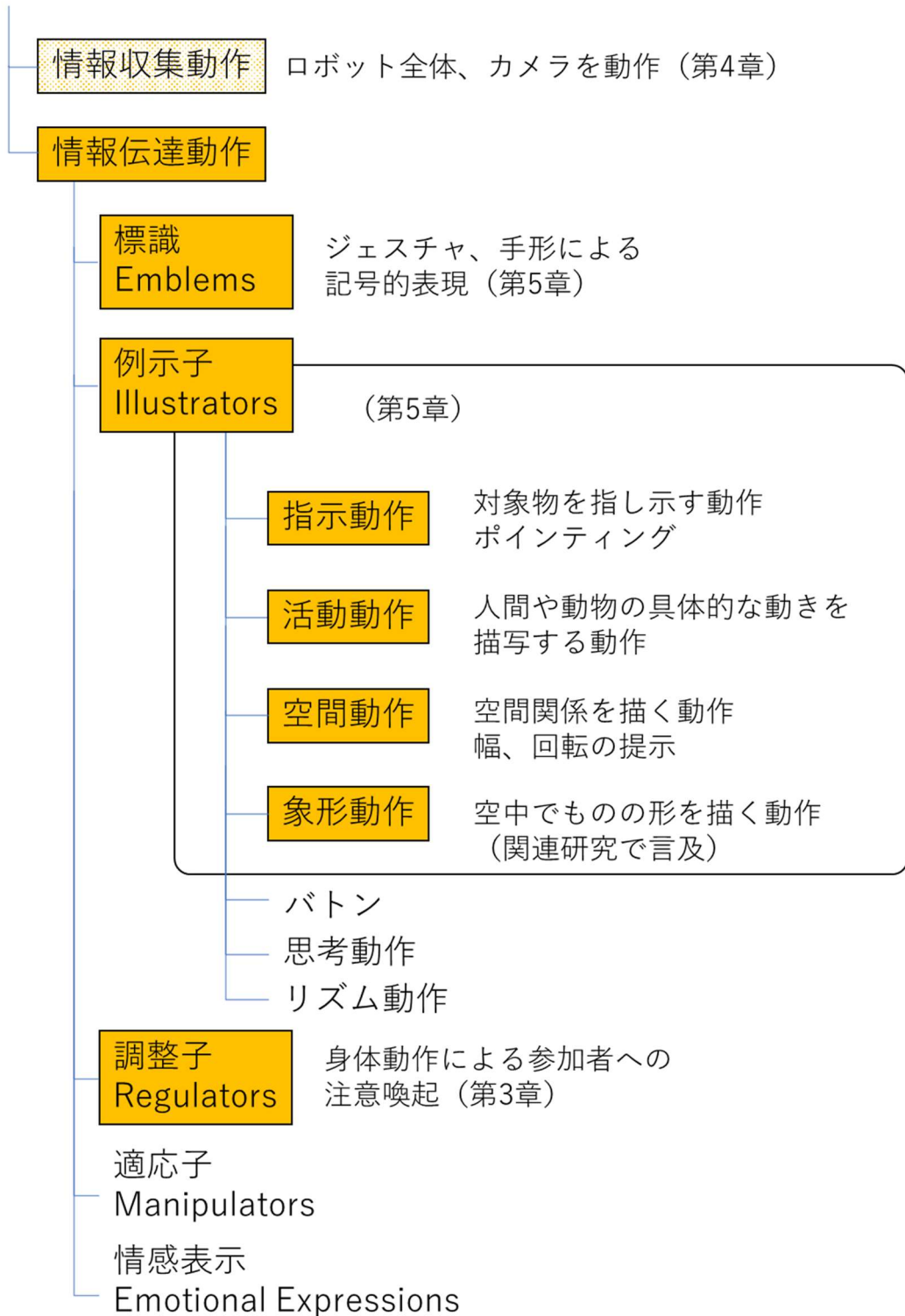


図 3 本論で扱う空間的動作の分類

Ekman らは身体動作の機能を下記の 5 つに分類した。(日本語訳は黒川 [57][58]に倣った。黒川は Ekman の 1969 年の論文と、その後の 1980 年の修正内容に対して訳語を定めているが、本論では英語表記には 2004 年の改訂後の用語を用いた。)

- 標識 (Emblems)
- 例示子(Illustrators)
- 調整子(Regulators)
- 適応子(Manipulators)
- 情感表示(Emotional Expressions)

標識は分類の中で、音声言語に依存せず特定の意味を伝えられるという点で、身体による言語的な表現である。Ekman は多くが手や腕で行われると主張しており、指でサインを作る、親指を立てて OK サインを示すなどの記号的な表現に相当する。

例示子は標識と異なり、音声会話と連動して使われることが多い。空間的動作の中でも多様であり、下記の 7 種類に詳細に分類される。

- 指示動作 (Deictic Movements)
- 活動動作 (Kinetographs)
- 空間動作 (Spatial Movements)
- 象形動作 (Pictographs)
- バトン (Batons)
- 思考動作 (Ideographs)
- リズム動作(Rhythmic movements)

指示動作とは、参照対象となる物体を指定する、指差しのような動作を意味する。活動動作とは、実際に体を動かして行う作業内容を表現するための動作である。空間動作とは、空間的な関係を描くものであり、話題となっている対象の大きさや、複数ある対象間の関係を示すためのものである。象形動作とは、空間に対して絵を描くような動作である。バトンとは会話内容の強調等を行うものである。思考動作は、思考の道筋を示すために行われる身振りの動作である。リズム動作とは、出来事のリズムや速さを描く動作である。本研究の中では、Ekman の分類の中で例示子のうち、遠隔協働作業で重要となる作業対象との結びつきが相対的に弱い、バトン、思考動作、リズム動作を除いた、指示動作、活動動作、

空間動作、象形動作を扱うこととする。

調整子は、誰が発話権をもつかを決定したり、発話権のやり取りを制御したりして、会話の流れを円滑にする機能を持つ。手をあげたり、身を乗り出して、参加者の注意を喚起し、発言権を獲得したりするような動作や、相手の発話を聞き続ける意志の表明としてのうなずきなどが知られている。

適応子は、頭をかいたり、髪をいじったりするなど、自分の身体を操作することなどで、現在の状況に適応するための身体動作であり、明示的には情報伝達的な内容を含まない。また情感表示は、表情や身振りによって感情を表示するもので、広義のコミュニケーションの文脈、具体的にはコミュニケーション参加者間の信頼性の構築等では非常に重要であるが、具体的な作業目標を持つ遠隔協働作業支援の文脈では相対的には重要度が低いものと考えられる。これらの理由から、適応子と情感表示は本研究では空間的動作の分類の中には含めないこととした。

2.5 空間的動作の課題

本研究で空間的動作と呼ぶ、「遠隔協働作業を円滑に進めるために、空間内での3次元的な動作や表現」を利用可能なシステムの研究はその歴史も長く、数多くの提案がなされているが、実際に産業現場等で広く利用されているものは多くない。第1章で述べたように、空間的動作を利用可能なシステムには共通する課題があり、実際に空間的動作を広く利用するためには、下記の問題を解決する必要がある。

課題 1. 空間的動作の遠隔操作が困難である

課題 2. 空間的動作の伝達が困難である

課題 3. 課題 1, 2 で生じる認知的負担によって遠隔協働作業に悪影響がある

さらに、伝達可能な動作の種類を増やそうとすると、複数の空間的動作をシステムから利用することになり、利用者が動作を選択する必要があるなど新たな課題も生じる。関連研究で振り返ったように空間的動作の実現形態は多種多様であり、これは遠隔協働作業の目的や、その作業対象が一樣ではなく、必要とされる空間的動作も多様であるためである。一種類の空間的動作では、伝達できる情報は限られ、またあらゆる目的に適合する万能の空間的動作が存在していないことは、関連研究で提案されている空間的動作の多様性からも明らかである

と思われる。

作業目的や作業対象に合わせて適切な空間的動作を利用して、遠隔協働作業を空間共有時と同様に円滑に進めたいというニーズに応え、遠隔協働作業を支援するシステムの利用範囲を拡大するためには、多様な空間的動作が遠隔協働作業支援システムから利用できなければならない。しかし、先に述べたような課題があるため、単純にシステムから複数の空間的動作を利用可能としても、問題の解決にはならない。本論文の目的はこれらの課題を解決して、遠隔協働作業支援システムを利用するユーザが空間的動作を選択、操作しやすくし、動作による伝達の効果を高め、利用に付随する認知的負担の低減を図り、円滑な遠隔協働作業の実現を支援するシステムの提案である。

本研究ではこれらの課題を解決するための設計指針として「空間的動作の半自動化」を提案する。遠隔協働作業で存在する対象物を利用者に指定させることで、間接的に遠隔協働作業の状況を推定し、システムから状況に合わせて、空間的動作の利用に関する支援を行う、というのがその枠組みとなる。

次章では、まず産業界で利用される遠隔協働作業支援システムの例として、遠隔会議を支援する小型ロボットシステムとその注意喚起の能力を具体例とし、空間的動作の遠隔協働作業での実際の利用のされ方を確認する。さらに、ロボットによって実現される空間的動作の効果について評価実験を行った結果を基に議論し、実際に空間的動作を利用する際に生じる上記の課題についてより詳細に議論する。そして、それらの課題を解決する方針として、空間的動作の半自動化という提案について述べる。

第3章 遠隔協働作業における空間的動作の半自動化

前章で論じたように、遠隔協働作業に関する課題は、物体への参照が行いづらいこと、テレビ会議などで利用される2次元画面上に表示される情報だけでは、目的とする実空間での作業がうまく行えないことによる。この課題を解決するためには3次元空間にある物体を参照する空間的動作が必要となる。しかし、実際に遠隔協働作業を行う場合、空間的動作は、システムからの支援がないと有効に活用することができない場合がある。本章では空間的動作の利用例として、遠隔会議を支援する小型ロボットの空間的動作による注意喚起効果について確認した後、その実際の利用には課題があることを議論する。その後には課題解決方針として「空間的動作の半自動化」を提案する。

本章では空間的動作の情報伝達動作、調整子の一つと位置付けられる「注意喚起動作」を対象とする。注意喚起動作を対象としたのは、実際の遠隔会議状況を観察した結果から、他のユーザの注意を喚起して、他の情報伝達を行うきっかけとなる基礎的かつ重要な機能であり、また小型ロボットによる比較的単純な手段で実現できる可能性があると判断したためである。評価実験によって、小型ロボットに適切な動作をさせて注意を喚起できることを確認する。その後には、この注意喚起機能を実際の遠隔協調作業で使うためには課題があり、特に情報を伝達する側、利用者を支援する必要があることを議論する。この課題に対して、本研究で提案する「半自動化」という設計指針で対応可能であることを主張する。最後に、遠隔協働作業における半自動化の意義について、全自動、全手動の遠隔協働作業支援システムとの比較によって論ずる。

次節では具体的な遠隔協働作業の例として、複数人の参加者が2つの拠点に存在する、オフィスでの遠隔遠隔会議を扱い、実際に会議を行う中で、「空間的動作」がどのように機能するかを実際の会議の観察に基づいて論じる。

3.1 オフィス内での遠隔協働作業

現在、普及している遠隔会議システムは、映像通信と音声通信とを併用した構成が一般的である。しかし、現状のビデオ遠隔会議システムに対しては、以前より問題点が多数指摘されてきた。例えば、対面した会議では自然に行われている、参加者間での視線を一致させて共同的な注意を向けるという行為が、遠隔会議の状況では、視線が正しく伝達できないことによって達成されなくなること [59]、参加者の身体の動きなどによって表現されるジェスチャの伝達が困難に

なること、映像を介して情報を送受信する場合に、コミュニケーションが非対称になること[2]などの問題が広く知られている。

筆者が注目した問題は、特に遠隔会議の参加者数が多人数対少人数というように、不均衡である場合に生じるものである。例えば、本社のチームと地方支社、小規模のベンチャー企業、個人経営のホームオフィスなどと協業する場合が考えられる。このような場合、本社の十数名のグループに対して、数名以下の人々と遠隔会議をするという状況が発生する。類似した状況において、筆者らは、遠隔地の少人数の参加者が、本社の大人数の参加者による会話に参加しづらくなるという問題を経験した。こうした実際にビデオ会議を行なう中で経験した問題をきっかけとして、筆者は会話への参加のしづらさが生じる原因の一つとして遠隔参加者の動作への「注意」の問題に注目している。

本研究では「注意」とは、ある対象に対してその存在や動作に気づくこととする。ビデオ会議における「注意」の問題の一部は、Heathら[2]によって指摘されている。すなわち、ビデオを用いた会議では、通常平面のディスプレイ上に遠隔地の参加者の姿が表示されるが、遠隔参加者が通常の会議と同様にジェスチャなどの動作を行っているだけでは、映像を見ている側に気づかれず、情報が伝わらない。また、情報が伝わらない状態が続くと、場合によっては遠隔参加者のジェスチャが徐々に大きくなって、注意を引こうとする傾向がある。筆者らの経験によれば、会議の参加人数が不均衡である場合には、参加人数が多い側における会話が活発になった時に、大半の参加者は、少人数の遠隔参加者が表示されているディスプレイに注目しなくなってしまう。このため、ジェスチャなどを通して現れる遠隔参加者の発言意図に気づかなくなり、結果として少人数側が会話に積極的に参加することが難しくなるといった状況が発生する。

筆者は福島らとの共同研究により、ビデオ会議において、遠隔参加者に「注意」を向けることが困難になる問題の解決方法として、ロボットを導入することを提案してきた。本章ではこれ以降、ロボットがその動作を人に気づかせる能力を「注意喚起能力」と呼ぶ。注意喚起は、遠隔地の実空間に存在する人に対して働きかける情報表現、つまり2D画面の中でなく、実際の空間にいる対象＝人を参照する情報表現であり、遠隔協働作業で必要とされる空間的動作の中で情報伝達動作、調整子として分類される特徴を持っている。また、情報の受け手＝人に対して、今後情報伝達をしたいという意図を伝える役割を持ち、それ以降、より複雑な空間的動作を伝達して、協働作業を始めるきっかけを作る機能である。注意を喚起できなければ、他の空間的動作を伝達することも困難となるため、基礎

的な機能として重要性が高い。

さらに、後に説明する実際の遠隔協働作業時の観察結果から、車輪付きロボットカメラという比較的単純な機構で実現可能でありながらも、利用に関してシステムによる技術支援を必要とする課題を有しているため、空間的動作の必要性、また提案である半自動化の必要性を議論するための機能として妥当であると考えた。

3.1.1 関連研究

ビデオ映像を利用した遠隔コミュニケーションシステムを利用する場合に、ディスプレイ上に現れる、遠隔会議参加者の意図を反映したジェスチャなどの動作に気づくことができるか、注意を向けることができるかは、ビデオ会議システムの開発の初期段階から問題となってきた。

Heath らはビデオを利用したシステムにおける参加者のジェスチャを観察し、ビデオ会議利用者によって行なわれるジェスチャは、相手の「注意」を引くことを目的としたものが多くなること、ジェスチャはディスプレイ上に表示されるので参加者の「注意」を引きづらく、そのため、通常の空間を共有した状況でなされるジェスチャよりも大きく、誇張されたものに変化していく傾向があるが、それでも「注意」を引くことができず多くのジェスチャは伝わらないままであることを報告している。Gaver[60]はHeath[2]らの研究を引用して同様の問題について述べ、大型のモニタを導入することでジェスチャに対する気づきやすさを高めることはできるが、モニタの大きさ自体によって生じる圧迫感で、遠隔参加者への心理的距離は逆に大きくなる、と指摘している。また、実際の会議では大型のスクリーンにはプレゼンテーションの資料を提示することが多く、必ずしも大型のスクリーンに遠隔参加者を大きく表示できるとは限らない。

さて、筆者らが遠隔参加者に対する「注意」に注目する理由は、例えばジェスチャが行なわれていることに対する「注意」が得られた後に、ジェスチャによって表現された情報が伝達できると考えるからである。ジェスチャで表現される重要な情報の例として、遠隔対話者がワークスペース内のどこや何に興味を向いているかということが先行研究で指摘されている。

例えばIshii らは、共有ワークスペースとして作業を行なう共有画面上に、遠隔参加者の視線を正しく再現した顔画像と手振りを重畳することができるClearBoard[61]を開発した。この研究でIshii らは、対話者同士の視線一致や、視線から共有作業空間に対する注意の方向に気づくこと (gaze awareness) の

重要性を指摘した。また Luff らは agora[62]というテーブル型の遠隔コミュニケーションシステムについて報告している。agora では、共有ワークスペースが表示されたデスクトップに対して垂直に設置されたスクリーンに等身大で遠隔参加者を表示することによって、共有されたデスクトップへの gaze awareness を支援している。

筆者らは、「注意」の問題を解決するために、ロボットを用いる構成を提案する。この理由の一つとして、遠隔会議の最中に、会議で利用されている遠隔操作可能なパンチルトカメラが、参加者の「注意」に影響する事例が観察されたことが挙げられる。パンチルトカメラは、実空間内で物理的な動作をするという点で、ロボットと共通する部分を持つ。次節で、筆者らの体験に基づいた事例を説明する。

3.1.2 筆者らが体験した事例

筆者らは業務内で遠隔会議を行う機会が多く、実際に会議を行う中で、本論で指摘した問題を体験した。本節ではそうした例について詳細に説明する。筆者が所属する組織は関東地区（埼玉県）と関西地区（大阪府）に分かれた 2 拠点があり、メンバー全員で直接対面して会議や打ち合わせなどのコミュニケーションを行うことは困難であった。そのため遠隔会議を定期的に行う必要があった。行われた会議の状況について表 1 に示す。特筆すべき点は、2 拠点で参加人数が不均衡であったことである。初年度は 11 名対 2 名、後に 16 名対 5 名とそれぞれ増加した。また、会議司会者は常に関東側に存在していた。こうした状況では、会議の主導権が関東側にあったため、関西側からの参加は受動的なものになりがちであった。その結果、関東側が関西側の挙動、すなわちディスプレイに注意を向ける機会が減少し、ディスプレイに表示された関西側の意図に気づきづらくなった。すると、発言意図に気づかれないので、関西側からの発言がさらに少なくなるといった悪循環が起り、円滑なコミュニケーションが行われなかった例が見られた。同様の事例は先行研究[3]でも報告されている。

実際の会議中に、関東側が関西側の挙動に気づいて、意図を理解するまでに時間を要した例を、図 4 を用いて説明する。この例の場合、関東側参加者は 16 名、関西側の参加者は 5 名であった。図 4 は遠隔会議中に関東側の会議室を撮影したものであり、画面内スクリーン脇のディスプレイに関西側を撮影した映像が表示されている。正面スクリーンは全画面をプレゼンテーションに利用するため、関西側の環境表示には利用できず、また配線の問題からディスプレイの位置

を大きく変更することは困難であった。ディスプレイ近傍に、関西側からの操作で動作し、関西側に映像を送信するパンチルトカメラ(表 1)が配置されていた。

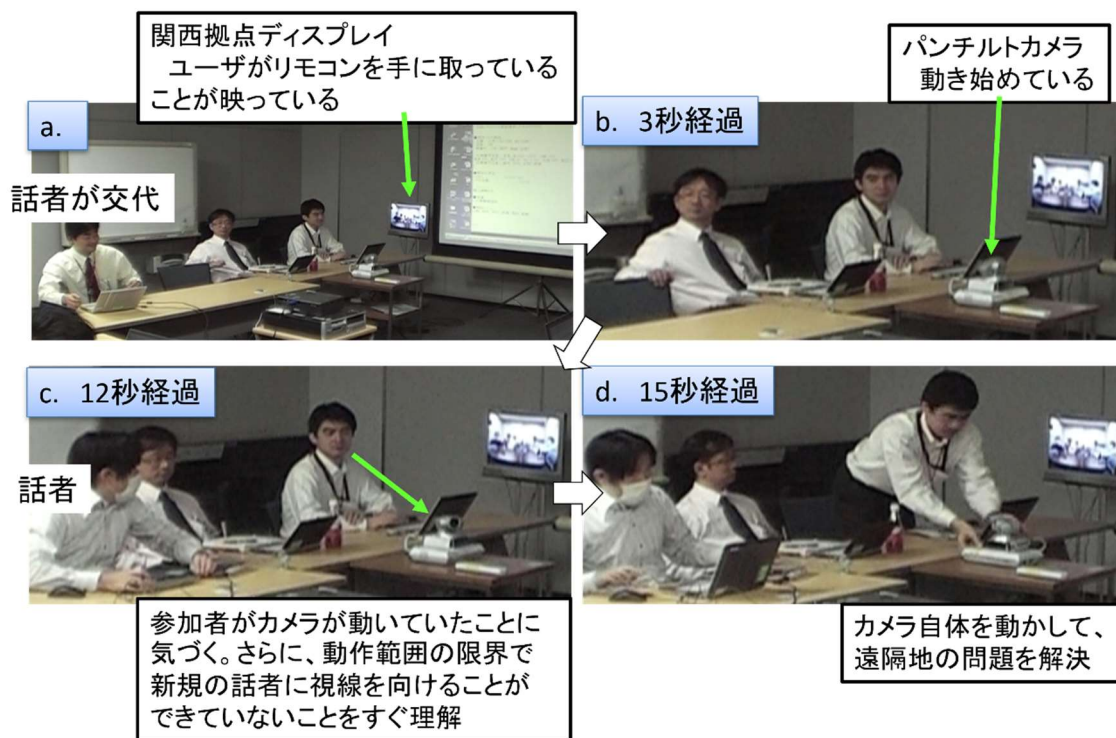


図 4 オフィスでの遠隔協働作業観察の事例

表 1 オフィス間遠隔会議の状況

接続方法	映像、音声を利用する遠隔会議システムを使用、映像の伝送には遠隔操作可能なパンチルトカメラ (SONY 社製 PCS-P1) を利用、パンチルトカメラの操作はリモコンで行われる。
参加人数	13 名 (関東拠点 : 11 名、関西拠点 : 2 名) (後に 16 名、5 名に増加)
会議時間	週 1 回 2 時間
司会	関東側に存在
内容	進捗状況、個人の活動に対する報告、質疑応答など

映像 a は、関東側で一人の話者（画面内には映っていない）が、プレゼンテーションを行うため座席を変更し、準備を行っている最中の光景である。映像 a 中の関西側ディスプレイの中には、関西側参加者が新規話者に興味を持ち、リモートコントローラに手を伸ばし、カメラ操作の準備を行っている光景が映っているが、関東側でディスプレイ映像中のこの動きに気づいている様子はない。リモコン取得後 3 秒経過時点（映像 b）から、カメラが動作を始めていることが映像に記録されているが、この時点では関東側ではこの動きに気づいていない。その後も関西側参加者は話者の方向にカメラを向けようと、カメラを断続的に動かしているが、関東側参加者はそれに気づかない。カメラが動作し始めてから約 12 秒程度経過してから（映像 c）、関東側の参加者 A が関西側の参加者がカメラを話者に向けようとしていること、カメラが動作範囲の限界に達しておりこれ以上話者の方向に向けることができないことに気づいた。参加者 A の視線の方向を映像 c 中に矢印で示した。最終的に参加者 A はカメラ配置を変更して関西側の問題を解決した（映像 d）。このように、関西側からの会議に参加しようとする意図が、関東側に気づかれず、適切に伝わらないと、関西側が会議に積極的に参加しようという意識を保てず、発言の量も減少することにつながるのである。この事例は筆者らの研究のきっかけとなる以下のような示唆を含んでいた。

- 関西側ディスプレイ映像内ではリモコンを持ち操作していることが表示されているが、映像だけではその動作は関東側の参加者に気づかれづらい。
- 遠隔地の参加者の興味関心の変化はカメラの操作を通じて、カメラの姿勢変更動作という形で現れる。
- 会議内において、パンチルトカメラの姿勢変更は「注意」を十分には喚起できていないようである。

本例ではカメラの動作開始から 12 秒経過してようやく気がつくといった状況であった。また、同様の問題が発生しながら、注意を喚起できず、数分間援助を得られなかったために、コミュニケーションが成立しなかった事例も複数存在した。ただし興味深いのは、カメラが動作していることに一旦気がつけば、状況、およびカメラの動作から遠隔操作者の意図を理解することは容易であったということである。この事例は、空間内で動作をする物体は注意喚起および、その後の gaze awareness を支援するが、現状のパンチルトカメラのように固定された場所で回転動作をするだけでは、注意喚起に対する効果は限定的であること、を

示唆している。

そこで筆者は、カメラのパンチルトに加えてカメラ装置本体を小型の台車に搭載してロボットとし、卓上で会議参加者の近くを移動させることによって、注意喚起に対する効果を高められるのではないかと考えた。筆者がロボットを利用する理由の 1 つは、会議参加者の注意をロボットに向けさせることができれば、観察で示されたようにカメラの向きなどから、遠隔参加者の注意方向に気づかせられること、すなわちロボットによる自然な gaze awareness の支援が期待できることである。

3.2 ロボットによる注意喚起能力評価実験

前節で説明した注意喚起能力を強化するための、遠隔会議支援ロボットの注意能力に関する基礎的な実験を行った。

3.2.1 仮説

前述の事例より、ロボットの動作は参加者の注意を喚起する効果がある。しかし、現状のパンチルトカメラ程度の姿勢変更では、その効果は十分とは言えない。筆者らは、参加者の視界内でロボットが前後に移動したり、左右に回転したりすることによって、注意喚起能力が強化されると推測した。そこで、ロボットが注意喚起に対して持つ効果に対して以下の仮説を立てた。

仮説 1 ロボットの移動機能によって、パンチルトカメラの参加者に対する注意喚起能力を強化することができる。

一方、会議中に参加者は、遠隔参加者に注意する以外に、資料を見たり話者の発話を聞いたりするなどの、会議参加に必要な作業を行わなければならない。しかし、ロボットの動作に注意を奪われることによって、そうした作業への影響があると推測される。そこで、次の仮説を追加した。

仮説 2 ロボットの移動は会議参加者の会議参加への妨げとなる。

3.2.2 遠隔会議支援ロボットシステム構成

筆者らが開発した遠隔会議を支援するロボットシステムは下記のような特徴

を持つ。

- ロボットを操作する人間は複数である。会議に参加する全員がロボットを操作可能とする。
- 利用するロボットが小型である。会議卓上での動作を意図した大きさとなっている。

これらの特徴は、開発背景となったオフィス間での遠隔会議支援を意識したものである。オフィス環境で行われる典型的な遠隔会議の例として、複数人同士が遠隔 2 拠点に存在する状況を仮定して説明する。遠隔参加者の失われる身体の機能を補完するという目的から考えると、会議参加者の人数と同数のロボットを配置することが自然である。しかし、

- 会議参加者数は多くの場合不定である。
- 居室の空間的な制限がある。
- ロボットを用意するコストに制限がある。

などの問題からロボットの配置数には制限があると考えられる。この制限から会議に参加する人数とロボットの台数が常には一致しないことになる。1 台のロボットに対して複数人が操作権をもち、ロボットは複数人の身体を切り替えて表現しなくてはならない。そのため、例えば舘らのテレサフォン[63]のようにロボットに操作者の顔を表示する立体型ディスプレイを備えて、ロボットを操作する個人に合わせて表示を変更する、あるいは三澤らの LiveMask[64]のように個人の顔形に合わせた 3D 形状のディスプレイを利用するなどして、顔などの身体的表現を個人ごとに変更可能にするか、またはある程度抽象的な共通する身体要素を表現できる必要がある。本研究では方針として最後の方針を選択した。開発するロボットは人間の身体を忠実に再現することより、「志向」を表現するのに重要度の高い動作を表現するための単純化された機構と、LED ディスプレイ等の表示機能によってロボットが現在誰の身体を表現しているのかを提示する機能を持つ。

3.2.3 システムの詳細説明

本システムは、遠隔会議を行う 2 拠点双方に存在し、各拠点の会議参加者に共有される。システムの動作イメージを図 5 に示す、システムは映像と音声を利用する通常の遠隔会議システムと併用され、「ロボット」、「操作インターフェー

ス」から構成される。ロボットは人間の頭部を模した形状のパンチルト動作するカメラと、それを搭載した台車から構成され、遠隔地における自身の分身として働く。将来的には全方向移動台車を利用する構成も考えられるが、まずは注意喚起に対する効果を検討することを目的としているため、現状は 2 輪による差動駆動台車を利用している。

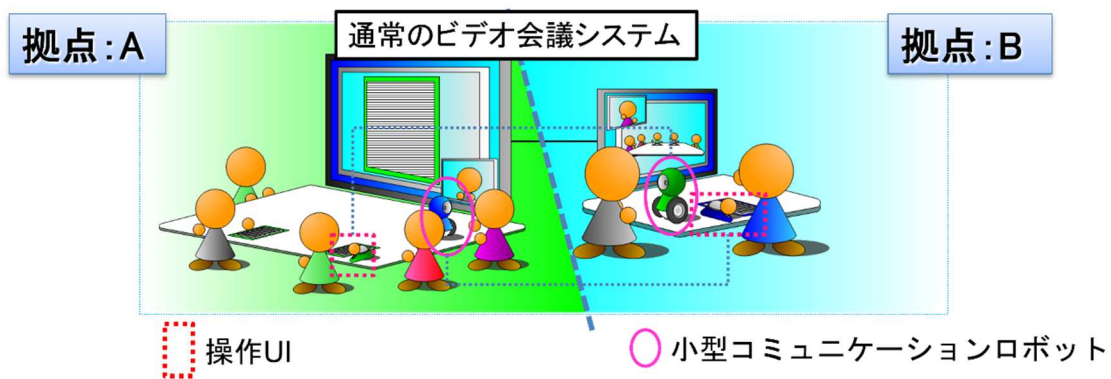


図 5 遠隔会議を支援する小型ロボットシステム

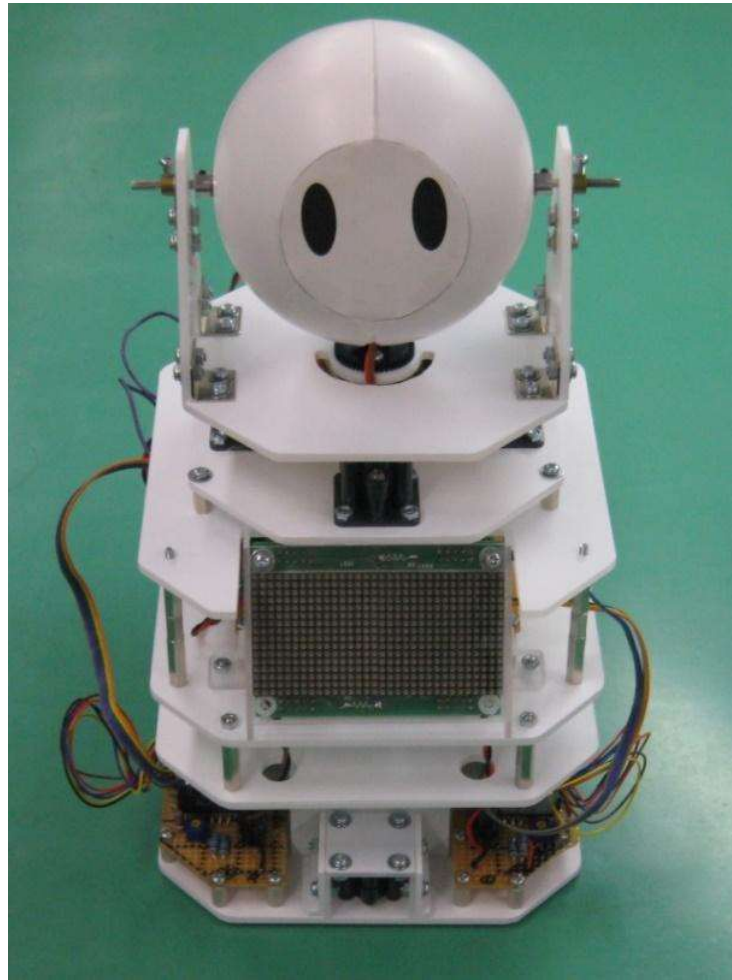


図 6 遠隔会議支援ロボットの外形

図 6 に開発したロボットの外形を示す。ユーザはロボットを使って遠隔地側の興味のあるものを「見る」ことができ、その「見る」ための行為がロボットの身体的動作として表現され、遠隔地側に伝わる。遠隔参加者の「見る」という行為と、それに伴うロボットの移動やロボットカメラの姿勢変更という行為によって、自然に存在感が提示され、また何に対して興味を持っているのかといった「志向」の表現を自然に行うことが期待される。ロボットの移動機能によって、カメラが固定されている場合と比較して撮影可能な範囲を拡大する効果も期待できる。カメラを空間内に複数配置しても同様に撮像範囲を拡大できるが、前節で説明したように、パンチルトカメラによる注意喚起能力は限定的であり、複数配置によってそれが解決できるかは不明である。また Gaver[60]らに指摘されているように、特に複数台のカメラによって撮影された映像を、離散的に切り替えて使用するような構成の場合、複数のカメラの空間内における配置関係が、ユー

ザにとって分かりづらくなるなどの問題を新たに生ずる可能性がある。本構成のように、空間内を連続的に移動するロボットを用いることでこの問題を回避できる可能性がある。

3.2.4 実験

3.2.1 節で説明した仮説を検証するための実験について説明する。実験参加者に遠隔会議参加状況を模した副課題を課した状況で、ロボットに移動、またはパンチルトカメラと同様の姿勢変更を行わせ、参加者がロボットの動作に気づいて反応するまでの時間を計測することによって、動作の種類と注意喚起能力の関係を明らかにする。ロボットが動作したことに気づき、ボタンを押して反応することが主課題となる。以下、ロボットの「移動」とは車輪による台車の前後移動・左右回転、「姿勢変更」とはカメラ部分のパンチルト回転を意味する。(図 7)。

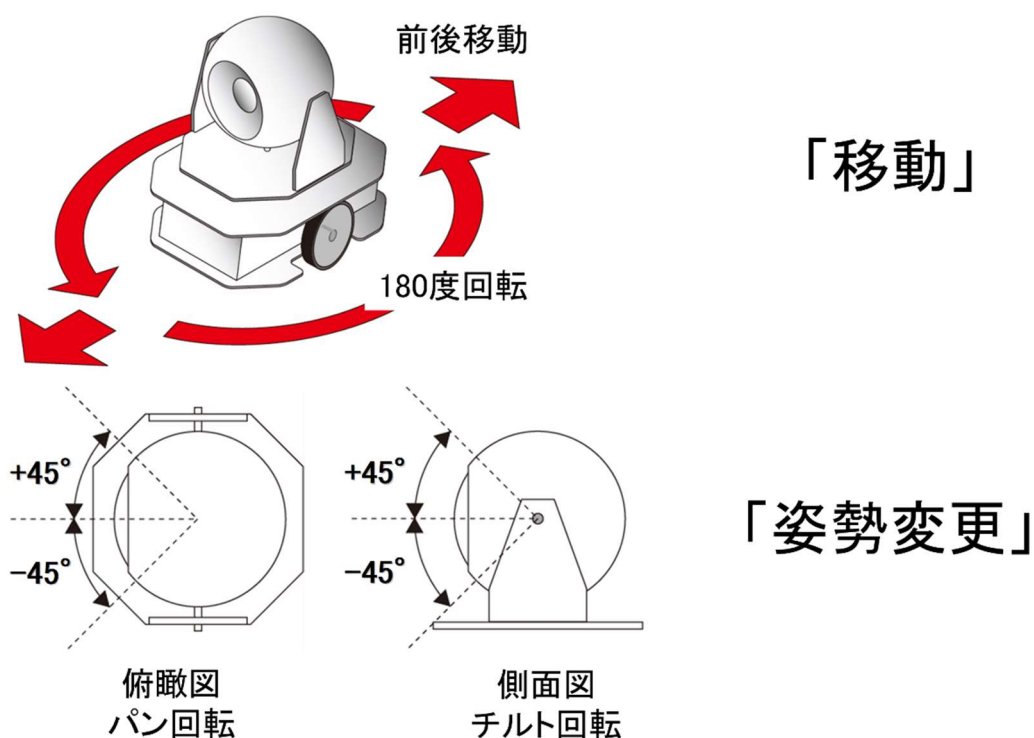


図 7 移動と姿勢変更の説明

音声課題

実験の副課題として音声課題を採用した。遠隔会議は聴覚、視覚を利用する複雑な作業であり、ロボットの動作に反応する作業は主として、視覚的な情報処理

であると見做せる。副課題として音声課題を加えることで、主課題と副課題で負荷が加わる情報経路を別にでき、また実際の会議に近い作業を模擬できると考えた。

定量評価に適した音声課題の設定には、西本[65]らによるインタフェース評価研究を参考にした。図 8 に概略を示す。参加者は一定時間ごとに提示される音声記憶して、その数秒後に提示されるビープ音による指示にあわせて復唱する。復唱の順序は提示順序と同一でなくてもかまわないとした。本実験では音声刺激として 1 秒間隔で 4 単語を提示、刺激の提示後に 2 秒間隔で 4 回のビープ音を提示した。参加者応答は実験者によって記録され、正答数の全セット平均値を点数とした。実験終了まで 5~7 セットの提示が行われた。練習時に単独課題として参加者に行わせた場合には、平均的に 4 点獲得できた。そのため得点減の度合いによって主課題による音声課題への影響を評価できる。

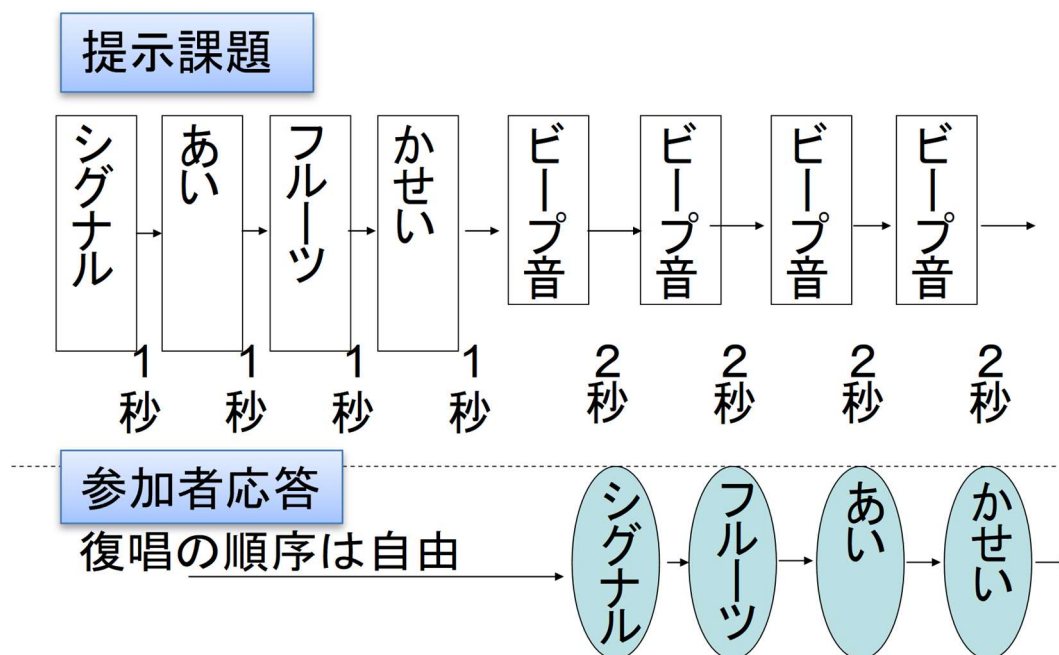


図 8 単語復唱課題の概略

単語復唱課題

単語復唱課題の語彙サイズは 270 単語とした。音声単語親密度（その単語が

どの程度なじみがあると感じられるかを 1:なじみがない ~7:なじみがあるまでの数値で表した指標) 5.0 以上の語[66]の中から、単語の頭文字が濁音を除く 50 音としてバランスよく出現するように 2~5 モーラの普通名詞をランダムに選択し、聞き取りにくいものなどを除いた。音声データは沖電気工業株式会社製テキスト音声変換ソフトウェア「OKI SMARTTALK 3.0」を使用して合成した。発話話者設定は「男性 1」とした。

ロボット反応課題

実験参加者が机上のノート PC に提示される注視点を見つめながら音声復唱課題を実施中、5~15 秒のランダム時間経過ごとにロボットが動作（「移動」または「姿勢変更」）する。参加者はロボットの動作に気づいたら、できるだけ早くボタン押しで反応する。

参加者との位置関係の影響を調べるためロボットの配置位置を複数定めた。注視点からの距離は 1200mm で一定、正面、正面から左右に 45 度と 90 度の角度の異なる 5 つの位置に配置し、ロボットが注視点の方向を向くようにした（図 9 参照）。距離は一般的な会議卓の両端（1800mm）に人がそれぞれ座った状況での、参加者身体の中心間の距離を基にして定めた。

予測による反応を避けるため、条件を満たす刺激に対しては反応し、それ以外には反応しないという「Go/No-Go タスク」を採用した。ロボットの各動作条件で複数種類の動作を行なわせ、視覚的判断を行わせる。「移動」（図 7 上）では前後移動と 180 度の回転を行わせた、前後移動の方向はロボットが配置される机の長手方向に制限した。「姿勢変更」（下）ではパン回転とチルト回転を行わせた。

実験環境を図 10、図 11 に示す。実験参加者は机の前に座り、カナル型イヤホン（Etymotic Reserch 社製 ER-6i）を装着し、その上からヘッドホン型の耳栓（PELTOR 社製 OPTIME2）を装着する。カナル型イヤホンと耳栓によってロボットの動作音、外部雑音を遮蔽する。イヤホンは机上のノート PC に接続され、ノート PC で動作するプログラムにより音声刺激が提示される。またノート PC のディスプレイ上には注視点が常時表示されている。

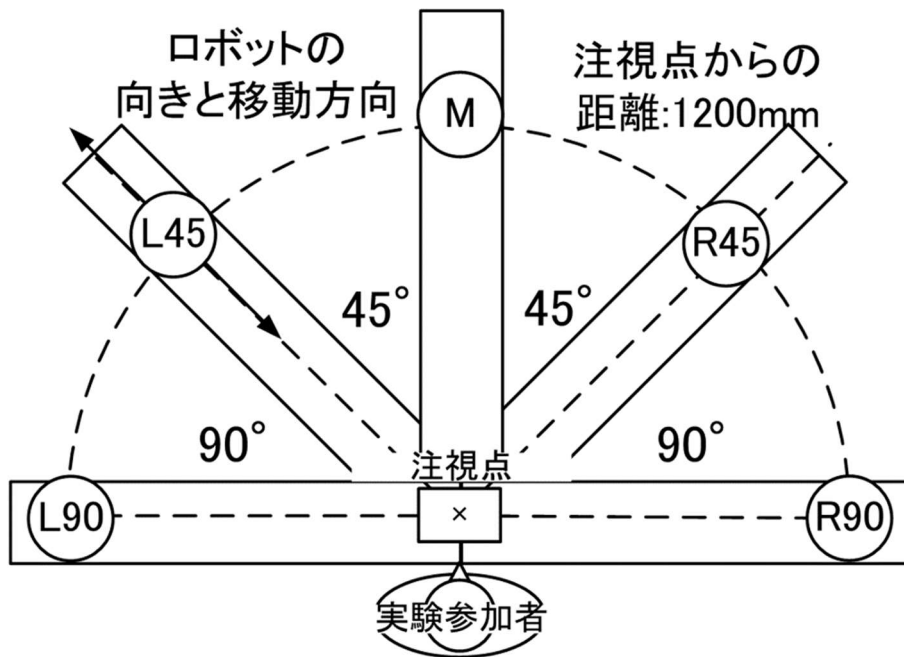


図 9 注意喚起実験配置条件

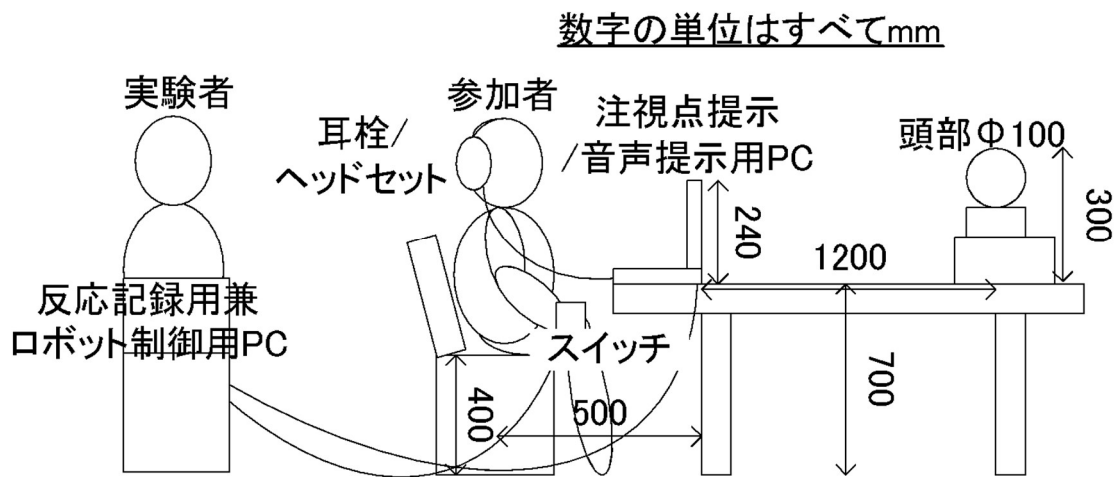


図 10 注意喚起実験環境模式図

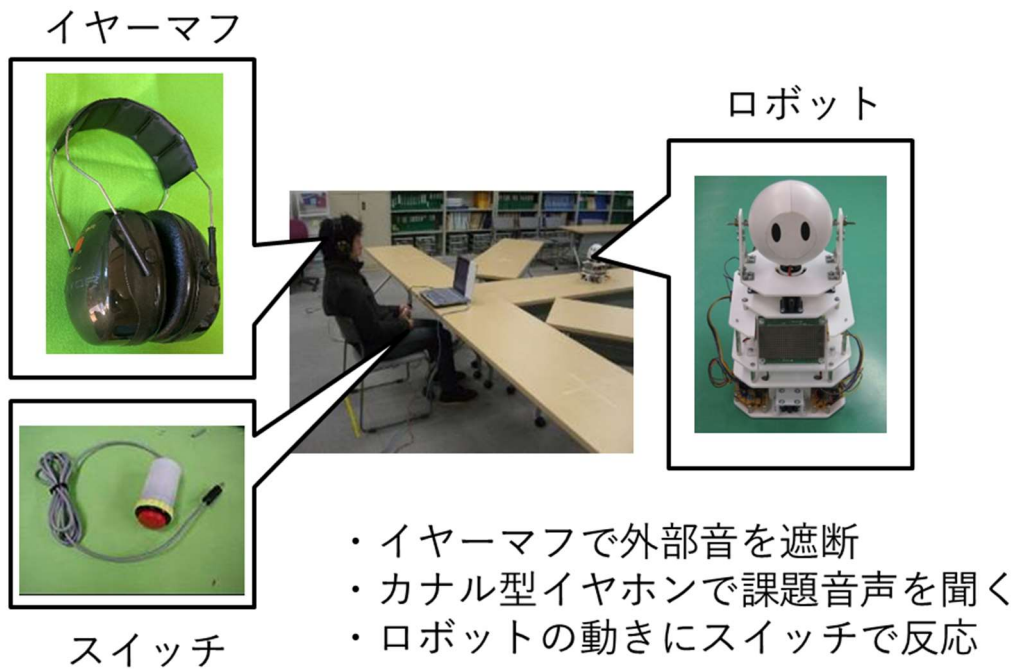


図 11 注意喚起実験環境外観

参加者はロボット動作に反応するためのボタンを手に持つ。持ち方は自由とした。ボタンは参加者の後方に配置された反応時間記録用 PC に接続される。反応時間記録用 PC は机上のロボットに対して無線信号を送信して、ロボットを動作させる役割も持つ。

前節で説明したロボットを実験に使用した。ロボットの仕様は、高さ約 300mm、頭部の直径約 100mm、体全体の前進速度が 66mm/秒、移動距離が前後 1 回毎に 200mm、体全体の回転速度が 60 度/秒、移動角度が 1 回毎に 180 度、頭部の回転速度が垂直方向に 30 度/秒、回転角度が 1 回毎に水平方向に 45 度、垂直方向に 45 度であった。頭部の回転量は観察時における、パンチルトカメラの一回の操作における一般的な動作量から定めた。

実験参加者と実験手順

実験は都内国立大学の教室で行った。男女 23 名が実験に参加した。平均年齢は 22 ± 4 歳、男性 15 名、女性 8 名であった。平均視力（自己申告式、矯正後）は 1.0 ± 0.4 であった。Chapman の利き手テスト[67]を実施した結果 20 名が右

利き、3名が左利きと判定された。

参加者は、実験室に入り利き手テストを行った後、実験全体について説明を受けた。続いて音声課題についての説明と、出力音声の調整、音声課題の練習を行い、ロボットの動作についての説明ビデオを見た後、実験に参加した。指示ではロボット反応課題を音声復唱課題より優先するよう指示した。図9の配置5条件、動作2条件（「移動」/「姿勢変更」）の組み合わせで計10条件の試行を行った。各条件の実施順序は参加者毎にランダムとした。5条件の試行終了後、1回5分間程度の休憩を取らせた。実験終了後に口頭による主観評価への回答とインタビューを行った。

分析した主観評価の質問は2種4問であり、

(A)「ロボットの動作への気づきやすさを5段階で評価してください」（評価値1：最も気がつきにくい～5：最も気がつきやすい）

Q1「首の動きへの気づきやすさはどうでしたか」

Q2「体全体の動きへの気づきやすさはどうでしたか」

(B)「ロボットの動作による音声課題への影響、集中力をそがれた程度を5段階で評価してください」（評価値1：最も影響がない～5：最も影響がある）

Q3「首の動きによる影響は」

Q4「体全体の動きによる影響は」

というものであった。

実験終了まで休憩を含めて1時間程度の時間を要した。

分析方法

ロボット反応課題の反応時間、反応エラー回数（5秒以内にGo刺激に反応できなかった、またはNo-Go刺激に反応した回数）、反応エラー率（反応エラー回数の刺激回数12回中の比率）、音声課題の正答数を用い統計解析を行った。動作条件と配置条件によって各データの平均値間に差があるかを見るため、それらを2要因とする二元配置反復測定分散分析を行なった。また同様に主観評価値も分析した。

3.2.5 実験結果

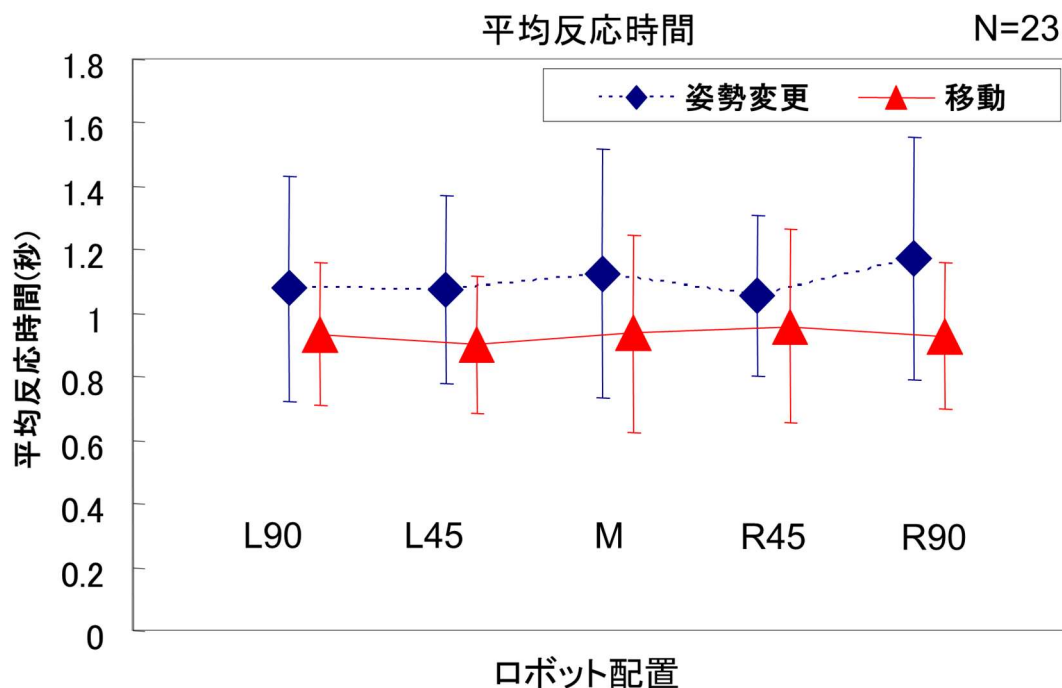


図 12 ロボット配置毎の平均反応時間

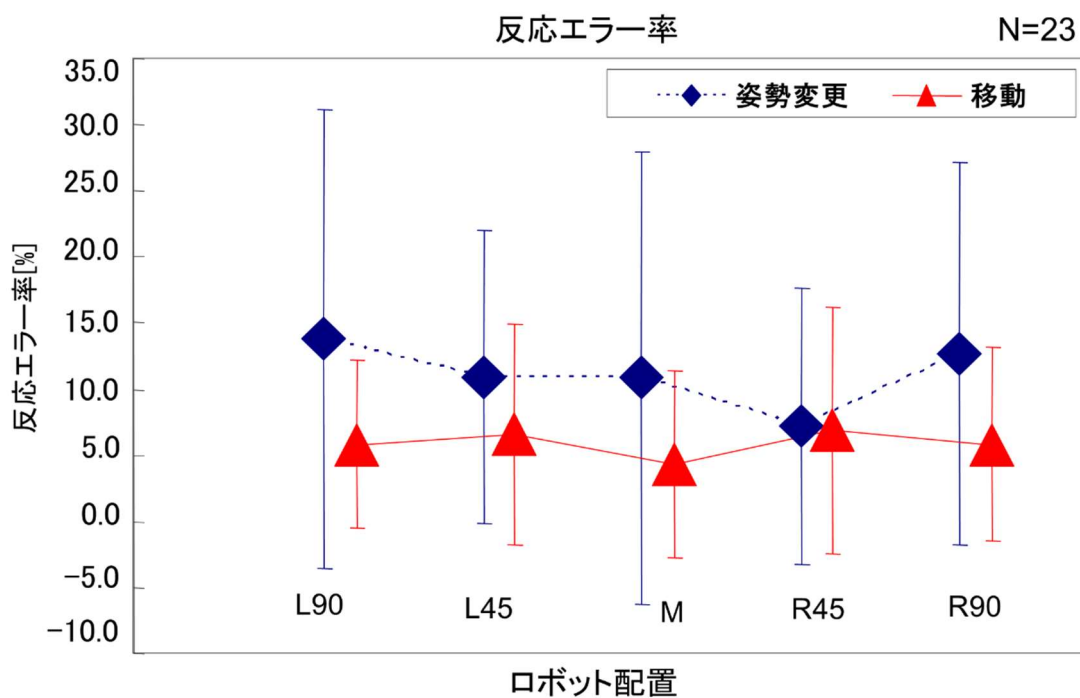


図 13 ロボット配置毎の平均反応エラー率

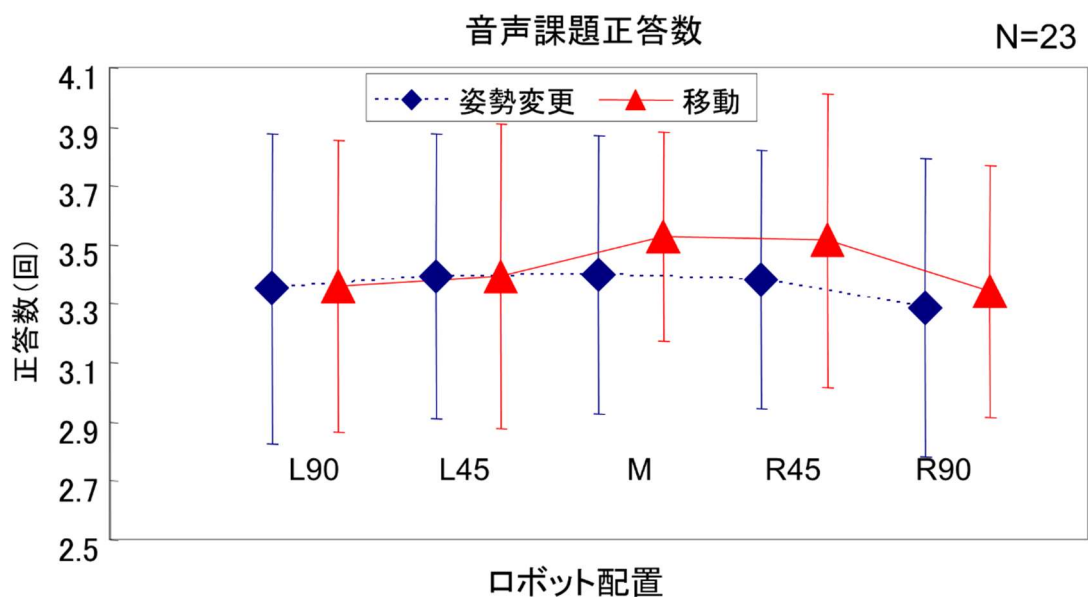


図 14 ロボット配置毎の音声課題正答数

図 12 に配置ごとの反応時間、図 13 に反応エラー率、図 14 に音声課題の得点の平均値のグラフを示す。横軸はロボットの配置を示し、縦軸は各値、エラーバーは標準偏差を示す。

反応時間の結果

平均反応時間は「移動」条件が 0.931 秒、「姿勢変更」条件が 1.100 秒であった。分散分析の結果、動作条件に対して 1%水準で有意な主効果が見られた（動作条件： $F(1,22) = 32.365, p < .01$ ）。一方、交互作用および配置条件主効果は有意ではなかった（交互作用： $F(4,88) = 0.573, p = 0.683$ 、配置条件： $F(4,88) = 0.445, p = 0.776$ ）。

反応エラーの結果

反応エラー率は「移動」条件が 5.9%（12 回の刺激中平均 0.704 回）、「姿勢変更」条件が 11.1%（同：1.330 回）であった。反応エラー率の平方根を、逆正弦関数で角変換して正規化した値について分散分析した。結果、動作条件に対し 5%で有意な主効果が見られ、交互作用及び配置条件主効果は有意ではなかった。（交互作用： $F(4,88) = 0.888, p = 0.475$ 、動作条件： $F(1,22) = 7.150, p = 0.014$ 、

配置条件 : $F(4,88) = 0.854, p = 0.495$)。反応回数に関しても同様の結果を得た。

音声課題の結果

音声課題の得点の平均値は「移動」条件が 3.427、「姿勢変更」条件が 3.352 であり、両条件データについて平均反応時間を対応のある t 検定で評価した結果、5%水準で有意差が見られた ($t(114) = 2.051, p = 0.043$)。

主観評価の結果

主観評価の結果を図 15 に示す。「Q1」「Q2」の回答平均値について対応のある t 検定を行った結果、1%水準で有意差が見られた ($t(22) = 9.033, p < .01$)。しかし「Q3」「Q4」間に有意差は認められなかった ($t(22) = 1.331, p = 0.197$)。

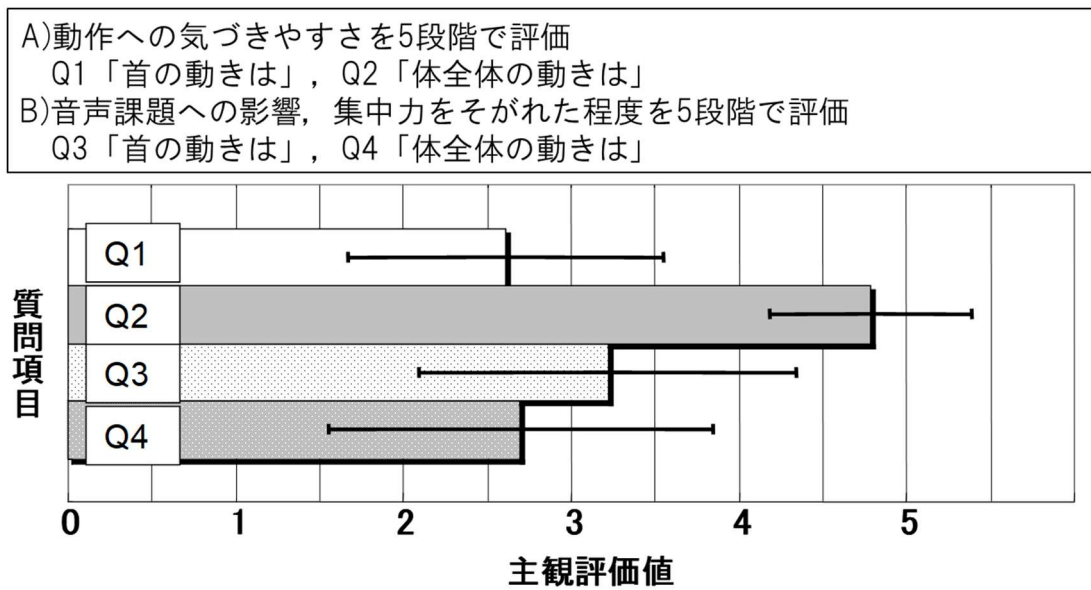


図 15 注意喚起実験主観評価値グラフ

反応データの相関

反応時間と反応エラー回数について両者間の積率相関係数を求めたところ、 $r = 0.614$ となり、両者間に有意な正の相関関係 ($p < .001$) が認められた。

3.2.6 注意喚起能力評価実験の考察

実験結果から、すべてのデータについて「移動」と「姿勢変更」間で平均値に有意な差があることが示された。反応課題の結果、反応時間、反応エラー回数が「移動」で有意に低く、互いに正の相関があることからロボットの「移動」機能は「姿勢変更」機能と比較して注意を早く喚起でき、また動作種類の区別が容易である事が示唆された。すなわち、仮説 1 を支持する結果が得られた。また有意な交互作用および配置要因主効果が見られなかったことから、この効果はロボットと人との位置関係に影響を受けづらい可能性がある。

主観評価の結果では音声課題への影響評価には差が出なかったが、音声課題の点数では「移動」と「姿勢変更」で有意差があった。これは「移動」機能は「姿勢変更」機能と比較して、参加者への注意喚起を行う際の情報処理負荷が低いこと、つまり実験構成では音声課題として模擬した、会議実施時の別作業に対する障害の程度が低いことを示唆し、仮説 2 を否定する結果となった。同様に参加者へのインタビュー結果では、「姿勢変更」の条件ではロボットが動作しているかどうか分かりづらい、反応するべき動作か区別しづらくて気になり、音声課題への集中がそがれた、などの意見があり、ロボットの「姿勢変更」の気づきにくさが、音声課題中の記憶や、復唱などの作業への悪影響を及ぼした可能性が考えられる。つまり、想定している遠隔会議のように、ロボットの動作に注意する必要があり、また同時に他の作業を行なう必要がある場合には、ロボットの注意喚起能力が不足していると、他作業への悪影響がある可能性がある。

「姿勢変更」ではロボットに注意する人に対しての、ロボットの動作による視覚的变化の大きさが、人とロボット（カメラ）の配置関係によってほぼ決まり、また動作の範囲からその変化に制限がある。しかし、「移動」では移動範囲や方向を変えることで、人の視野内の視覚的变化量を、「姿勢変更」にあるような制限なしに大きくすることができる。「視覚的に参加者の注意を喚起する能力」に限定すれば、この点をロボットの車輪による「移動」機能の利点であるといえることができるだろう。

今回の実験結果は、実験環境において以下の「移動」機能の注意喚起に関する有効性を示唆するものである。

- 「移動」によって「姿勢変更」より早く注意喚起できる。
- 「移動」による注意喚起による、音声課題への悪影響は「姿勢変更」と比較して少ない。

しかし、実際の会議においての有効性を示すには更なる検討が必要になる。例えば、

- 複数台のロボットを利用する場合
- 「注意喚起」と同時に行う課題として視覚的課題が与えられた場合
- 実際の会議で利用した場合

などについても、同様の効果が得られるかについては、今後評価実験で確認する必要がある。また今回「姿勢変更」、すなわちパンチルト機能の注意喚起の有効性は、「移動」機能に及ばないという結果を得たが、デザイン等の工夫で、「移動」機能同様に視覚的变化を大きくできれば、パンチルト機能も「移動」機能と同等の注意喚起効果を得ることができる可能性も残されている。

遠隔参加者が興味を持っている対象物や、興味の変化を、空間内に物理的に存在する要素、すなわちロボットの動作に反映させて注意を喚起するという方法には一定の有効性がありそうだが、現状では課題も多い。特に、注意を喚起する側の利用者の支援が重要となる。遠隔協働作業を具体的に進めるためには、注意喚起の後に、他の空間的動作によって、情報を伝達する必要があるが、利用者が適切なタイミングで適切な表現を行なわないと、伝達意図を遠隔に伝えられず、作業を円滑に進めることが難しいからである。具体的な支援の方法については、本章の後半で議論する。

3.2.7 注意喚起能力評価実験のまとめ

3.1 節でオフィス内での観察に基づき、注意喚起能力が遠隔協働作業に対して重要であること、遠隔操作可能なカメラの動きで参加者の注意を喚起できることもあるが、カメラの動きだけでは注意喚起能力が十分でないことを確認した。この観察結果を受け、カメラによる注意喚起能力を向上させるため、カメラをロボット化し車輪による移動機能を持たせる構成を提案した。さらに、3.2 節の実験室実験によって、ロボット化されたカメラの姿勢変更機能と移動機能を比較することで、移動機能が遠隔協働作業、中でも遠隔会議実施時に向けた、注意喚起能力を有する空間的動作であることを確認することができた。

3.3 空間的動作の半自動化

前節までの実験結果から、車輪付きの小型ロボットに全身移動をさせることで、参加者の注意を喚起する効果が高まることについて確認できた。注意喚起は

2.3 節の空間的動作の分類中では、情報伝達動作「調整子」の機能に相当する効果である。遠隔会議支援システムに追加するロボットの動作によって、遠隔協働作業に必要な空間的動作（調整子に相当）を表現可能であることを確認した。

しかし、ユーザが現在の遠隔会議システムの構成のまま、空間的動作による効果を遠隔会議中に適切に利用することは難しいことが考えられる。特に、情報の伝達者側に対する支援が重要となる。例えば、会議中に、発言等の意図をもって参加者の注意を喚起したい場合と、そのような要望無しにただカメラによって提供される視野領域を変更したい場合で、動作を使い分けることは困難であることが考えられるからである。より詳細に述べると、ロボットによって複数の動作（本章の内容では車輪による移動と、カメラによる姿勢変更）が実現可能な場合に、ユーザが行いたいことを表現する効果がある、適切な空間的動作を選択することがまず課題になる。すなわち、選択には、ユーザ自身が伝達したい空間的動作の内容、たとえば参加者の注意を喚起したいなどを理解したうえで、さらにロボットの可能な動作のうち、移動と姿勢変更による前述の内容の伝達効果の差を熟知する必要がある、このような知識をユーザに期待し、この作業をユーザに行わせることは難しいからである。同様に、注意喚起ができた後に適切なタイミングで適切な空間的動作の表現を行う必要がある場合があるが、システムの支援なしにこれを行うことは困難であることが考えられる。

また、ロボットを操作する人間（以降、情報の送り手という意味で送信者とする）が適切な動作を理解していた場合でも、通常のリモコン等の操作は難しく、それを実現するのは困難である場合がある。別の空間的動作（調整子）の例となるが、送信者の同意を、人間が行うような「うなずき」という形で表現するために、ロボットカメラを複数回チルト動作させることを考える。現状のロボットカメラを動作させるリモコンはこのような表現を行うことを想定した設計になっていないため、送信者がカメラのチルト角度変化量や、速度、時間などを詳細なボタン操作によって、適切に手動で変更する必要があり、操作に習熟が必要となる（課題 1）。さらに、動作が実現された場合にも、動作の受け手（同様に受信者とする）がそれを理解できない場合も発生する。引き続きうなずきの例で説明すると、送信者が適切に操作を行ったとしても、受信者がロボットカメラのチルト回転を送信者のうなずき、つまり同意を表現したものであるとは理解できない場合もあり得るのである。非言語コミュニケーションに限らず、コミュニケーションは相互的なものであり、ロボットの動作が送信者の意図通りのものであっても、受信者にとって理解しづらいこともあるのである（課題 2）。

このように、1章で課題とした、空間的動作の遠隔操作が困難である点（課題1）、空間的動作の伝達が困難な点（課題2）が、具体的な遠隔会議の場でも課題となることが確認できた。

本研究では「半自動化」を提案することでこの問題の解決を試みる。システムからの支援によって、ユーザが状況やタイミングに応じて適切な空間的動作を選択、利用しやすくするものである。これらの効果により、操作や伝達に関する負担を減らすことができれば、遠隔協働作業により注力できる可能性もあり、すなわち、課題3の解決も可能となりうるのである。

3.3.1 空間的動作の半自動化の設計指針

本節では、本研究で提案する空間的動作の半自動化を実現するシステムの設計指針を述べる。提案する半自動化は、一般的なGUIインタフェース設計で採用される指針と、複雑な構造をもち、操作が困難な要素を遠隔から動作させるシステムを提案している複数の先行研究から示唆を得たものであり、遠隔協働作業で利用される対象物を利用者に選択させて、間接的にユーザの作業状況をシステムが把握して、空間的動作の利用に必要な支援を行い、前述の課題の解決を図るものである。

まず、一般的なGUIシステム等のインタフェース設計で使われる指針[68]から、下記を採用する。

1. ユーザに不要な動作を行わせない。
2. ユーザが行う必要がある動作を容易に実現できるようにするため、適切な入力への制限、操作出力の変更を加える。
3. 制限や操作後の空間的動作の変更を可視化してユーザに提示する。

本研究で提案するシステムはこれらの指針に基づき、ユーザがどのような状態か、次に何を行おうとしているのかを把握して支援する。前節で論じたように動作の複雑さが重要な課題の一つであるため、システムから適切な制限や変更を加えること、必要な柔軟性を残しつつ不要な操作を行えないようにすることで、ユーザの誤操作や心理的な負担[69]^dを減らせると考えている。

第2章で参照したFisherらによる遠隔ロボットシステムは[13][14]は、ロボットを基本的に自律的、自動で動作させ、ユーザが必要な場合に限って手動で介

^d 負荷は作業員に対して外から作用する要因、負担は結果として作業員の内部で起きる現象とする。

入をするというものであった。本研究の提案はこの研究から、自動動作と手動操作を使い分ける必要性について示唆を得たが、人間がどのように介入すべきか、すなわち自動から手動に切り替える状況や手段等については論文内に詳細な議論がなく、また、本研究の提案では基本となる動作が手動操作であるという点で異なっている。

システムによる自動的な動作支援を行う際に課題となるのは、「ユーザがどのような状態にあるか」をシステムが如何に把握するかということである。ここで、本研究で扱う遠隔協働作業の特徴は、空間内に存在する「もの」（作業対象や、コミュニケーションの参加者を含む）を参照する表現を扱うことであった。Krautら[70]は協働で物理作業を行う実験の分析から、作業対象すなわち「もの」に関する指示的動作と、「もの」を参照するジェスチャが伝達できるとき、音声コミュニケーションが最も効果的になると報告している。遠隔地への指示の場合にも同様に、どの「もの」に対する指示を行いたいかを指示者が意識することは自然であり、またその「もの」の空間内の配置から、動作・作業範囲の制限や変更（後述）を適切に行えると考えられる。

ユーザの入力で対象を指定し、システムで扱う要素の動作の自動動作、手動操作を変更することで複雑なシステムの操作を容易にするという、本研究と類似した課題を扱った先行研究に、30自由度をもつヒューマノイドを2本のジョイスティックで制御できるようにした研究[71]がある。具体的には、注意を払うべきヒューマノイドロボットの関節をユーザが選択し、選択した関節以外の関節の動作する範囲を制限することによって、ユーザが他の関節の動作を考慮する必要が少なくなるようにしている。換言すれば、システムによる制限を解除する関節を選択して、その関節だけをユーザに操作させることで、操作の単純化を図っている。ユーザに対象を指定させ、対象（ここではロボットの関節）の動作を半自動的に制限することで操作の支援を行うという処理の流れが、本研究の提案がこの先行研究から示唆を得た部分である。しかし、先行研究[71]のシステムの利用にはユーザがロボットの関節構造や動きに関する特徴等を熟知している必要があり、またロボットに行わせるべき動作の操作自体はユーザが手動で行う必要がある。一方で、本研究で扱うような産業上で利用される遠隔協働作業ではシステムを利用するユーザの経験や背景知識も多様であることから、利用者がすべて遠隔協働作業支援システム内要素を熟知していることを前提としてシステムを設計するのは適切とは言えない。本研究では、注意を向けるべき対象物が、操作する対象（ロボット）そのものではなく、遠隔協働作業を進めるうえで

参照すべき対象物^eであり、利用者が操作する対象を熟知している必要がない点、遠隔協働作業の中で、ユーザが特別な負担なく意識できる、参照すべき対象物を指定するだけでシステムからの支援を活用できる点、加えられる制限が動作範囲だけではない点、また、制限以外の支援を行うことができる点が異なっている。

具体的な「もの」をユーザが指定することで、ユーザの意図、状況をシステムに伝え、システムが「半自動」的に不要な選択肢を削除、可能な指示内容と、その範囲、方向などに制限を加えること、または表現される情報を変更することを本研究が提案する処理の方針とし、本研究ではこのような処理の流れを「半自動」と呼ぶ。

半自動化の一例として、システムで利用できる空間的動作、指示方法が多数ある場合に、複数ある対象の中から、不要な指示方法が選択肢から除外されて表示されるイメージを図 16 に示した。ユーザがまず対象物を選択することで、対象に関係する空間的動作の選択肢のみに、内容が制限される。

図 17 に本研究で提案する半自動化システムを採用した遠隔作業支援システムについて示す。図 17 上部は工場内で複数の人が作業を行っている現場に遠隔地から操作可能なロボットを配置し、リモートから指示者 A が作業指示を行うという利用イメージである。本章の実験で検討したように、情報伝達を行う前にまず注意喚起を行う必要があるため、注意を喚起すべき候補となる対象者 B、B'から B を選択して B に対してロボットを動作させて注意を喚起する (3.3 で後述)。

下部は同様に工場内で設備保全の作業中である現場の作業者 D に対し、ウェアラブルデバイスで遠隔作業支援可能なシステムを用い、リモートから指示者 C が作業指示を行うという利用イメージである。設備に設置された複数のバルブから作業対象を C が選択し、選択された対象が C と D 間で共有され、CG で表現された、バルブに対する作業指示に適切な空間的動作が C から D に送信される (第 5 章で詳述)。

^e 遠隔協働作業を進める上で、ロボットに興味を向けることが重要である場合には、ロボットを参照すべき対象物の一つに含めることは当然可能である。

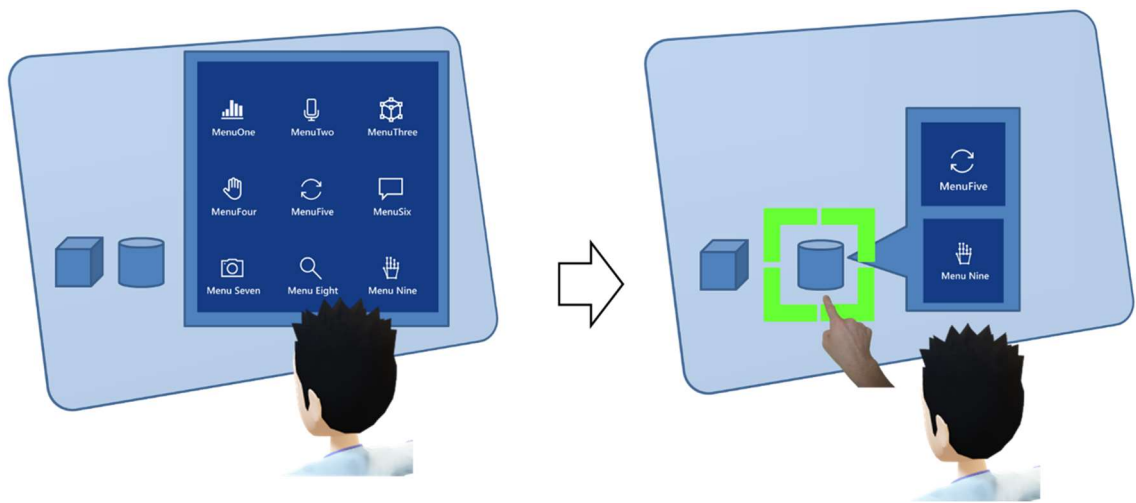


図 16 半自動による選択肢の制限

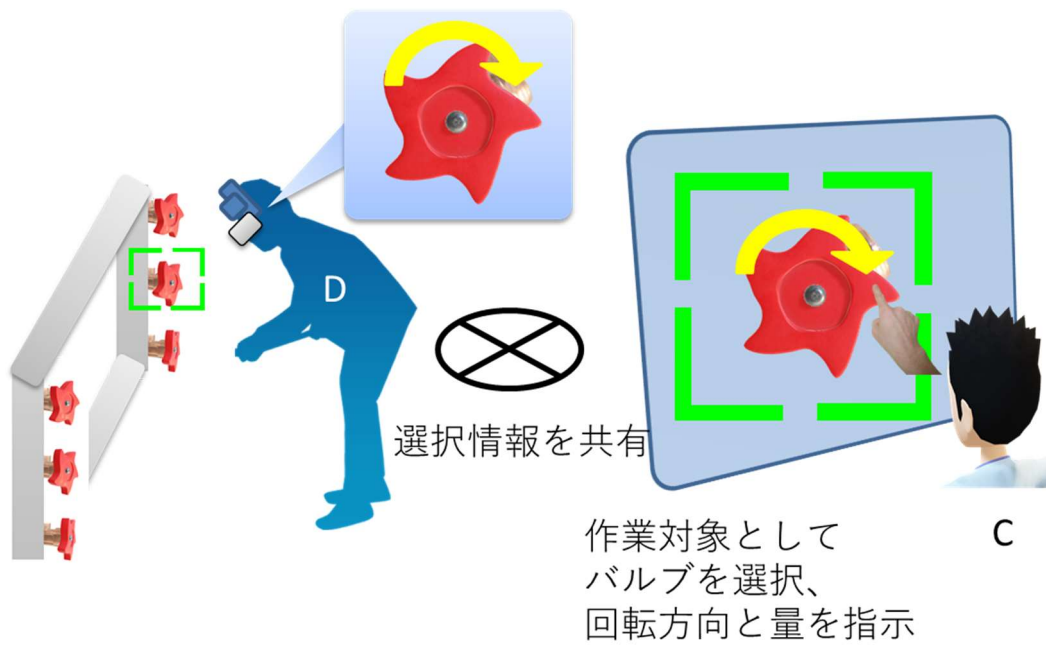
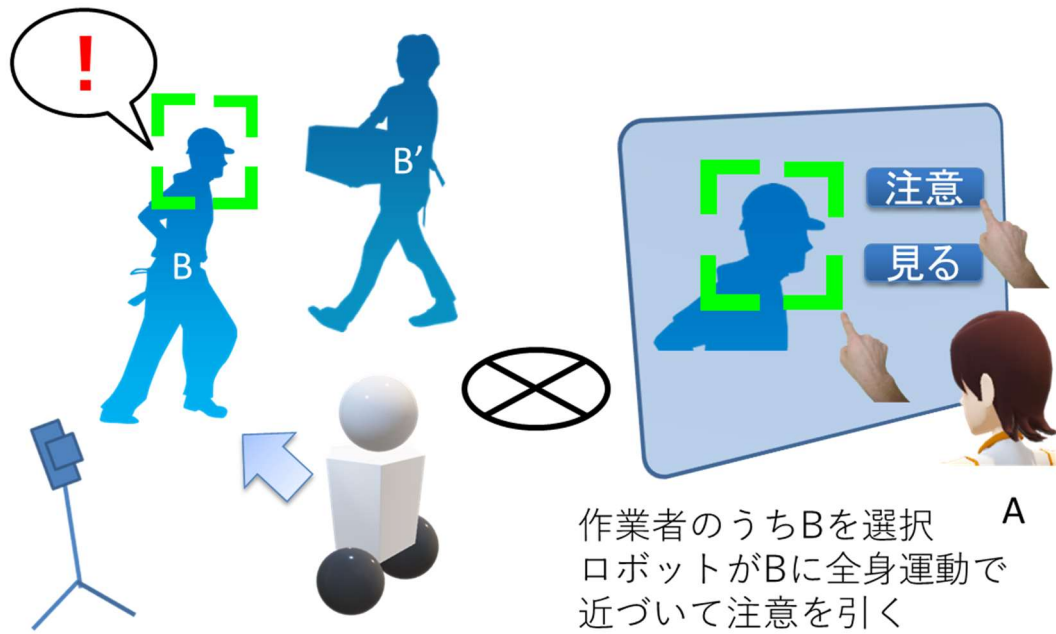


図 17 空間的動作の半自動化を採用した遠隔作業支援の例

3.3.2 半自動システムの全手動、全自動システムとの比較

次に、提案する半自動システムの特徴を明確にするために全自動システム、および全手動システムとの比較によって論ずる。図 18 に一般的な全自動システムと全手動システムと半自動システムの関係を示した。左右の両端に全手動および全自動システムがあり、中間に半自動システムが存在する。手動的要素、自動的要素は段階的に変化し、程度によって全手動システム、全自動システムとなる。



図 18 全手動、全自動、半自動システムの関係

遠隔協働作業支援における全手動システムとはカメラ、ロボット、CG など空間的動作を行う要素を利用者が全て選択、操作するシステムである。つまり、現状の遠隔会議用のカメラシステムと同様に、GUI やリモコンなどの UI を用いて選択、操作する。情報表現動作の場合、まず、空間的動作を表現する手段を「選択」する必要があり、またその具体的な表現も操作入力する必要がある。たとえば、遠隔会議で参加者が身を乗り出す姿勢は、空間的動作の分類で調整子 (regulator) に相当する興味の表現や、注意を喚起する効果を持つが、全手動の場合ユーザが意識的にそれを入力して実現する必要がある。利用者は空間共有時には無意識に伝達される内容を意識して操作を行う必要がある、注意喚起の例では、ロボット全身を動かす、カメラだけ動かす等の使い分けをそれぞれの受信者に伝える効果をユーザが理解、あらかじめ意識して、選択する必要がある。CG による支援でも同様に多数の選択肢の中から空間的動作を選択する必要がある、指示方法などを随時選び、要素を適切に「操作」する必要がある。ロボ

ット、カメラ、CGをどう動かすか、要素を操作する際に精緻なコントロールが必要なこともある。コミュニケーションにおいては、タイミングが重要となり、空間的動作が複雑な操作や選択を要する場合、こうしたタイミングを逸してしまい、円滑なコミュニケーションを妨げる可能性もある。

同様に、情報収集動作の場合、操作するロボットの要素を選択する必要が発生する。例えば車輪付きロボットカメラの場合、カメラを動かすか、またはロボット全体を動かすかを選択する。要素の操作には精緻なコントロール UI 操作が必要なこともあるため、一般にユーザにとっての負担は大きくなる。全「手動」システムの課題をまとめると以下のようなになる。

- 利用者が空間共有時には意識する必要のない処理（思考、操作）をする必要がある
- 空間的動作によって伝達される情報伝達効果を熟知、予想して手段を選択する必要がある
- 効果が期待できる適切な操作、精緻な操作を行う必要がある場合もある

一方、遠隔協働作業における全自動システムとはカメラ、ロボット、CGなど空間的動作を行う要素をシステム側が全て制御するシステムである。実現のためには、画像含むセンサとAIによるコミュニケーションの参加者間の状況把握、参加者の内面も含んだ意図推定と、それに基づく適切な要素の動作制御がシステムの動作に必要となる。つまり、システムは遠隔地の人の意図を理解して空間的動作を制御する必要がある。情報伝達動作を遠隔会議の利用例の中で考えると、遠隔地の人の「興味」を理解して人間の操作なしに別拠点のカメラ・ロボットを操作することに相当する。例えば、遠隔地の人が身を乗り出すなどの自然に行う動きを検知して、参加者の注意を引くべきと判断し、ロボット全体を動作させるという処理を行う。具体的な人の体の動きがない場合、人間の意図を視線や表情など何らかの手段で検出する必要がある。また、遠隔作業指示を行う場合にも、作業指示を行う際に、作業状況を理解して、作業指示に必要なCG等を選択して利用者に提示する必要がある。この際、作業状況の理解をどう行うかが課題になるが、作業対象の映像等の認識によって将来的には実現できる可能性があり、現時点で実際に利用可能な認識水準に達しているものはないため、本研究ではより実現可能性が高いと考えられる半自動化のアプローチを試みる。

情報収集動作の場合、遠隔協働作業の状況をシステムが把握する必要がある。例えば、会議の状況では誰に注目すべきか（話者、作業員）を理解してカメラ（ロボット）をそちらに向ける等の処理がある。作業対象に対して同様の処理を行う場合、作業員の視線を解析するなどして状況を認識し、それにふさわしい空間的動作を自動的に提示するなどの実現方法が考えられる。

全自動化には共通して高度な状況認識手段が必要であり、また認識後に適切な空間的動作を制御するという、他の課題も残っている。認識された状況と、状況にふさわしい空間的動作の対応付けや制御は現時点では人手で行う必要があり、これも自動化の準備として必要となる。全「自動」システムの課題をまとめると以下のようなになる。

- 現時点では技術的に実現が難しい内容が残っている
- 利用者の意図推定、状況推定が困難である
- 推定後の空間的動作制御も、まずは人手で事前設定が必要となる

3.3.3 遠隔会議支援ロボットシステムの半自動化例

本章で扱ったロボットシステムによる注意喚起動作に関して、半自動化による支援を行う例について説明する。

図 19 に遠隔会議支援ロボットシステムの操作に、半自動の概念を導入したインタフェースのイメージを示した。実験結果を踏まえ、遠隔協働作業や遠隔会議支援システムに実験で利用したものと同様の機能を持つロボットを導入することを考える。この場合、ロボットがその上を移動するテーブル、テーブル上の資料や、テーブル脇に座っている参加者を対象物として捉えることができる。「半自動化」の指針に従い、システムを設計すると、参加者が UI を使って、画面内の対象物を選択し、システムが「半自動」的にロボットの動作を変更することになる。例えば、ユーザが画面内に映っている会議参加者の一人を興味の対象として選択した後、選択肢として提示される「注意を引く」を動作として選択すると、ロボットが身体全体を動かすことによって参加者の注意を引く動作を行う。また逆に、「見る」を選択して、ロボットの頭部だけを動かして、遠隔参加者の注意を引かずに、遠隔参加者がカメラ視野角を変更することもできる。これらの動作を、ユーザはロボットの機構や操作に対する意識なしに実現可能となり、システムの利便性が高まると考えられる。

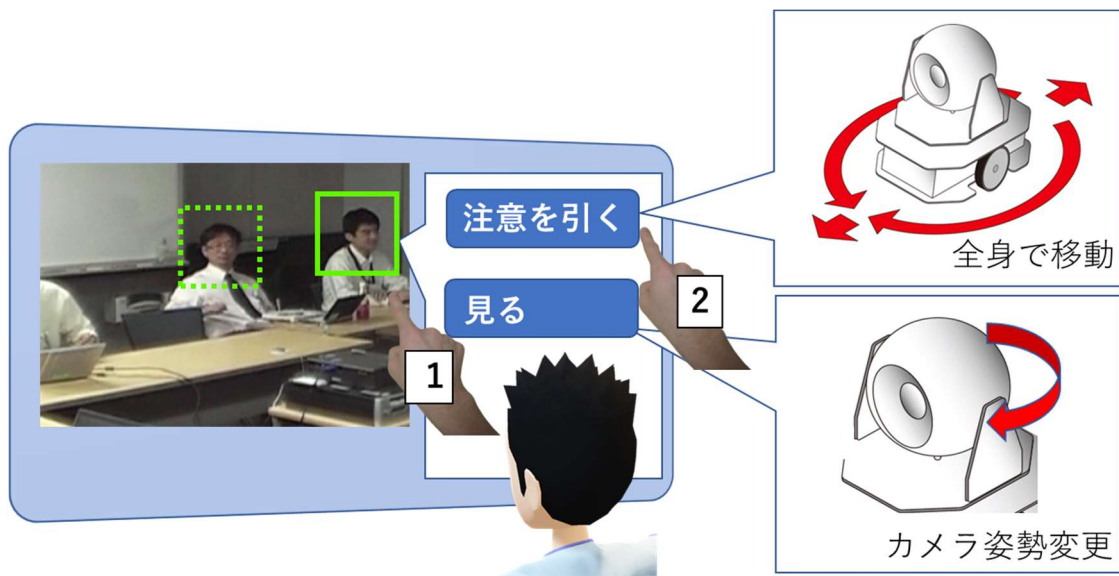


図 19 提案する半自動システムによる注意喚起インタフェース

3.4 考察

本章では、空間的動作で遠隔協働作業を支援する具体的な例として、小型ロボットによる遠隔会議参加者の注意喚起効果を実験で確認した。注意喚起に着目したのは、それがその後の遠隔協働作業の端緒となる基本的な機能であるためである。利用者が多様な空間的動作で伝達を行っても、参加者がそれに気が付かなければ情報伝達は行われず、遠隔協働作業を支援する効果を得ることはできない。

実際にオフィスで行われている遠隔会議の状況を観察した結果から、パンチルトカメラの利用で注意を喚起することはできるが、その注意喚起能力は限定的であることが分かったため、ロボットに車輪による移動機構を追加することでより適切に注意喚起するための動作を実現できるという着想を得た。

実際にパンチルト機構と、車輪機構を有する小型ロボットを動作させて、ロボットの動作に気が付くまでの時間を計測する評価実験を行った結果、小型ロボットで表現可能な動作によって、注意喚起能力が異なること、具体的には全身による移動が、パンチルトの姿勢変更と比較して、遠隔協働作業における注意喚起動作（空間的動作の分類で、情報伝達動作、調整子に相当する）として適切であるということが分かった。ここで適切とは、ロボットの動作に気が付くまでの反応時間が早く、また遠隔会議状況を模擬するために被験者に同時に行わせた副課題である音声課題に対する影響が少ないという意味である。この結果は移動

機能付きの小型ロボットを導入することで、注意喚起能力を高め、遠隔協働作業を改善できる可能性を示すものである。

しかし、実際のシステム実装を考えると、単純にロボットに移動機能を追加するだけでは効果を得ることは難しく、システムによる利用者の支援が必須であるということが分かった。効果が得られないと判断したのは、ユーザに対する負担が大きすぎると考えられるためである。

まず、空間的動作の操作に関する負担が問題になる。空間的動作を実現する操作をユーザが手動で行わなければならない。現在のシステムの操作 UI であるリモコンを利用する場合、注意を引きたい場合には全身動作、単に視界すなわち撮像範囲を変更したい場合にはカメラを動かす、それぞれの動作をユーザが随時リモコンで実現しなければならない、これは情報の送信者側にとって操作に習熟を要するものとなりうる。

次の負担は表現の内容、伝達に関わるものである。ロボットの動作が送信者の意図通りのものであったとしても、受信者に正しく伝わらない可能性がある。注意喚起は比較的単純であり、また実験結果から気づきやすさに対する個人差はなかったが、うなずきなどの他の調整子、また他の空間的動作が伝達可能か、つまり受け手にとって理解しやすいものになるかについては、同様に支援が必要である。

また、空間的動作が複数種類利用可能なシステムを考えると、利用の前提としてユーザによる空間的動作の選択が必須となる。つまり、どの動作がこの状況で適切かをユーザが判断する必要がある。例えばロボットに実現可能な動作が、パンチルト動作と、車輪による全身動作である場合に、車輪による移動は注意喚起能力が高く、注意喚起を行いたい場合に適切であることを送信者は事前に知らなければならない。システムで多様な空間的動作が利用できる場合、選択の幅が広がるので、その中からどれを選択するか、ユーザの判断はより難しくなる。

このように、空間的動作の選択とその後の操作が難しいと、利用者がコミュニケーションに必要なタイミングを逸する可能性も高くなる。適切なタイミングで適切な情報を伝達できないと、コミュニケーションは円滑に行えない。また、利用に関係する認知的な負担によって、遠隔協働作業を進めるための作業に集中できない可能性もある。

これらの問題意識から、システムによる「空間的動作の半自動化」という支援を考えた。これは一般的な GUI システムの分析や Fisher らによる遠隔操作ロボットシステムの自動、半自動動作の切り替え、また操作可能な関節を多数持つ

ヒューマノイドロボットの操作システムなどから着想を得たものである。利用者に参照すべき対象物体を選択させ、その選択内容によってシステムが状況を間接的に推定して、状況にふさわしい空間的動作を利用するための支援を行う。1章で述べたように遠隔協働作業では参照すべき実物体（人も含まれる）は存在するはずなので、参照すべき物体を利用者に選択させるというのは自然な流れであると考えた。

半自動化の内容を全自動、全手動のシステムと比較検討した結果、ユーザの負担を減らすことができ、また現状の技術水準でも実現性が高いことが分かった。ロボットによる注意喚起動作を半自動化した GUI を設計検討したが、上述の選択と操作に関する課題は解決ができる可能性がある。

注意喚起は重要であるが、それだけではコミュニケーションは完結せず、作業指示などの詳細な情報伝達は別途行う必要がある。2章で説明し、3章の関連研究で扱った他の空間的動作の利用支援にも同様の指針が有効であるかについては、次章以降の検討課題とする。

3.5 まとめ

本章では、遠隔協働作業に関する課題の解決に重要な、空間的動作の利用に関して、システムからの支援がないとそれらを有効に活用できないことを議論し、その支援方法、問題解決方法として「半自動化」を提案した。

議論の中では空間的動作の情報伝達動作、調整子の一つと位置付けられる注意喚起動作を検討対象とした。これは実際の遠隔会議状況を観察した結果から、注意喚起動作が他のユーザの注意を喚起して、他の情報伝達を行う端緒となる基礎的かつ重要な機能であり、また小型ロボットによる比較的単純な手段で実現できる可能性があることが分かったためである。ロボットを用いた評価実験によって、小型ロボットに適切な動作をさせることで注意喚起を行うことが可能であることを確認した。具体的には車輪付きロボットの移動機能を検討し、パンチルトカメラの姿勢変更機能との注意喚起能力を比較する評価実験を行った。その結果、移動機能が、副課題、すなわち音声の記憶や復唱などの作業への悪影響を低く抑えたまま、注意喚起能力を高められるという結果を得た。

その後、注意喚起能力が優れていても、注意喚起機能を実際の遠隔協調作業で使うためには、課題があり、特に情報を伝達する側、利用者を支援する必要があることを議論し、この課題に対して提案する「半自動化」という設計指針で対応可能であることを主張した。最後に、全自動、全手動の遠隔協働作業支援システ

ムとの比較によって、半自動システムの特徴を論じ、注意喚起機能の利用を支援するシステムに半自動の設計指針を用いた例についても述べた。この提案により先述の課題のうち 1, 2 について解決可能となる。すなわち、ロボットの実際の動作をユーザによる操作ではなく、システムに行わせることでユーザの操作に関する負担を低減する（課題 1 に対応）。またユーザが作業対象として人を選択した後に、対象である人の注意を喚起したい、もしくは注意を引かずに人を観察したいという実際に行いたい要望を UI 経由で入力させて、動作を出力するという構成により、「協働作業における注意喚起には全身移動が適切である」などの、空間的動作の効果に関する事前知識をユーザが持たなくても、適切な動作を表現することが可能となる（課題 2 に対応）。

ロボットによる注意喚起は情報表現動作の一部、調整子に相当するが、半自動化の概念は他の空間的動作の利用にも同様に有用である可能性が高い。次章では空間的動作のうち、同様にロボットの持つ基本的な機能である、情報収集動作についても半自動化が有効であることを示す。

第4章 空間的動作の半自動化による遠隔操作ロボット インタフェース

前章では空間的動作の遠隔会議における小型ロボットの注意喚起動作を例として扱った。評価実験によって、会議支援小型ロボットの注意喚起能力、情報伝達動作、調整子の表現としての有効性を主張した。また、後半で空間的動作を表現するシステムの課題を解決する「半自動化」の設計指針について説明し、半自動化で、注意喚起機能の利用を容易にする UI 案の提案を行った。本章では、前章で扱った注意喚起動作に限らず、空間的動作の情報収集動作に相当する、遠隔協働作業を支援するロボットの動作の制御にも半自動化が有効であることを、遠隔会議を支援する小型ロボットの操作インタフェースに関する実験に基づいて述べる。情報収集動作に着目したのは、空間に関する情報収集は前章で扱った動作可能なロボットの基本的な機能として、注意喚起と同様に重要な動作であるためである。

ロボットをネットワーク経由で遠隔から動かすという試みはインターネットの発達初期から継続されてきた。初期の本格的ブラウザである NCSA Mosaic が発表された 1993 年のわずか 2 年後、1995 年には Goldberg らによって Mosaic 経由でロボットを遠隔操作する仕組みが報告されている[72]。近年、ネットワークの広帯域化やロボットの低価格化が進み、遠隔操作することが可能なロボットは広い領域で利用されるようになってきている[73][74][75]。その中で遠隔協働作業を支援するロボットの研究[16][17][29]も増えており、一般の人がシステムのユーザとして想定される場合が多くなっている。そのため、将来的にはより多くの人がロボットを遠隔操作する機会が増えることになると予想される。

しかし、ロボットの遠隔操作に関する従来の研究より、

- 問題 1 状況の Awareness (Situation Awareness) [76]を得づらい
- 問題 2 ユーザの操作の結果が予測しづらい
- 問題 3 ロボットの操作要素が多いため操作が煩雑になりがちである

という問題があることが知られている。本研究では、これらの問題を解決するために、ロボットが動作する環境を大域から把握するための、俯瞰映像取得用カ

メラと、ディスプレイ上に表示された俯瞰映像をユーザの操作インタフェースとして利用するための拡張現実感技術（以下 AR とも記載）を利用する。また新たに、ロボットと、ロボットが操作する対象物との関係に対応して、対象物を操作するのに必要なことだけができるように、ロボットの動作を制限するという特徴をもつインタフェースを提案した。

本章では、遠隔操作ロボットの課題を先行研究を参照してまとめ、それを解決する提案するインタフェースの特徴についてまとめる。

4.1 状況の Awareness 取得に関する問題

ロボットが配置された空間の情報と、その空間にある対象物の情報と、ロボットが行う作業に対してそれらの情報が持つ意味を、遠隔地からロボットを操作する人間が利用できる場合に、状況の Awareness (Situation awareness) が提供されているという [76]。しかし、通常ロボットに搭載されたカメラだけでは、状況の Awareness を得ることは難しいと先行研究で指摘されている。カメラの撮像範囲は通常狭く、得られる情報が限られている。そのため、ロボットを利用するユーザにとって未知の環境でロボットを操作する場合、ユーザは作業空間の情報把握に多くの作業時間を必要とする。例えば、Yanco らの研究 [76] では「全操作時間中 30%以上の時間を環境把握に必要とする」と報告されている。このように長時間が環境把握に費やされるため、本来行うべき作業が円滑に行えなくなる。

この問題を解決するため、先行研究では、環境とロボットの関係を把握するための映像取得手段をシステムに追加することが提案されている。村上ら [77] はロボットが動作する空間の情報を得やすいように、カメラを空間内の高い位置に配置することで、ロボットの操作性が改善されることを報告している。また佐藤ら [78] は、ロボットの上部に全方位カメラや下向きの魚眼カメラを設置して、全方向の俯瞰視点映像を提示することにより、ロボットの衝突回数や移動時間が減少するという点で、操作性が向上することを示している。

異なる解決法としては、Sugimoto ら [79] による Time Followers Vision がある。このシステムでは、過去にロボットのカメラから撮影された映像のデータを利用して、推定されたロボットの現在位置や姿勢を過去映像の中にコンピュータグラフィクス (以下 CG) で描画するという複合現実感の技術を利用している。これにより、ロボットの外部からロボットを見ているかのような映像をユーザに提供することができ、外部環境の中でのロボットの状態の把握が容易になっ

ている。いずれの例でも、外部環境を撮影した映像が問題の解決に有効であることが示されている。

4.2 ロボット動作の予測に関する問題

遠隔操作の場合、ユーザの操作がロボットにどのような動作をもたらすかが予測しづらいことが問題になる。この問題は特にデータ通信に時間遅れがある場合に顕著である。例えば、宇宙空間にあるロボットを地球上から操作する場合のように、ロボットと操作者との物理的距離が長く、情報の送受信に通信時間遅れがある場合、ユーザの入力がロボットの動作に反映されるまでに時間がかかり、円滑な操作を妨げる。

この問題の解決方法としては、CG を利用することが一般的である。映像情報に、動作後のロボットの予想イメージを CG で重畳提示して、ユーザがロボット操作後の変化を把握しやすくする提案がされている[80][81]。

また時間遅れが問題にならない場合でも、ロボットシステムに対するユーザの入力と、システムの出力の対応が複雑である場合に、同様の問題が発生する。

この問題の解決にも同様に CG の利用が有効であると報告されている。荒井[5]や、妻木ら[6]による研究では、非ホロノミック系のロボットや、加速度制御のロボットなど、ユーザのロボットに対する操作入力と、その出力であるロボットの動作との対応がユーザにとって複雑であるために、直感的な理解と操作が難しいロボットを対象としている。これらに適切な視覚的表示をインタフェースとしてユーザに与えることなどで、ロボットの操作を容易にできることが示されている。これらの先行研究は、遠隔協働作業を対象としたものばかりではないが、提案されているロボット操作を容易にするための CG による可視化表現は、我々の空間的動作の分類を当てはめると、ロボット操作者自身にとっての情報伝達動作（例示子、空間動作）であると見做すことも可能である。

問題 1 を解決するために俯瞰映像を用いた場合にも、入出力の対応関係が複雑になる場合がある。例えば鉛直方向から環境を俯瞰した映像で、ロボットを観察しながら、ジョイスティックでロボットを操作することを考える。この場合、同じようにジョイスティックを操作しても、ロボットの向きによって、ロボットが進行・回転する見かけ上の方向が異なることになる（図 20）。

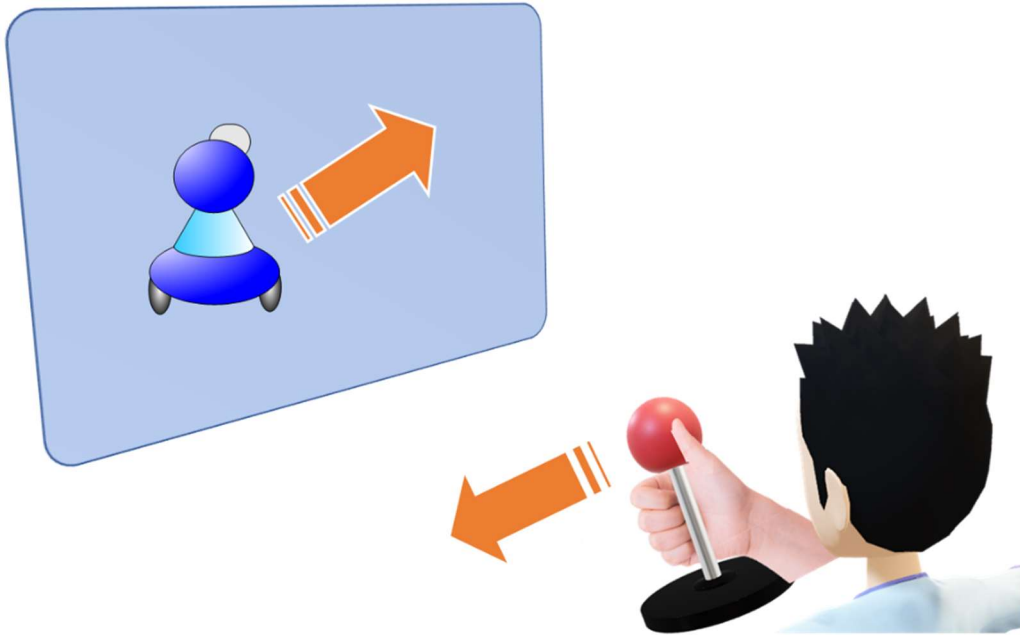


図 20 インタフェースの操作の向きと動作方向が一致しない例

このような場合には、ユーザはその度にメンタルローテーションによって、ジョイスティックの操作を、期待されるロボットの動作に変換する必要があり、これは大きな負荷となる。また、変換の誤りによって、本来意図したようにロボットを動かすことができないといった操作ミスの原因となる。メンタルローテーションおよび他者視点取得に関する問題は、長距離の遠隔操作だけでなく、宇宙空間のような稼働自由度が大きい場所でロボットを動かす場合にも発生する一般的な課題として報告されている[82]。

この問題の解決法には、俯瞰映像そのものを操作インタフェースとする方法がある[83]。具体的には俯瞰映像が表示されるディスプレイ内で、ユーザがタッチした場所にロボットが移動するような処理ができれば、ユーザは操作の方向などについて考える必要がなくなる。また俯瞰映像と CG を併用すること、すなわち AR 技術を利用することで、双方の利点を活用できる。複数のロボットを同時に操作したり、画面内での移動を指示するためにスケッチによる描線を用いたりする研究が報告されている[84][85][86][87]。Ishii らは[88]スケッチ描線によるロボット操作インタフェースの評価において、2 桁の暗算による二重課題を用いている。Zhao ら[89]は AR によるフィードバックを期待するのではなく、空間にコマンドを記載したカードを配置することで、AR 技術を用いてカードに記されたマーカを認識し、ロボットに対しての指示を伝達する提案をしている。

4.3 操作の煩雑さに関する問題

ロボットの機能は多様であり、ユーザがロボットを遠隔操作する場合、ロボットに搭載された各種の機能をユーザが適宜選択して操作する必要がある。しかし、ロボットの要素が複雑になると、動作を実現するための方法が多様になり、利用するユーザにとって操作が困難になる場合がある。たとえばヒューマノイドは30近くの自由度を持つ場合があり、これをユーザが通常の方法で直接操作するのは困難である。

問題の解決を試みた先行研究として、30自由度をもつヒューマノイドを2本のジョイスティックで制御できるようにした研究[71]がある。このシステムでは、ユーザの必要に合わせてロボットの動作に適切な形で制限を加えるという方法が提案されている。具体的には、注意を払うべきヒューマノイドロボットの関節をユーザが選択し、選択した関節以外の関節の動作する範囲を制限することによって、ユーザが他の関節の動作を考慮する必要が少なくなるようにしている。換言すれば、システムによる制限を解除する関節を選択して、その関節だけをユーザに操作させることで、操作の単純化を図っている。このようにロボットの動作に適切な制限を加え、必要な自由度だけ操作可能にすることが、操作の煩雑さの問題の解決につながる場合がある。

4.4 インタフェースの特徴

提案するロボット操作インタフェースは下記の3つの特徴を有している。

- (A) 指示者、ここではロボットの操作者に俯瞰映像を提示し、シチュエーションウェアネス（状況の理解）を提供する。
- (B) 俯瞰映像にAR(Augmented Reality)技術でロボットの移動軌跡を重畳表示して、作業後の移動経路を予想しやすくする。
- (C) 指示者の関心対象であるところの、作業対象とロボットの関係により、ロボットの作業可能な動作を制限する。

特徴の(A)、(B)は先行研究で課題として扱われている内容を取り入れたものであるが、(C)が我々の提案の主要な貢献であると考えている。本章では空間的動作のうち、ロボットによって実現される情報収集動作を「半自動化」の主な対象として議論を進めているが、(B)に関しては、操作者自身にとっての情報伝達動

作、例示子、空間動作であると考えられることもできる。

次に、「適切な」制限を決定する必要があるが、こうした制限は、状況によって異なる。前述の複雑な構造を持つヒューマノイドロボットを操作する UI の提案[71]では、まず、すべてのロボットの関節部分が拘束されている状態が基本となり、ロボットの操作者が拘束、制限を外して動かせる関節を随時指定する、という操作方法が提案されている。しかし、こうした提案では操作者自身が、ロボットの機構や制御に関する知識を有することが前提となっている。遠隔協働作業におけるロボットの役割は、コミュニケーションを円滑にするための手段であり、利用者にロボットの機構や制御法に関する知見を求めるのは適切とは言えない。

提案手法では、操作者はこのような知識を持つ必要はなく、ロボットによって注意を誘導されるべき、あるいは撮影されるべき、空間内の対象物を指定するだけでよい。操作者が対象物を指定すると、システムが指定された対象物によって適切な動作制限を半自動的にロボットに加える。そもそも遠隔協働作業の利用目的として、デジタル化が難しい、空間内にある対象物を扱うことがあるため、利用者が現在興味を持っている、何らかの対象物を意識、選択することは比較的自然な流れであると考えられる。ユーザが対象物を選択すると、システムは対象物の情報を集め、その対象物に関する情報から、ロボットの動作がどう制限されるべきかを決定する。

4.5 実験用システム

システムは環境全体の俯瞰映像を撮影するためのカメラ、俯瞰映像上に AR 技術によってロボットの可能な動作を表示し、操作コントローラとして利用できるタッチディスプレイで構成した。ロボットは遠隔参加者の操作で動作し、遠隔環境の物体を撮影する (図 21)。

ロボットと、ロボットの撮影対象となるものの近傍に 2 次元マーカを配置し、ARToolkit[90]によって俯瞰映像内での位置や方向と ID を認識し、またそれらの情報を利用した AR 情報を俯瞰映像内に重畳表示できるようにした。

ロボットを操作するユーザは、俯瞰映像内に表示される注目する対象物のマーカを、タッチパネル上でのタッチによって選択する。システムはマーカの位置、方向の情報から、ロボットの位置と、選択された対象物との位置関係を得て、その位置関係によって、動作の制限に関する情報、ここではロボットが動くことができる仮想的な経路を AR でユーザに提示する(図 23)。

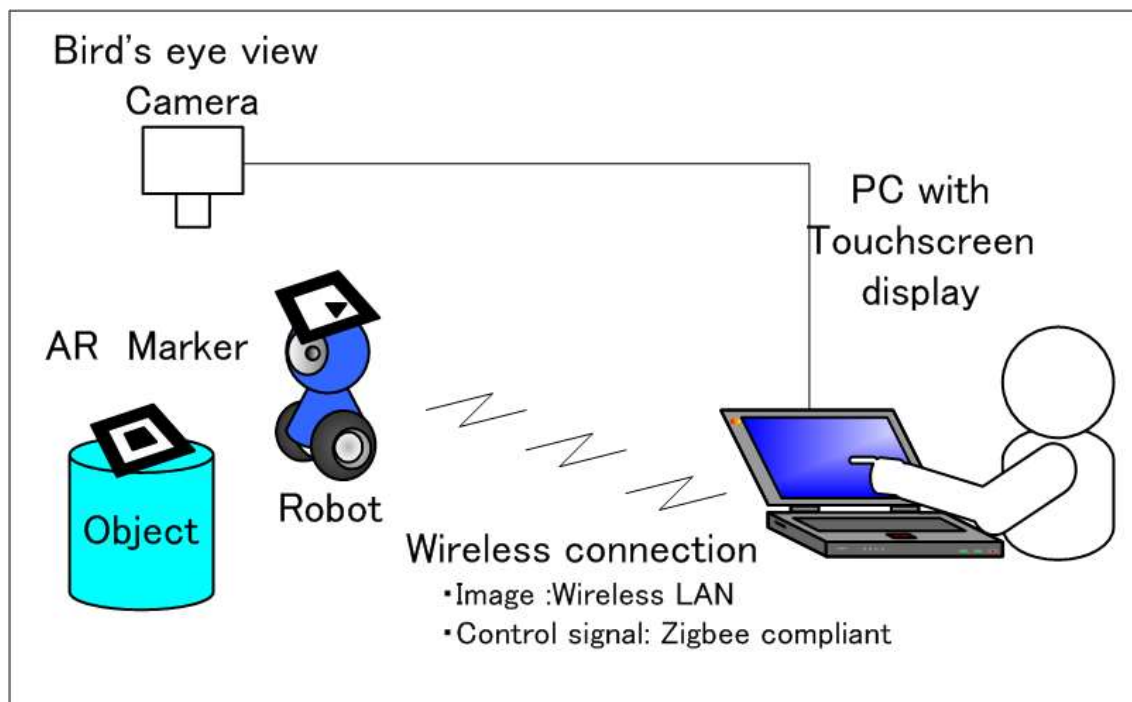


図 21 小型ロボットによる遠隔協働作業支援システム

4.5.1 実験に利用したロボット

実験に利用したロボットを図 22 に示す。ロボットはカメラを搭載した移動車両であり、大きさは幅約 250[mm]、奥行き約 250[mm]、高さ約 300[mm]である。カメラには遠隔操作可能な Vivotek 社製パンチルトカメラ PZ6114 を採用した。PZ6114 は無線 LAN 経由で映像を配信できる。移動車両にはオカテック社製 Infant Mini を採用した。Infant Mini は 2 輪差動駆動型で、キャスターである受動輪を後部に持つ。カメラ、移動車両ともに車両に搭載した電池による電源供給により動作する。無線化された通信によるコマンド指令でカメラ、移動車両の制御ができる。動作時にロボット外部との有線接続は不要である。

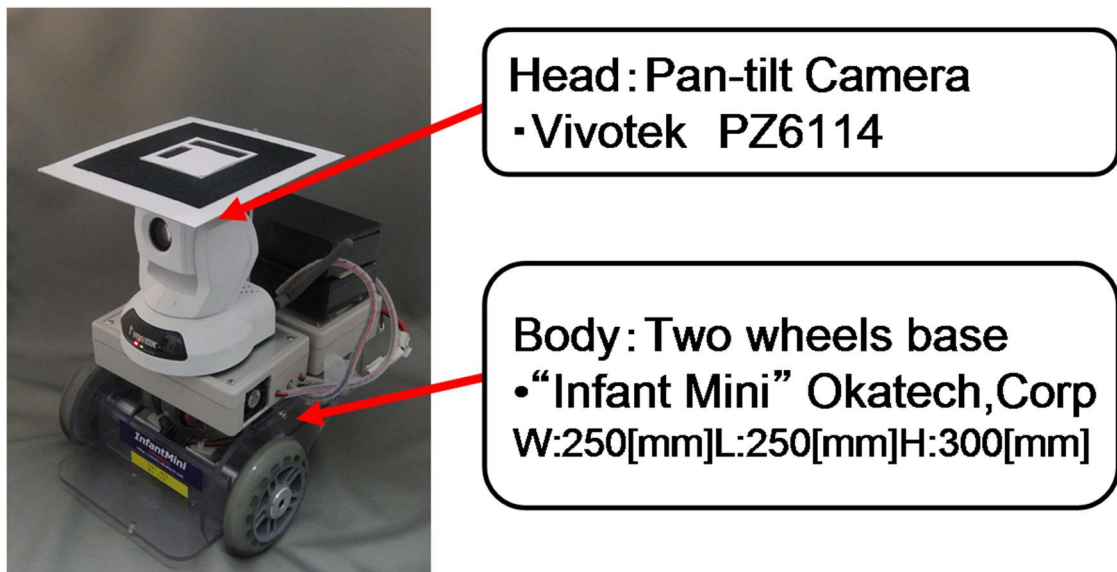


図 22 小型移動ロボットの外形

4.5.2 動作の制限と AR による制限の可視化

前節で説明した、ロボットの撮影対象になる物、つまり対象物と、対象物に関係するロボットの動作制限と、AR を利用した制限の可視化の方法について説明する。

ロボットを操作するユーザは俯瞰映像内に表示される、興味を持った対象物を選択する。システムは対象物に割り当てられたマーカの位置、方向の情報からロボットの位置と選択された対象物との位置関係を得て、その位置関係によって動作の制限に関する情報を AR 技術で視覚的に表示する。

具体的には、撮影される対象物とロボットを結んだ直線、対象物とロボットの距離を半径とし、対象物を中心とした CG の円が実際の映像に重畳されて表示される (図 23)。この CG による線は、いわばロボットが移動できる仮想的なレールを表しており、ユーザはロボットが移動する経路と、移動後の位置をディスプレイ画面上で予想することができる。ユーザが仮想レール上の一点を直接タッチすることで、その位置にロボットが移動する。直線のレール上をタッチした場合には対象物の方向に前進、または後退する運動を行う。同様に円形レール上をタッチした場合には、対象物を中心とした円を描くように動作をする。運動の方向を図 24 内太線矢印で模式的に示した。これらの動作は対象物を適切に撮影することを意図したものであるため、どちらの動作の場合にもカメラの方向は対象物の方向を向くように、自動的に固定される (図 24 内点線矢印)。この

仮想のルールを表す画像はユーザが選択した対象物によって自動的に変更され、運動の制限も同時に変化する。本章の目的は空間的動作のうち、情報伝達動作に関する半自動化の効果を検証するものであるが、その要素の一部として利用されている前述の CG による可視化表現は、空間的動作の分類を当てはめると、ロボットを操作する者自身にとっての情報伝達動作（例示子、空間動作）であると考えられることも可能である。

ユーザはこのインタフェースを用いることで、例えば複雑な構造の対象物をさまざまな角度から観察したい場合などにも、画面内の経路上の点をタッチするだけでロボットを移動させ、その位置から対象物を撮影することができる。同様に、より詳細な情報を得るために、対象物に近づいたり、あるいは全体像を得るために距離をとったりすることもできる。

運動の制限以外にも操作に必要な情報は AR 情報で表示される、図 23 内中央の小円は対象物の位置、三角形はロボットの位置と進行方向、扇型はロボットのカメラの向きをそれぞれ表している。

本実験の実装では、ロボットが動作している途中で停止したい場合は、画面内の AR 情報が表示されていない部分をタッチすることで停止させる様にした。

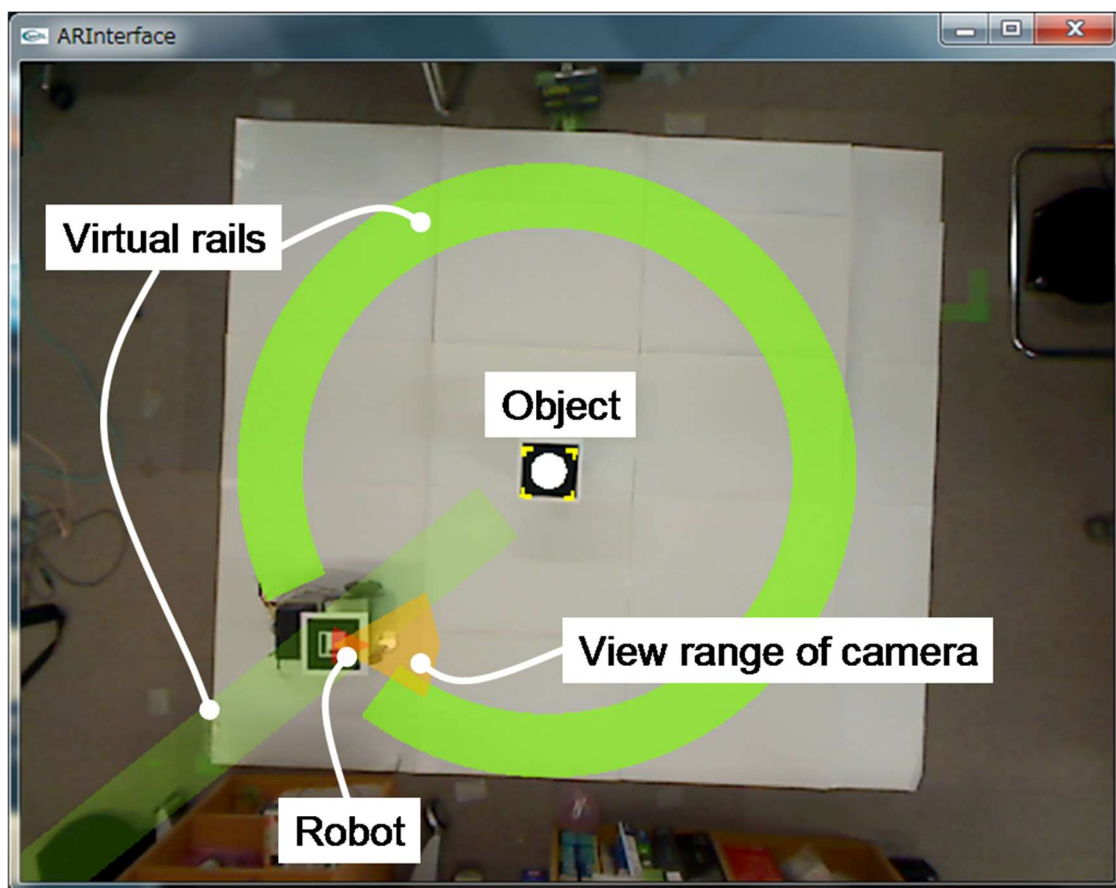


図 23 オブジェクト選択による動作制限のスクリーンショット

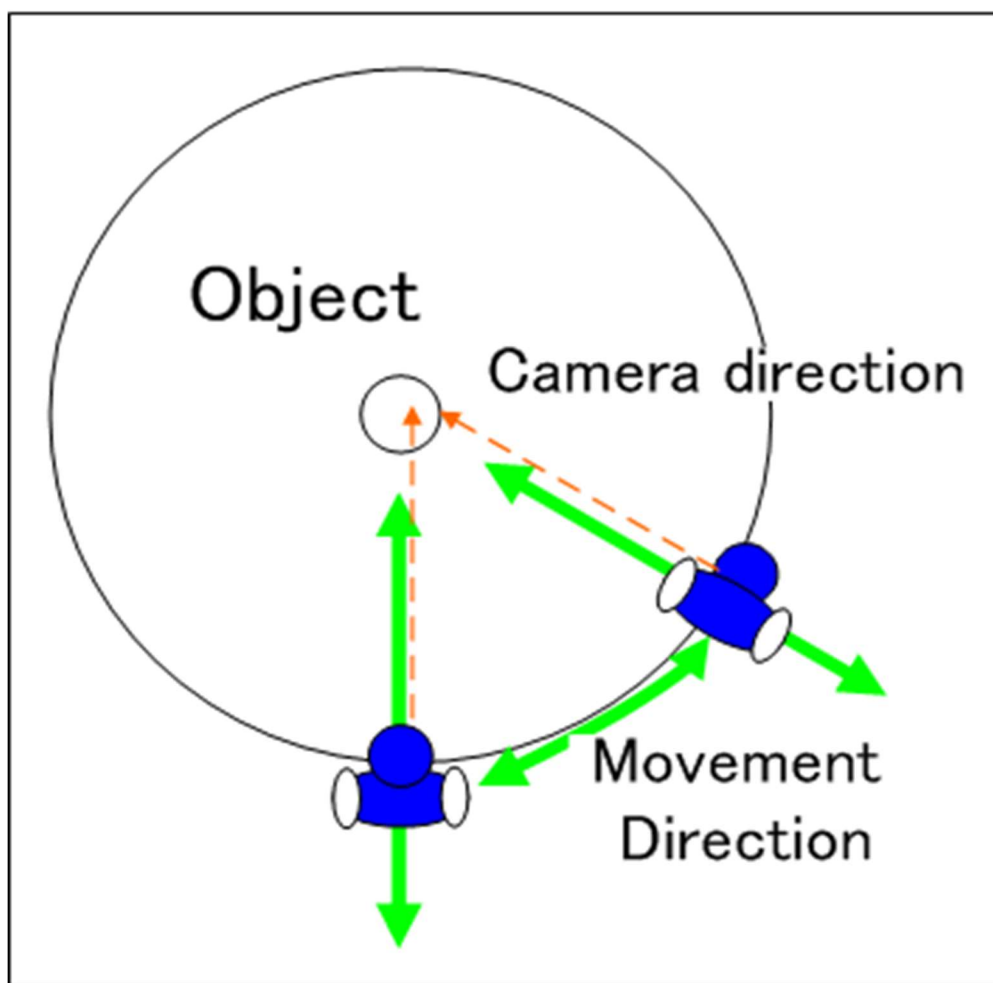


図 24 動作制限の模式図

4.6 評価実験

提案する新規インタフェースを搭載したシステムの有効性を検討するための評価実験を行った。

4.6.1 実験概要

実験参加者に比較手法と、提案手法のインタフェースでロボット操作させて課題を行わせた。後述する比較手法と比較して、提案するインタフェースによって、課題実行が容易になったかを検討するために、課題実施時間、課題のエラー回数などを計測した。また参加者による主観評価を行なった。

課題としてブロックの組立てを行わせた。ブロックの組立ては CSCW (Computer Supported Collaborative Work) 研究では一般的に用いられるタス

クである[12][45]。この課題の実行には、ロボットとカメラを細かく操作して、ブロックを詳細に観察することが必要であり、また課題の結果から、観察が適切であったかの確認ができる。このため、提案する半自動化インタフェースロボットによる遠隔操作作業の例として適当であると考えた。

参加者から見えない位置にロボットと、課題ブロックが配置される。参加者は各インタフェースを利用してロボットを操作し、ロボット搭載のカメラを利用して課題ブロックを観察して、参加者の手元にある課題ブロックと同数のブロックを用いて、課題ブロックと同一のブロックを組立てる。本実験では、5色11個のブロックを2組利用した。実験に利用したブロックの1例を図25に示す。

4.6.2 比較対象のインタフェース

提案インタフェースの比較対象として、Sekimotoら[83]の提案するロボット操作インタフェースを参考にしたインタフェースを用いた。これは俯瞰映像とタッチパネルディスプレイを利用し、ディスプレイ上俯瞰映像内でタッチした目標位置にロボットが移動するというものである。目標位置と、ロボットの位置関係に応じて、ロボットが回転して向きを変え、目標位置まで直進する。タッチした目標位置はロボットの移動中には、赤い点としてAR情報で提示され、ロボットが移動を完了した後に消える。カメラのロボット胴体に対する方向は移動命令では変化しない。カメラの現在の向きは提案手法と同様にAR表示される。動作中のロボット停止方法は提案手法と同じである。

このインタフェースはシステム構成に提案手法と共通点を持ち、同様に問題1と2を解決している。しかし、提案手法の特徴3に相当する以下の3つの機能は持たない。

1. 対象物との関係でロボットの運動に制限を加える。
2. 選択した対象物を向くようカメラ方向を変更する。
3. 運動の制限をARで表示する。

比較対象の他の機能特徴は提案インタフェースと同等であるため、提案インタフェースのこれらの特徴による効果を比較検討するのに適当な例であると考えた。

4.6.3 カメラ操作のインタフェース

ロボットに搭載したカメラを動かすために通常の GUI インタフェースを提供した(図 26)。「UP」、「LEFT」、「RIGHT」、「DOWN」、「カメラをリセット」の 5 種類のボタンを押してカメラを操作する。各ボタンを 1 回押す毎にロボットカメラが一定角度動作する。「カメラをリセット」を押した場合、カメラはロボットの真正面を向いた状態になる。カメラ操作のインタフェースは 2 種類の操作インタフェースで共通である。

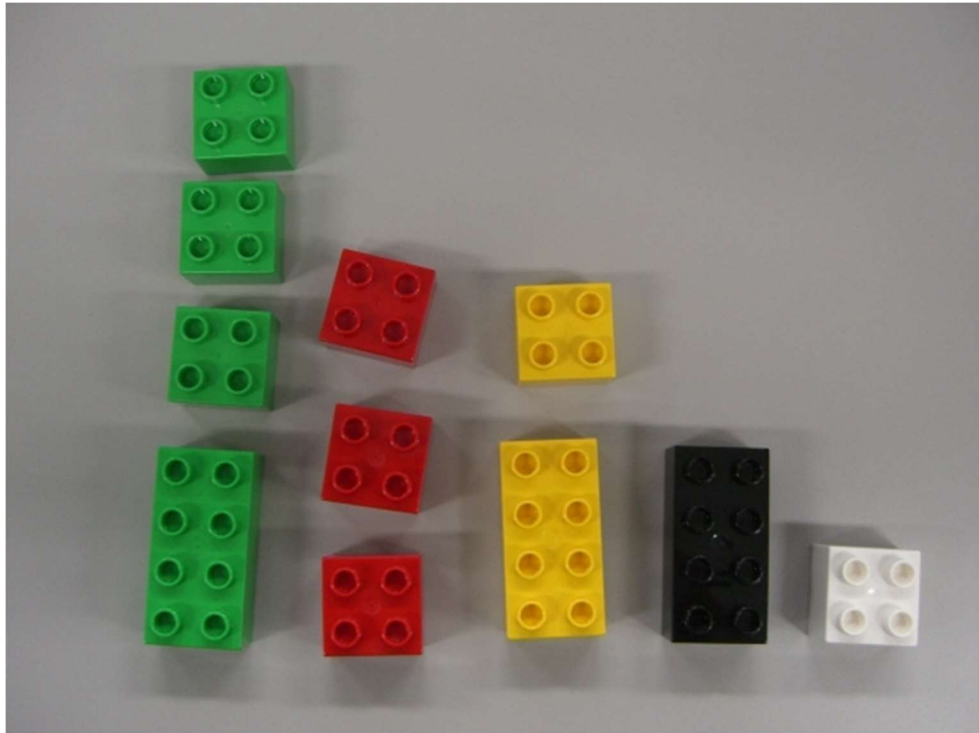


図 25 実験に利用したブロックの例

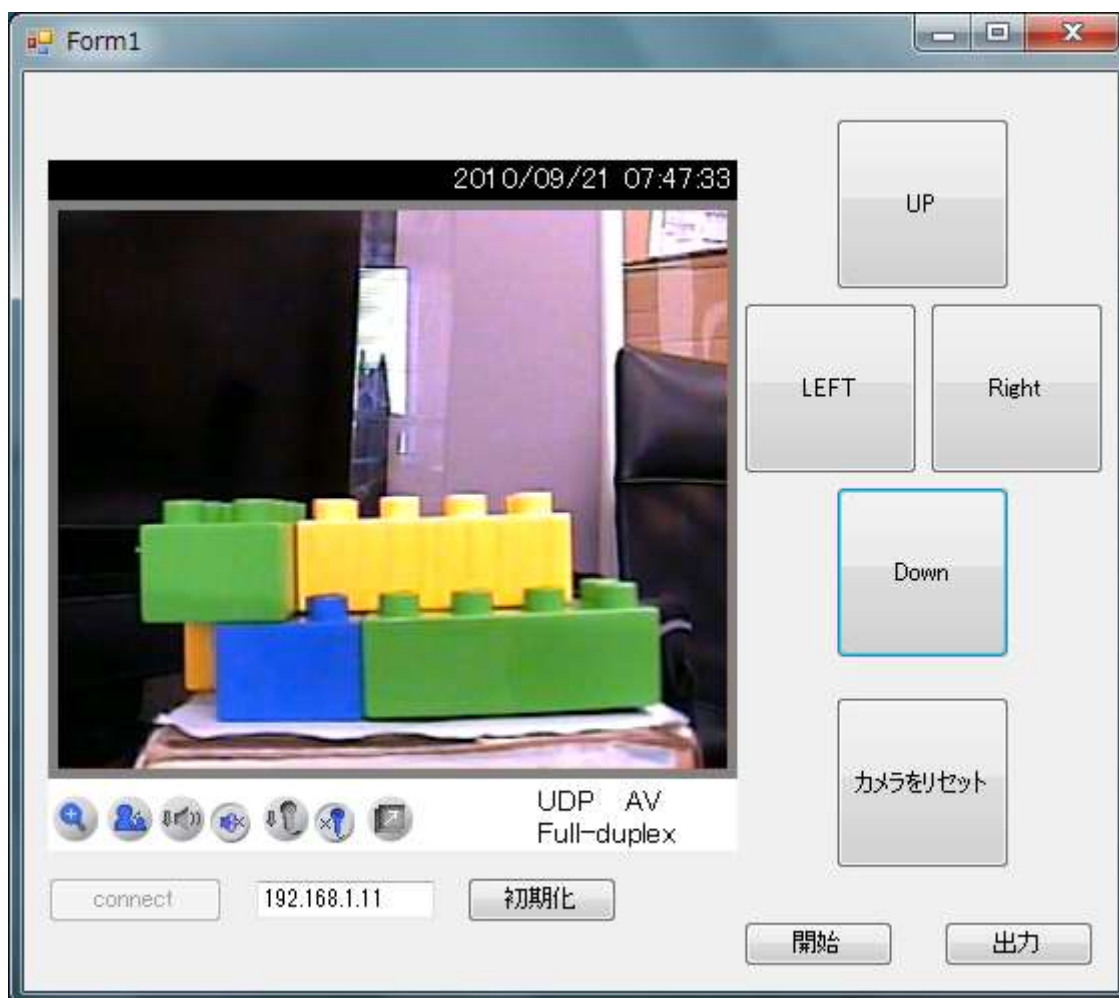


図 26 カメラ操作インターフェースのスクリーンショット

4.6.4 実験環境

実験環境を図 27、図 28 に示す。実験参加者はロボットが動作する空間を直接見ることができない位置に配置された机の前に座り、PC のタッチパネルディスプレイをインターフェースとして利用してロボットを操作する。ロボットカメラで撮影された映像も同じディスプレイ上に表示される(図 26 参照)。ユーザのインターフェースとなる PC から、無線化されたシリアル信号で動作命令が送信され、ロボットはそれを受信して動作する。ロボットが動作する空間は俯瞰カメラの配置位置の制限下で最大となるようにし、1800[mm]×1700[mm]とした。後の解析のため、ビデオカメラを配置して、ロボットの動作、ロボットを操作する実験参加者の操作を映像として記録した。

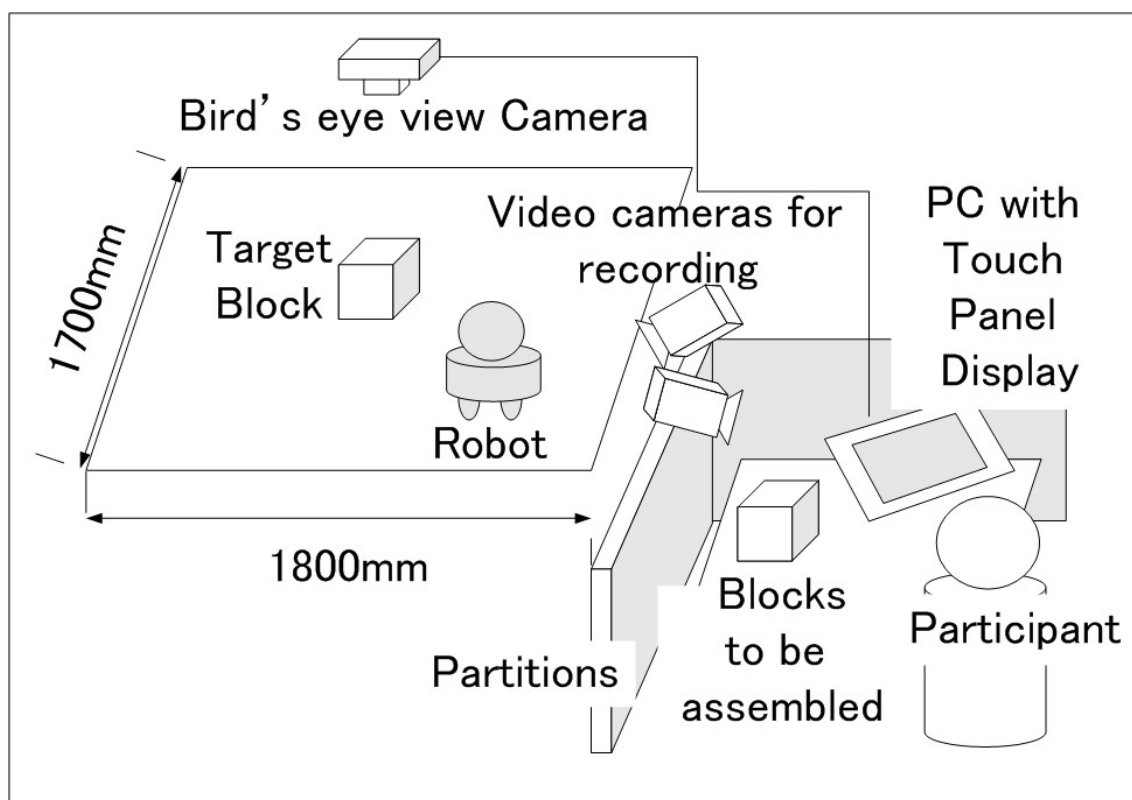


図 27 ロボットインタフェース実験環境

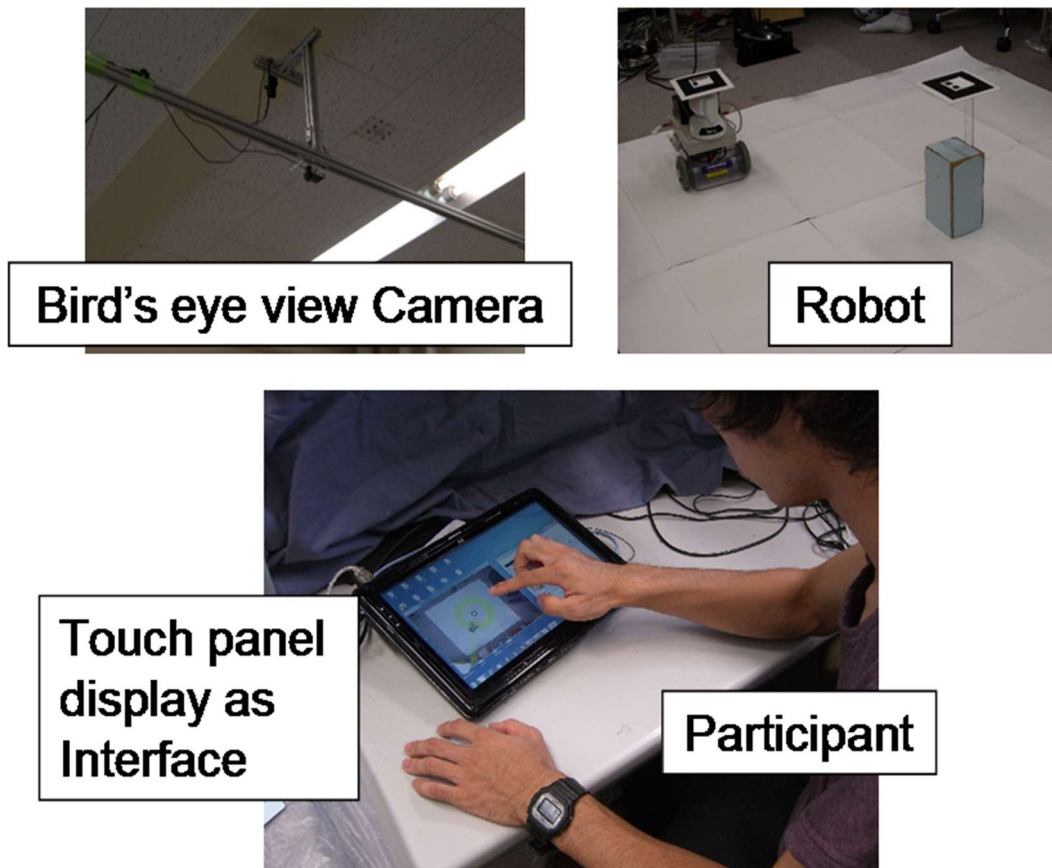


図 28 ロボットインタフェース実験 実際の実験風景

4.6.5 実験参加者と実験手順

実験は国立大学の一室で行った。大学生および大学院生男女 31 名が実験に参加した。実験中にシステムに不具合が発生した場合等を除いた、有効データ 28 名分を分析対象とした。分析対象となった参加者の年齢は 20 代 26 名、10 代 2 名であった。性別は男性 16 名、女性 12 名であった。自己申告による利き手は右利き 26 名、左利き 2 名であった。

参加者は、実験室に入り、ロボットと、ロボットが動作する空間を見た後、実験全体について説明を受けた。続いてカメラの操作方法の説明、1 種類のインタフェースによるロボット操作方法の説明、ブロック組立て課題についての説明を受けた。実際にロボットを動かして操作に慣れた後、練習として簡易な構造のブロック（3 色、4 個のブロックで作られたブロック）を利用した練習課題を行わせた。その後 4.6.1 節で説明したブロックを利用した本課題を行い、5 分間の

休憩を挟んだ後、別のインタフェースによるロボット操作方法の説明、練習、練習課題、本課題を同様に行わせた。操作インタフェースとは別のソフトウェアを用い、課題の開始、終了をタッチパネル上のボタンでユーザ自身に記録させた。後の解析のために、カメラインタフェースの操作回数、すなわち GUI ボタンを押した回数を計測した。

課題の教示では、課題を早く終了させることを、ブロック組立ての正確さよりも優先するように指示した。また「ブロックを正しく組めた参加者のうち、最も早く課題を終了させた人に賞品を出す」と告げ、正確さに対しても動機付けた。また、ロボットをブロックに当てないようにすること、ロボットを俯瞰映像の画面外に出さないようにすることを指示した。課題の成否や順位に関わらず、実験参加者全員に対して、賞品以外にも謝礼を提供した。

ブロックは 2 種類用意し、同程度の難易度であることを事前の予備実験で確認した。インタフェースの利用順序は参加者間でバランスするようにした。

実験終了後に主観評価への回答とインタビューを行った。分析した主観評価の質問は以下の 5 問であり、評価値 1：まったくそう思わない～5：非常にそう思う、の 5 段階の評価尺度で評価してもらった。

- Q1 ロボットを操作して、ブロック全体の形状を把握しやすかったですか？
- Q2 ロボットをブロックに当てる心配はありましたか？
- Q3 見たい位置に、ロボットを移動できましたか？
- Q4 ロボットは操作しやすかったですか？
- Q5 操作に慣れるまで時間がかかりましたか？

実験終了まで休憩を含めて 1 時間程度の時間を要した。

4.6.6 分析方法

課題実施時間、カメラインタフェースの操作回数を指標として統計解析を行った。また課題のエラー回数についても分析した。ここでエラーとは 10 分以内に課題を終了できなかつた、またはブロックを正しく組立てられなかつた場合である。課題を終了できなかつた参加者の課題実施時間データは、課題を終了できた参加者の最長課題実施時間と同じ値として分析した。

インタフェースによる効果と、ロボット操作自体に対する慣れの効果が、各デ

一タの平均値に与える効果を検討するため、インタフェース条件 2 水準、その課題が何回目の試行かを示す順序条件 2 水準、これらを 2 要因とする 2 元配置分散分析を行った。また同様に主観評価値も分析した。

4.6.7 実験結果

図 29、図 30 にインタフェース条件および順序条件での課題実施時間の平均値のグラフを、図 31 にそれらの交互作用のグラフを示す。横軸はインタフェース条件、もしくは順序条件の水準を示し、縦軸は課題実施時間、エラーバーは標準偏差を示す。

平均課題実施時間は比較対象のインタフェースと比較して、ブロックを組み立てるまでに必要な平均作業時間は提案手法で 168 秒、比較手法で 210 秒であった (図 29)。また順序条件で「1 回目」条件が 209 秒、「2 回目」条件 168 秒であった。分散分析の結果、インタフェース条件および順序条件の主効果に有意傾向が見られた (インタフェース条件 : $F(1,52)=3.56$, $p=0.0648$, 順序条件 : $F(1,52)=3.36$, $p=0.0723$)。一方、両者の交互作用は有意ではなかった (交互作用 : $F(1,52)=0.183$, $p=0.670$)。

Levene 検定によると、インタフェース条件で各水準の課題実施時間の分布の等分散性は仮定されなかった ($F(3,52)=1.57$, $p=0.208$)。

インタフェース条件での課題実施時間の参加者内の時間差 (比較手法－提案手法) を Kolmogorov-Smirnov 検定で正規性を検定した結果、正規性は棄却されなかった。インタフェース条件での課題実施時間について対応のある t 検定を行ったところ、分散分析同様に有意傾向が見られた ($t(27)=2.02$, $p=0.0532$)。

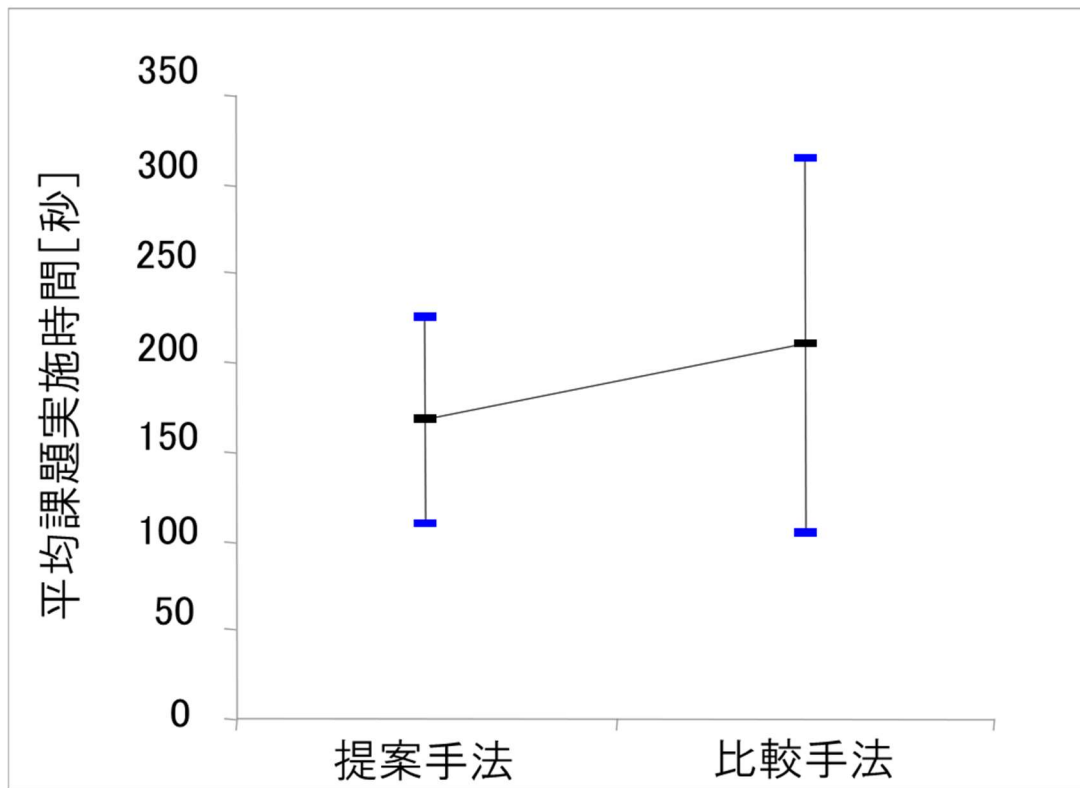


図 29 平均課題実施時間(インタフェース条件)

順序要因

N=28

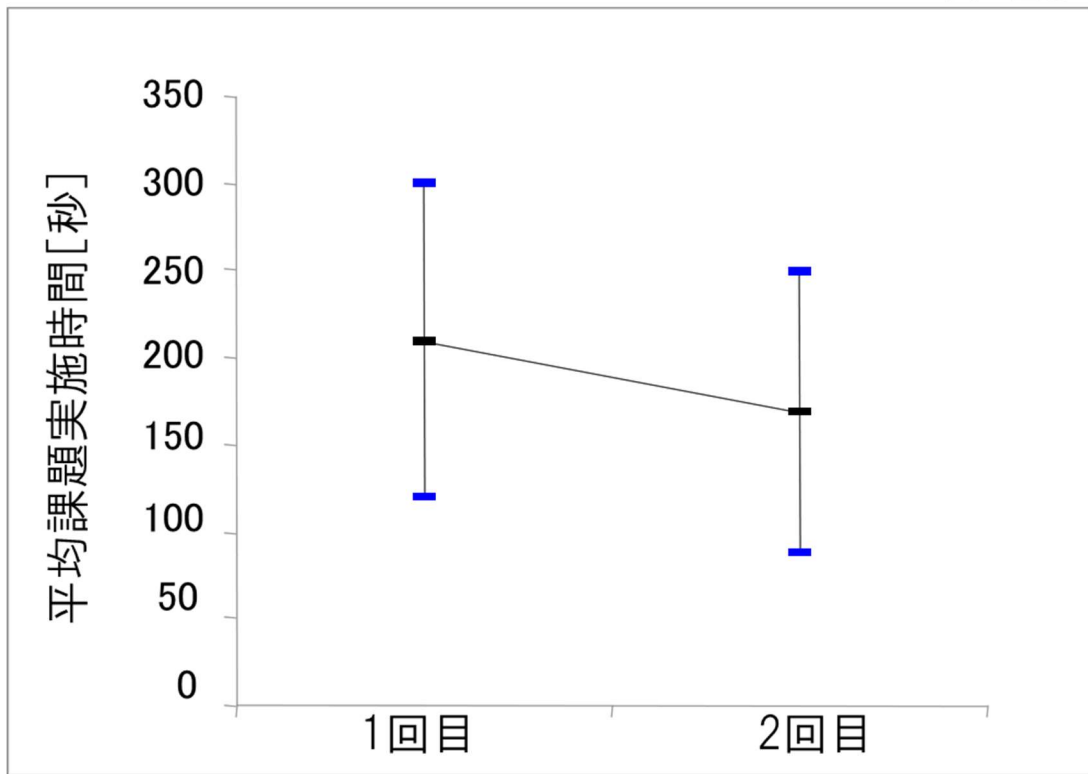


図 30 平均課題実施時間(順序条件)

交互作用(インタフェース * 順序) N=28

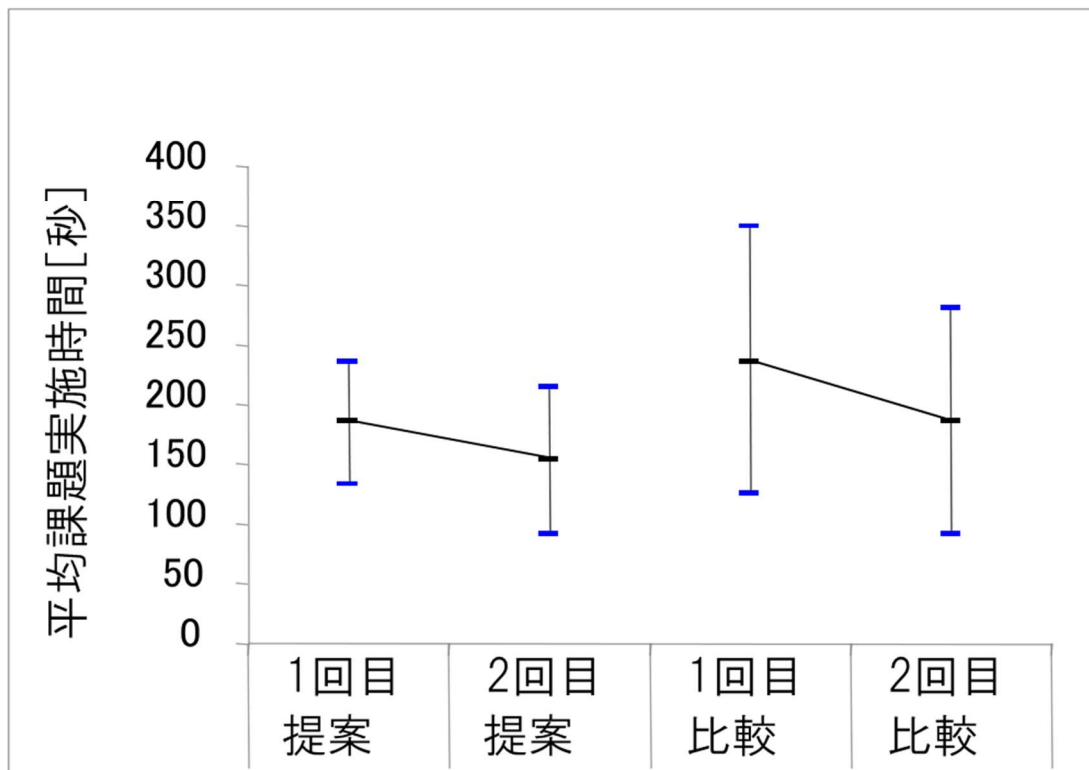


図 31 平均課題実施時間の交互作用

エラー回数の結果

28 名による 56 回の課題実施中、ブロックの組立てを間違えた場合が 9 回、時間内に完了できない場合が 1 回あった。両方のインタフェース課題でエラーがあった参加者はいなかった。インタフェース条件で比較すると、「提案手法」を利用した場合に 3 回、「比較手法」の場合に 7 回のエラーがあった。順序条件で比較すると、「1 回目」は 5 回、「2 回目」も 5 回のエラーで差はなかった。

カメラ操作回数

インタフェース条件でのカメラ平均操作回数は「提案手法」では 0.286 回、分散は 0.656、「比較手法」では 10.1 回、分散は 70.6 であった。対応のある t 検定を行った結果、1%水準で平均値に有意差が認められた($t(27)=6.11, p<0.01$)。

運動時間とカメラ操作回数の相関

インタフェース条件での、課題実施時間とカメラ操作回数の条件間の差（比較手法－提案手法）の積率相関係数を求めたところ、 $r=0.429$ となり、両者間に中程度の正の相関関係が認められた。

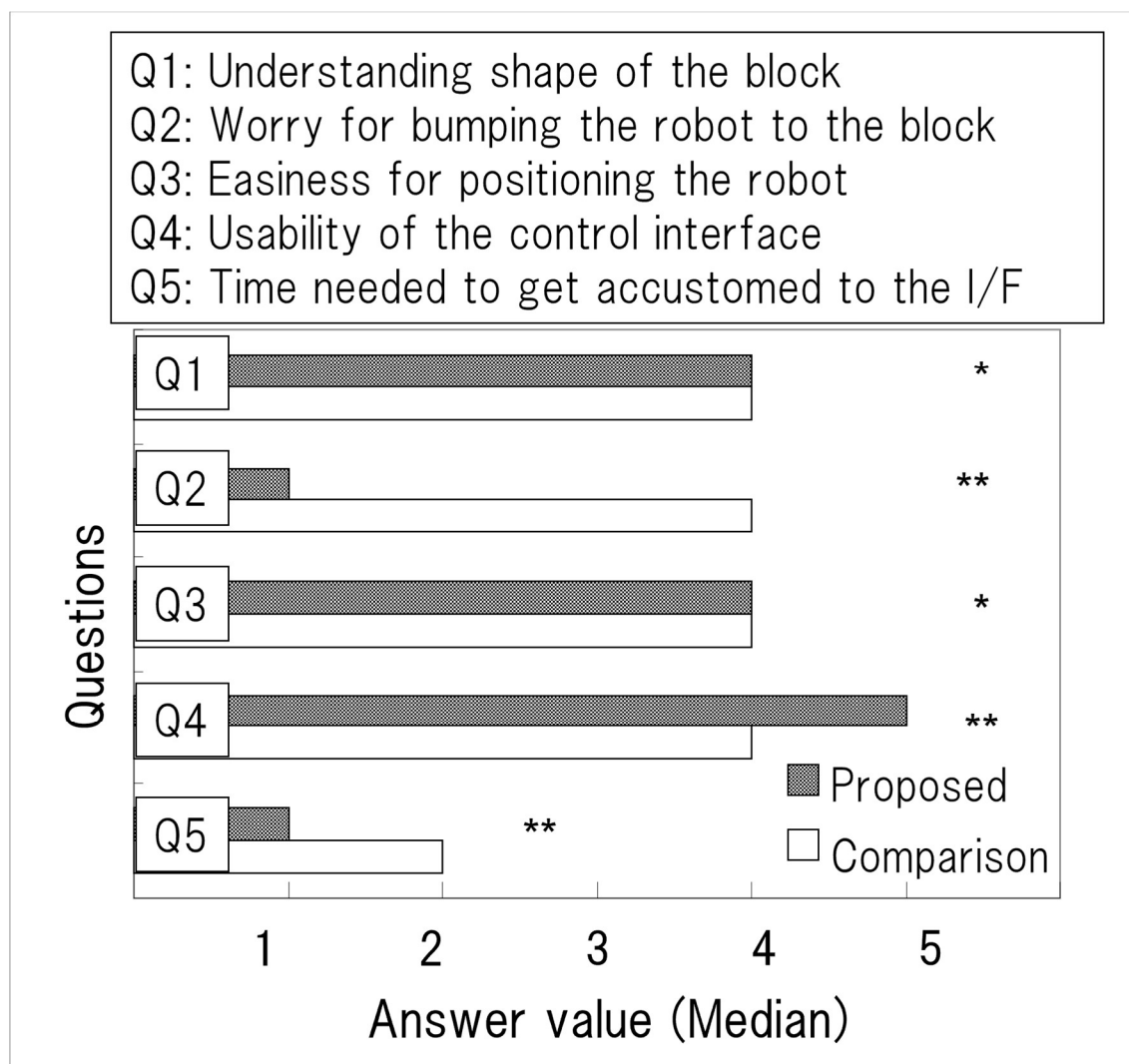


図 32 ロボットインタフェース操作に関する主観評価値

主観評価

図 32 に主観評価結果のグラフを示す。インタフェースの 2 条件間で、ウィルコクソンの符号付順序和による検定を行った。Q1 と Q3 が 5% レベル、Q2、Q4、Q5 が 1% レベルでの有意差を示した。

操作者による利用の傾向

提案手法の場合、28人中3人で合計7回のカメラ操作が観察された。しかし、それらのほとんどは、深い意図のない操作であるように見え、実際、操作の結果は直後の動作によって更新された。つまり、特定の傾向を発見することはできなかった。提案手法を比較手法の前に利用した作業者は、比較手法を使っているときにも、ロボットをブロックの周囲を回旋するような動きをさせていた。提案手法利用者の中には、ロボットをブロックの周囲を回旋させ、カメラに映るブロックの画面を回転させながら、同時に手元にある組み立て中のブロックを回転させて、正しくブロックを組み上げていることを確認するような操作を行う人もいた（図 33）。この操作は共通的なもので、28人中15人で観察された。また、同様の動作を比較手法で行う参加者もいたが、その人数は限られていた。（28人中2人）参加者に3Dゲームや、ブロック遊びの経験についても質問したが、特定の傾向はなかった。



図 33 片手で操作しながらブロックを回転させている実験参加者の例

4.7 考察

実験結果から、課題実施時間に対して、「提案手法」「比較手法」間で平均値の差に有意傾向があった。更に、カメラ操作回数に対しても有意差があった。また、

主観評価ではすべての質問で平均回答値に有意差があった。これらの結果から「提案手法」は、課題実施時間を短くし、また、カメラ操作回数を減らす効果があるということが確認された。また統計的分析を行えるほど十分なデータではないものの、課題のエラー発生回数も、「提案手法」を利用した場合のほうが少なかった。

課題実行順序による効果に有意傾向があったが、インタフェース条件に対する交互作用はなく、順序はバランスさせたことから、前述の結論に対する影響はなかったものと考えられる。

「比較手法」と「提案手法」の課題実施時間の差が、「提案手法」のどの要素によって得られたものかをより詳細に検討する。数値的に差があるのは、カメラ操作回数の減少である。しかし、相関係数に示されるように、カメラ操作回数と動作実施時間との相関は中程度であり、カメラ操作回数が減少したことだけでは、動作実施時間の差を説明するのに十分ではないと考えられる。そこで、主観評価値を検討すると、Q2の回答値に大きな差があり、「提案手法」ではブロックに当てる心配がなかったという回答に有意差が得られている。これは、カメラ動作とは無関係であり、「提案手法」の特徴のうち、ロボットの動作制限と可視化によって得られた差であるといえる。「比較手法」の場合、参加者はロボットをブロックに当ててしまわないように注意しながら、ロボットを操作した。しかし、「提案手法」ではロボット動作の制限によって、課題の実行とは直接関わりない、ブロックに当てる心配をせずにロボットを移動させることができた。この心理的な負荷、すなわち、ロボットをブロックに当てないように慎重になったことの差が、動作実施時間の延長につながった可能性を示唆する。

また「提案手法」は、Levene 検定の結果にも表れているように、課題実施時間の分散が「比較手法」と比較して有意に小さく、使う人によって差が出づらい方式であるということができると思われる。つまり、ロボットの操作が苦手な参加者は、「比較手法」のインタフェースを使うと課題に時間を要する場合がある。しかし、「提案手法」を利用すれば、操作が得意な人とも、それほど変わらない時間の範囲内で課題を終えることができる。

エラー回数と操作インタフェースとの関係を見るため、ビデオ撮影したロボット操作状況を観察した。その結果、参加者の中にはブロックを一旦組立て終えた後に課題ブロックと一致しているかを確認するため、再度ロボットをブロックの周囲で動かして、課題ブロックの形状と自分が組立てたブロックの形状を比較する作業を行うものがいた。しかし、その中でも数名の参加者はインタビュー

一時に「比較手法」では操作が面倒であったため、確認作業を行なわなかった」と回答した。この回答と、「提案手法」からエラー回数が少ないこととの関係が示唆される。すなわち、「提案手法」は操作が容易であり、ブロック確認作業が容易に行えるため、多くの参加者が確認作業を行なったため、結果としてエラーが少なかったとも考えられる。

「提案手法」は「比較手法」に対して、AR 情報として画面に表示される情報が増えているなどの理由で、参加者の操作方法理解が難しくなる可能性がある。しかし、主観評価 Q4、Q5 の結果からは、回答値の差自体はわずかであるが、「提案手法」の方が、操作が容易であり、操作の習得も容易であったと参加者が感じていたことが示されている。

今回の実験結果から、対象物であるブロックを周囲から詳細に観察する必要があるという本課題に対して、本提案インタフェースが有効であったということができると考えられる。すなわち特徴である対象物によって定まる運動の制限、対象物を注視するカメラの動作、および AR 技術による運動制限の可視化が、ロボット遠隔操作を容易にするために有効であるということである。

実施したブロック組立て課題の結果を、単純に一般化することはできない。そのため、ロボット遠隔操作一般に関して議論できる段階ではない。しかし、今回の実験結果から、筆者らは、ロボットによる操作の対象物に応じて、ロボットの動作に制限を加えることで課題の遂行が容易になること、すなわち本研究で提案する半自動化インタフェースの有効性を示唆する事例について、定量的な実験データを用いて示すことができたと考えている。

半自動の概念を取り入れた、空間的動作の制限を行うシステムによって、遠隔地のロボットを操作して行う作業時間が短縮できること、ロボットを操作するユーザの心理的な負荷を軽減できることを確認できた。

4.8 まとめ

本章で扱った小型ロボットの動作は3章の空間的動作の分類では情報「収集」動作に相当する。ユーザに対象物を選択させ、対象物の情報を取得して「半自動」でこの情報収集動作を制限するというシステムを提案し、実験結果から提案の有効性を示した。半自動化によるロボット動作範囲の制限と可視化によって、ユーザがロボットをエラーなく容易に操作できるようになること(課題1に対応)、ユーザの操作に関係する心理的負担を低減できる(課題3に対応)こと、またロボット操作と同時に進行作業成績が向上することを確認することができた。半

自動化によって対象物の情報収集に必要なないロボットの動作が制限されているために、利用者は動作の選択に関して悩むことが少なく、容易に動作させることができた。また、誤操作に関する不安も少ないことから、収集される情報（ブロックの外形）の理解に集中することができたと考えられる。このように 1 章で述べた課題 1, 課題 3 に関して半自動化による効果があることを確認することができた。

次章では第 3 章、第 4 章で扱ったロボット動作以外の遠隔協働作業で用いられる空間的動作にも、半自動化の指針が有効であることを示す。

第5章 空間的動作の半自動化による遠隔作業支援システムの実装例

本章ではロボットを用いる前章までのシステムとは異なり、ウェアラブルデバイス（カメラ、ディスプレイ）等を利用する遠隔作業支援システムについて述べ、提案する「空間的動作の半自動化」の概念が、遠隔協働作業支援システムの他の実現形態にも広く応用可能であることを示す。

ウェアラブルデバイスを利用する遠隔作業支援の利用例として図 34 に筆者が所属する製造産業分野での利用例を示す。工場の現場の複数の作業員を、空間を隔てた場所に存在する熟練技能者が監督、指導して、作業対象となる生産設備のトラブル対応や点検等を行う。現場の状況は空間に固定されたカメラ、あるいは作業員が身に付けるウェアラブルのカメラで撮影され、撮影された映像はネットワーク経由でリアルタイムに送信される。遠隔地の熟練者はシステムを通して送られてくる映像や音声から、作業対象の状態や、各作業員の状態を含む現場の状況を把握し、作業員に対しての指示を同様にシステム経由で伝達する。本章では、この作業指示手段が空間的動作（情報伝達動作、例示子）に相当する。すなわち、ウェアラブルディスプレイ上に表示される情報として空間的動作が実現される。

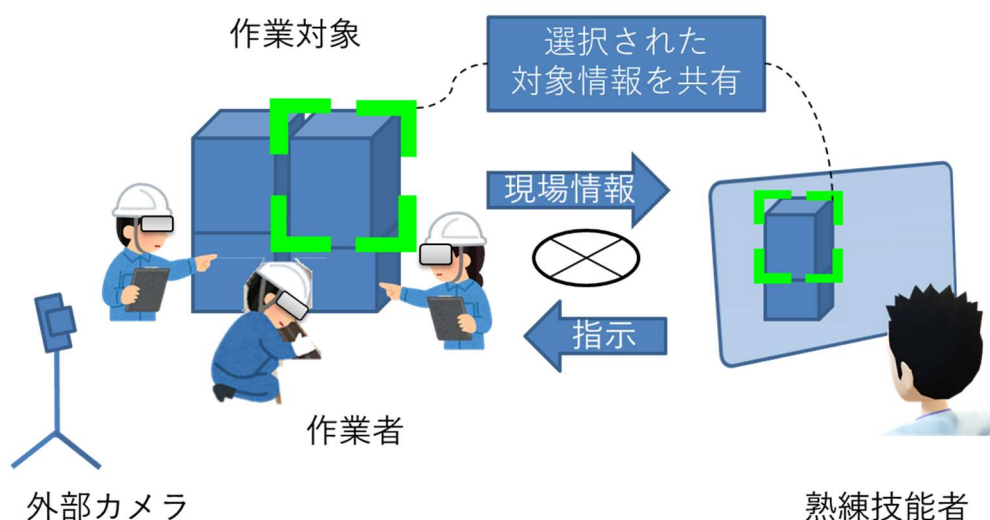


図 34 製造業での遠隔協働作業の例

5.1 ウェアラブルデバイスを用いた遠隔協働作業支援システム

図 35 に著者らが開発中の遠隔作業支援システムの概要を示す[91][92]。小型 PC と接続されたウェアラブルデバイス（カメラ、ディスプレイ）を身に着けた作業側と、遠隔地の指示者側で利用する各 PC にインストールされた Google Chrome 上で動作するソフトウェアを開発し、ブラウザを用いる映像音声送受信の標準プロトコルである WebRTC[93]ライブラリを用いた映像・音声通信で接続している。海外との接続試験や、利用者の心拍計測で、遠隔作業支援システム利用時の利用者への負担に関する予備的評価実験を行い、後述するジェスチャによる情報提示機能によって、利用者の負担を減らせる可能性を検証した[94]。

近年ウェアラブルデバイスが小型軽量化し、モバイル環境で利用できる通信帯域も拡大し、WebRTC などの映像音声通信の標準ライブラリも充実していることから、現場の映像を撮影し、回線経由で送信して遠隔地から見て、作業内容指示は音声で行うというシステムは容易に構築可能となった。しかし、片方向の映像と音声を利用するシステムでは作業効率の観点から限界があることが指摘されており[95]、効率改善のためには、本研究で扱う空間的動作による支援が必要となる。筆者らのシステムでは、空間的動作の伝達のために、遠隔地の指示者が用いる PC 端末にジェスチャセンサー(UltraLeap 社製、Leap Motion) を接続し、指示者の手の形状、動きによるジェスチャをリアルタイム計測、作業側でデータとして送信する機能を有する。作業側端末では受信したジェスチャデータを用いて、ウェアラブルディスプレイ上に、撮像した映像に CG を重ねて表示することによって、指示者のハンドジェスチャによる複雑な作業指示を遠隔地の作業者に送ることができる。作業者のウェアラブルディスプレイ上の画面を図 36 に示し、合成のイメージを図 37 に示す。通常ビデオ会議では伝達しづらい、ハンドジェスチャによる指差し(空間的動作の分類では指示動作)や具体的な手の動き(分類では活動動作)などを伝達可能な構成となっている。すなわち、このシステム内においては「空間的動作」はハンドジェスチャの CG として実現されている。

第 2 章で参照したように、ジェスチャを送信するシステムには複数の提案があり、ジェスチャによる指示の有用性が検証されている。一例では Scavo らは、Unity3D と LeapMotion で構成され、作業者の視野映像に手と前腕の CG を提示するシステムを提案した。熟練者の作業を肩越しに見るような視点で情報を提供できるため、作業の理解や習熟に有用であることを主観評価によって示している[96]。近年では山田らは[97]はジェスチャと画面上へのスケッチを併用で

きるシステムにより、それぞれが単独に利用できるシステムよりも、遠隔協働作業の作業時間が短縮できることを報告している。山田らのシステム等で利用されている、撮影された映像上に描線を重畳して作業者に提示できるスケッチは、本研究の分類では例示子の中の象形動作に分類できる空間的動作である。また、遠隔協働作業とは異なる用途ではあるが、高齢者に対しての AR による情報提示の妥当性を検証した研究の中でも、CG で身振りを表現した情報伝達が高齢者にとっては理解しやすいことが報告されている[98]。

木村ら[99]は CG による身体モデルを用いた教示動作提示方法の効果を検証した研究で、作業者の体と、CG で表現される指示者の体の位置関係が一致することが、部分的な動作の修正や、細かい動作の模倣に適切であることを示している。前述の工場の例のように、製造業などの産業分野では特に細かい動作の理解と習熟が重要である。しかし、遠隔協働作業の中では、常にこの用途に適切な映像が得られるとは限らない。作業者のカメラで撮影した対象物の向きが、カメラの向きに正対していないなど、撮影された映像の条件によっては、作業者が二次元画面に重畳されたジェスチャによって指示される、位置や回転方向を正しく理解できず、作業指示が伝わらないという問題が葛岡[100]によって指摘されている。また、ジェスチャインタフェースをシステムへの情報入力手段として利用するために、対象に関して操作を行う場合に人が自然に行うジェスチャ入力方法を検討した大西らの研究[8]によると、特に、回転操作に関するジェスチャは表現方法の個人差が大きく、曖昧であり

- 回転量を示すか、回転の方向だけを示すかが人によって異なる
- 行う作業として何度も回転させることが必要ではない場合にも、手を回転させる作業を何度も反復して指示する場合がある

等が指摘されている。

ジェスチャによる回転方向伝達の多義性、曖昧性を解消するため、位置や回転方向を示すための機能を持つ、専用の CG を表示するアイコンを利用可能にして、作業指示伝達手段の種類を増やすという方法がある。しかし、図 34 に示したような、多人数が作業する環境だと、外部のカメラも含めた選択肢の中から、適切な指示を行うために必要な映像を選択することがまず困難である、また 1 名のウェアラブルカメラの映像に情報を提示する場合だと、特定の個人にとってしか有用な情報とならないなどの課題がある。また、第 3 章での議論のように、これを全手動のシステムとして構成すると、指示者が適切な指示手段をうま

く選択できず、利用されないなどの課題がある。

これらの課題の解決法として、空間的動作を実現する指示方法を対象物選択で半自動化するための UI を導入する。

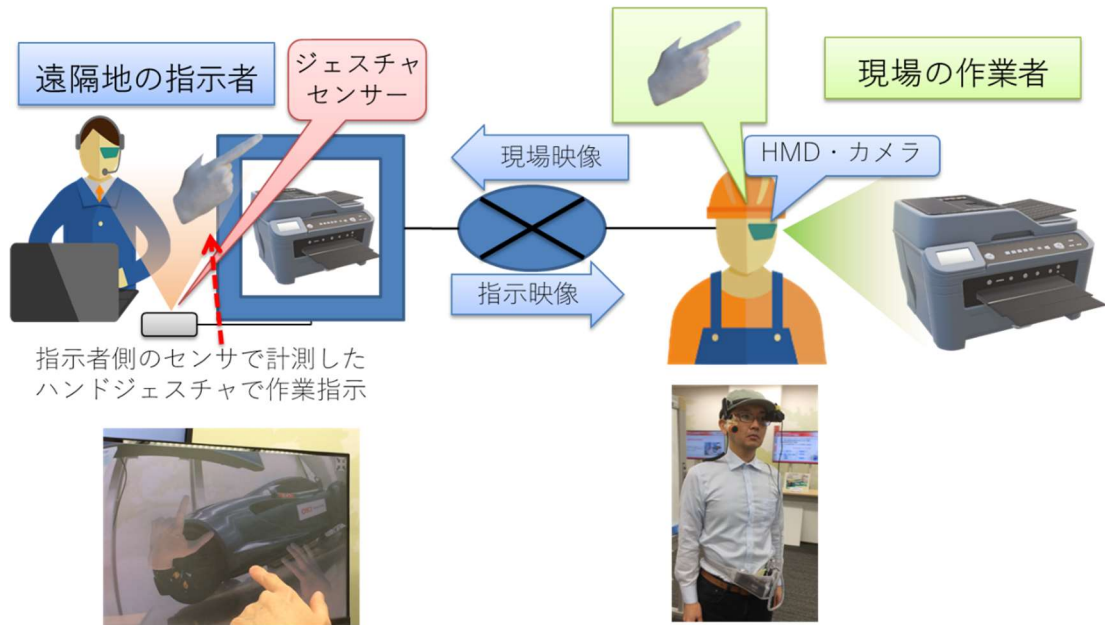


図 35 ウェアラブルデバイスを用いた遠隔協働作業システム

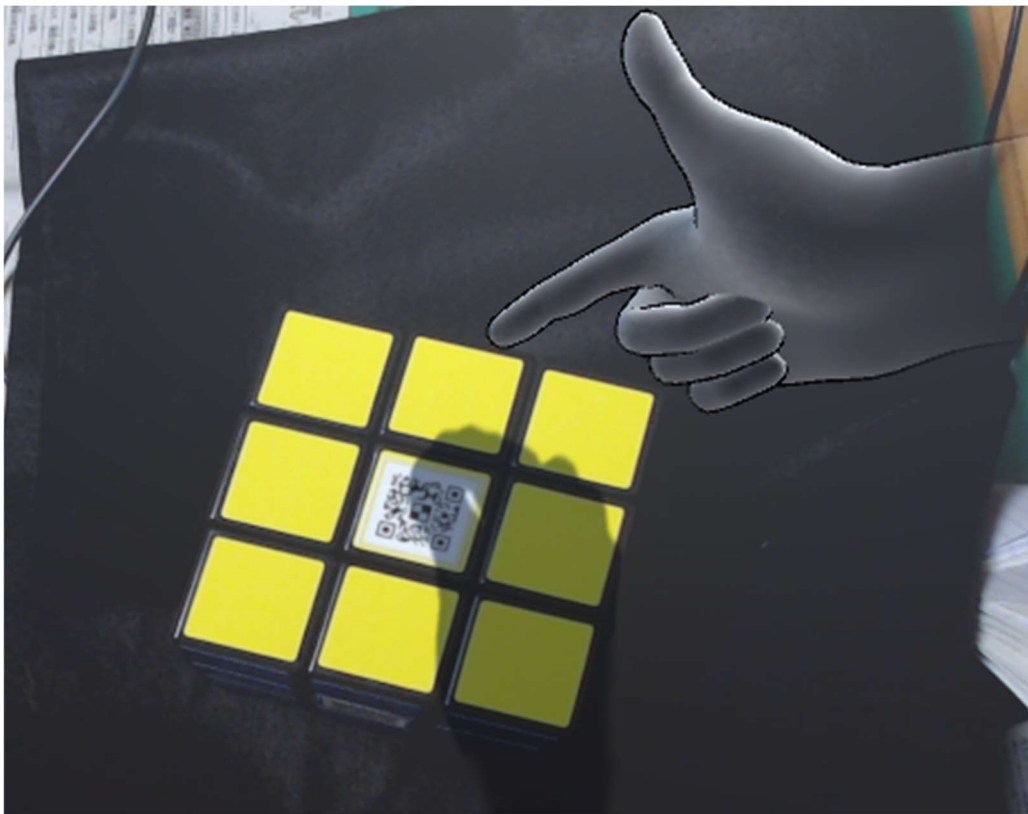


図 36 ハンドジェスチャ CG による作業指示

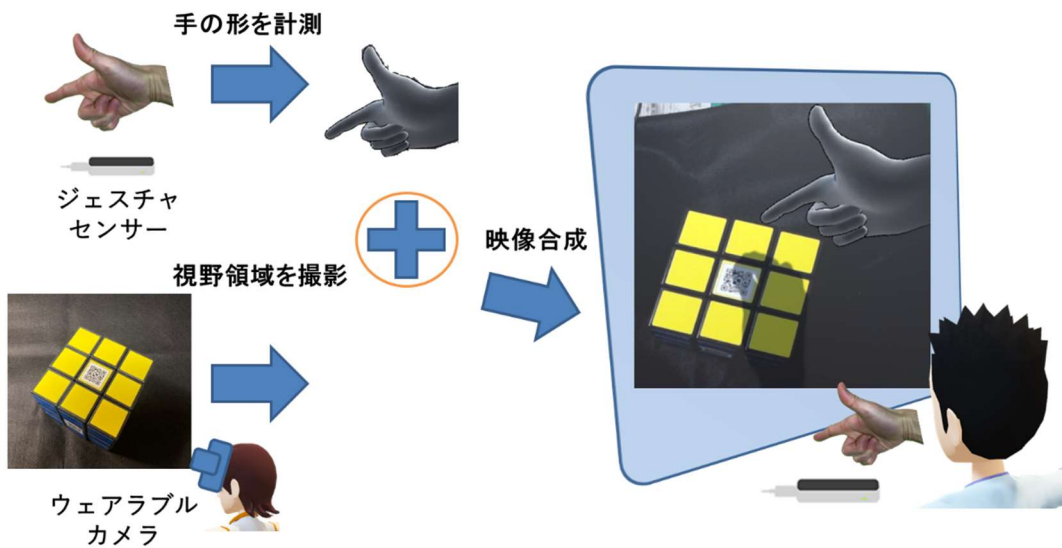


図 37 ハンドジェスチャの合成イメージ

5.2 Manicon による作業指示

図 38 にルービックキューブを作業対象物とした場合の、実現される操作指示イメージを示す。遠隔地の指示者（熟練技能者）から映像と音声で、面を完成させるための作業指示を受け、作業者が対象物を操作する。ルービックキューブは詳細に回転軸を指定したり、回転方向に関する操作を指示したりすることが必要となる対象として、既存研究でも作業対象として利用されており [101][102][103]、本研究でも効果を検証するプロトタイプの対象物体として採用した。

作業指示手段、すなわち「空間的動作」としては、本研究で Manicon(Manipulation Icon)として提案する 3DCG による記号を用いる。これら葛岡[100]によって議論されている内容をもとに検討したものである。3DCG による記号がルービックキューブの位置、姿勢と関連付けられて、画面上に重畳され、指示者はルービックキューブの回転軸や、回転方向を作業者に指示することが可能である。Manicon による情報提示もハンドジェスチャと同様に、本論で定義する「空間的動作」の情報伝達動作、例示子（空間動作、活動動作）の実現例と位置付けられる。

ハンドジェスチャ送信による作業指示の自由度の高さと比較すると、Manicon によって提示可能な指示情報の種類、つまり「空間的動作」の種類が対象物（ここではルービックキューブ）選択によって、制限を受けているが、それによって、ユーザが送りたい作業指示を誤送信するなどの問題が減り、遠隔協働作業がより円滑に行えるようになると考えている。

また、システムはルービックキューブ上の 2 次元マーカを認識し、作業指示の空間内での位置、方向関係を「半自動」で変更、調整するため、カメラと対象の位置関係にずれがある場合にも、指示者がそれを意識せずに、ユーザにとって理解しやすい方向に変更することが可能である。

5.2.1 プロトタイプ実装

3D ゲーム制作環境 Unity と AR ライブラリ Vuforia[104]を用いて、Manicon によりルービックキューブの作業指示を行うことができるシステムのプロトタイプを実装した。ルービックキューブ上に貼り付ける、2 次元マーカのカメラからの認識のしやすさを考慮し、プロトタイプシステムでは立方体の 1 辺が 10cm の大型の Rubik's Cube Bank を対象として用いた。

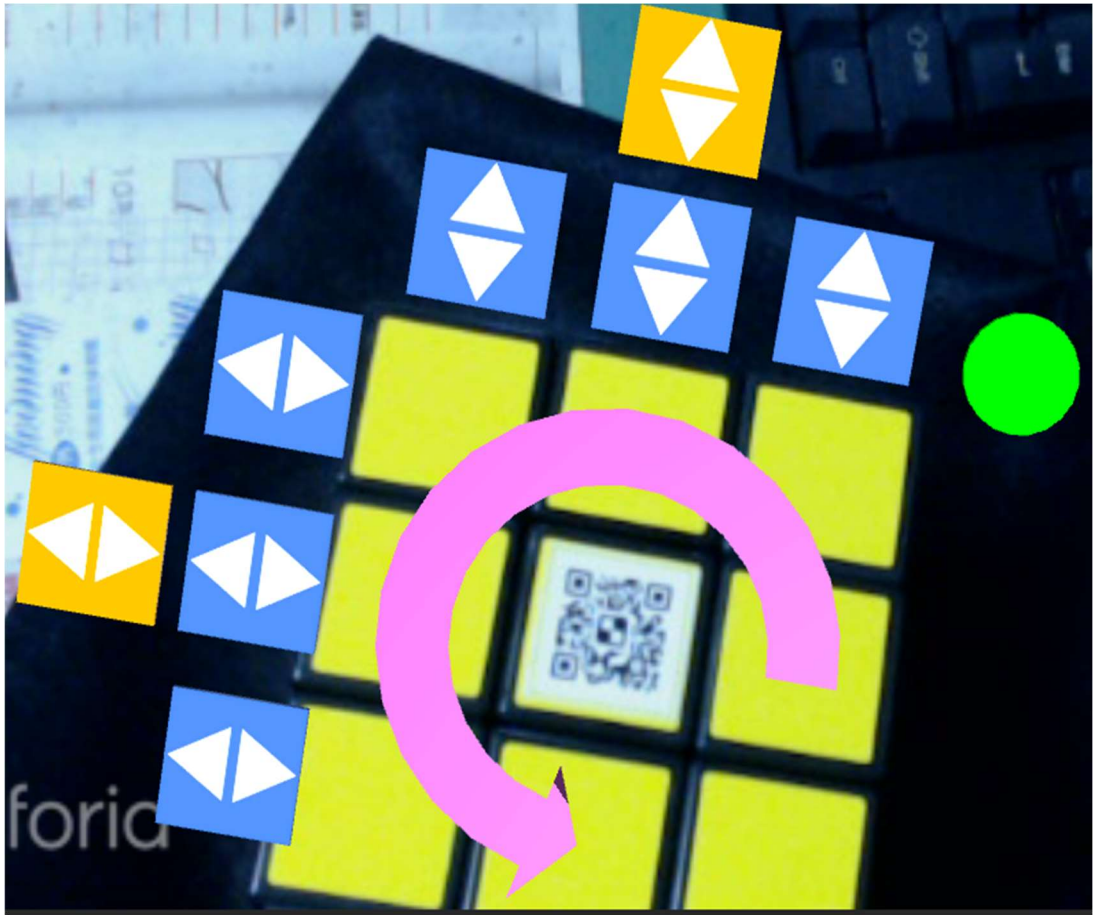


図 38 ルービックキューブに対する Manicon での作業指示

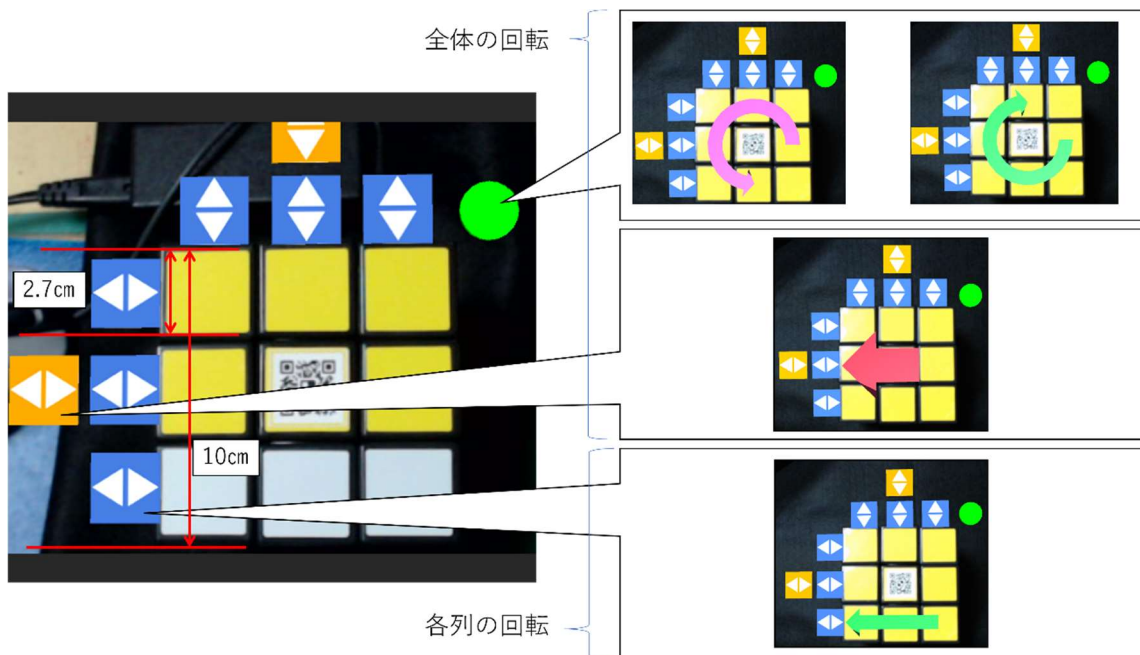


図 39 Manicon による作業指示詳細

作成したアプリケーションでは、PC に USB 接続された Web カメラからの映像を処理し、撮影された 2 次元マーカ（本研究では QR コードで実装）を用いて、ルービックキューブの中心位置と姿勢を認識する。認識された情報を用いて、3 種類、9 個の 2 次元の板状の仮想ボタンを画面上に AR 情報として配置した。作業者に相当するユーザはタッチパネルやマウスクリックで仮想ボタンを押下することで、作業指示を行うための各種の Manicon、3D アイコンを表示させることができる。ボタンと表示される CG の関係を、図 39 に示した。上 2 種類のボタンは、キューブ全体の回転動作とその方向指示であり、最下部のボタンが、各列に対する回転動作の指示となる。現在の実装では、指示回転角度は一律に 90 度と定めている。ボタンを複数回押すことで、作業指示を表示、回転方向を変更、表示停止を切り替えることができる。

5.3 半自動化による効果

本システムの Manicon、3D 記号の表現により、ルービックキューブを組み立てるのに必要な回転方向や回転の量が、記号として明瞭に表現・伝達されるため、ハンドジェスチャや身振りによる場合のような多義性、曖昧さを含まず適切に指示可能であり、またシステムが対象物であるルービックキューブの位置姿勢

を認識し、指示用の CG 記号がその位置、姿勢に合わせて変更されるため、複数人で作業をする場合や、異なる視点からを撮影した場合にも、矛盾しない作業指示を得ることができると考えている。

ルービックキューブという対象物を認識することによって 3D アイコンという「空間的動作」が「半自動的に」制限されるため、ユーザに対する認知的負担が減少する効果が期待できる。指示者側は表示される Manicon の中から、適切な記号を選択するだけで作業指示が伝達できるため、

- 提示された Manicon の選択肢候補の中から選択するだけで作業指示を伝達できるため、適切な作業指示方法に関して前提知識や選定の迷い等が発生しづらい
- 作業者が複数の視点から見ている場合にも、システムが Manicon の表示位置や姿勢を、各視点から撮影された対象物を認識して設定するため、指示者側から指示方法の調整等が不要である(図 40)

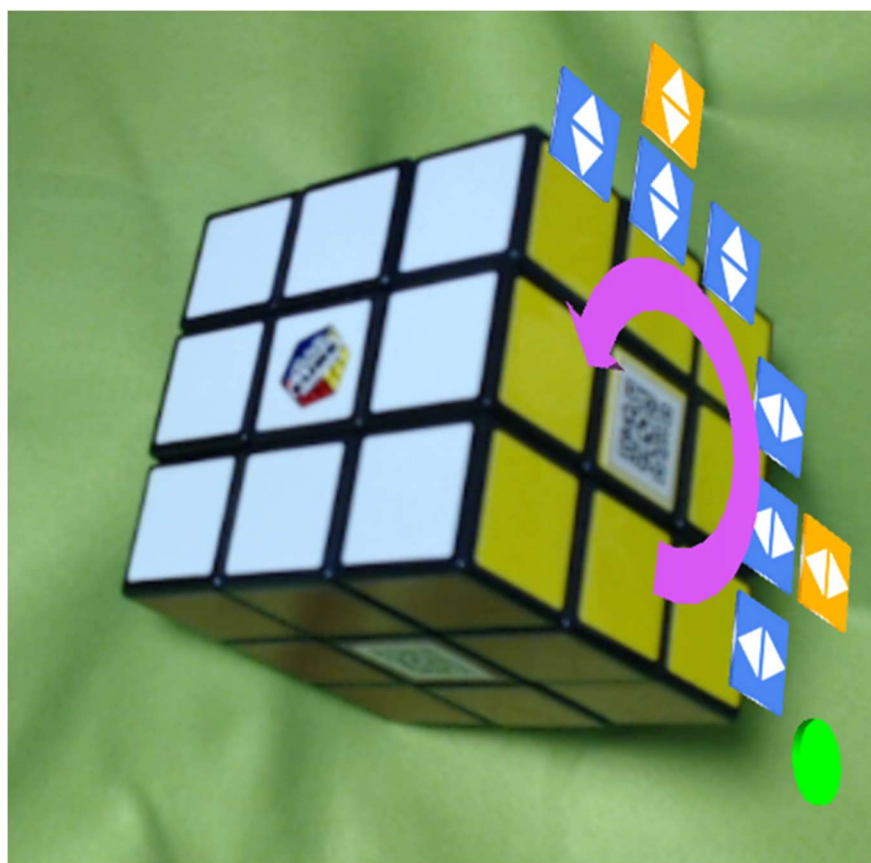


図 40 対象物に正対していない場合の Manicon 表示

また作業側は、

- 回転方向や回転量が、身振りの場合よりも明瞭に理解しやすい
- Manicon の表示内容が対象の画面内での姿勢に合わせて変更されるため、姿勢が変更された場合にも指示内容を理解しやすい

といった効果が得られることが期待できる。

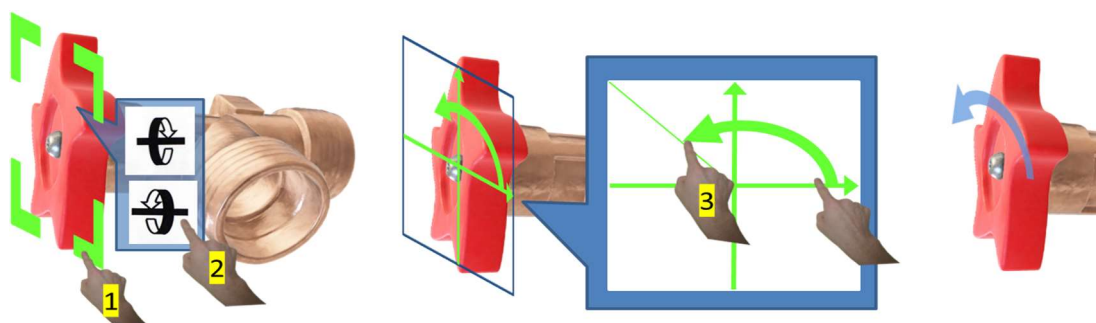


図 41 バルブに対する作業指示のイメージ

本論では、プロトタイプとしてルービックキューブを対象として提案システムの妥当性を論じたが、当然のことながら、産業界での利用形態に近い他の対象物にも応用可能である。図 41 に工場などの産業現場でよく用いられる、回転操作が必要な対象として、バルブを用いた場合のイメージを示した。類似の対象を利用した遠隔協働作業に関する研究も報告があり、バルブを用いたシステムは一般的な作業対象であると言える[105]。図 41 中で作業対象であるバルブのハンドルは、撮影方向に正対していないため、ハンドジェスチャでは回転方向や回転角度の指示が行いづらい。ここに空間的動作の半自動化で、Manicon を利用可能とすると、まず、指示者であるユーザがバルブを対象物として選択する、システムはバルブが参照対象であることを認識し、バルブに対して回転指示を行うための Manicon の候補を二種類ユーザに提示する。ここでは回転方向ごとに別の Manicon が提示されるものとする。ユーザがどちらかを選択すると、回転方向に応じた回転量、回転角度を指定するための UI が提示され、回転量をマウスのドラッグやタッチパネルのスワイプによってユーザが決定すると、最終的に作業側（指示を受ける側）に右端のような回転指示を伝える CG が提示される、というのが利用のイメージである。指示の回転量を具体的に指定したい場合には、数字入力可能なダイアログを別途表示するという構成も可能である。ル

ルービックキューブでの実装と同様に、画面に正対しない物体に対する奥行き方向の回転作業の指示等、ハンドジェスチャだけでは指示が難しい内容を適切に伝達できることが期待できる。

5.1 節で先行研究を引用して説明したように、ハンドジェスチャによる回転作業指示には個人差等に由来する曖昧さが残るが、**Manicon** を利用した入力制限や記号的表現によって、曖昧さを排した正確な作業指示を実現することが可能となる。

5.4 考察

先行研究や、筆者が製造業の工場で行った実験結果からも、ウェアラブルディスプレイ上に指示者のハンドジェスチャを表示する情報伝達手段が有効であることは確認されている。しかし、実験室環境ではルービックキューブの操作、また産業用途ではバルブの操作など、対象物に関する回転操作に関する指示方法を扱う場合、ハンドジェスチャだけでは十分に作業指示を伝達することができない場合があることが先行研究で指摘されている。一つには手の動きによる、回転に関する情報の表現方法が人によって異なること、また表現される動き自体が多義的な解釈を許すため、受け手によって解釈の仕方が異なることなどで正確な伝達が難しいことが理由として挙げられる。また他の問題として、図 34 に例を示したような産業現場では、教育や指示などの目的で、複数人に対して同時に指示を行う必要がある場合があり、その場合、作業者の立ち位置によっては、作業指示に好適な作業対象に正対する映像が得られない場合があり得る。このような場合、指示者の側で作業者の姿勢や状況を把握して、作業指示を手動で変更することは難しく、また、作業者の側でも、指示者が誰のカメラ、または外部のカメラで取得された映像に対して指示を行ったのか、つまり指示者が実際にどのような意図で指示を行ったのかが理解しづらい場合がある。

この課題を解決するために空間的動作として **Manicon** を提案したが、システムでハンドジェスチャと **Manicon** が利用できたとしてもユーザがそれを自身で判断して切り替えながら指示をするのは同様に難しい可能性が高い。本研究では、半自動化によって、上記の問題が解決する可能性を示した。ルービックキューブという対象物が参照されることで、適切な指示情報となる空間的動作、すなわち **Manicon** による指示が選択可能となること、また、画面の中で対象物が AR マーカによって認識され、その対象物の位置姿勢に対して空間的動作が重畳されて 3 次元的に表現されるため、対象物が画面内で姿勢が変化した場合でも、

指示者の意図通りの情報を得ることができる。

5.5 まとめ

本章では、ロボットによる「空間的動作」以外に、ウェアラブルデバイスなどに表示される CG を空間的動作として利用可能な遠隔協働作業支援システムにおいても「半自動化」の設計指針が有用であることを、リアルタイムな CG で表現されるハンドジェスチャを送信可能な遠隔作業支援システムと、ルービックキューブを対象物とする、Manicon による作業指示システムとを題材に論じた。

半自動化による Manicon 提示システムのプロトタイプ実装により、ルービックキューブという対象物が参照されることで、適切な指示情報となる空間的動作、すなわち Manicon による適切な指示のみが選択可能となること、また、画面の中で対象物が AR マーカによって認識され、その対象物の位置姿勢に対して空間的動作が重畳されて 3 次元的に表現されるため、対象物が画面内で姿勢が変化した場合でも、指示者の意図通りの情報を得ることができることを検討、議論した。すなわち 1 章で述べた課題 1、2、3 に関して半自動化による効果が得られる可能性を示した。つまり、対象と関連付けて、対象に必要な動作のみを操作する専用の GUI を提供し、カメラ位置がジェスチャ表示には好適でない場合でも空間的動作の伝達操作を容易にし（課題 1 に対応）、ジェスチャと比較して多義性、曖昧さが少ない、つまり伝達されやすい 3D 記号、Manicon という形式で動作を実現する（課題 2 に対応）、これらの課題解決手段によって利用者が感じる作業負担を低減できる（課題 3 に対応）。本章ではこの議論提案する空間的動作の半自動化が、ロボット操作だけでなく、遠隔作業支援システムにも有効な指針となりうることを実装と議論によって確認した。

第6章 考察

本研究では遠隔協働作業を支援するシステムについて、「空間的動作の半自動化」という提案を行い、ロボット操作、CGによる作業指示を対象とした評価実験や実装に関する議論で提案が有効であることを確認した。以下では各章の内容を振り返りながら考察を加える。

1章の背景の説明で、遠隔協働作業が注目されている理由として、熟練者の負担軽減が必要であること、コロナウイルス禍で現場への移動に制限があることなどを挙げたが、現状の課題に対応するだけでなく、遠隔協働作業を導入することによるポジティブな効果も期待されている。図42左に例を示したが、これまで熟練者の現場への移動、到着を待つ必要があった作業を、熟練者が移動せずに遠隔で支援して並列で作業を進めることを可能とし、顧客へのサービス提供までの時間を短縮することにも期待されている。また、右に示したように製品の設計を担当する設計者と、製造を担当する製造担当者が遠隔協働作業支援システムにより遠隔で連携が可能となると、工場が所在していることが多い地方では雇用が難しい、都会に在住している優秀な設計者を転居等の負担をかけずに雇用することも可能となり、設計者側も工場の所在に縛られずに、業務を進めることができるという点でメリットがある。実際に本研究の中で言及した例は限られているが、遠隔協働作業の適用先や利用可能な領域が非常に幅広いことは明らかである。

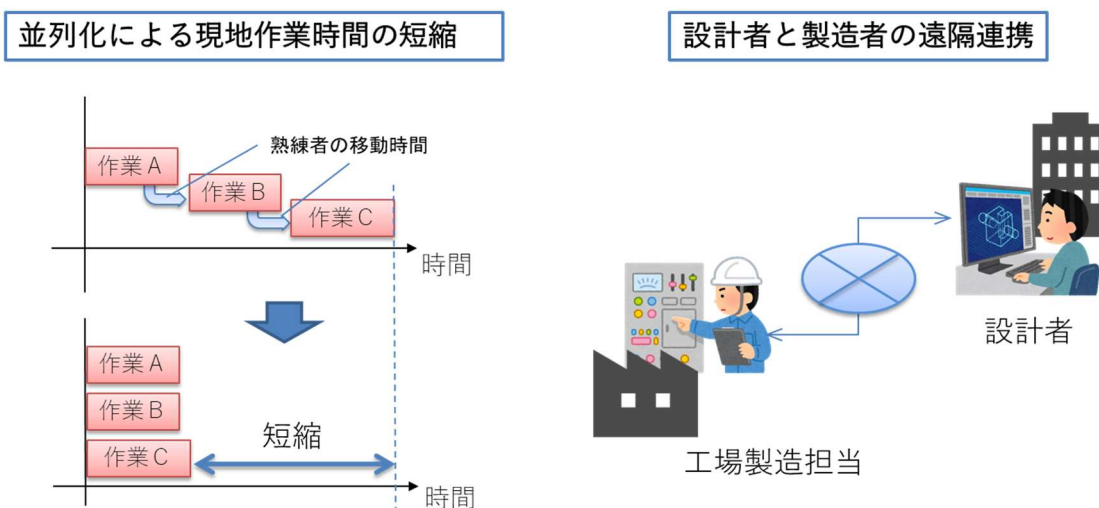


図 42 遠隔協働作業の導入によるポジティブな効果

2章では関連研究を引用しながら、遠隔協働作業を円滑に進めるためには、本研究では空間的動作と呼ぶ、空間に関係する動的表現の重要性を確認した。空間的動作の形態は多様である、これは先に考察したように、遠隔協働作業の利用される領域や分野が多様であり、必要とされる空間的動作も多様であるからである。しかし、遠隔協働作業システムでただ多様な空間的動作を利用できるようにすれば問題が解決できるとは限らない。本論の中では、空間的動作の利用にかかわる課題を3つ挙げ、その解決が重要であること、その解決に半自動化という設計指針が利用できることを論じた。

3章では遠隔会議の事例から、遠隔協働作業における空間的動作の表現の重要性に着目し、中でも小型ロボットによる注意喚起能力について実験で検証した。ロボットの移動による注意喚起能力が高いことは実験で確認できたが、実際の遠隔協働作業の中で、ロボットの空間的動作で注意喚起能力を活用することは困難であることを2章で述べた課題と関連付けて論じ、その解決手段として、空間的動作の半自動化を提案した。半自動化とは、利用者に参照すべき対象物体を選択させ、その選択内容によってシステムが状況を間接的に推定して、状況にふさわしい空間的動作を利用しやすくするための支援を行う枠組みである。

ここで半自動化を別の観点で見ると、システムはユーザの選択した対象物から現在の状況を間接的に推定して、システムが現在の状況で利用するのが望ましいと判断した空間的動作の「推奨」をユーザに対して行っていると考えることもできる。なぜなら、空間的動作の操作や表現の変更等の前に、ユーザは多くの場合複数の候補の中から、どの空間的動作を利用するかをまず決定する必要がある、そのこと自体も困難である場合があるからである。3章、4章で扱った小型ロボットは、車輪とパンチルトカメラを有しており、それらの要素がユーザから直接操作可能な要素であった。このように比較的単純なロボットであり、操作可能な要素、すなわち空間的動作が少なくても、ユーザが全手動で適切に操作し、遠隔作業を支援する効果を得ることは困難であることは3章で論じた。そのため、さらに多種多様な空間的動作が表現可能なシステム(図43にイメージを示す)をユーザに提供しても、空間的動作を適宜使い分けることはユーザにとって非常に負担が大きいと考えられる。タイミング等が重要となるリアルタイムなコミュニケーションでは、システムの支援なしにそういった操作を行うことは困難であることが予想される。半自動化は、ユーザが参照する、すなわち関心を示す対象物の入力に基づいて、現在の状況を把握し、状況にふさわしい空間的動作を多数の選択肢の中から、ユーザに推奨、制限して提供する枠組みであ

る。システムで利用できる空間的動作の種類が増えるほど、「半自動化」の有効性や必要性は高まると考えられる。

4章では空間内でのロボットの移動による情報収集動作について論じた。本研究で対象としたのは、3章に続き、車輪機構とパンチルトカメラ、という比較的単純な構造のロボットであった。このロボットについては半自動化の効果を実験で確認することができたが、より複雑な構造のロボットを用いた場合にも同様の効果が得られるかについては今後検証が必要である。

本研究では、ロボットの情報収集とは搭載されたカメラによる空間や対象の撮影に限られたが、ロボットの用途によっては、搭載されるセンサが異なることは考えられ、センサの性質によっては、参照される対象物が同じであっても、ロボットが行うべき動作、本研究例の場合では移動経路が異なるなどの可能性があるため、用途を拡大する中で検討を要する事項である。



図 43 多様な空間的動作を利用できるシステムでの課題

5章では作業対象に対する操作指示を伝達するためのシステムで、CGを用いた情報提示を扱った。リアルタイムなハンドジェスチャのCGによる作業指示の課題を提示し、それを解決する手段として、Maniconを提案、またManiconの利用に関する課題を解決するために半自動化の設計指針を用いた。

本研究の中ではManiconによる静的な動作指示を扱ったが、例えば物を移動させる指示を動的なアニメーションで指示するなど、利用する3DCG記号を設定した後に、その移動範囲等を指定、変更する必要があるような場合が考えられる。この場合に、4章のロボットの移動経路の制限で行ったような移動動作の制限等をCG記号に対しても行う必要性が発生する可能性がある。CG記号に対する動作制限を、対象物との関係で適切に加えるためには半自動化の指針が有

用になるはずである。

また、産業での遠隔協働作業支援においては、遠隔地に道具の利用方法をリアルタイムの CG で提示してほしい、などの要望もあり、ハンドジェスチャによる情報提示方法を変更し、現在手形を表示している CG を作業対象物に合わせて、必要な道具の形状に変更するなどの展開も考えられる。ここにも作業対象を指定して、対象物との関係で表現を変更するという半自動化の指針が利用できる。

半自動化によるシステムの設計ガイドライン

本研究では、複数種類の遠隔協働作業に対し、空間的動作を半自動化するシステムを提案、実装してきた。ここでは提案、実装を行った際の知見から、提案する半自動化による空間的動作を用いるシステムを設計する際に利用できるガイドラインを示す。以下の手順に従うことで、決定すべき内容が複雑な場合にもシステムの設計を進めることができる。

1. 遠隔協働作業で共有する対象物体を選定
2. 必要となる空間的動作を選定
3. 対象物と空間的動作を対応付け（半自動の設定）
4. 空間的動作の操作の詳細化
自動的に動作する内容とユーザが操作すべき内容の区別、操作に対する制限の設定
5. 操作内容ごとの UI 設計、または既存の UI を割当て

まず、システムが支援する遠隔協働作業で作業対象となる物体を選定する。本研究で対象とする遠隔協働作業は空間に存在する物体を扱うことを特徴とするため、何らかの対象物が定義できる。第 5 章で説明したバルブやルービックキューブは典型的な対象物の例であるが、第 3 章で述べたように、会議空間に存在する作業参加者自体を対象物とすることも可能である。次に、伝達する必要がある空間的動作を選定する。すなわち第 2 章で整理した空間的動作の中から、作業内容に関係して伝達が必要なものを選択する。さらに、選定した対象物と空間的動作を対応付ける。本研究で扱う空間的動作は対象物への参照を行うものであり、対象物と動作の対応付けは容易に行うことができる。引き続き、空間的動作を詳細化する。この過程で、システムが自動的に動作させるべき内容、ユー

ザが操作すべき内容、ユーザの操作に対する制限等の設定を行う。最後に、操作内容を実現するために必要な操作内容ごとに UI 設計を行う、または既存の GUI などの UI から操作を行うために適した要素を選択する。UI 設計、GUI の割り当ての際には、空間的動作に必要とされる詳細さ、精度を確認することが重要となる。例えば第 5 章で扱ったバルブに対する空間的動作、例示子で回転を指示する動作は、具体的な回転角度に重要な作業情報が含まれているため、正確に角度を指定するための入力が必要となる場合がある。第 5 章で説明したようにドラッグによる指定の他に、ユーザが利用可能な UI としてキーボードからの入力を可能にするなどの対応が必要になる。

ここで述べたガイドラインにより、必要なシステムを定義し、空間的動作を半自動化するシステムの設計ができるが、最も重要なのは 1. の共有する対象物体の選定である。実際の空間の中に多数ある物体の中から、協働作業の中で注目、共有されるべき対象物を絞りこんで決定することで、対象物に関連付けて、伝達する優先度の高い空間的動作を明らかにできるからである。

本提案の未解決課題

本研究では複数の応用例で、空間的動作の半自動化の有効性を議論、一部は実験によって確認してきたが、現在の提案システムで解決できていない課題には下記のようなものがある。

課題 1. 作業に伴う対象物の動的な変化や、内部状態を反映できていない。

提案システムは、参照する対象物を利用者に指定させて、空間的動作を半自動的に選択、制限、変形するようなシステム構成となっているが、遠隔協働作業を進める中で、対象物の外形や内部状態に変化があった場合に、半自動化処理の内容を変化させる、ということが現時点ではできていない。

具体的な例として、製造業での利用で、何らかの装置を協働で組み立てるような作業を行う場合を考える。この場合、装置が対象物となるが、組み立てられていく過程に従って、装置の形状や動き等が変化すると、必要とされる空間的動作が変化していく可能性がある。しかし、現時点のシステムでは、空間的動作が時間や状態に伴って変化するという構成にはなっていない。また、装置の状態、例えば装置の温度や装置のシステムの内部状態など、システムがビデオ映像などからは取得することができない情報に、空間的動作を半自動化するために必要な情報が含まれている場合があるが、これも現在のシステムでは扱うことがで

きていない。

AIによる画像認識システムがさらに発展して、撮影された映像の中に映っている対象物である装置の形状や動き等を正確に認識することができるようになれば、推奨される空間的動作を半自動的にその状態にふさわしい内容に変更することは可能となるだろう。また、内部状態を取得することができるIoTセンサとシステムを連携させ、空間的動作を変更するのに必要な装置の内部状態を利用することも同様に実現が可能となるであろう。

課題2. 適切な空間的動作の制限、変更等の設定は人が行う必要がある。

対象物が指定された場合に、システムが空間的動作に対して行う半自動的に処理の詳細内容の設定は、現時点では人間が行うことを前提としている。これは手間を要する作業であり、システムの利用範囲の拡大の妨げとなる課題である。ここで述べる必要作業とは、具体的には4章のロボットによる情報収集動作の半自動化の例で、対象物を指定されたときに、ロボットがその上だけを移動可能となる仮想的なレールの形状の設計等である。ロボットの移動経路の形状を容易に編集、指定可能なエディタを設計し、入力に関する労力を低減することは重要だが、ほかにも、すべての対象物に対して、一から経路を登録させるのではなく、AIを利用した画像に対する一般物体認識技術[106]、言語の分散表現[107]を用いた類似度検出技術などと組み合わせ、すでに仮想的な経路が関連付けられた、登録済みの対象物と類似性が高いと判定された対象物の場合には、同様の制限、変更を関連付けるようシステムが提案するなどの仕組みを用いることで、すべて人力で対応するよりも少ない労力で、システムを利用できるようになる。

図44に例として、画像認識AI技術を用いた場合の、対象物認識とその後の空間的動作の候補をユーザに推奨、提示するまでのフローを示した。ここでの空間的動作は、5章のManiconのようなCGを用いた作業指示であることを前提に説明する。図中のデータベースは2種類、DB1は登録された物体の名称と、物体を参照するのにふさわしい空間的動作を対応付けて格納するものである。DB2は別のデータベースであり、物体の名称を分散表現として格納している。DB2を名称で参照すると、その名称と意味的に距離が近い名称を得ることができる。具体的な動作としては、作業対象を撮影したカメラの映像にAIによる一般物体認識機能や顔認識機能を導入し、映っている映像の中の対象物を認識して、何、または誰が映っているか(物名称)、画面の中でどのような位置、姿勢にあるかを常時検出する。ユーザが参照する、すなわち指示を送る対象物を選択すると、検出されている物名称を用いてDB1を検索し、物名称が登録されてい

れば、空間的動作提示するための UI を検出された位置に関連付けて提示する。提示される UI にはシステムが利用できるすべての空間的動作ではなく、登録されている物体にふさわしい空間的動作のみが半自動的に制限、すなわち推奨されて、優先的に表示される。もし DB1 に物名称の登録がない場合には、DB2 を検索し、物名称に類似度が高いとされる別の物名称を得ることができるので、代わりに得た類似物の名称を持ちいて、DB1 を検索して類似物の参照に適切な空間的動作を得ることができる。これにより、すべての物体に対して空間的動作を人力で定義しなくても、類似した物体の空間的動作を利用できるようになり、半自動化による効果をより多くの対象に対して利用することができる。

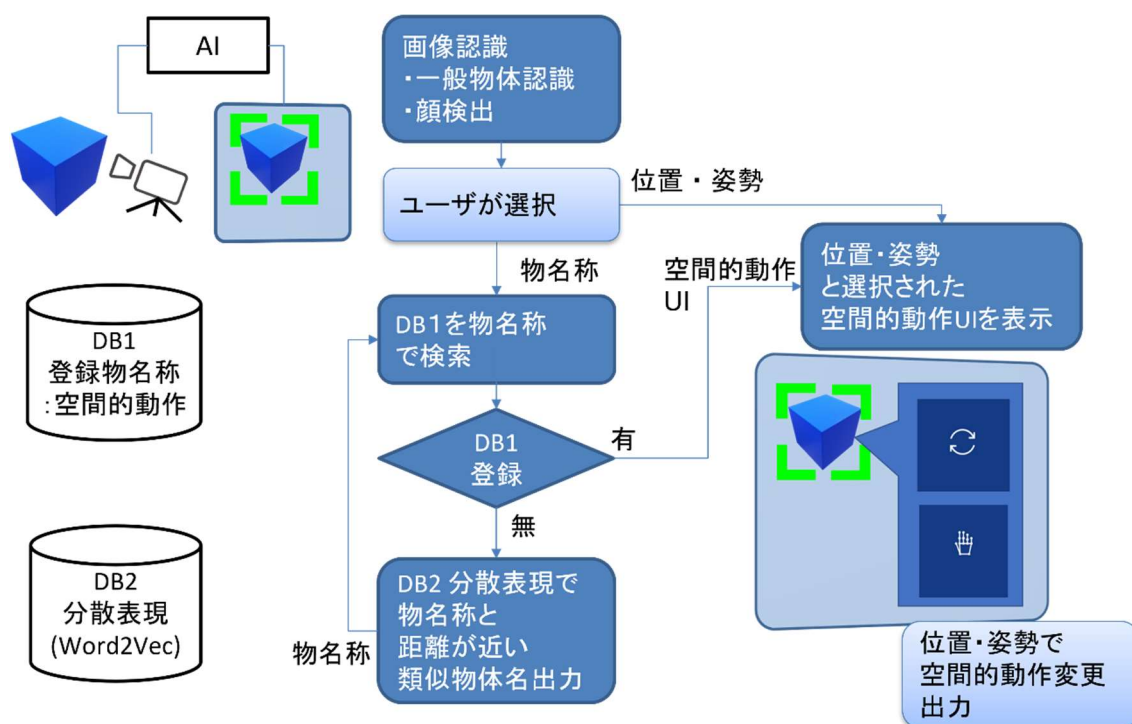


図 44 AI による半自動システム実装のフロー

課題 3 半自動化による推奨が適切でなかった場合に対応する必要がある。

利用者による対象物選択によって、利用を推奨される空間的動作が必ずしも適切でなかった場合、ユーザは結局自分自身で空間的動作を選択して、手動で操作して利用する必要がある。このような場合には、システムはユーザの利用履歴等から情報を得て、選択された対象物と結び付けられる空間的動作の内容を更新するなどの処理が必要となる。先に述べた AI 利用による未登録の物体への対

応はその一つの例だが、ユーザの空間的動作の利用履歴から個人ごとのカスタマイズを行い、次回利用時には更新された、実際にユーザが利用した空間的動作を推奨するなどが考えられる。また、集合知の考え方を応用して、同様にシステムを利用している他のユーザの利用状況に関する情報を用いる等も、検討すべき事項である。

課題 4: 本論で対象外とした空間的動作についても伝達が必要となる場合がある。

第 3 章で空間的動作の整理を行った際に、Ekman の先行研究を基に分類した情報伝達動作のうち、情感表示や適応子、例示子の中でもボタンや思考動作、リズム動作は本研究の中では扱わないものとした。これは、産業応用上の優先度が必ずしも高くないためと判断したためであるが、遠隔協働作業の内容や目的によっては提示が必要な場合も考えられる。以下では情感表示、つまり感情の表現について議論する。

Marks[108]らは、テレコミュニケーションサービスや修理業務を行うチームは、顧客等との関係のなかでストレスを抱えやすい状況にあり、メンバーの感情伝達や感情マネジメントが適切に行われないと、メンバーがストレスを増加させ、チームワークが機能せず、作業パフォーマンスが悪化するなどの影響を指摘している。また、通常の遠隔協働作業遂行の中でも感情の伝達が必要となる場合がある。例えば、指示を受けた作業者が伝達された作業内容を正しく理解でき、確信をもって作業を行うことができたのか、逆に理解が不十分で不安を感じながら作業を行ったのかを把握する場合などである。不安を感じた動作を詳細に確認することで、誤りを早く検出して作業品質を高めるなどの効果が期待できる。空間を共有して作業指示を行う場合には、指示者は作業者の表情等から状況を適切に判断できる場合もあるが、遠隔の場合には特に難しいため、システムがこれらの情感表示を空間的動作として扱い、伝達を支援することが必要となることがある。本研究では、空間的動作の利用に関して、ユーザの能動的な操作を一部必要とする「半自動化」の方針で対応することを提案してきた。しかし、こうした情感表示を遠隔へ伝達する場合には、半自動による方針は適切でない可能性がある。情感表示はリアルタイム性が重要となるため、作業中にユーザに感情状態を手動で入力させる適切な入力手段を設計することが難しく、また半自動化で重要となる具体的な「作業対象」を設定することも困難であるためである。

情感表示に関しては、システムが自動で伝達することが適切である可能性があり、これは半自動システムと併用可能である。例えば、[94]のように遠隔協働

作業の指示者、作業者がバイタルセンサを装着し、装着者の心拍等をセンサで計測し、心拍データから推定した感情等を遠隔地に提示するなどの方法である。ジェスチャや CG 等による半自動の空間的動作は使いながら、感情に関する表現はユーザの操作なしにシステムが自動的に伝達する。自動システムに必要な応答性や情感表示の具体的な表現方法、つまり空間的動作としての実現形態については今後検討を要する課題である。

課題 5. リアルタイム性が重要となる空間的動作には適さない場合がある。

課題 4 と関連するが、本研究で扱う空間的動作は、基本的にはユーザ、特に遠隔協働作業を支援する指示者が、意図に基づいて操作入力を行うことで伝達される構成としているため、送受信タイミングが極めて重要となる伝達に関しては適さない可能性がある。対応策も課題 4 と同様であり、センサの導入とセンサ出力を用いて、空間的動作を自動的に送信するシステムを導入することで対応の可能性はあるが、産業上で応用するためにはセンサのコストやセンサを身に着ける必要がある作業者の身体負担等にも考慮する必要がある。

遠隔協働作業以外への応用

本研究では遠隔協働作業を対象として議論してきたが、空間的動作の半自動化という設計指針には、遠隔協働作業以外にも有用なユースケースがあると考えられる。図 45 にドローンの操作に半自動化を応用したイメージを示した。

空中撮影に利用されるドローンは 3 次元空間内を自由に飛ぶことができるため、移動や姿勢の変更に関する自由度が高いが、自由度が高すぎることで操作を困難にしている。4 章で論じた情報取得動作に対する半自動化システムと同様の構成で、ドローンと対象物を撮影する外部カメラをシステムで利用し、ユーザが対象物を選択することで、ドローンが対象物を撮影するのにふさわしい軌跡を CG で可視化し、またその軌跡以外は移動できないように動作を半自動で制限することができる。これにより、通常操作の習熟に時間を要するドローンによる撮影を、比較的簡単に初心者でも行うことが可能となることが期待される。

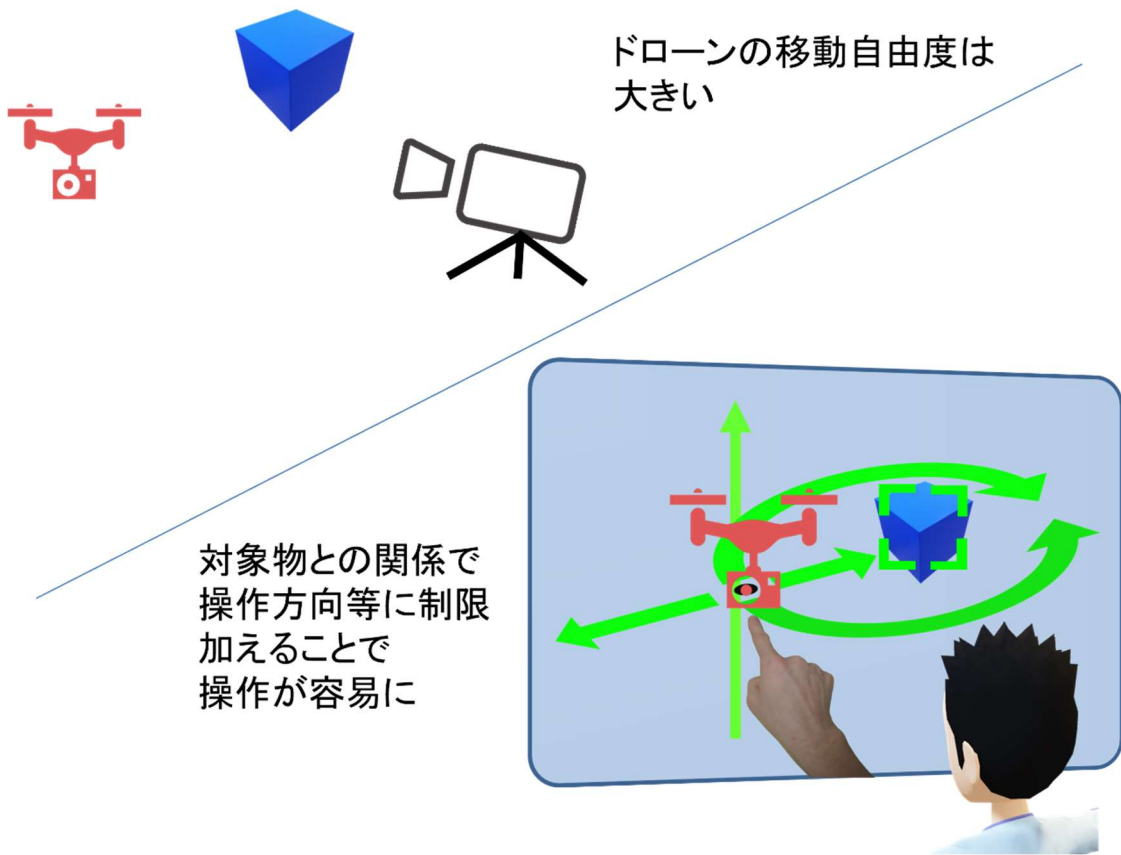


図 45 ドローン操作に半自動化を応用したイメージ

第7章 結論

本論文では、まず、産業分野で遠隔協働作業を支援するシステムが必要とされている背景について述べた。また、関連研究により、遠隔協働作業支援においては対象物（作業対象や、協働作業への参加者も含む）を参照する情報の伝達が重要であり、遠隔協働作業支援で、作業環境の情報を取得するため、参加者の注意を喚起、誘導するため、また作業指示を正確に伝達するために、ロボットや、CGにより実現される「空間的動作」が必要であることを論じた。

本研究では Ekman らによるノンバーバルコミュニケーションの身体動作に関する分類を利用して、遠隔協働作業を支援するシステムが伝達すべき空間的動作を分類した。さらに、これらの空間的動作を利用して、遠隔協働作業を円滑にするためには、以下の課題があることをまとめた。

課題 1. 空間的動作の遠隔操作が困難である

課題 2. 空間的動作の伝達が困難である

課題 3. 課題 1, 2 で生じる認知的負荷によって、遠隔協働作業に悪影響がある

これらの課題に対して、本論文では「空間的動作」の「半自動化」という設計指針を解決案として提案したが、課題およびその解決案は、具体的にオフィス内での実際の遠隔会議状況の情報の観察結果とその後の実験、および関連研究から洞察を得たものである。

まず、空間的動作の分類の中で、情報伝達動作の調整子、なかでも注意喚起能力に着目した。注意喚起は情報の受け手に、情報伝達したい意図を伝える役割を持ち、協働作業のきっかけを作る重要な機能であるためである。遠隔会議で利用するカメラの動作で、参加者の注意を喚起している事例を観察し、遠隔操作ロボットと位置付けられる、遠隔地から操作可能なカメラの空間的動作によって、参加者の注意を喚起できるが、その効果は限定的であることを論じた。そこで空間的動作の注意喚起力を高めるために、ロボットに移動機能を追加する提案を行い、車輪付きロボットの全身による移動と、カメラ姿勢変更によって、注意喚起に関する効果が異なることを評価実験で確認した。

しかし、前述した課題によって、現在のシステムのままでは、遠隔協働作業中に実際に空間的動作を利用しその効果を得ることは困難だと考えられた。そこ

で、課題を解決して、空間的動作を活用し、遠隔協働作業を円滑に進めるために「空間的動作の半自動化」という設計指針を提案した。さらに、全手動システム、全自動システムとの比較によって提案をより詳細に論じた。加えて、提案指針に基づいて、会議参加者の注意喚起を行うロボット動作を利用可能とする実現する UI 案を提案した。

続いて、他の空間的動作の活用にも半自動化の指針が有効であることを検証するために、以下のシステムを実装し、一部を評価実験によって検証した。情報伝達動作と同様に重要な空間的動作である情報収集動作を対象とし、カメラと車輪を有する小型の遠隔ロボットの移動、撮影動作を支援する操作 UI を提案、評価実験で作業完了時間を短縮、主観評価で、利用者の認知負荷が低減できることを確認した。

さらに、より複雑な情報伝達動作を対象とし、ウェアラブルデバイスと CG を利用して空間的動作の表現が可能な遠隔作業支援システムを半自動化指針に従って設計し、「空間的動作」を操作するシステムとその UI を実装した。

システムからの支援、つまり対象物選択による「半自動」での「空間的動作」の制限や変更によって、課題を解決して空間的動作を利用して、協働作業時間を短縮、主観的評価で計測する認知負担を改善することができるシステムを提案し、実験結果によって有効性を議論した。

最後に、現在の提案では解決できていない課題や、それを将来的に AI 技術等を利用して解決する将来システムの提案を行った。また、「半自動化」の設計指針が、ドローン操作など、遠隔協働作業以外にも応用可能性があることを示した。

以下に各章の結論をまとめる。

第 1 章

高齢化等で生産年齢人口が減少しているなどの理由で、産業分野で遠隔協働作業を支援するシステムが必要とされている。遠隔協働作業を円滑に進めるには、ロボットや CG を用いて、実際の空間や物体を参照する情報の伝達などが必要となる。本研究ではこれらを総称して空間的動作と呼ぶ。しかし、これらの空間的動作を利用して、遠隔協働作業を円滑に進めるためには課題があり、これらを解決する指針が必要となる。

第 2 章

実空間を参照する遠隔協働作業支援の先行研究は多種多様な提案がなされて

いる。空間的動作という観点から、ロボット技術や、CG を用いた遠隔協働作業支援システムとシステムに関連する研究について整理し、遠隔協働作業を支援するシステムの普及のために解決が必要となる課題について述べた。

空間的動作を情報収集動作と情報伝達動作の 2 つに大別し、情報伝達動作に関しては、Ekman らによる先行研究を用いて整理した。

第 3 章

本研究で提案する、空間的動作に関する課題を解決する「半自動化」について説明した。

基本的な空間的動作として重要であること、また実際の遠隔会議の観察などから、遠隔会議で小型ロボットを動作させることで得られる「注意喚起」機能に着目した。また、小型ロボットの「注意喚起能力」を評価する実験を行い、ロボットに実現できる動作の違いによって、具体的には全身運動と、頭部カメラ部分の動作の違いによって、注意喚起の効果が異なることを確認できた。

実験結果から空間的動作に関する課題を整理し、ロボットを導入するだけでは遠隔協働作業で空間的動作を利用することが難しい点について、課題と関連付けて論じ、課題に対して半自動化という設計指針で対応可能であることを主張した。

空間的動作の半自動化とは利用者に参照すべき対象物体を選択させ、その選択内容によってシステムが状況を間接的に推定して、その状況に基づいて、空間的動作を利用しやすくするための支援を行う枠組みである。

遠隔協働作業における空間的動作の半自動化について、全自動、全手動の遠隔協働作業支援システムとの比較を行い、全手動システムよりユーザの負担が少なく、全自動システムより実現性が高いことを論じた。

さらに、遠隔会議で注意喚起するための UI 案を半自動化指針に基づいて提案した。

第 4 章

「空間的動作の半自動化」の「情報収集動作」への応用として、遠隔操作ロボットの操作インタフェースに半自動化を導入した。カメラを搭載した小型ロボットの情報収集動作を、半自動的に制限するシステムを実装し、実験によって、操作が容易になり作業時間を短縮できること、ユーザの心理的な負担を軽減できることを確認した。

第5章

「空間的動作の半自動化」の「情報伝達動作」への応用事例として、CGを利用する遠隔作業支援システムに半自動化を導入した。まず、ハンドジェスチャを送信可能なウェアラブルデバイスを用いた遠隔作業支援システムについて述べた。ハンドジェスチャは「情報伝達動作」の一つだが、カメラによる撮影方向や回転指示を伝える必要があるなどの条件によっては、作業内容の詳細伝達が困難になる場合があるという課題があることを先行研究に基づいて議論した。この問題を解決する手段として、Manicon と呼ぶ 3DCG の作業指示を行う記号として実現される、情報伝達動作を対象にあわせて半自動で選択、提示可能なシステムを実装した。さらに、ルービックキューブに対する作業指示を実装したシステムの内容と、その有効性を議論した。

第6章

各章の結果について考察し、本研究で提案する「空間的動作」の「半自動化」という設計指針が、遠隔協働作業支援システムの改善に有用であることを論じた。また、提案内容の課題と展望についても論じた。

謝辞

本論文執筆にあたり、多くの方の御指導、御助言、御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

実際に大学キャンパスを訪問するのは、入試の時も加えても片手に余る程度、研究指導や論文執筆の支援はすべてリモート、つまり研究活動のほぼすべてが遠隔協働作業として行われました。コロナ禍の移動制限など、環境が安定しない中の学生生活でしたが、指導教員である本学システム情報系矢野博明教授、本学客員教授、東京大学大学院情報理工学系研究科の葛岡英明教授には本研究を進めるにあたり、対面時と同様、あるいはそれ以上のご指導、ご支援を頂きました。

本論内でまとめた各研究の実施にご協力いただいた沖電気工業株式会社の皆様にも同様に深く感謝いたします。

本当にありがとうございました。

参考文献

- 1 「人」が主役となる新たなものづくり—産業競争力懇談会最終報告書
<http://www.cocn.jp/report/theme97-L.pdf>,(2018). (2021/12/30 閲覧)
- 2 Heath, C., Luff, P: Disembodied conduct: communication through video in a multi-media office environment, Proc. of CHI 1991, pp. 99–103 (1991).
- 3 Yankelovich, N., Simpson, N., Kaplan, J., and Provino, J.: Porta-person: Telepresence for the connected conference room, CHI 2007 Extended Abstracts, pp.2789-2794 (2007).
- 4 Hashimoto, S., Ishida, A., Inami, M., Igarashi, T., : TouchMe: An Augmented Reality Based Remote Robot Manipulation, The 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Proc. ICAT2011, Osaka, Nov. 28-30 (2011).
- 5 荒井 裕彦, :非ホロミック系操作のためのヒューマンインタフェース, 日本ロボット学会誌, 2003, 21 巻, 5 号, pp. 554-561 (2003).
- 6 妻木 勇一, 横浜 真誠, 工藤 聖真, :加速度指令型遠隔操作における予測運動表示, 日本ロボット学会誌, 2008, 26 巻, 8 号, pp. 951-956 (2008).
- 7 伴野 明, 岸野 文雄 :臨場感通信会議におけるヒューマンインタフェース技術、人工知能学会誌, 1991, 6 巻, 3 号 pp.358-369 (1991).
- 8 大西 剛, 竹村 治雄, 伴野 明, 岸野 文郎 :手振りを用いたユーザインタフェースに関する一検討, 電気情報通信学会技術報告, HC90-23, pp.59-64 (1990).
- 9 Gopher, D, :二重課題の遂行 , M.W.アイゼンク編, 認知心理学事典. 新曜社, pp.320-325 (1998).
- 10 Gaver, W.W. : The Affordances of Media Spaces for

- Collaboration, Proc. CSCW'92, pp.17-24 (1992).
- 11 Schegloff, E. : Body Torque, Social Reseach, Vol.65, No.5, pp.535-596 (1998).
 - 12 Fussell, S. R., Setlock, L. D., Parker, E. M, Where do helpers look?: gaze targets during collaborative physical tasks, In CHI'03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.768-769 (2003).
 - 13 Fisher, S. S., McGreevy, M., Humphries, J., Robinett, W., :Virtual Environment Display System, Proc. ACM 1986 Workshop on 3D Interactive Graphics, pp.77-87 (1986).
 - 14 Fisher, S. :Telepresence Master Glove Controller for Dexterous Robotic End-Effectors, Advances in Intelligent Robotics Systems, D.P.Casasent, Editor, Proc. SPIE 726, (1986).
 - 15 Tachi, S., Arai, H., Morimoto I., Seet, G. : Feasibility experiments on a mobile teleexistence system, Proc. the Int. Symp. and Exposition on Robots, 1988, pp. 625-636 (1988).
 - 16 Kuzuoka, H., Kosuge, T., and Tanaka, M. : GestureCam: a video communication system for sympathetic remote collaboration, Proc. CSCW'94, pp.35-43 (1994).
 - 17 Kuzuoka, H., Oyama, S., Yamazaki, K., Suzuki, K., and Mitsuishi, M.: GestureMan : a mobile robot that embodies a remote instructor's actions, Proc. CSCW'00, pp.155-162 (2000).
 - 18 Paulos, E. and Canny, J.: PRoP: Personal Roving Presence, Proc. SIGCHI'98, pp.296-303 (1998).
 - 19 Jouppi, P.N.: First steps Towards Mutually Immersive Mobile Telepresence, Proc. CSCW'02, pp.354-363 (2002).
 - 20 渡辺 富夫, 大久保 雅史, 小川 浩基, 堀井 昌子 : 身体的インタラクションロボット InterRobot によるコミュニケーション, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演会論文集, 1P1-77-118, pp.1-2 (2000).

- 21 Nakanishi, H., Murakami, Y., Nogami, D. et al: Minimum Movement matters: Impact of Robot-Mounted Cameras on Social Telepresence, Proc. CSCW08, pp.303-312 (2008).
- 22 森田 友幸, 間瀬 健二, 平野 靖, 梶田 将司, 岡留 剛: ヒューマノイドロボットを用いた遠隔コミュニケーションにおける注目伝達, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp.3849-3858 (2007).
- 23 坂本 大介, 神田 崇行, 小野 哲雄, 石黒 浩, 萩田 紀博: 遠隔存在感メディアとしてのアンドロイド・ロボットの可能性, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp.3729-3738 (2007).
- 24 葛岡 英明, : CSCW におけるソーシャルロボット研究の動向, 日本ロボット学会誌, 2011, 29 巻, 1 号, pp. 6-9(2011).
- 25 Tachi, S. , Inoue, Y. and Kato, F.: TELESAR VI: Telexistence Surrogate Anthropomorphic Robot VI, International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 17, No. 5, p.2050019(1-33) (2020).
- 26 Saraiji, mhd y., Sasaki, T.,Matsumura, R.,Minamizawa, K.Inami, M.: Fusion: full body surrogacy for collaborative communication,In ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, pp.1-2(2018).
- 27 Saraiji, MHD Y., Sasaki,T. Kunze, K. Minamizawa, K., Inami, M., : MetaArms: Body Remapping Using Feet-Controlled Artificial Arms. Proc.the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '18). Association for Computing Machinery, pp.65–74(2018).
- 28 Guillaume GOURMELEN, Adrien Verhulst, et al, : Co-Limbs: An Intuitive Collaborative Control for Wearable Robotic Arms. In SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, pp.9–10 (2019)
- 29 Adalgeirsson, S. O., Brazieal, C.: Mebot, a robotic platform for socially embodied telepresence, Proc. HRI'10 (2010).

- 30 Kawanobe, H., Aosaki, Y., Kuzuoka, H., Suzuki, Y.: iRIS: a remote surrogate for mutual reference, HRI 2013: pp.403-404 (2013).
- 31 長谷川 孔明:遠隔会議におけるテレプレゼンスロボットのための非言語的な意思伝達に関する研究,筑波大学博士論文,(2015)
- 32 Azuma, R. T. : A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments,1997; 6 (4): pp.355–385 (1997).
- 33 Bimber, O., Raskar, R.: Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds. 10.1201/b10624(2005).
- 34 Ens, B., Lanir, J., Tang, A., Bateman, S., Lee, G., Piumsomboon, T., Billinghamurst, M. :Revisiting collaboration through mixed reality: the evolution of groupware. International Journal of Human-Computer Studies, 131, pp.81-98 (2019).
- 35 Chang, Y., Wang, H., Chu,H. ,et al.: AlphaRead: Support Unambiguous Referencing in Remote Collaboration with Readable Object Annotation. Proc.CSCW '17., pp.2246–2259 (2017).
- 36 Irlitti, A., Smith, R. T., S. Von Itzstein, Billinghamurst, M. Thomas, B. H. :Challenges for Asynchronous Collaboration in Augmented Reality, 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct), 2016, pp. 31-35 (2016).
- 37 Fussell, S.R., Setlock, L.D., Yang, J., Ou, J., Mauer, E., & Kramer, A.D.: Gestures Over Video Streams to Support Remote Collaboration on Physical Tasks. Human–Computer Interaction, 19, pp.273 – 309 (2004).
- 38 Gauglitz,S. Benjamin,N., Turk, M. obias Höllerer.,T 2014. World-stabilized annotations and virtual scene navigation for remote collaboration. In Proc of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '14). pp.449–459 (2014).
- 39 加藤 晴久, 小林 達也, 辻 智弘, 菅野 勝, 柳原 広昌,:スマートグラスのAR表示による遠隔フィールド作業支援システムの開発,映像情報メデイ

- ア学会誌, 2017, 71 巻, 1 号, pp. J35-J43(2017).
- 40 Chapanis, A. :Interactive Human Communication, Scientific. American., vol.232, pp.36-42 (1975).
- 41 三樹 弘之ほか, 身体的メタファーとしてのメディアスペース, 情報処理学会 GW 研究会 23(4), pp.19-24 (1997).
- 42 山崎 敬一, 三樹 弘之, 山崎 晶子, 鈴木 栄幸, ほか:指示・道具・相互性 : 遠隔共同作業システムの設計とそのシステムを用いた人々の共同作業の分析, 認知科学, 5(1), pp.51-63 (1998).
- 43 Kuzuoka, H.:Spatial workspace collaboration: a SharedView video support system for remote collaboration capability, Proc. CHI '92, pp.533-540 (1992).
- 44 Kirk, D., Crabtree, A., Rodden, T.:Ways of the Hands, Proc. ECSCW '05, pp.1-22 (2005).
- 45 Kirk, D., Stanton, F. D.: Comparing remote gesture technologies for supporting collaborative physical tasks, Proc. CHI'06, pp.1191-1200 (2006).
- 46 Tang, A., Neustaedter, C. Greenberg, S. : Embodiments for Mixed Presence Groupware. Research Report 2004-769-34, Department of Computer Science, University of Calgary, December 21 (2004).
- 47 Huang, W., and Alem, L. : HandsinAir: A wearable system for remote collaboration on physical tasks, Proc. ACM CSCW 2013, pp.153–156 (2013).
- 48 Huang, W., Alem, L., and Tecchia, F. : HandsIn3D: Augmenting the shared 3D visual space with unmediated hand gestures. In SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies, pp.10:1–10:3 (2013).
- 49 Kim, S. Lee, G. Huang, W., Kim, H, Woo, W., Billingham, M.: Evaluating the Combination of Visual Communication Cues for HMD-based Mixed Reality Remote Collaboration, Proc. CHI 2019, Paper No.173, pp.1–13 (2019).

- 50 檀原 龍正, 渡辺 富夫, 大久保 雅史,:音声駆動型身体引き込みキャラクター InterActor が発話音声に与える効果, 日本機械学会論文集 C 編, 2005, 71 巻, 712 号, pp. 3486-3493 (2005).
- 51 Wang, T., Sato, Y., Otsuki, M., Kuzuoka, H., Suzuki, Y. :Effect of Full Body Avatar in Augmented Reality Remote Collaboration,26TH IEEE CONFERENCE ON VIRTUAL REALITY AND 3D USER INTERFACES (VR) pp.1221-1222 (2019).
- 52 樋口 啓太, 米谷 竜, 佐藤 洋一 : 遠隔作業支援シナリオにおける注視位置可視化の効果,第 23 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2015),pp.1-6 (2015).
- 53 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 : 肩載せアクティブカメラ・レーザによる遠隔協調作業, 日本 VR 学会論文誌 , Vol.10, No.3, pp.333-341 (2005).
- 54 Ekman, P., Friesen,W. V. : The repertoire of nonverbal behavior: categories, origins, usages, and coding, *Semiotica*, 1, pp.49-98 (1969).
- 55 Ekman, P.: Three classes of nonverbal behavior, in *Aspects of Nonverbal Communication* (ed. W. vonRaffler-Engel), Swets & Zeitlinger(1980).
- 56 Ekman, P. : Emotional and conversational nonverbal signals, *Language, knowledge, and representation*: pp.39–50 (2004).
- 57 黒川 隆夫 :ノンバーバルインタフェース, オーム社(1994).
- 58 黒川 隆夫 :ノンバーバルコミュニケーション、電子情報通信学会「知識ベース」、S3 群－感性・マルチモーダル情報処理 (ver.1/2016/5/20)
https://www.ieice-hbkb.org/files/S3/S3gun_07hen_05.pdf (2021/12/30 閲覧)

- 59 Ou, J., Fussell, R.S., Chen, X., et al.: Gestural Communication over Video Stream: Supporting Multimodal Interaction for Remote Collaborative Physical Tasks, Proc. ICMI'03, pp. 242-249 (2003).
- 60 Gaver, W., Sellen, A., Heath, C., and Luff, P.: One is not enough: multiple views in a media space, Proc. INTERCHI'93, pp.335-341 (1993).
- 61 Ishii, H. and Kobayashi, M.: ClearBoard: A Seamless Media for Shared Drawing and Conversation with Eye-Contact, Proc. CHI'92, pp.525-532 (1992).
- 62 Luff, P., Heath, C., Kuzuoka, H., et al.: Handling Documents and Discriminating Objects in Hybrid Spaces, Proc. CHI2006, pp.561-570 (2006).
- 63 舘 すすむ, 川上 直樹, 関口 大陸, 梶本 裕之, 多田隈 理一郎 : 相互テレグジスタンスロボット「テレサフォン」, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2, p.177 (2006).
- 64 三澤 加奈, 石黒 祥生, 暦本 純一 : LiveMask : 立体顔形状ディスプレイを用いたテレプレゼンスシステムにおけるコミュニケーションの評価, 情報処理学会インタラクシオン 2012, pp.41-48 (2012).
- 65 西本 卓也, 高山 元希, 荒木 雅弘 : 音声インタフェースにおける認知的負荷測定法とその評価, 情報処理学会研究報告, 2002-SLP-45-5, pp.29-34 (2003).
- 66 天野 成昭, 近藤 公久 (編著) : 日本語の語彙特性 第1期 第1巻, 三省堂 (1999).
- 67 八田 武志 : 左利きの神経心理学, pp.24-30, 医歯薬出版 (1996).
- 68 Cooper, A., Reimann, R., Cronin, D. (長尾訳): About Face 3 インタラクシオンデザインの極意, ASCII (2008).

- 69 芳賀 繁 : メンタルワークロードの理論と測定,日本出版サービス, (2001)
- 70 Kraut, R. E., Fussell, S. R., Siegel, J.: Visual information as a conversational resource in collaborative physical tasks, *Human. Computer. Interaction.* 18, 1 pp.13-49 (2003).
- 71 Neo Ee Sian, 横井 一仁,梶田 秀司ほか : 簡易な入力装置を用いたヒューマノイドロボットの全身遠隔操作システム;日本ロボット学会誌, Vol.22, No.4, pp.519-527 (2004).
- 72 Goldberg, K., Mascha, M., Gentner, S., Rothenberg, N., Sutter, C., Wiegley, J. : Desktop Teleoperation via the World Wide Web, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.1, pp.654 - 659 (1995).
- 73 Mano, T., Hamada, S. : Development of Robotic System for Nuclear Facility Emergency Preparedness, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.19, No.6, pp.38-45 (2001).
- 74 Wakita, Y., Hirai, S., Machida, K., et al. : Application of Intelligent Monitoring for Super Long Distance Teleoperation, *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Vol.3, pp.1031-1037 (1996).
- 75 Maeyama, S., Yuta, S., Harada, A. : Experiments on a Remote Appreciation Robot in an Art Museum, *Proc. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1008-1013 (2000).
- 76 Yanco, H. A., Drury, J.: Where Am I? Acquiring Situation Awareness Using a Remote Robot Platform, *Proc. SMC'04*, Vol.3, pp.2835-2840 (2004).
- 77 村上 友樹 , 中西 英之 :案内ロボットの遠隔操作のための GUI の提案、情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) ,2008(11(2008-HCI-127)),pp.79-86 (2008).
- 78 佐藤 徳孝, 城間 直司, 小島 稔ほか : 遠隔操作ロボットにおける有効な提示カメラ画像の検証,第 22 回 日本ロボット学会学術講演会, 3A27

(2004).

- 79 Sugimoto, M., Kagotani, G. Nii, H. et al.: Time Follower's Vision: A Tele-Operation Interface with Past Images; IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.25, No.1, pp.54-63 (2005).
- 80 Noyes, M.V., Sheridan, T. B.: A Novel Predictor for Telemanipulation Through a Time Delay, Proc. Annual Conf. on Manual Control , NASA Ames Research Center (1984).
- 81 Bejczy, A.K. Kim, W.S. Venema, S. C. : The Phantom Robot: Predictive Displays for Teleoperation with Time Delay; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.546-551 (1990).
- 82 Menchaca, A., Liu, A., Oman, C. , Natapoff, A.: Influence of perspective-taking and mental rotation abilities in space teleoperation. Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction, pp. 271-278 (2007).
- 83 Sekimoto, T., Tsubouchi, T., Yuta,S. :A Simple Driving Device for a Vehicle - Implementation and Evaluation; IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.147-154 (1997).
- 84 鈴木 雄介, 福島 寛之 : コミュニケーション支援ロボットシステムの撮影動作インタフェース,情報処理学会シンポジウムインタラクシオン 2010, インタラクティブ発表, PB05 (2010).
- 85 Sugiura, Y., Igarashi, T., Takahashi, H., et al.: Graphical Instruction for a Garment Folding Robot, In ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies (2009).
- 86 Skubic, M., Anderson, D., Blisard, S., et al.: Using a hand-drawn sketch to control a team of robots, Auton. Robots, Vol.22, No.4, pp.399-410 (2007).
- 87 Sakamoto, D., Honda, K., Inami, M., et al.: Sketch and run: a stroke-based interface for home robots, Proc. CHI'09, pp.197-200 (2009).
- 88 Ishii, K., Takeoka, Y.,Inami,M. ,Igarashi, T. : Drag-and-Drop Interface for

- Registration-Free Object Delivery, Proc. the 19th IEEE International Symposium in Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN2010, pp. 228-233 (2010).
- 89 Zhao, S., Nakamura, K., Ishii, K., et al.: Magic cards: a paper tag interface for implicit robot control, Proc. CHI'09, pp.173-182 (2009).
- 90 Kato, H. et al. : Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System; Proc. 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94 (1999).
- 91 鈴木 雄介, 市原 俊介, 福島 寛之, 淵上 正睦 : 遠隔作業支援システムの現場適用～情報通信沼津工場での実証実験～,OKI テクニカルレビュー231号,Vol.85 No.1 (2018).
- 92 市原 俊介, 鈴木 雄介 : ハンドジェスチャ送信機能を有する遠隔作業支援システムの開発と課題,情報処理学会シンポジウムインタラクシオン2019,2B-36 (2019).
- 93 WebRTC (Web Real Time Communication) 公式サイト, <https://webrtc.org/>
(2021/12/19 閲覧)
- 94 Suzuki, Y. et al. : User Stress Measurement of Remote Operation Supporting System with Hand Gesture Transmission Function, Proc.of Human Computer Interaction International, 2019, LNCS 11570, pp.412–425 (2019).
- 95 Fussell, S. R., Setlock, L. D. Kraut, R. E. :Effects of Head-Mounted and Scene-Oriented Video Systems on Remote Collaboration on Physical Tasks, Proc. of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) 2013, pp.513-520 (2013).
- 96 Scavo, G., Wild, F., Scott, P. : The GhostHands UX : telementoring with hands-on augmented reality instruction. 10.13140/RG.2.1.5069.1682. (2015).

- 97 山田 昇平・ナイワラ P. チャンドラシリ : 遠隔地間コミュニケーションのための手振り・描線統合指示手法の提案, 電子情報通信学会技術報告 vol. 118, no. 437, HCS2018-48, pp. 7-12 (2019).
- 98 Williams, T. J., Jones, S. L., Lutteroth, C., Elies Dekoninck, E., Boyd, H. C. : Augmented Reality and Older Adults: A Comparison of Prompting Types. In CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21), pp.1-13 (2021).
- 99 木村 篤信, 黒田 知宏, 眞鍋 佳嗣, 千原 國宏 : 動作学習支援システムにおける視覚情報提示方法の一検討, 日本教育工学会論文誌, 30(4)pp.293-303 (2007).
- 100 葛岡 英明 : 遠隔地間空間型共同作業の支援に関する研究, 東京大学博士論文, (1992)
- 101 橋塚 和典, 神原 誠之, 萩田 紀博 : 拡張現実感によるルービックキューブ解法教示システム, Information Processing Society of Japan, vol.2014-CVIM-190, no.25, pp.1-6 (2014).
- 102 Park, J., Park, C. : Guidance System Using Augmented Reality for Solving Rubik's Cube, HCI International 2014 - Posters' Extended Abstracts, pp.631-635(2014).
- 103 Park J., Park C. : Augmented Reality Based Guidance for Solving Rubik's Cube Using HMD. HCI International 2016 – Posters' Extended Abstracts. HCI (2016).
- 104 Vuforia engine developer portal, <https://developer.vuforia.com/>
(2021/12/19 閲覧)
- 105 Stolzenwald, J. and Mayol-Cuevas, W. : Reach Out and Help: Assisted Remote Collaboration through a Handheld Robot, arXiv:1910.02015v2 [cs.RO](2020).
- 106 Redmon, J. Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. : You Only Look Once:

Unified, Real-Time Object Detection, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.779-788 (2016).

- 107 Mikolov, T.Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G.S.,Dean, J. : Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality, Proc. of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems,NIPS'13,Vol.2,pp.3111-3119 (2013).
- 108 Marks, M. A., Mathieu, J. E., & Zaccaro, S. J. A temporally based framework and taxonomy of team processes. *Academy of Management Review*, 26, pp.356-376 (2001).

既発表一覧

1 . 査読付き学術雑誌論文

【既発表1】 鈴木 雄介,福島 寛之,深澤 伸一,竹内 晃一 : 遠隔会議支援ロボットシステムの注意起能力評価, 情報処理学会論文誌,Vol. 51, No. 1, pp. 25-35, (2010).

【既発表2】 Yusuke SUZUKI, Motoki TERASHIMA, Koichi TAKEUCHI, Hideaki KUZUOKA : An object-defined remote robot control interface, Journal of Information Processing, Vol. 21, No. 2, pp. 304-314, (2013).

2 . 査読付き国際会議論文

【既発表3】 Yusuke Suzuki and Shunsuke Ichihara : User Stress Measurement of Remote Operation Supporting System with Hand Gesture Transmission Function : Proc.of Human Computer Interaction International, 2019, LNCS 11570, pp.412-425, (2019).

3 . 国際会議口頭発表

(O-1) Yusuke Suzuki : Experimental Application of a Real Image Based Text-to-Sign Synthesizing Engine for an Airport Announcement System, International Conference for Universal Design 2006, O-132, (2006).

4 . 報告 (口頭発表・ポスター発表)

(1)鈴木 雄介 , 竹内 晃一 , 宮本 一郎 , 三樹 弘之 : 実画像ベースによる手話映像合成の試み, 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) ,2004(115(2004-HI-111)),pp.131-135,(2004).

(2)鈴木 雄介 , 竹内 晃一 , 宮本 一郎 , 三樹 弘之 : 実写映像ベース手話映像合成の評価に関する研究, 1507 ,HI シンポジウム 2005 口頭発表,(2005).

(3)鈴木 雄介,福島 寛之,深澤伸一,竹内 晃一 : 参加者の身体性を表現する遠隔会議支援ロボットシステムの評価 , 情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN) ,2008-GN-069,pp.113-118,(2008).

(4)鈴木 雄介,福島 寛之,竹内 晃一 : 遠隔会議支援ロボットシステムの AR インタフェース,3123,HI シンポジウム 2009 ポスター発表,(2009).

(5)鈴木 雄介,福島 寛之,深澤 伸一,竹内 晃一 : コミュニケーションロボットの移動機能の注意喚起能力評価,情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN) ,2010-GN-75(10),pp.1-7 ,(2010).

(6)鈴木 雄介,福島 寛之,宮本 一郎,竹内 晃一 : コミュニケーション支援ロボットシステムの撮影動作インタフェース , 情報処理学会シンポジウムインタラクション 2010,インタラクティブ発表,PB05,(2010).

(7)鈴木 雄介,金丸 利文 : スマートフォンと光センサを利用したオフィスでの状況推定 , 情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN) ,2012-GN-83(7),pp.1-5,(2012).