

遠隔作業指示における身体動作提示が予期に及ぼす効果

山本拓弥 大槻麻衣 葛岡英明

概要: 機器に関するサービス、保守、安全性の向上などを目的とし、現地の「作業員」の状況を把握しながら遠隔地の「指示者」が作業員へ指示を出す遠隔作業支援システムが提案されている。これらの研究の多くは卓上の組み立て操作など、比較的狭い作業領域での作業を対象としていたが、大型プラントの保守のように、広い空間を移動しながら行う作業を考えた時、モバイル端末やHMDなどの機器越しでは、視野が限られ、身振り、視線・体の向きなどの非言語表現が十分に伝達できない。そのため、遠隔の相手の行動を予期できず、作業効率が低下するという問題がある。本研究では、身体配置および身振りを相互に伝達できるシステムを作成した。また、実装したシステムを用いて、移動が伴う作業を行い、提案手法を用いた場合と、ポインタと音声のみの指示の場合とを比較し、作業効率に与える影響を調査した。

キーワード: CSCW 遠隔作業指示 行動予期 AR VR

1. はじめに

機器に関するサービス、保守、安全性の向上などのために、現場やそこにいる「作業員」の状況を把握しながら、遠隔地の「指示者」が作業員へ指示を出すことを支援するシステム（以後、遠隔作業支援システム）が提案されている。これらの研究では、作業員が指示者に送った作業空間の映像に対して指示者がポインタや手振り映像を重畳して作業員に送り返す。その映像を作業員がモバイル端末やHMD (Head Mounted Display) で確認することによって、遠隔ポインタによる指示を受けることが可能となる。従来のこうした研究では卓上の組み立て作業など、比較的狭い領域での作業を対象としていたため、こうした単純な指示映像で十分であった。しかし大型プラントの保守のように「広い空間を移動しながら行う作業」を考えた時には、身振り、視線・身体の向きなど、より多くの非言語表現が伝達されないと、遠隔の相手の行動を十分に予期できず、作業効率が低下するという問題がある。

そこで本研究では拡張現実感 (Augmented Reality; AR) 技術を利用して、指示者と作業員が相互に身体映像を提示できるシステムを提案し、その有効性を示すことを目的とする。

本論文では、関連研究を紹介したあと、我々が開発した身体配置および身振りを相互に伝達できるシステムの実装について説明する。次にそのシステムを用いて、移動が伴う作業を利用した実験を行い、提案手法を用いた場合と、ポインタと音声のみの指示の場合とを比較し、作業効率に与える影響を示す。

2. 関連研究

遠隔作業を支援するシステムとして、実空間の物体に対

してポインタを行う遠隔コミュニケーション支援ロボットの研究が行われてきた。Kuzuokaら[1]のGestureMan-3はレーザポインタとそれを補助する差し棒を搭載したロボットで、遠隔からレーザポインタと差し棒を用いて実空間の対象の参照や指示を行うことができる。また、指示者の頭の動きを検出して、ロボットの頭部の動きに連動させることで、作業員は指示者の志向を観察することができる。しかしGestureMan-3は、ロボットが現地で移動やポインタを行うために十分に広く、整地された空間が必要であり、作業員が狭い空間を移動する必要があるような環境では指示が十分に行えないという問題があった。

これに対してSakataら[2]は、ポインタデバイス小型化して作業員に装着させるウェアラブルデバイス、WACL/CWDを開発した。この装置は作業員の肩にカメラとレーザポインタが搭載されており、遠隔の指示者はカメラ映像を見ながら、レーザポインタを遠隔操作し、作業支援を行う。

しかし作業によっては、ポインタだけでは動作表現を伝えるには不十分であると指摘されている[3]。そのため、AR技術を用いて、対話者にポインタだけではなく手振りなどの情報を伝える遠隔作業支援システムの研究が行われている。

Robertら[4]のMobileHelperは、作業員のヘルメットに取り付けられたカメラで取得した映像を指示者側のタブレットに送信し、指示者はタブレットで映像を確認しながらタブレットの背面カメラで手振りをキャプチャし、映像に重畳描画する。作業員は、この手振りを重畳した映像をウェアラブルディスプレイ (near eye display) で確認することで作業を行う。Sodhiら[5]のBeThereは、Kinectで取得した作業空間の3次元形状を指示者に送信し、指示者はモバイル端末を用いて、独立した視点から作業空間を観察する

ことができる。また、指示者の手振りの3次元形状をキャプチャし、実風景に重畳することで遠隔作業支援を実現している。

しかし、これらのシステムは、モバイル機器を片手で持つ必要があり、作業を行う指示者にとって大きな負担となることが考えられる。したがって作業者、指示者がハンズフリーで指示を行うことができる遠隔作業支援システムが提案されている。

Tecchia ら[6]や、Huang ら [7] はデプスカメラを用いて取得した作業空間となる机の3次元情報を遠隔の指示者のHMDに表示し、指示者はその映像を観察しながら、指示者側のデプスカメラで取得した手振りを作業空間の映像に重畳するシステムを提案した。作業者はこの手振りが重畳された作業空間の映像をモニターで確認することで作業を進める。しかし、このシステムは机上の狭い空間での作業を想定しており、移動を伴うような空間での作業に対して用いることができない。

一方で Gauglitz ら [8][9] が提案するシステムは、作業者がモバイル端末を持ち、車のボンネットの周囲など比較的広い空間を移動しながら作業を行うことができる。このシステムでは、カメラの自己位置推定 (Simultaneous localization and mapping; SLAM) を行い、作業環境の3次元情報を実時間で構築し、これを作業者と指示者で共有することで、作業者と指示者が独立して作業環境を観察することができる。また、指示者は任意のタイミングでタッチディスプレイ越しに注釈を作業対象上に描画できる。作業者のモバイル端末にはどちらの方向にポインタがあるかを示す矢印が表示されるが、ポインティングの動作を事前に「予期」できないため「広い空間」においては矢印を探さなければならない。

このような「広い空間」で作業支援を行う場合、非言語表現による「予期」の有無が、作業効率や質に大きな影響を与えることが指摘されている [10]。例えば、ある対象物を説明していた指示者が、次の対象物を説明しようとするときには、まずそちらの方向に視線を向ける。作業者は指示者のこうした動きを観察することで、具体的な説明が始まる前に、次に指示される対象物を予期することができる。このようなコミュニケーションにおける相手の身振り・手振り、相互の位置、顔・身体の向きなどの情報は「非言語表現」と呼ばれ、コミュニケーションにおける非言語表現の重要性は古くから指摘されている [11]。特に社会学においては、先に述べたように身体的な志向 (orientation) と予期の関係が議論されてきた [12]。

そこで、本研究では広い空間における作業を対象とし、作業者、指示者ともに HMD を装着させることによって両手が自由に使えるようにする。指示者の身振りや手ぶりなど、身体全体を使った指示を作業者が観察でき、予期を支援する遠隔作業支援システムを実現する。

3. 遠隔作業支援システム

HMD の限られた視野内に、相互の身体動作や身体配置などの非言語表現を提示することによって、行動の予期を支援するシステムを作成した。図1に、本研究で想定する環境の模式図、図2に本研究で用いるシステムの各機器の配置とシステム構成を示す。本システムは作業を行う「作業者」と遠隔から作業者に指示を出す「指示者」の計2名による作業を想定している。

作業者の前方には図3のように作業対象となるホワイトボード (高さ162cm、幅80cm) 2枚の上部にそれぞれ Webカメラ (iBUFFALO BSW20KM11BK) を1台ずつ設置した。

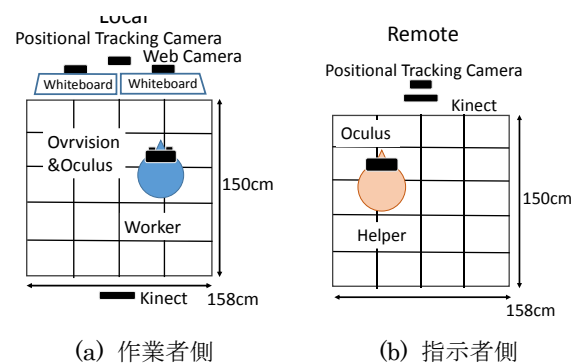


図1 実験環境

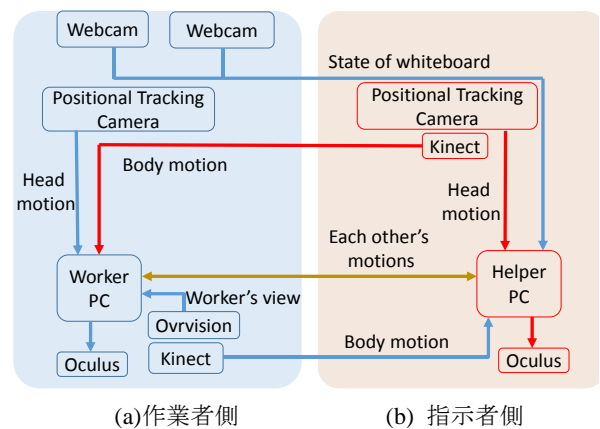


図2 システム構成図とデータフロー

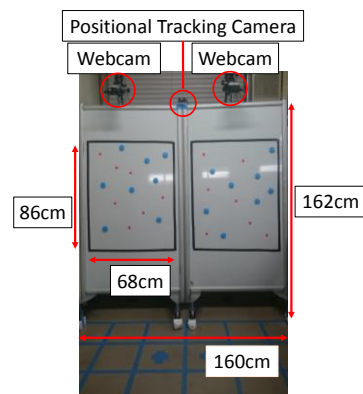


図3 作業者側前方実験環境

このカメラで作業の様子を取得し、指示者に送信した。2枚のホワイトボードの間には作業者の頭部の動きをトラッキングするヘッドトラッキングカメラ (Oculus Rift DK2 付属の IR カメラ), 後方には作業者の体の動きをトラッキングするモーショントラッキングカメラ (Kinect for Windows) を設置し、これらの情報を指示者用 PC へ送信した。指示者側は指示者の前方にモーショントラッキングカメラ, ヘッドトラッキングカメラを三脚に固定して設置することで、作業側と同様に、指示者の動きを作業 PC へ送信した。

作業者は図 4 のようにステレオカメラ (Ovrvision) が取り付けられた HMD (Oculus Rift DK2) を装着することで、図 5 ように実際の作業空間を観察しながら、AR による指示者の指示を受ける。指示者は HMD のみを装着し、図 6 のように Web カメラで取得したホワイトボードの表面の映像を射影変換して作成された仮想ホワイトボード、作業者の立ち位置を示す作業者モデル、そして自分の身体動作と同期して動くスケルトンモデルを斜め後方上部から見ながら作業者に指示を行う。指示者側の VR 空間の構築、および作業側側の AR 空間の構築には Unity を用いた。

4. 実験

4.1 実験目的

実装したシステムを用いて、移動が伴う作業を行い、非言語表現が作業効率、印象、認知的負荷に及ぼす影響を調査した。本実験では以下の 2 条件を比較した (表 1)。

【条件 1 (提案手法)】

作業者に指示者を全身アバタで提示し (図 7(a)), 指示者に作業者モデルを提示する (図 8)。指示者の全身アバタの手先には赤いポインタ (球体) を取り付ける。

【条件 2】

作業者には指示者の手先を示す赤いポインタのみ提示し (図 7(b)), 指示者には作業者モデルを提示しない。

4.2 タスク

作業者は、指示者の指示に従ってホワイトボード上の青いマグネットを正しい赤いポイントまで移動させた。指示者は CG で表現された指示書 (図 9) を見ながら作業者に指示を行った。指示書は指示者の視界前方に常に半透明で表示されているが、指示者は手に持ったマウスをクリックすることで指示書の表示、非表示を変更可能とした。マグネットの移動 10 回を 1 セットとし、各条件 1 セットずつ、計 20 回の移動を行わせた。

4.3 実験手順

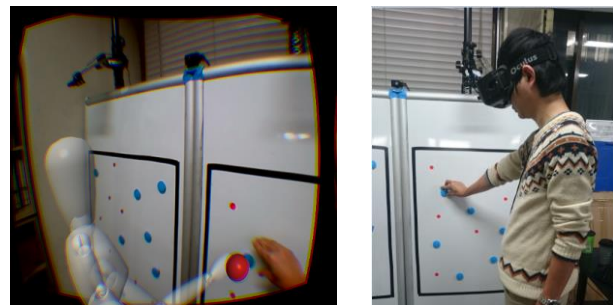
実験は大きく分けて以下の 5 つの手順で実施した。

(1) 遠隔作業支援システムの説明

実験を行う前に本システムの説明を行った。被験者 2 人に、本システムを用いることで、指示者、作業者の双方にどのように作業空間が見えるかを説明した。この際に比較



図 4 HMD 装着時の作業者



(a) 作業者視点映像 (b) 実際の作業者

図 5 作業支援を受ける様子

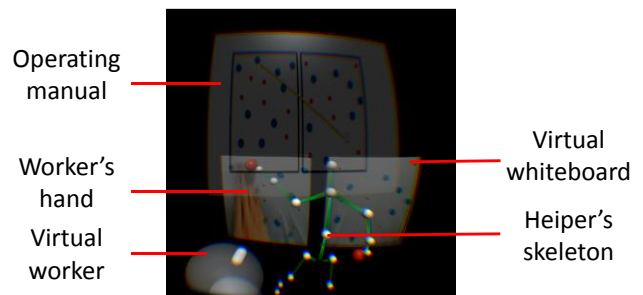
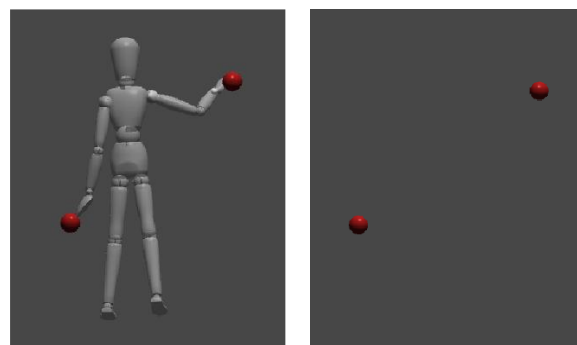


図 6 指示者視点映像

表 1 実験条件

条件	指示者モデル	作業者モデル
条件 1	全身アバタ	有り
条件 2	ポインタ	無し



(a) 全身アバタ (b) ポインタ

図 7 指示者モデル

を行う 2 条件の説明も行った。

(2) タスクの説明

4.2 節に記述したタスク内容を説明した。

(3) 練習

作業者、指示者の役割を決定し、実際にシステムを用いて、実験で短いタスクの練習を行わせた。練習の後、評価の基準として用いるため、作業者と指示者が実際に隣り合って作業支援を行った場合と、作業者モデル・指示者モデルともに非表示の条件でタスクを行わせた（システムの評価方法については (5) アンケート、インタビューで述べる）。

(4) タスクの実施

1 条件ずつタスクを行わせた。条件の実施順は、被験者グループ間で変更し、カウンタバランスをとった。また、10 回のマグネットの移動のパターンも練習とは異なるものを 2 種類用意し、被験者グループ間で変更し、カウンタバランスをとった。

ボイスレコーダーおよびビデオレコーダーによる記録と、作業者・指示者の HMD の映像をキャプチャすることで作業の様子を記録し、マグネットの移動のエラー数、タスクを完了した時間、被験者の移動の様子を計測した。ここでエラー数は、指示者が指示した場所とは異なった場所のマグネットを作業者が指した、あるいは指示とは異なる場所に配置した場合に 1 回カウントするものとした。

(5) アンケート、インタビュー

各条件終了後、調査紙を用いた筆記式アンケートに回答させた。アンケート項目は表 2 のように NASA-TLX による 6 つの尺度に加え、“相手の存在を感じたか”を回答させた。Q1~Q7 の評価には 7 段階のリッカート尺度を用い、1：負荷が小さい、7：負荷が大きい、といったように数が小さいほど良い結果となるよう設定した。また、Q8 については VAS (Visual analog scale) を用いて評価した。具体的には、10cm の評価軸を用意し、左端を“隣り合って作業を行った場合”、右端を“作業者モデル、指示者モデルともに非表示にして作業を行った場合”とし、被験者が体験した条件がこれらの場合に比べてどの程度有用であったかを評価軸上にマークさせ、左端からの距離によって評価を行った。つまり、数値が低いほど評価が高くなるものとした。

実験終了後、口頭によるインタビューを行った。実験時間は約 90 分程度を想定しており、長時間のタスクによる肉体的・精神的な疲労が予想された。そのため、各条件の途中であっても、被験者の意思で自由に中断・休憩、もしくは参加を中止することができることとした。

4.4 実験結果

本実験は筑波大学の男子大学生 16 名 (年齢 21~30 歳) を被験者とし、作業者 8 名、指示者 8 名の 8 ペア、計 16 名によって行った。実験結果の分析には、全ての結果について、アバタ提示の有無を要因とした 1 要因分散分析を行った。

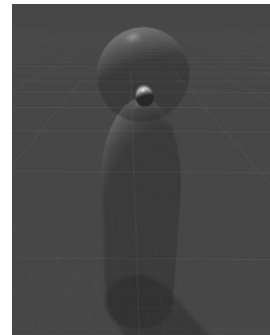


図 8 作業者モデル

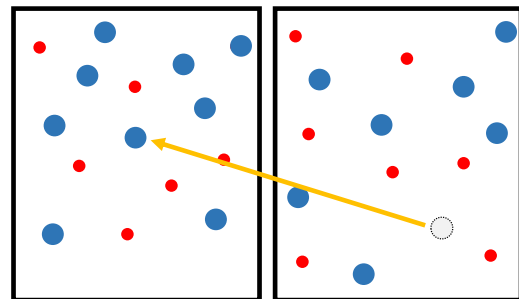


図 9 指示書の例

表 2 アンケート項目

Q1: どの程度の認知, 知覚的活動 (考える, 記憶する, 見る, など) を必要としましたか?
Q2: どの程度の身体的活動を必要としましたか?
Q3: 課題の目標 (タスクの完了) を, どの程度達成できたと思いますか?
Q4: 操作のために感じる時間的切迫感は何の程度でしたか?
Q5: タスクを行うために精神的・身体的にどの程度一生懸命に作業しなければなりませんでしたか?
Q6: 操作中に, 不安感, 落胆, イライラ, ストレス, 悩みをどの程度感じましたか?
Q7: 共同作業者の存在を感じましたか?
Q8: 作業を行う上でこのシステムは有用でしたか?

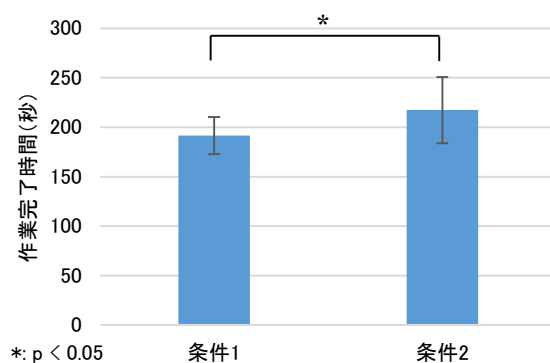


図 10 作業完了時間

図 10 に各条件での平均作業完了時間、図 11 に平均エラー数を示す。平均作業完了時間に関して分散分析を行った結果、有意な差がみられた ($p < 0.05$) が、平均エラー数に関しては、有意な差はみられなかった。

図 12 に作業員に対するアンケート結果の平均値を示す。各質問に関して分散分析を行った結果「Q1: どの程度の認知、知覚的活動(考える、記憶する、見る、など)を必要としましたか?」「Q6: 操作中に、不安感、落胆、イライラ、ストレス、悩みをどの程度感じましたか?」「Q7: 共同作業員の存在を感じましたか?」の質問項目に関して、有意な差が見られ ($p < 0.05$)、「Q4: 操作のために感じる時間的切迫感はどの程度でしたか?」に関しては有意傾向が見られた ($p < 0.1$)。

次に、図 13 に指示者に対するアンケート結果の平均値を示す。同様に各質問に関して分散分析を行ったところ、「Q7: 共同作業員の存在を感じましたか?」の質問項目に関して、有意な差が見られた ($p < 0.05$)。

図 14 に作業員・指示者別の各条件でのシステムの有用性評価 (Q8) の平均値を示す。アバタ提示の有無による 1 要因分散分析を行った結果、作業員に関してのみ 2 条件間で有意な差が見られた ($p < 0.05$)。

5. 考察

5.1 指示者に提示する作業員モデルの有無

遠隔作業支援において、作業員、指示者双方の身体動作、もしくは身体配置を伝えることが作業効率に及ぼす影響を調査することを目的として、実験をおこなった。

作業効率には作業負荷が影響を及ぼすと考えられるが、指示者に対するアンケート結果 (図 13) Q1~Q6 より、指示者側に提示する作業員モデルの有無に関しては、指示者の作業負荷を低減させる効果は見られなかった。同結果の「Q7: 共同作業員の存在を感じましたか?」に関してのみ、作業員モデルが表示されていた方が作業員の存在感が有意に増すという結果が得られた。しかし、タスク終了後の被験者へのインタビューにおいて、指示者に対して「タスクを完了させるのに 2 条件の間で違いはあったか」と質問を行ったところ、「違いはなかった」「あまり違いはなかった」といった意見を指示者全員から得た。「あまり違いはなかった」と答えた被験者からさらにインタビューを行ったところ「作業員の存在は感じたが、それがあつたこととタスクを行うことにあまり関係がなかった」といった意見を得た。このことから、今回設定したタスクにおいては作業員の身体位置を知ることは作業支援に関して有用ではなかったと言える。

この原因としては作業空間の広さが考えられる。本実験では、「移動を伴う広い空間」を想定してタスクを設定したが、作業対象となるホワイトボードは 2 枚合わせて横幅は

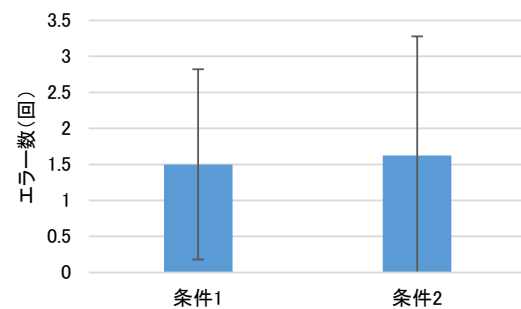
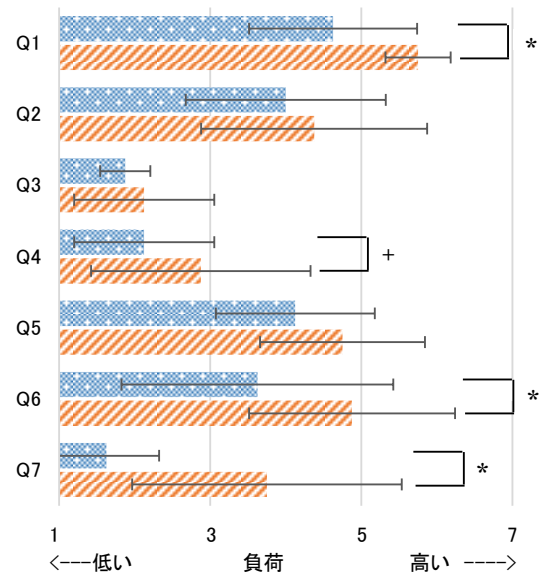
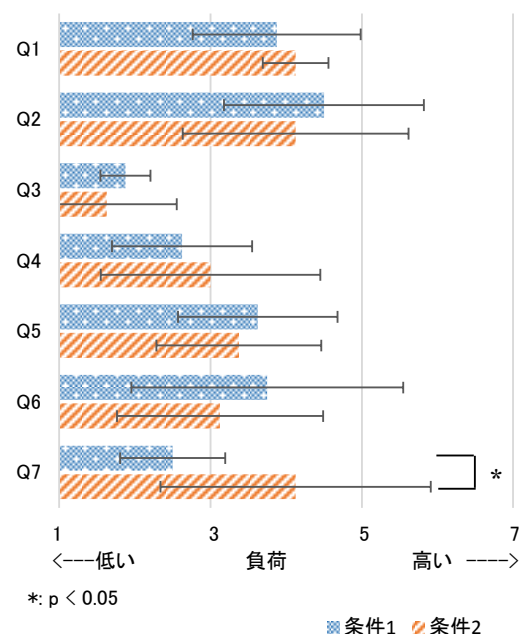


図 11 平均エラー数



*: $p < 0.05$
+: $p < 0.1$
条件1 条件2
図 12 作業員へのアンケート結果の平均値



*: $p < 0.05$
条件1 条件2
図 13 指示者へのアンケート結果の平均値

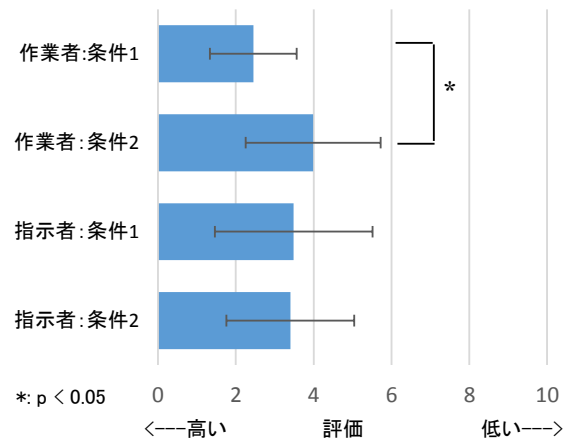
160cm であり、作業者は AR で表示された指示者モデルがこのホワイトボード上の一点をポインティングするのを観察し、マグネットの操作を行う。つまり、作業者の横方向の移動は 160cm 程度の移動しか必要としない。したがって指示者がホワイトボードのどの点をポインティングしても、作業者はすぐに手が届く位置にいることになる。従って指示者は、作業者モデルの表示・非表示に関係なく、近くにいるものだと認識し、作業者が近くにいないことで問題が発生するような環境ではなかった。また、作業者モデルは指示者に作業者の身体位置のみしか伝えることができず、身体動作を伝えることができないことも、作業者モデルがタスクの達成に寄与しなかった原因になっていると考えられる。そのほか、指示者へのインタビューより「作業者モデルがホワイトボードとかぶって見にくい場面があった」といったコメントがあったことから、今回のタスクでは指示者にとっては、作業者モデルを表示することでむしろタスクの遂行の妨げになった可能性も考えられる。

5.2 指示者モデルの効果

作業完了時間（図 10）より、条件 1（指示者モデル：全身アバタ、作業者モデル：有り）で作業を行った方が条件 2（指示者モデル：ポインタ、作業者モデル：無し）で行うより短い時間で完了していることがわかる。条件 1 と条件 2 の違いは、作業者が見る指示者モデルの形状（全身アバタ／ポインタのみ）と、指示者が見る作業者モデルの有無である。しかし、5.1 節で述べたように、本実験では作業者モデルを表示することによる作業負荷への影響は見られなかった。

作業者に対するアンケート（図 12）の「Q1:どの程度の認知、知覚的活動（考える、記憶する、見る、など）を必要としましたか?」「Q6:操作中に、不安感、落胆、イライラ、ストレス、悩みをどの程度感じましたか?」「Q7:共同作業者の存在を感じましたか?」に関しては 2 条件の間に有意な差が見られ、指示者アバタを表示した方がポインタを用いて指示を行うより負荷が小さいという結果が得られた。また、システムの有用性に関して、2 つの条件間に有意な差が見られ、作業者に指示者アバタを表示した条件の評価が高い結果となった。以上の結果より本実験では、作業者に対して指示者アバタを提示することが作業負荷の低減、および作業効率の向上に効果があることが示された。

ここで、タスク終了後の作業者のインタビューに注目すると、「アバタが表示されているほうが指示者の向いている方向を知ることができ、指示者が次にどちらの方向に移動するのかわかりやすい」といったコメントがあった。ビデオで確認を行うと、図 15 のように条件 2 では、指示者が対象の場所を指し、「これ」「ここ」と発話してから作業者が移動を行い、対象物を指し、「ここ?」と確認して作業を行っていた。しかし、図 16 のように条件 1 では、指示者が対象の場所を確認し、その場所を指そうと手を伸ばすと同時



に指示者はその方向に移動を始め、指示者が「ここ」と発言するのとほぼ同时对象物に触れているような場面が見られた。この図 15、図 16 の例に挙げたタスクをビデオで確認したところ、指示者が動き出してから作業者が指示されたマグネットを把持するまでの時間は、条件 2 では、10 秒であるのに対して、条件 1 では 2 秒で行われていた。

このような動作のタイミングの差ができたことの原因として、アバタを表示させることで指示者の志向が作業者に伝わったことが考えられる。具体的には、指示者アバタが表示されている場合は、各ポインタがアバタの腕と連動して動くので、作業者は指示者がどのような体勢であるのか知ることが可能となり、その体勢から相手の動作を予測することができた可能性がある。一方、条件 2 では、指示者の身体の向きが作業者に伝わらず、作業者は指示者の発話を聞いてからしか動き出せなかったと考えられる。

そのほか、条件 2 では指示者の左右それぞれの手先を示す 2 つのポインタが常に見えていたため、「ポインタの条件では、どちらの手がポインティングを行っているのが判断しづらかった」という作業者の意見もあり、指示者の身体の向きを観察することができる全身アバタの提示の有効性を確認することができた。

6. おわりに

本研究では「移動を伴う広い空間」において、作業者、指示者ともに HMD を用いて、相互の身振りや手ぶりなどの身体動作や身体配置を伝え合うことで遠隔作業を支援するシステムを作成した。さらに、実験によって身体配置や身体動作といった非言語表現が作業効率に及ぼす影響を調査した。その結果、指示者の身体動作・身体配置をトラッキングしたアバタを表示することでタスクの作業完了時間を短縮できることが示された。これは、身体動作を伝えることで指示者の志向を作業者に伝えることが可能となり、

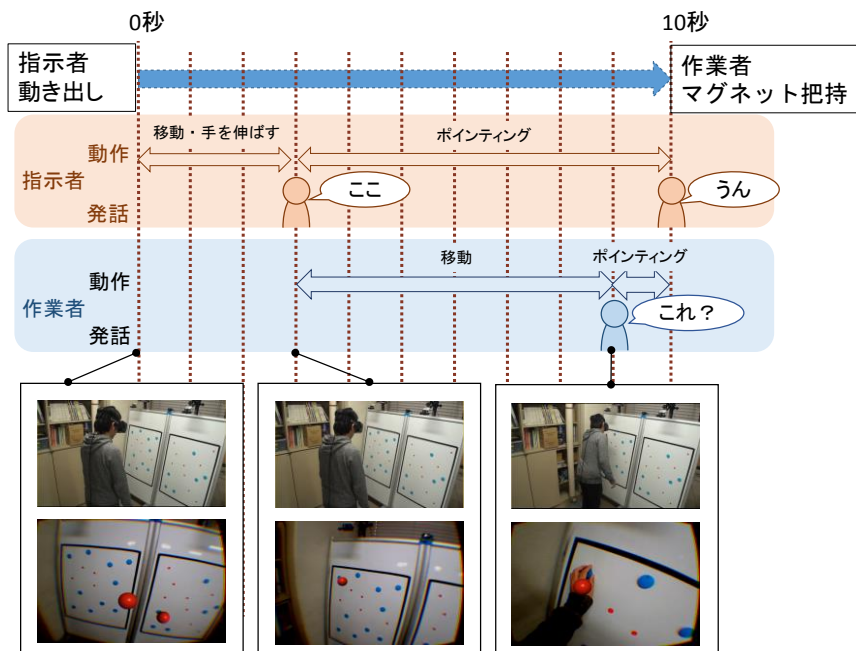


図 15 条件 2 (指示者モデル: ポインタ, 作業者モデル: 無し) での作業の様子

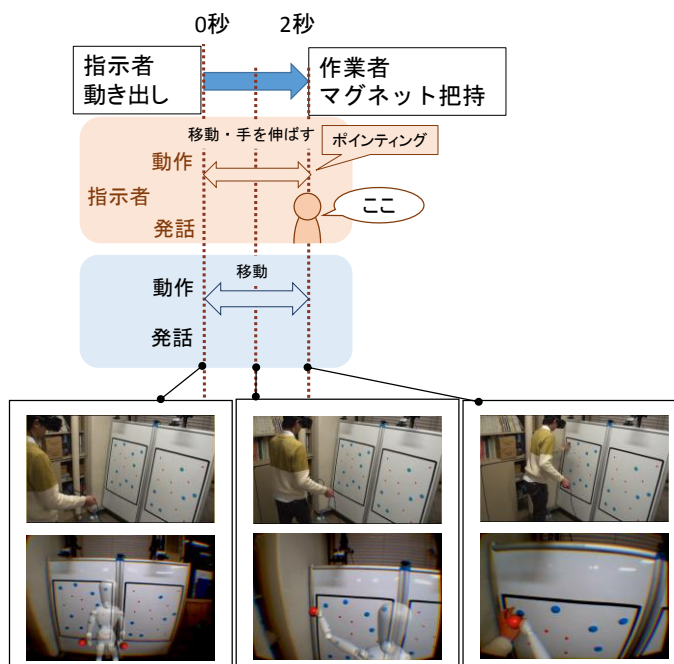


図 16 条件 1 (指示者モデル: 全身アバタ, 作業者モデル: 有り) での作業の様子

その結果、作業者が指示者の動作を予測することによって早めに指示された場所を見つけることができたためであると考えられる。

今後の実験では、本実験では確認できなかった、作業者の身体配置・身体動作を指示者に伝えることの有用性を検証するため、奥行きがあるような空間や、より広い空間での作業支援を想定したタスク設定を行う。さらに、身体配置のみでなく、身体動作の伝達が可能な作業者モデルを導入することを検討している。

参考文献

- [1] H. Kuzuoka, et al.: "Mediating dual ecologies", CSCW '04, pp. 477-486, 2004.
- [2] N. Sakata, et al.: "Visual assist with a laser pointer and wearable display for remote collaboration", CollabTech2006, pp.66-71, 2006.
- [3] S. R. Fussell, et al.: "Assessing the value of a cursor pointing device for remote collaboration on physical tasks", CHI '03 Extended Abstracts, pp. 788-789, 2003.
- [4] K. Robert, et al.: "MobileHelper: Remote guiding using smart mobile devices, hand gestures and augmented reality",

- SIGGRAPH Asia 2013 Symp. Mobile Graphics and Interactive Applications, Article 39, 2013.
- [5] R. S. Sodhi, et al.: "BeThere: 3D mobile collaboration with spatial input", CHI '13, pp. 179-188, 2013.
 - [6] F. Tecchia, et al.: "3D helping hands: a gesture based MR system for remote collaboration", VRCAI '12, pp. 323-328, 2012.
 - [7] W. Huang, et al.: "HandsIn3D: Augmenting the shared 3D visual space with unmediated hand gestures", SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies, Article 10, 2013.
 - [8] S. Gauglitz, et al.: "World-stabilized annotations and virtual scene navigation for remote collaboration", UIST '14, pp. 449-459, 2014.
 - [9] S. Gauglitz, et al.: "In touch with the remote world: Remote collaboration with augmented reality drawings and virtual navigation", VRST '14, pp. 197-205, 2014.
 - [10] N. Yamashita, et al.: "Supporting fluid tabletop collaboration across distances", CHI'11, pp. 2827-2836, 2011.
 - [11] M. F. Vergas.: "LOUDER THAN WORDS - An Introduction to Nonverbal Communication", Iowa State University Press (1987).
 - [12] E. Scajlof.: "Body Torque", Social Research, Vol. 65, No. 5, pp. 844-853, 2005.