

回転するディスプレイに表示される顔画像の 注視方向知覚に関する研究

川口 一画^{1,a)} 葛岡 英明¹ 鈴木 雄介²

受付日 2014年6月29日, 採録日 2014年9月12日

概要: 遠隔コミュニケーションにおいて注視方向を伝達する手段として, テレプレゼンスロボットが注目されている. 本研究では, テレプレゼンスロボットにおいて注視方向を正確に伝達するための基礎的な知見を得るために, 顔画像とそれを提示するディスプレイが回転する場合に, システムの注視方向がどのように知覚されるかを明らかにすることを目的として実験を行った. この際, 実際のコミュニケーションを想定し, 頭部と眼球の分担比を反映した刺激を用いた. 実験結果より, 従来のテレプレゼンスロボットで用いられてきた注視方向の提示手法では, 注視方向が正確に知覚されないことが明らかになった. また, 得られた結果をもとに, 適切な注視方向提示のための補正手法について検討を行った.

キーワード: テレプレゼンスロボット, 注視方向の知覚, 分担比

Study on the Gaze Direction Perception of the Face Image Displayed on Rotatable Display

IKKAKU KAWAGUCHI^{1,a)} HIDEAKI KUZUOKA¹ YUSUKE SUZUKI²

Received: June 29, 2014, Accepted: September 12, 2014

Abstract: As a way to transfer the gaze direction in remote communications, telepresence robot has attracted attention. In our study, to acquire a basic knowledge for telepresence robot to convey accurate gaze direction, we conducted experiments to reveal the gaze direction that is perceived when the display and face image are rotated. Assuming the actual communication, using stimulation reflects the sharing ratio of the eye and head. Experimental results suggested that, the methods which used in recent telepresence robot can not convey accurate gaze direction.

Keywords: telepresence robot, perception of gaze direction, sharing ratio

1. はじめに

人同士の対話では, 視線一致 [1], 共同注意 [2], ゲイズウェアネス [3] 等, 視線の重要性が指摘されている. このような視線のインタラクションが可能になるためには, 対話者の注視方向を正しく知覚できることが重要である. しかし通常のビデオ対話システムを利用して遠隔対話をする

場合, 注視方向が正しく伝わらないために, コミュニケーションに齟齬が生じることが知られている [4]. このような問題を緩和する手段の1つとして, テレプレゼンスロボットの有効性が注目されている. テレプレゼンスロボットとは, 遠隔地にいる人の代理として利用されるロボットのことである. そのようなロボットの多くは, ロボットを遠隔操作をすることによって対話をしようとする人 (以後, 「遠隔操作者」) の顔画像をリアルタイムで表示するためのディスプレイを有しているが, そのディスプレイを物理的に動作させることによって, 遠隔操作者の注視方向が表現できるのではないかと期待されている [5], [6], [7]. しかしこれらのロボットではディスプレイが動作した際に, ロボット

¹ 筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of System and Information Engineering,
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

² 沖電気工業株式会社研究開発センター
Corporate Research and Development Center, Oki Electric
Industry Co., Ltd., Warabi, Saitama 335-8510, Japan

a) s1430196@u.tsukuba.ac.jp

を観察する人がディスプレイを正面以外の斜め方向から見る事が多くなる。このような状況では、ディスプレイの回転角度とそこに表示された遠隔操作者の顔画像（以後、単に「顔画像」）の回転角度が組み合わさることによって、遠隔操作者の注視方向が誤って知覚されてしまうため、これを解決することが課題となっている [8], [9]。しかし、現状では、ディスプレイの回転角度と顔画像の回転角度がそれぞれ変化した場合に、それらの組合せによって観察者が遠隔操作者の注視方向をどのように知覚するかを詳細に調査した研究は少ない。そこで本研究では、テレプレゼンスロボットにおいて注視方向を正確に伝達するための基礎的な知見として、ディスプレイの回転角度と顔画像の回転角度の様々な組合せによって、観察者が遠隔操作者の注視方向をどのように知覚するかを詳細に調査することを目的とする。

2. 関連研究

2.1 ディスプレイの動作により指向性を強調するテレプレゼンスロボット

Yankelovich ら [5] は、カメラを搭載したディスプレイと、それを回転させる機構を有する Porta-person を開発した (図 1)。遠隔操作者は PC 上のユーザインタフェースを操作してシステムを回転させることによって見たい方向の動画を取得でき、対話者はシステムの回転から操作者の注視方向を判断できる。Adalgeirsson ら [6] は、pan-tilt および前後動作が可能な可動式ディスプレイ (頭部) と、3 自由度の腕を有する MeBot を開発した (図 2)。MeBot は、遠隔操作者の顔画像から画像処理によって注視方向を検出し、検出された注視方向とロボットの頭部が同期するよう制御が行われる。Kawanobe ら [7] は、pan-tilt および前後動作が可能な可動式ディスプレイ (頭部) と、プロジェクタによる指さし映像の伝達機能を有する iRIS を開発した。iRIS も MeBot と同様に、遠隔操作者の頭の動きに連動してロボットのディスプレイが動作するようになっている。

これらの研究では、ロボットのディスプレイの向きによって、遠隔操作者の注視方向を伝達できると仮定しているが、実際にどの程度の精度で伝達できるのかは詳細に調

査されていない。

2.2 ディスプレイを斜めから見た場合の注視方向誤認の解決のための研究

Misawa ら [8] は、pan-tilt-roll の 3 自由度を有し、人の顔の形をした立体的なディスプレイに実際の人間の映像を投影することで顔の映像を 3 次元的に表示することができる LiveMask を開発した。そして固定された平面ディスプレイとの比較を行い、LiveMask は平面ディスプレイよりも正確に注視方向を伝達できることを示した。Divorra ら [9] は、TV 会議においてディスプレイを見る角度によってそこに表示されている対話者の注視方向が異なって知覚されるという課題を解決するため、見る角度に応じて異なる映像を表示する 3D ディスプレイの開発を行っている。

これらの研究では、ディスプレイを斜めから見た場合に注視方向が誤認されることを前提として解決法の提案を行っているが、そもそもディスプレイの回転角度とそこに表示される顔画像の回転角度がそれぞれ変化した際に、それらの組合せによって観察者が遠隔操作者の注視方向をどのように知覚するかを詳細に調査していない。

2.3 人間の注視方向の認知に関する研究

Anstis ら [10] は、対人条件 (実際の人と対面する条件) と可動式 TV ディスプレイ (CRT) に人物を表示した条件において、被験者が注視方向をどのように知覚するかを調べる実験を行った。提示する刺激は、対人条件と、顔画像を表示した TV 画面を一定の角度回転させる TV 条件 (TV 0°, TV+30°, TV-30°) であった。さらにそれぞれの条件の中で実験者の頭部を 0°, +30°, -30° に、視線を 5° 刻みで -20°~+20° に設定し、被験者に提示した。その結果、TV ディスプレイ回転効果、視線の過大評価、頭部回転効果という 3 つの現象を見出した。

TV ディスプレイ回転効果とは、TV ディスプレイを回転させることにより、注視方向がディスプレイの回転方向側にズレて知覚される現象のことをさす。この実験で用いられた TV ディスプレイは一般的な CRT であったため、表面が曲面となっており、Anstis らはこの曲面によって映し



図 1 Porta-person
Fig. 1 Porta-person.



図 2 Mebot
Fig. 2 Mebot.

だされた顔が3次元的な立体物として知覚されることが、ズレの原因であると推測した。

視線の過大評価とは、対人で頭部を回転させないという条件において、注視方向が10°以上である場合に、実際の注視方向よりもさらに大きな角度方向を注視していると被験者が知覚してしまうことをさす。これに対してAnstisらは、人間は相手の眼裂内の白目と黒目の割合から視線を判断することに着目し、眼裂周辺では眼球自体の回転角度以上に黒目の相対的位置が変化したように見えることが過大評価の原因であると説明した。なお視線の過大評価については森井ら[11]や真覚ら[12]も同様の結果を報告しており、さらに5°以下では逆に過小評価される場合があることも報告している。

頭部回転効果とは、頭部の回転方向とは逆方向に視線が過大評価される現象のことをさす。たとえば、実験者が被験者から見て右側30°に頭部を向けた状態で被験者の方向を見た場合、被験者は自分より左側を見ていると感じてしまう。Anstisらは、この現象についても視線の過大評価同様、黒目が眼裂周辺に近づくことに起因すると説明している。なお、頭部回転効果についてはCline[13]やGibsonら[14]も同様の結果を報告している。

2.4 本研究の位置づけ

Anstisらの研究は、回転するディスプレイに表示された人の顔の注視方向を評価するという点で、本研究と共通点を持つ。しかし以下の理由により、Anstisらの研究結果による知見は限定的であると考えられる。

- TVディスプレイ回転効果は、実験に用いたCRTの表面が曲面であったことによる影響とされ、現在一般的に使用されている、完全な平面である液晶ディスプレイにおける効果は調査されていない。
- TVディスプレイとそこに表示される顔画像の回転角度の組合せが限定的である(TVディスプレイの角度が0°, +30°, -30°の3方向のみ)。テレプレゼンスロボットにおいては、操作方法に応じて様々なディスプレイと顔画像の回転角度の組合せが想定される。
- 視線と頭部の回転角度をそれぞれ独立した要因として組み合わせた条件で評価が行われているため、通常のコミュニケーションにおける自然な注視が想定されていない。人間の通常の見回し動作においては、頭部と眼球は連動して回転し、それらの組合せによって特定方向への注視が行われる。このときの頭部と眼球の回転角度の比率は分担比と呼ばれており(図3)、杉江[15]や山田[16]らにより研究が行われている。

そこで本研究では、平面の液晶ディスプレイを用いて、テレプレゼンスロボットで想定されるディスプレイと顔画像の回転角度を様々な組み合わせた条件で、注視方向について評価を行う。用いる顔画像は自然な分担比に基づいた

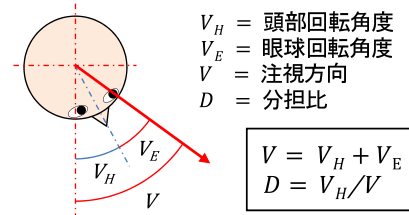


図3 分担比

Fig. 3 Sharing ratio.

ものとする。

3. 実験

本研究では、ディスプレイの回転角度と、そこに表示された顔画像の回転角度の組合せによって観察者が遠隔操作者の注視方向をどのように知覚するかを明らかにするための実験を行う。この際、ディスプレイには平面の液晶ディスプレイを用いる。また、用いる顔画像は自然な分担比に基づいたものとする。分担比は教示方法等の条件により変化するものとされているため[16]、実際に実験を行う環境において事前に分担比の計測および評価を行い、実験で提示する刺激は計測された分担比を反映したものとした。

3.1 実験方法

3.1.1 実験条件

本実験では、以下の5条件の比較を行った(図4)。

- (1) 対人条件(Person): 被験者は実際の人間(実験者)と対面し、その人間の注視方向を推定する。実験者は、注視目標のルール上の目盛を事前実験(3.1.4項参照)で求めた分担比で注視する。
- (2) 画像回転・ディスプレイ固定条件(Turn Image-Fixed Display): 被験者は液晶ディスプレイと対面し、ディスプレイ内に表示された顔画像の注視方向を推定する。ディスプレイは被験者に正対するように固定した状態で、事前実験で求めた分担比で特定の角度を注視している顔画像(頭部と眼球の両方が回転)を表示する。以後、略称として「画像のみ回転条件」と表記する。
- (3) 画像固定・ディスプレイ回転条件(Fixed Image-Turn Display): 被験者は液晶ディスプレイと対面し、ディスプレイ内に表示された顔画像の注視方向を推定する。ディスプレイには正面方向を注視している顔画像のみを表示し、ディスプレイの回転角度のみを変化させる。以後、略称として「ディスプレイのみ回転条件」と表記する。
- (4) 画像・ディスプレイ回転条件(同角度)(Turn Both: Same angle): 被験者は液晶ディスプレイと対面し、ディスプレイ内に表示された顔画像の注視方向を推定する。ディスプレイには事前実験で求めた分担比で特定の角度を注視している顔画像(頭部と眼球

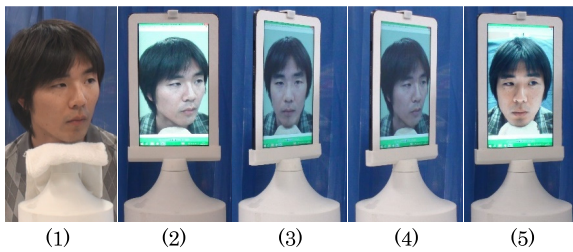


図 4 提示刺激 (45°)

Fig. 4 Presented stimuli (45°).

の両方が回転) を表示する。ディスプレイは注視方向の角度と等しい角度回転する。以後、略称として「両方回転 (同角度) 条件」と表記する。

- (5) 画像・ディスプレイ回転条件 (分担比反映) (Turn Both : Sharing ratio) : 被験者は液晶ディスプレイと対面し、ディスプレイ内に表示された顔画像の注視方向を推定する。ディスプレイには正面を向いて眼球のみを回転させた顔画像を表示する。このとき、眼球の回転角度は提示する角度に応じて事前実験で求めた分担比から求めたものとする。ディスプレイは、分担比から求めた頭部回転角度と等しい角度回転する。この条件は、人間の頭部の回転をディスプレイの回転に置き換えたものと見なせる。以後、略称として「両方回転 (分担比) 条件」と表記する。

これらの5条件それぞれについて、0°, 5°, 10°, 15°, 30°, 45°, 60° の7方向の刺激を提示する。従来の研究において、提示方向の左右の差によって、実験結果の傾向に違いが見られていないことから [10], [11], 刺激は片側 (被験者から見て右側) に限定した。この際、各条件で提示する顔情報は分担比を反映したものとする (今回用いる分担比については 3.1.4 項参照)。なお、(2) は遠隔操作者の周囲に広視野角をカバーするディスプレイ [17], [18] を設置し、遠隔操作者がこれに対して自然な見直し動作をしている様子を正面の1台のカメラで撮影している状況を想定している。(3) は Porta-person [5] の遠隔操作ユーザインタフェースのように、遠隔操作者が比較的小さいディスプレイでロボットから送られてくる映像を見ながら、マウスやキーボード等を利用してロボットを操作する状況を想定している。このような状況では、遠隔操作者の頭部と眼球はあまり動かないと考えられる。(4) は Mebot [6] や iRIS [7] のようにシステムが遠隔操作者の注視方向を検出し、その情報に基づいてロボットを動作させる状況を想定している。ただし、ユーザインタフェースは(2)と同様に広視野角をカバーするものを想定している。(5) は(2)と(4)の中庸の条件として、本研究のために特に設定した。

3.1.2 実験装置

実験装置は、ディスプレイと回転機構、および回答用ポインタから構成される (図 5)。ディスプレイには 10.8 イ

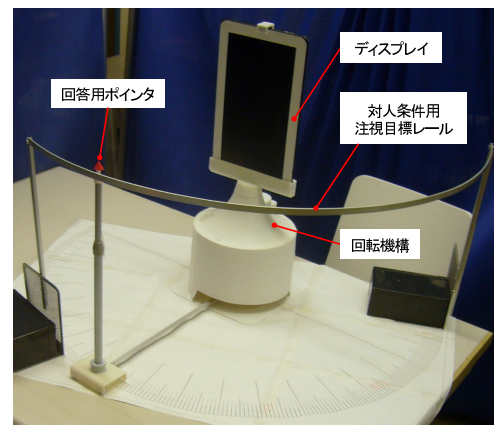


図 5 実験装置

Fig. 5 Equipment for the experiment.

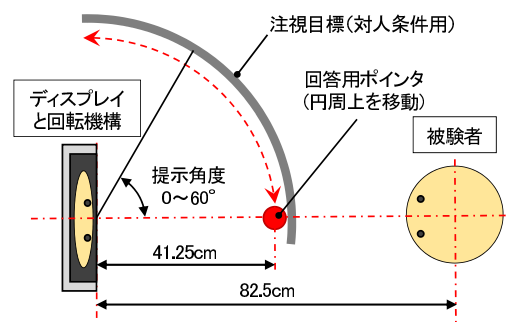


図 6 実験環境

Fig. 6 Experiment setup.

ンチのタブレット端末 (Dell 社 Venue 11 Pro) を使用した。端末には IPS 方式の液晶ディスプレイが採用されており、上下左右 178° の視野角を持つ。10.8 インチのディスプレイを選択した理由は、市販のテレプレゼンスロボットに、10 インチ前後のタブレット PC を使用したものが多いためである [19], [20]。この際、ディスプレイ上の顔画像の大きさは実際の人間よりも小さくなるが、後述する実験結果より、大きさの違いによる影響は無視できる程度であると考えている (4.1.2 項参照)。タブレット端末上で制御プログラムを実行することで、回転機構と回答用ポインタの制御を行った。回転機構と回答用ポインタには近藤科学製のサーボモータ (KRS-788HV, KRS-4014HV) とコントロールボード (RCB-3HV) を用いた。なお、回答用ポインタは先端部の高さ変更が可能である。

3.1.3 実験環境

構築した実験環境を図 6 に示す。実験の際、被験者はあご乗せ台にあごを乗せ頭部を固定する。システムから被験者までの距離は 82.5 cm とした。これは、Hall により定義された対人距離における、個人的距離にあたる [21]。また、41.25 cm (ディスプレイと被験者の中間地点) の距離の位置に回答用ポインタを配置した。回答用ポインタは、ディスプレイを中心とする円周上を手動で移動できる。また、刺激を提示する直前にはモータ駆動によって、初期位置に

移動させることができる。被験者は提示された刺激から、その注視方向を推定し、その位置までポインタを移動させることによって回答した。このとき、被験者が頭をあご乗せ台に固定したままポインタを移動させられるように、操作棒を使わせた。対人条件の場合は、回転機構からディスプレイを取り外し、回転機構の中心に合わせて実験者用のあご乗せ台を設置した。また、回答用ポインタと同じ円周上に、対人条件において実験者が注視方向を決めるために用いる注視目標のレールを設置した(図5参照)。レールの実験者側には、注視目標となる目盛があり、実験者はその目盛を見ることで特定角度の刺激を提示する。なお、被験者側からは目盛は確認できない。実験にあたっては、システムに映す人物画像(もしくは対人条件の実験者)の視線の高さと、被験者の視線の高さ、および回答用ポインタの先端の高さがそれぞれ一致するようにあご乗せ台の高さ、および回答用ポインタの高さを調整した。対人条件用の注視目標レールは、被験者から見て実験者の目が隠れないよう、それぞれの視線高さより1cm下に配置した。この際、実験者の視線は被験者から見て約1°下に下がるが、Clineの研究によれば実験者の視線は約1°上にずれて知覚されるという知見が得られており[13]、この誤差は許容範囲内であると考えた。また、この位置関係においては、注視用レールにより実験者の顔の一部(鼻の下付近)が隠れるが、Clineの研究において、実験者の顔の下半分がすべて隠れていても視線方向の判断には影響がないことが明らかになっていることから、影響は少ないと判断した。

3.1.4 分担比計測のための事前実験

主実験における適切な分担比を求めるための事前実験を行った。事前実験には、主実験における対人条件と同じ環境を用い、被験者は初めに中心点(0°)を注視した後、指定された注視点を見た。この際、あご乗せ台は位置決めのためだけに用い、頭部位置を決めた後は回転動作に影響が出ないように、あご乗せ台から頭部をわずかに浮かせ、頭部を自由に動かせる体勢とするよう指示を行った。被験者の頭部角度を計測するために、CyVerse社のステレオラベリングカメラを用いた。注視点は主実験に用いる6方向(5°~60°)とし、5°から小さい順に60°まで注視を行うという一連の注視行動を3回繰り返した。被験者は4名とした。角度ごとのすべての注視行動での頭部回転角度の平均値を求めた結果を図7に示す。この結果から、分担比は角度が大きいくほど大きくなり、最終的に50%を超えるという、従来の研究結果と同様な傾向が見られた[15]、[16]。そこで、主実験の実験者として、4名のうち最も平均に近かった1名を選んだ。そして、計測された平均的な分担比で、決められた角度を注視している映像を撮影した。また、対人条件での刺激の提示にあたっては、求めた分担比を反映した刺激となるよう、事前に練習を行った。

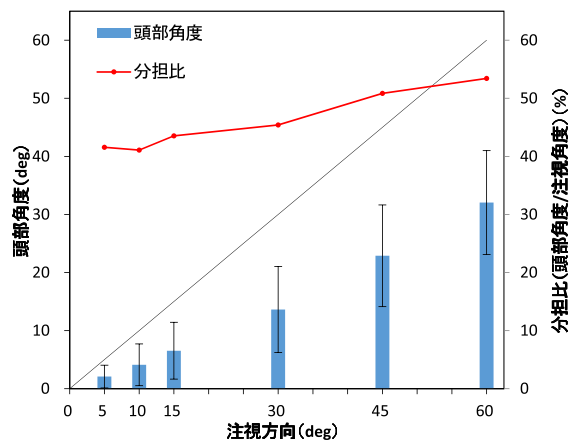


図7 分担比計測の結果(図中の直線は注視角度)
 Fig. 7 Measurement result of sharing ratio (straight line in the graph refers the gaze direction).

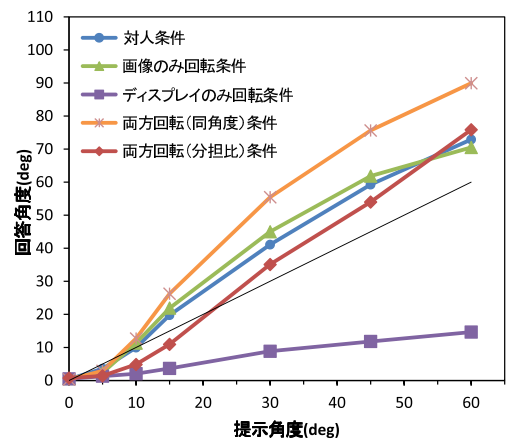


図8 全回答の平均(図中の直線は提示角度)
 Fig. 8 Average of all responses (straight line in the graph refers the presented direction).

3.1.5 主実験の手続き

被験者は、システム(もしくは実験者)が提示する刺激から推測した注視方向にポインタを合わせて回答を行う。被験者は試行開始まで目を閉じ、開始の合図とともに刺激を確認し、ポインタを動かして回答を行い、回答が終わったら再び目を閉じる。各条件で、7方向の刺激をランダムに1回ずつ提示する試行を1セットとし、2セットを1タスクとして、1条件あたり計14回の試行を行った。各被験者はこのタスクを5つの条件で1回ずつ実施し、順序効果の影響に配慮し、条件の順序は被験者ごとにランダムにした。各被験者は条件(5)×角度(7)×セット(2)=70試行を実施し、全体の所要時間は約50分程度であった。なお、実験内容の説明後、練習として4回の試行を行った(4回の刺激の内容は全被験者共通)。

3.1.6 被験者

被験者は正常な視力を有する大学生、大学院生、および社会人の10名(男性9名、女性1名)で、平均年齢は26.8歳であった。

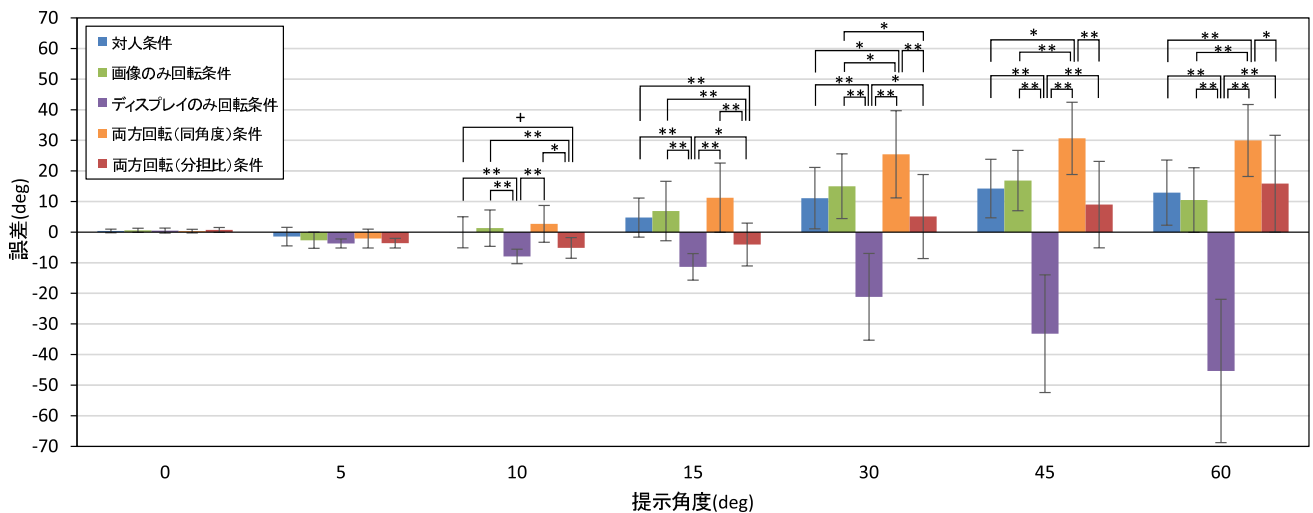


図 9 角度ごとの条件間多重比較 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, +: $p < 0.1$)

Fig. 9 Multiple comparison between the conditions in each angle (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, +: $p < 0.1$).

3.2 主実験の結果

各条件・角度ごとの全回答の平均値を示したグラフを図 8 に示す。統計的な分析にあたっては、各回答値を誤差 (= 提示角度 - 回答角度) に換算した。そして、条件 (5 水準)、角度 (7 水準)、セット順序 (2 水準) を要因として、3 要因の分散分析を行った。ここでセット順序とは、1 タスクにおける 1 セット目か 2 セット目かの区別をさす。

3 要因の分散分析の結果、条件・角度・セット順序のそれぞれについて、主効果が有意であった (それぞれ $F(4,6)=59.8$, $p < 0.01$; $F(6,4)=7.15$, $p < 0.05$; $F(1,9)=13.6$, $p < 0.01$)。また、条件と角度の 1 次の交互作用が有意であった ($F(24,216)=35.7$, $p < 0.01$)。そこで下位検定として、提示角度ごとに各条件間での単純主効果の検定および多重比較を行った。多重比較の結果を図 9 に示す。

図 9 に示すように、 $0^\circ \cdot 5^\circ$ においては各条件間で有意差は見られなかった。 $10^\circ \cdot 15^\circ$ においては、ディスプレイのみ回転条件と両方回転 (分担比) 条件が、それ以外の 3 条件と比べてマイナス方向 (提示された角度より小さい角度を回答した場合) の誤差が有意に大きかった。 $30^\circ \cdot 45^\circ \cdot 60^\circ$ では、ディスプレイのみ回転条件が他の 4 条件と比べてマイナス方向の誤差が有意に大きかった。また、両方回転 (同角度) 条件は他の 4 条件と比べてプラス方向の誤差が有意に大きかった。なお、 30° では両方回転 (分担比) 条件が画像のみ回転条件よりもマイナス方向の誤差が有意に大きかった。

4. 考察

4.1 条件ごとの考察

4.1.1 対人条件

図 8 に示すように、対人条件では 10° 以下の範囲で注視方向はほぼ正確か、もしくは過小評価される傾向があり、

15° 以上においては過大評価が見られた。これは、従来研究と同様の傾向であり [10], [11], [12], 今回の実験設定は他の条件と比較するための基準として適切であると考えられることができる。

なお、今回の実験では、分担比を反映した注視を行っているが、得られた結果は従来研究と同様であった。分担比を反映する場合、視線のみで注視を行う場合と比較して黒目の移動量は減少するが、頭部の回転により、それを補う注視方向の過大評価が発生したと考えられる。これは、回転方向側の白目の視認性が低下し、黒目が眼裂側に寄っているように知覚されることで発生したと推測される。なお、Anstis らの定義した頭部回転効果は、頭部と眼球の回転方向が逆の場合の現象であったのに対し、ここで説明した頭部の回転による過大評価は、頭部と眼球が同一方向に回転した場合の現象である。そこで本論文では、前者を「逆方向の頭部回転効果」、後者を「順方向の頭部回転効果」と呼ぶこととする。

4.1.2 画像のみ回転条件

同様に図 8 より、画像のみ回転条件では、注視方向の過大評価が見られ、対人条件とほぼ同様な傾向が示された。これは従来研究と同様な傾向であり [22], 分担比を反映した顔画像を提示した場合も同様な結果となることが示された。この結果より、本条件のように比較的一般のビデオ会議に近い、ディスプレイが動作しないような条件では、対人条件と同等の精度で注視方向を伝達可能であることが分かった。ただし、本条件と同様の顔画像をディスプレイに提示するためには、遠隔操作者のユーザインタフェースとして広視野角をカバーする特殊なディスプレイを提供しなければならないという問題がある。また、人と人が対面した状況では、注視方向の過大評価が生じて、手振り等で適時修正することが可能であるのに対し、遠隔対話では遠

隔で手振りを利用しにくいことから、顔画像のみから、対人している場合以上に正確に注視方向を知覚できるようになることが望まれる。

なお、画像のみ回転条件の結果が対人条件とほぼ同様な傾向であることから、3.1.2 項で述べた、ディスプレイ上の顔画像の大きさが対人条件と比較して小さくなることによる影響は無視できる程度であると考えられる。

4.1.3 ディスプレイのみ回転条件

多重比較の結果より、ディスプレイのみ回転条件では、 10° 以上で他の条件よりもマイナス方向の誤差が有意に大きくなることが分かった。被験者の回答角度は、提示角度にかかわらず 0° に近い結果となっており、これはモナリザ効果（平面上に、正面に視線を向けた顔画像が表示されていると、鑑賞者が見る位置を変えても、つねに自分の方向を見ているように感じられる心理的効果）により、つねに被験者の方を見ていると判断されたことを示している。この結果より、遠隔操作者がロボットから送られてくる画像を、比較的小さな首振りで隔々まで見られる程度の大きさのディスプレイで観察するようなインタフェース [5] を用いている場合は、いくらロボットの頭部を動作させても、注視方向の伝達という観点では効果が低いことが分かった。

4.1.4 両方回転（同角度）条件

両方回転（同角度）条件は、画像のみ回転条件の刺激に提示角度分のディスプレイ回転を追加したものと考えることができる。多重比較の結果より、 30° 以降で画像のみ回転条件よりプラス方向の誤差が有意に大きくなることが分かった。つまり、ディスプレイを回転させることで、ディスプレイの回転方向に刺激が過大評価されることが示された。このことから、従来研究で示された TV ディスプレイ回転効果と同様に、平面である液晶ディスプレイにおいても、画面の回転による過大評価が発生することが明らかになった。この現象を「平面ディスプレイ回転効果」と呼ぶこととする。Anstis らは、TV ディスプレイ回転効果は画面の曲面によるものと説明しているが、今回の結果からは他の要因も存在することが分かった。

本条件では、画像のみ回転条件と同様に、遠隔操作者の視野角を広くカバーするディスプレイを使用する場合を想定している。本実験結果は、そのような場合に安易に遠隔操作者の注視方向に連動してロボットの頭部を動作させると、視線の伝達精度は頭部を固定している場合よりもむしろ悪化してしまう可能性があることが分かった。

4.1.5 両方回転（分担比）条件

人間の頭部の回転による影響と、ディスプレイの回転による影響を比較するため、両方回転（分担比）条件と対人条件の比較を行う。図 8 より、 $10^\circ \sim 45^\circ$ の範囲で両方回転（分担比）条件は対人条件よりも $5^\circ \sim 10^\circ$ 程度小さい回答角度となっている。また 60° においては対人条件とほぼ同じ回答角度となっている。それぞれの条件において眼球

の回転角度は共通であるため、差分は人間の頭部を回転させるかディスプレイを回転させるかの違いである。このことから、ディスプレイの回転よりも人間の頭部の回転の方がより大きな過大評価を生じさせる効果があると考えられる。つまり、平面ディスプレイ回転効果よりも順方向の頭部回転効果の方が過大評価を生じさせる効果が大きいと考えられる。

なお、両方回転（分担比）条件においては提示角度が 15° まで過小評価が見られるが、これは Anstis らの視線の過大評価と、平面ディスプレイ回転効果により説明される。事前に計測した結果から、今回の実験環境での分担比は 50% 程度としたため、眼球の回転角度とディスプレイの回転角度は提示角度の約半分となる。そのため 15° 以下では眼球とディスプレイの回転角度が 10° 以下であり、視線の過大評価および平面ディスプレイ回転効果は発生しないため、注視方向は過小評価される。提示角度が 30° 以上になると、眼球とディスプレイの回転角度は約 15° となり、視線の過大評価が発生する。ここで両方回転（同角度）条件の結果からはディスプレイ角度約 15° でディスプレイの回転効果が発生するかは不明であったが、視線の過大評価についての従来研究において、眼球角度 15° の場合に知覚される方向は 20° 程度であるのに対し [10], [11], 今回の結果は 30° 以上となっていることから、 15° の時点で平面ディスプレイ回転効果が発生すると考えられる。

4.2 正確な注視方向提示のための補正手法の検討

4.1 節の考察から、今回考察を行った 5 条件ではいずれも誤差が発生し、正確な注視方向の提示が行えていないことが分かった。本節では、得られた結果のうち、画像のみ回転条件と両方回転（同角度）条件に着目し、これらの条件でテレプレゼンスロボットでの使用を想定した補正手法を検討する。まず画像のみ回転条件においては、 45° 近辺の注視が 60° と知覚されていることに着目し、システムから見て 60° の方向を見るために必要となる操作者の注視点移動量が 45° 近辺となるように補正を行う。具体的には、図 10 に示すように遠隔操作者に提示するカメラ取得映像の幅を補正する。この際、 5° 以下の部分ではもともと提示角度に近い結果が得られているため、上記の補正は 5° を超える角度において適用する。両方回転（同角度）条件では、被験者の 30° 近辺の注視が 60° と知覚されていることに着目し、同様の補正を行う。

図 11 にそれぞれの条件の補正後のグラフを示す。画像のみ回転条件では、 5° 以降の提示角度 (X) を以下の式で補正している。このとき 43° の結果が 60° に換算される。

$$X' = \frac{(60 - 5)}{(43 - 5)}(X - 5) + 5$$

また、両方回転（同角度）条件では、 5° 以降の提示角度 (X) を以下の式で補正している。このとき 33° の結果が

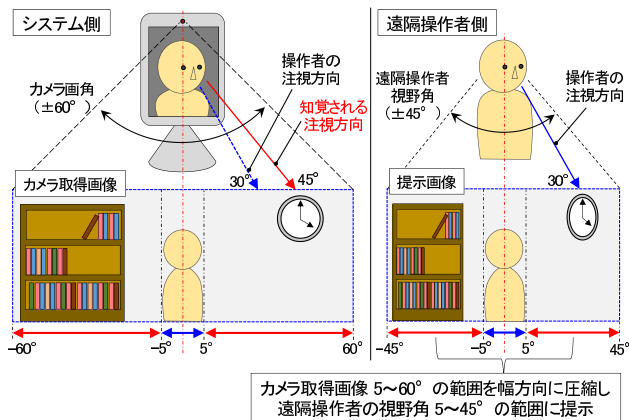


図 10 補正手法
Fig. 10 Correction method.

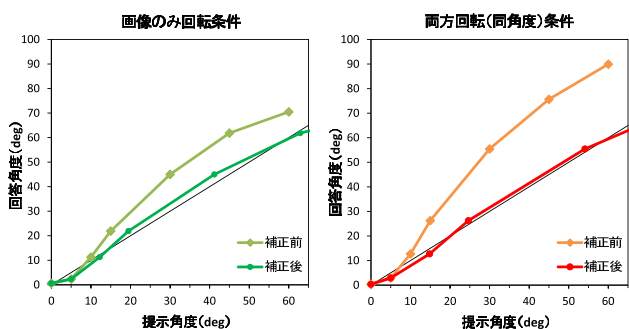


図 11 補正結果 (図中の直線は提示角度)
Fig. 11 Correction results (straight line in the graph refers the presented direction).

60°に換算される。

$$X' = \frac{(60 - 5)}{(33 - 5)}(X - 5) + 5$$

これらの補正にあたっては、VDT作業のための環境の機能条件に基づき [23]、遠隔操作者の目からディスプレイまでの距離を 50 cm と設定した場合、画像のみ回転条件では 16 対 9 のアスペクト比で 46 インチのディスプレイ、両方回転 (同角度) 条件では 16 対 9 のアスペクト比で 30 インチのディスプレイが必要であることになる。

このように、それぞれの条件で適切な補正を行うことで、適切な注視方向の提示が可能となるとともに、使用するディスプレイの大きさも比較的小さくすることができる可能性がある。ただし、これらの補正手法の効果は、今後の実験により検証する必要がある。

なお、両方回転 (分担比) 条件については、検証のための条件であり実際のシステムを想定していないため具体的な検討は行わないが、今回提案した手法を応用し、過小評価されている範囲と過大評価されている範囲に異なる補正をかけることで適切な注視方向の提示が可能となることが予測される。

5. おわりに

本研究では、テレプレゼンスロボットにおいて注視方向を正確に伝達するための基礎的な知見を得るために、ディスプレイの回転角度とそこに表示する顔画像の回転角度がそれぞれ変化した際に、それらの組合せによって観察者が遠隔操作者の注視方向をどのように知覚するかを明らかにするための実験を行った。ディスプレイには平面の液晶ディスプレイを用い、テレプレゼンスロボットで想定されるディスプレイと顔画像の回転角度の様々な組合せを想定した条件で評価を行った。用いる顔画像は自然な分担比に基づいたものとした。実験結果より、すべての顔画像表示条件で知覚される注視方向に誤差が生じていることが分かった。実験結果をもとに、画像のみ回転条件と両方回転 (同角度) 条件について、テレプレゼンスロボットでの使用を想定した補正手法の検討を行った。提案する手法を用いたシステムの構築と検証については、今後の課題とする。なお、本研究では水平方向の注視に限定して注視を行ったが、垂直方向についても同様な検証を行う必要がある。また、本研究で得られた知見はシステムに対して対話者が正面にいる場合に限定される。テレプレゼンスロボットでの使用を想定した場合、対話者やロボットが移動する状況や、ロボットを複数人が同時に見る状況が考えられ、このような場合はロボットを正面以外から見ることになるため、今後本実験の環境において被験者が実験装置を正面以外の角度から見る場合の検証を行う必要がある。

参考文献

- [1] Goodwin, C.: *Professional vision*, American anthropologist 96.3, pp.606-633 (1994).
- [2] Moore, C. and Dunham, P.J.: *Joint Attention: Its origins and Role in Development*, Lawrence Erlbaum (1995). 大神英裕 (訳): ジョイント・アテンション: 心の起源とその発達を探る, ナカニシヤ出版 (1999).
- [3] Ishii, H., Kobayashi, M. and Grudin, J.: Integration of interpersonal space and shared workspace: ClearBoard design and experiments, *ACM Trans. Information Systems (TOIS)* 11.4, pp.349-375 (1993).
- [4] Heath, C. and Luff, P.: Disembodied conduct: Communication through video in a multi-media office environment, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM (1991).
- [5] Yankelovich, N., Simpson, N., Kaplan, J. and Provino, J.: Porta-person: Telepresence for the connected conference room, *CHI'07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM (2007).
- [6] Adalgeirsson, S.O. and Breazeal, C.: Mebot: A robotic platform for socially embodied presence, *Proc. 5th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction*, pp.15-22, IEEE Press (2010).
- [7] Kawanobe, H., Aosaki, Y., Kuzuoka, H. and Suzuki, Y.: iRIS: A remote surrogate for mutual reference, *Proc. 8th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction*, pp.403-404, IEEE Press (2013).

- [8] Misawa, K., Ishiguro, Y. and Rekimoto, J.: Livemask: A telepresence surrogate system with a face-shaped screen for supporting nonverbal communication, *Proc. International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp.394–397, ACM (2012).
- [9] Divorrra, O., Civit, J., Zuo, F., Belt, H., Feldmann, I., Chreer, O. and Braspenning, R.: Towards 3D-aware telepresence: Working on technologies behind the scene, *Proc. ACM CSCW: New Frontiers in Telepresence* (2010).
- [10] Anstis, S.M., Mayhew, J.W. and Morley, T.: The perception of where a face or television ‘portrait’ is looking, *The American journal of psychology*, pp.474–489 (1969).
- [11] 森井精啓, 岸野文郎, 鉄谷信二: 眼の CG アニメーションと視線の知覚に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告 IE, 画像工学, Vol.93, No.176, pp.17–24 (1993).
- [12] 真覚 健, 丸山欣哉, 桐田隆博: 他者の視線方向の知覚, 日本心理学会第 54 回発表論文集, p.513 (1990).
- [13] Cline, M.G.: The perception of where a person is looking, *The American journal of psychology*, pp.41–50 (1967).
- [14] Gibson, J.J. and Pick, A.D.: Perception of another person’s looking behavior, *The American Journal of Psychology*, pp.386–394 (1963).
- [15] 杉江 昇: 眼球運動系のシステム解析, 電気試験所研究報告, No.693, pp.59–75 (1968).
- [16] 山田光穂: 2次元平面上の視標を注視させたときの頭部運動と眼球運動の協調関係の分析, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.75, No.5, pp.971–981 (1992).
- [17] 橋本 渉, 岩田洋夫: 凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ: Ensphered Vision (<特集> プロジェクション型没入ディスプレイ), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.3, pp.479–486 (1999).
- [18] Cisco Systems: Cisco TelePresence TX9000 シリーズ (online), available from <http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/tp/tp9000> (accessed 2014-06-23).
- [19] Revolve Robotics: Revolve Robotics (online), available from <https://revolverobotics.com> (accessed 2014-06-23).
- [20] Double Robotics: Double Robotics - Telepresence Robot for Telecommuters (online), available from <http://www.doublerobotics.com> (accessed 2014-06-23).
- [21] Hall, E.T.: *The Hidden Dimension*, Doubleday & Company (1966). 日高敏隆, 佐藤信行 (訳): かくれた次元, みすず書房 (1970).
- [22] Gale, C. and Monk, A.F.: Where am I looking? The accuracy of video-mediated gaze awareness, *Perception & psychophysics*, Vol.62, No.3, pp.586–595 (2000).
- [23] 田村 博: ヒューマンインタフェース, オーム社 (1998).



葛岡 英明

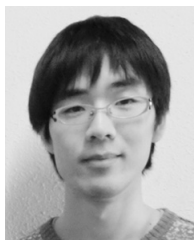
葛岡 英明 (正会員)

1962 年生。1986 年東京大学工学部機械工学科卒業。1992 年同大学大学院情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。CSCW, HRI の研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, ACM 各



鈴木 雄介

2003 年北海道大学大学院システム情報工学専攻修士課程修了。同年沖電気工業株式会社に入社。支援工学, ヒューマンインタフェース, 遠隔コミュニケーションに関する研究開発業務に従事。日本ロボット学会会員。



川口 一画 (学生会員)

1986 年生。2008 年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。2010 年同大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程修了。同年パナソニックモバイルコミュニケーションズ (株) 入社。2014 年同

社退職の後, 現在筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士後期課程在学中。CSCW, HRI の研究に従事。