

三項関係における行為の連鎖を考慮した
コミュニケーションロボットの設計

2017年 9月

川口 一画

三項関係における行為の連鎖を考慮した
コミュニケーションロボットの設計

川口 一画

システム情報工学研究科
筑波大学

2017年 9月

概要

本研究では、三項関係の場で利用されるコミュニケーションロボットを適切にデザインするという課題に対して、人間同士のコミュニケーションにおける「行為の連鎖 (sequence)」という概念に注目した。「行為の連鎖」とは、話し手の発話と聞き手の応答との間に形成された発話間の関係のことであり、会話の参加者は行為の連鎖を通して共通の知識や信念を確立することで、お互いに協力しながら連鎖的に何らかの目的を遂行していく。本研究ではこのような行為の連鎖に関する知見に基づき、コミュニケーションロボットが特定の目的を達成するためには、ロボットが提示する個別の行為だけに着目するのではなく、そこから誘起される対話者の行為を含めた行為の連鎖に着目することが有効であると考えた。これにより、コミュニケーションロボットにより提示された行為がどのようなプロセスで目的達成につながるかを把握し、課題が発生した際にその原因を特定し適切な対策を行うことが可能となる。本研究では、このような設計指針に基づいて実施した研究事例に基づき、行為の連鎖を考慮した設計の有効性を示すことを目的とする。具体的なコミュニケーションロボットとして、鑑賞支援ロボットとテレプレゼンスロボットを対象とした。

鑑賞支援ロボットについては、ロボットが指さし等の非言語的表現を用いて対象物への注意誘導を行った際、動作に気付かれず注意誘導が達成されないという課題に対して、人間同士のコミュニケーションにおいて用いられる注意獲得のための方策（沈黙・言い直し、身体ねじり）をコミュニケーションロボットに適用しその効果の検証を行った。そしてそれらの行為がコミュニケーションロボットにおいても有効であり、注意獲得につながる行為の連鎖を誘起することが示された。

テレプレゼンスロボットについては、ディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットにおいて遠隔参加者の存在感や参加が達成されないという課題に対し、円滑なコミュニケーションを達成する上で重要な役割を果たす基盤化を達成するため、注視方向伝達の課題を解決することを目的とした研究を実施した。具体的な取り組みとして、既存のテレプレゼンスロボットを想定した様々な条件における注視方向伝達精度の評価を行った後、そこで示された課題を解決するためヒューマノイドロボットの頭部を付与したテレプレゼンスロボットの提案を行った。そして提案手法により注視方向の伝達精度が向上し、目が合っている感覚や同じ場所にいる感覚等の印象が改善すること、さらに基盤化の証拠となる相互注視の達成という行為の連鎖が誘起されることが示された。

最後にそれぞれの研究事例に基づいて、本研究で提案する行為の連鎖を考慮した設計の効果を示すとともに、それぞれの研究事例における取り組みをもとに特定の課題に対して行為の連鎖を考慮した設計を行うための指針を示した。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
第2章	行為の連鎖に関わる社会学的知見	3
2.1	行為の連鎖	3
2.2	共同行為の階層	4
2.3	基盤化	5
2.4	基盤化における視線の役割	5
2.5	注意獲得に関連する知見	6
2.5.1	沈黙・言い直し	6
2.5.2	F陣形と身体ねじり	7
2.6	行為の連鎖に関わる各概念のまとめと本研究の指針	9
第3章	関連研究	10
3.1	鑑賞支援ロボットに関する研究	10
3.2	ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットに関する研究	12
第4章	鑑賞支援ロボットにおける「沈黙・言い直し」の効果	14
4.1	システム構成	14
4.2	実験	16
4.2.1	実験方法	16
4.2.2	実験条件	17
4.2.3	評価項目	19
4.3	実験結果	20
4.4	考察	21
4.4.1	注意獲得確率の時間的な推移	21
4.4.2	適切さの問題	22
4.5	まとめ	23
第5章	鑑賞支援ロボットにおける「身体ねじり」の効果	24
5.1	鑑賞支援ロボット「TalkTorque2」	25
5.2	実験	27
5.2.1	実験環境	27
5.2.2	実験条件	28
5.2.3	実験タスク	29
5.2.4	評価項目	30
5.3	実験結果	30
5.3.1	調整歩数	30
5.3.2	被験者と絵画の距離	32
5.3.3	視線方向	33
5.3.4	アンケート	34
5.4	考察	36

5.4.1	F 陣形の再構築に関する考察	36
5.4.2	被験者の視線方向に関する考察	37
5.5	まとめ	37
第6章	ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットに表示される顔画像の注視方向評価	38
6.1	ディスプレイに表示された顔画像の注視方向認知に関する研究	39
6.2	実験	41
6.2.1	実験条件	41
6.2.2	実験装置	43
6.2.3	分担比計測のための事前実験	45
6.2.4	実験の手続き	46
6.3	実験結果	47
6.4	考察	49
6.4.1	条件ごとの考察	49
6.4.2	複数の方向からシステムを見る場合の課題	51
6.5	まとめ	52
第7章	ヒューマノイドロボットの頭部を付与したテレプレゼンスロボットの提案	53
7.1	物理的なインジケータとしてのヒューマノイドロボット頭部付与	54
7.1.1	関連研究	54
7.1.2	システム構成	55
7.2	実験Ⅰ：注視方向伝達精度の評価	56
7.2.1	実験方法	56
7.2.2	実験条件	56
7.2.3	実験結果	58
7.2.4	考察	59
7.3	実験Ⅱ：対話実験	60
7.3.1	実験方法	60
7.3.2	実験条件	63
7.3.3	評価項目	65
7.3.4	実験結果	68
7.3.5	考察	71
7.4	ロボット頭部付与の効果の考察	72
7.5	まとめ	73
第8章	行為の連鎖を考慮した設計の有効性に関する考察	74
8.1	本研究における取り組みと得られた成果	74
8.2	行為の連鎖を考慮した設計指針	77
8.3	本研究の制約と今後の課題	79
第9章	結論	80
	謝辞	82
	参考文献	83
	公表論文リスト	86

目次

図 2-1	社会的 F 陣形と道具的 F 陣形	7
図 2-2	身体ねじり	8
図 2-3	行為の連鎖・階層モデル	9
図 3-1	鑑賞支援ロボットにおける課題	11
図 3-2	ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットにおける課題	13
図 4-1	案内ロボットの外観	15
図 4-2	システム概要	15
図 4-3	実験の様子	17
図 4-4	評価範囲において鑑賞者がロボットを見た確率の時間的推移	21
図 5-1	TalkTorque2 の胴体部機構	26
図 5-2	測域センサによる被験者位置の推定	26
図 5-3	実験環境	27
図 5-4	実験条件	28
図 5-5	各フェーズ終了時点で身体方向を調整した割合	31
図 5-6	各フェーズにおける平均調整歩数	31
図 5-7	各フェーズにおける被験者-絵画距離の平均	32
図 5-8	各条件におけるロボットを見た時間の平均	33
図 5-9	各質問項目の平均得点	35
図 6-1	分担比	40
図 6-2	各実験条件の刺激提示 (45°)	42
図 6-3	実験装置	44
図 6-4	実験環境	44
図 6-5	分担比計測の結果 (図中の直線は提示角度)	45
図 6-6	全回答の平均 (図中の直線は提示角度)	47
図 6-7	角度毎の条件間多重比較結果	48
図 6-8	複数方向から画像を見た場合に知覚される方向のばらつき	51
図 7-1	システム外観	55
図 7-2	複数方向からの評価の概要	56
図 7-3	実験条件	57
図 7-4	評価位置毎の全回答の平均	58
図 7-5	評価位置毎平均絶対誤差の条件間多重比較	58
図 7-6	実験システムの構成	61
図 7-7	実験環境の外観	61
図 7-8	各注視方向における各条件の外観	64
図 7-9	視線判別性に関する各質問の平均評価値	68
図 7-10	各カテゴリの平均評価値	69
図 7-11	説明フェーズにおける注意誘導達成時間	70
図 7-12	回答フェーズにおけるシステムの視線獲得時間率	70
図 8-1	行為の連鎖・階層モデル (再掲)	74

表目次

表 2-1	共同行為の階層（石崎・伝[19]による翻訳を引用）	4
表 4-1	説明スクリプト	18
表 4-2	評価範囲内でロボットの方を見た鑑賞者数	20
表 5-1	評価区間のスクリプト	29
表 5-2	アンケート項目	34
表 7-1	発話内容と動作指針の例	62
表 7-2	質問項目	66
表 7-3	説明フェーズにおける相互注視達成率についての χ 二乗検定と残差分析	70

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

人と対話することを目的とするコミュニケーションロボットは、音声や映像のみを用いる従来型メディアと比較して、物理的な実体を持ち非言語的情報を伝達可能である点を特徴とする。ここで非言語的情報とは、指さしや視線移動等の身体動作や互いの身体配置、発話における韻律等のことを指し、人間同士のコミュニケーションにおいては言語的情報以上に重要な役割を果たすことが知られている[1]。

本研究では、コミュニケーションロボットによる非言語的情報の伝達が重要な役割を果たす状況として、三項関係に着目した。三項関係とは、2人の参加者と1つの対象物を含んだ3者間の関係のことであり、展示物の案内や資料を交えた会議のような、何らかの対象物を交えた会話状況のことを指す[2]。音声や映像のみを用いる従来型メディアは、このような三項関係の場での利用は困難であった[3]。これに対してコミュニケーションロボットでは、非言語的情報を適切に用いることで、三項関係の場において人間との間で共同注意を達成し円滑なコミュニケーションを実現することが示されている[4]–[7]。そしてその応用例として、博物館等で展示物の案内を行う鑑賞支援ロボットや[8]–[10]、対象物を交えた遠隔コミュニケーションを実現するテレプレゼンスロボットに関する研究が行われている[11]–[13]。

これらのコミュニケーションロボットが三項関係の場において円滑なコミュニケーションを達成するためには、非言語的表現を適切に用いることが重要となる。しかし、ある単独の非言語的表現（指さし・視線の提示等）に着目しただけでは目的が達成されない場合があることが示されている。たとえば、鑑賞支援ロボットにおいては、ロボットが指さし等の非言語的表現を用いて対象物への注意誘導を行った際、動作に気付かれず注意誘導が達成されない場合がある[14]。また、通常のビデオ通話にディスプレイの回転機能を付与し注視方向の提示を可能にしたテレプレゼンスロボット（以下、ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボット）では、ディスプレイの向きによって特定の方向への注視を提示するという非言語的表現により、三項関係の場において円滑なコミュニケーションを達成し、遠隔参加者の存在感や参加を向上させることが期待されているが、ディスプレイの回転による注視方向の提示は人間の身体動作に比べて指向性があいまいであるために、その効果が限定的であることが示されている[15], [16]。

本研究では、このような三項関係の場で利用されるコミュニケーションロボットを適切にデザインするという課題に対して、人間同士のコミュニケーションにおける「行為の連鎖（sequence）[17]」という概念に着目した。「行為の連鎖」とは、話し手の発話と聞き手の応答との間に形成された発話間関係のことを指す。行為の連鎖は一貫性と規則性を持ち、会話の参加者は行為の連鎖を通して共通の知識や信念を確立する。そしてこのような行為の連鎖を繰り返すことで、お互いに協力しながら連鎖的に何らかの目的を遂行していく。このような行為の連鎖の知見に基づけば、コミュニケーションロボットが特定の目的を達成するためには、ロボットが提示する単独の行為だけに着目するのではなく、そこから誘起される対話

者の行為を含めた行為の連鎖に着目することが有効であると考えられる。そこで本研究では、コミュニケーションロボットの設計において、社会学的知見に基づき目的の達成に必要な行為の連鎖を考慮することを提案する。これにより、コミュニケーションロボットにより提示された行為がどのようなプロセスで目的達成につながるかを把握し、課題が発生した際にその原因を特定し適切な対策を行うことが可能となる。本研究では、このような設計指針に基づいて実施した研究事例に基づき、行為の連鎖を考慮した設計の有効性を示すことを目的とする。具体的なコミュニケーションロボットとして、鑑賞支援ロボットとテレプレゼンスロボットを対象とした。

1.2 本論文の構成

本論文は、全9章からなる。まず2章では、行為の連鎖に関わる社会学的知見について説明する。3章では、本研究で対象とするコミュニケーションロボット（鑑賞支援ロボット、ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボット）に関する関連研究について述べた後、それぞれの事例における課題と本研究の指針について述べる。4・5章では、鑑賞支援ロボットを対象とした研究について述べる。ここで、4章では「沈黙・言い直し」、5章では「F 陣形」と「身体ねじり」に着目した鑑賞支援ロボットに関する研究について述べる。6・7章では、テレプレゼンスロボットにおける注視方向の伝達に関する研究について述べる。ここで、6章では既存のディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットにおける注視方向伝達精度の検証を実施し、7章では6章で示された注視方向伝達の課題を解決するためヒューマノイドロボットの頭部を付与したテレプレゼンスロボットの提案を行う。8章ではそれぞれの研究事例より、行為の連鎖を考慮した設計の有効性について考察する。最後に9章において本研究で実施した取り組みをまとめ、結論を述べる。

第2章 行為の連鎖に関わる社会学的知見

本章では本研究に関連する社会学的知見について解説する。はじめに、Schegloffにより提唱された行為の連鎖 (Sequence) という概念について解説した後 (2.1 節)、行為の連鎖に関わる複数の概念について述べる (2.2~2.5 節)。最後に 2.6 節において、各概念が相互にどのように関連しているかをまとめた上で、本研究の指針を述べる。

2.1 行為の連鎖

行為の連鎖 (Sequence) [17]は人間のコミュニケーションの特性を説明するため Schegloff により提唱された概念であり、話し手の発話と聞き手の応答との間に形成される発話間の関係のことを指す。ここで「行為 (action)」とは、「質問」や「依頼」等のように何らかの社会的な目的を達成するために実行される発話や振る舞い等のことをさす。なお本論文中では、発話や振る舞い等を物理的な動作という側面に限定して扱う場合には「行動」、何らかの目的を達成するために行動が行われる場合にその目的を含めて表現する場合には「行為」として区別する (質問者が音声で「質問」するという場面为例として挙げれば、質問者による「発話」という物理的な動作のみを表す場合は「行動」と言い、回答を期待して質問者が何かを尋ねるといった目的を含めて「質問」を表現する場合は「行為」と言う)。人間同士のコミュニケーションにおいて、会話参加者は、話者交替をしながら、自分の順番での発話をとおしてさまざまな行為をおこなう。そしてその行為は多くの場合、前後の行為と関係づけられて連鎖的におこなわれる。本研究においては、このような話し手と聞き手の間で連鎖的に実行される一対の行為のことをさして「行為の連鎖」と呼ぶこととする。行為の連鎖は一貫性と規則性を持ち、参加者間で何らかの目的を達成するための手段として用いられる。例えば、話し手の行為が「質問」であれば聞き手は「回答」という行為を返すように、特定の行為に対して決まった種類の応答が返されることにより目的が達成される。会話分析の分野では、このような性質に基づき、話し手の発話と聞き手の応答との間に形成された発話間関係を分析する連鎖分析の有効性が指摘されている。ここで、行為の連鎖における「行為」としては、「質問」と「回答」や「依頼」と「承諾/拒否」等の発話だけでなく、指さしや領き等の非言語的行為も行われる。非言語的行為は言語的な発話と時間的に共起し、言語的な発話と補完し合うことによって統合的な役割を果たすとされ、高梨らはこのような発話と非言語的行為が共起するという性質をマルチモダリティと定義した[2]。特に、三項関係においては空間的な参照を示すため、視線や指さし等の非言語的行為が重要な役割を果たす。そのため、三項関係において適切なインタラクションを行うためには、非言語的な行為を含めたマルチモーダルな行為の連鎖を誘起していくことが必要となる。

また、会話においては一対の行為の連鎖が単独で発生し、それで会話が終了するのではなく、一つの行為の連鎖をきっかけとして次の行為の連鎖が発生することでその後の会話が進行していく。Schegloff はこのような会話の性質を「行為の連鎖の編成 (Sequence organization)」と定義した。これらの知見に基づけば、人間が遂行するコミュニケーションについて理解するためには、単独の行為の連鎖に着目するのではなく、全体の目的に沿ってその前後の行為からなる行為の連鎖についても考慮する必要がある。

2.2 共同行為の階層

Clarkによれば、人間同士の対話は複数の参加者が共同で従事する共同活動(joint activity)とみなすことができ、共同活動は共同行為(joint action)をもとにして成り立つ。ここで共同活動とは、「議論」や「取引」のように、何らかの目的を持って参加者同士が共同で行う行為の連鎖の編成のことをさす。共同行為は、共同活動の場において参加者間で相互にやり取りされる行為の連鎖のことをさす(Clarkが用いた共同行為という概念はSchegloffによって定義された行為の連鎖と同様な意味を持つ)。Clarkは、共同活動の場において共同行為が階層性を持つことを指摘し、表2-1で示される共同行為の階層(ladder of joint action)を示した[18]。表中の話し手Aの行為と聞き手Bの行為のペアが共同行為、すなわち行為の連鎖を示す。なお、表中の各レベルはそれぞれが独立した行為を表すのではなく、一つの行為の連鎖が成立するために必要となる複数の理解の段階を表している。表中のレベルは数字が大きくなるほど上位の概念となり、上位の階層が成立するためにはそれ以下の階層が成立することが必要となる。このような特性は上方への完了(upward completion)と呼ばれる。例えば、AがBに特定の物を取って渡すよう依頼し、依頼を受けてBがAに頼まれた物を手渡すという状況を考える。この場合、Aが発した「物を取って渡す」という相互行為の提案をBが考慮・受理し対応するというレベル4の理解に基づく共同行為が成立しているが、これが成立するためにはまずAが何らかの発話を行ったということにBが着目し(レベル1)、Aが発した発話の内容を同定(レベル2)、Aの発話の意味を理解する(レベル3)という各レベルの相互理解が同時並行して成立していることが必要となる。

表 2-1 共同行為の階層 (石崎・伝[19]による翻訳を引用)

レベル	話し手 A の行為	聞き手 B の行為
4	A が B に相互行為 w を提案する	B が A からの w の提案を考慮する
3	A が B に対して命題 p を意味する	B が A からの命題 p を理解する
2	A が B に対して信号 s を提示する	B が A からの信号 s を同定する
1	A が B に対して行動 t を実行する	B が A の行動 t に着目する

2.3 基盤化

共同行為の遂行にあたっては、知識や信念をコミュニケーションによって共有し、相互信念 (mutual belief) を確立する必要がある。相互信念とは、参加者間で共有される共通の知識、信念および仮定の総体を指し、参加者間で相互信念を確立することを基盤化 (grounding) という [18]。基盤化は、話し手からの提示 (presentation) と、聞き手による受理 (acceptance) という 2 つの段階からなる。共同行為の階層 (表 1) の各レベルにおける話し手 A と聞き手 B の行為はそれぞれ提示と受理に該当し、これらが成立することで基盤化が行われる。なお、共同行為の階層における上方への完了の性質より、上位の基盤化が成立するためには、それ以下の全てのレベルで基盤化が成立することが必要となる。そのため、レベル 1 において聞き手 B の注意を獲得することが重要となる。Clark によれば、聞き手 B が話し手 A に注意を向けていることの証拠として、話し手 A に視線を向けるという行為が一般的に用いられる。ただし、実際のコミュニケーションにおいては相手の視線を獲得することは容易ではなく、Clark はこれを注意の問題 (attention problem) と呼んだ [18]。

2.4 基盤化における視線の役割

Kendon によれば、対話状況において基盤化が成立するためには、話し手と聞き手の視線のやり取りが重要な意味をもつ [20]。例えば、聞き手は話し手との会話に参加していること (attending) を示す受理の合図として、話し手に視線を向ける。話し手は聞き手が会話に参加しているかを確認するため、聞き手の方に視線を向けて確認する (monitoring)。この際、話し手と聞き手の間で「相互注視 (mutual gaze)」が達成され、これにより話し手は聞き手が自分との会話に参加していることを、聞き手は自分が会話に参加していることを話し手が理解したということを理解し、基盤化が達成される。

このような視線のやり取りは話し手と聞き手が共同行為として会話を進行していく上で重要な役割を果たす。Nielsen はその例として、話者交替のための合図として用いられる相互注視を紹介している。具体的には、会話において聞き手が次の発話権を要求する際、その合図として話し手に視線を向ける。聞き手からの視線に対して、話し手も聞き手に視線を向け返し相互注視が成立した場合、それが発話交替の合図となるという [21]。また、三項関係の場において、話し手は特定の方向に視線を向けることで会話の焦点となる対象を示す。一方聞き手は、話し手が意図した会話の焦点を理解したということを示すため、話し手と同じ対象に視線を向ける。このような、話し手と聞き手が相互に同じ対象を見ている状態は「共同注意 (joint attention)」と呼ばれ、三項関係の場において関心の対象を共有し円滑なコミュニケーションを達成する上で重要な役割を果たす [22]。

このように、注視方向の伝達は話し手として発話を行う際の提示・および聞き手としての受理に関わり、これらの視線のインタラクションにより話者間で基盤化が達成されることが円滑なコミュニケーションを達成するための前提となる。ただし、実際のコミュニケーションにおいて相手の視線を獲得することは容易ではない (注意の問題)。

2.5 注意獲得に関連する知見

Clark によれば人間同士のコミュニケーションにおいては、注意の問題 (attention problem) を解決するため様々な方策が用いられるという [18]. 本研究においては、注意獲得に関わる知見として、「沈黙・言い直し (restart and pause)」という方策と、「F 陣形 (F formation)」および「身体ねじり (body torque)」という概念に着目した。

2.5.1 沈黙・言い直し

「沈黙・言い直し (restart and pause)」は注意の問題を解決するために人間が用いる方策の一つであり、Goodwin により定義された [23], [24]. Goodwin の研究によると、話し手は発話を開始した後に聞き手の注意が自分に向いていない場合、発話の途中で沈黙 (例 1 参照)、もしくは言い直し (例 2 参照) を行うことによって聞き手の注意を自分に誘導する。以下の例 1, 例 2 のトランスクリプトは Goodwin の論文からの引用である。

例 1: 沈黙 (pause)

A: They've changed- (----) the China City

B: X_____

例 2: 言い直し (restart)

A: Can you bring-? (0.2) Can you bring me here that nylon?

B: X_

このトランスクリプト中において、アンダーライン「_」の部分は聞き手が話し手を見ていることを、それ以外の部分は見えていないことを示し、「X」は聞き手が話し手を見はじめた時点を示す。またハイフン“-”は1つにつき0.1秒の時間を表し、ここでは注意を得るための沈黙を表す。それぞれの例において、話し手の用いた方策により聞き手の注視が獲得されていることが示されている。

2.5.2 F 陣形と身体ねじり

F 陣形 (F formation) は、複数人が向かい合って会話を行う際に互いの間に一定の空間が維持されるという現象を説明するための概念として、Kendon によって定義された[20]。Kendon によれば、人間とその人間が関与しようとする対象との間に広がる空間を操作領域 (transactional segment) と呼び、複数人で会話する際には参与する人々の操作領域が重なり下半身方向によって O 形の空間が構成される。これを O 空間 (O-space) と呼び、参与者は通常この O 空間を相互に維持しようとするという。このような、会話集団を空間的に規定する相互行為レベルの行動単位のことを F 陣形と呼ぶ。McNeill によれば F 陣形は人間だけにより構成される社会的 F 陣形 (social F-formation) と、人間同士だけでなく指示対象物を介する道具的 F 陣形 (instrumental F-formation) に細分化されるという[25] (図 2-1)。道具的 F 陣形においては O 空間内に指示対象物が存在し、これにより O 空間の変形が起こるといふ。これらの知見より考えると、三項関係において話し手が聞き手の注意を獲得し、対象物を交えたインタラクションを円滑に行うためには、話し手と聞き手および対象物の間に道具的 F 陣形が構築されていることが有効であると考えられる。

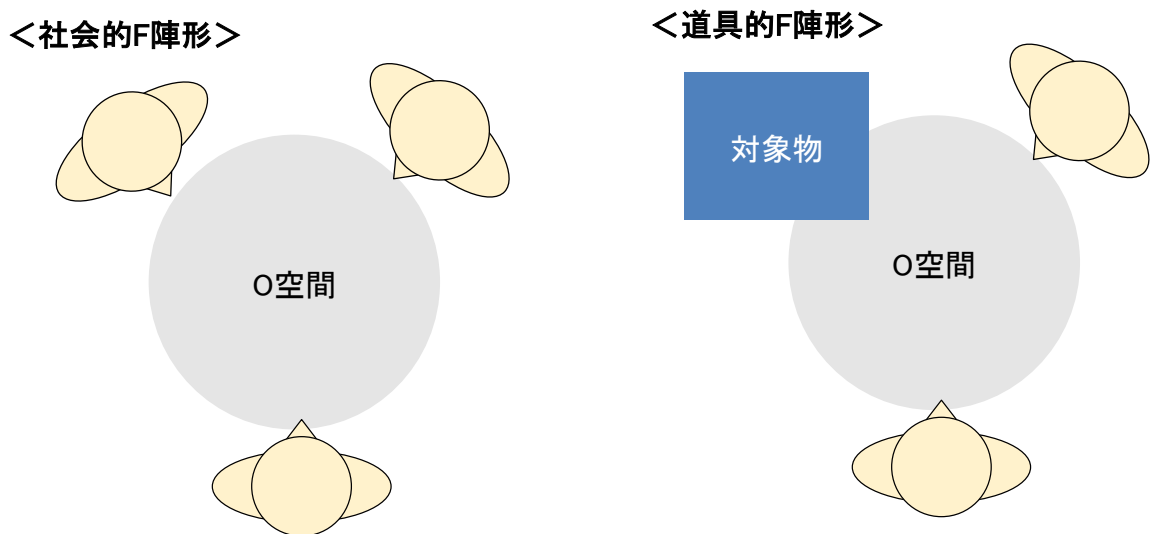


図 2-1 社会的 F 陣形と道具的 F 陣形

F 陣形を構築する上では、参加者の身体の各部位の方向が重要な役割を果たす。例えば、人間の説明員が鑑賞支援を行う場合、説明員は身体の各部位の回転を使い分けて鑑賞者の身体配置の調整を促し、適切な道具的 F 陣形を構築する。具体的には、説明員が全身を指示対象物の方に向けた場合、鑑賞者は指示対象物に近づく方向に移動しながら道具的 F 陣形の再構築を行う。一方、鑑賞者の立ち位置を維持したまま特定の方向に注意を誘導したい場合、説明員は下半身を鑑賞者の方に向けたまま上半身を回転させて注意誘導を行う。Schegloff は、このような下半身を固定したまま上半身をねじるという身体の分岐的振舞いを身体ねじり (body torque) と呼んだ[26] (図 2-2)。人間は身体ねじりによってどの活動にどの程度関与しようとしているかを表しているという。この際、安定性の高い下半身の方向付けは主要関与 (main involvement) を示しており、一時的な上半身の方向付けは副次的関与 (side involvement) を示している。例えば人物 A が何らかの作業を行っている最中に人物 B から声をかけられた場合に、下半身は作業対象に向けたまま上半身のみで B の方を向いたとする。これは A の主要関与が作業対象であることを示しており、B との会話はすぐに終了することが予想される。一方、話しかけられた際に下半身ごと体を B の方に向けた場合、主要関与が作業対象から B に移ったことを示し、A は B との会話を続けることを志向していると考えられる。

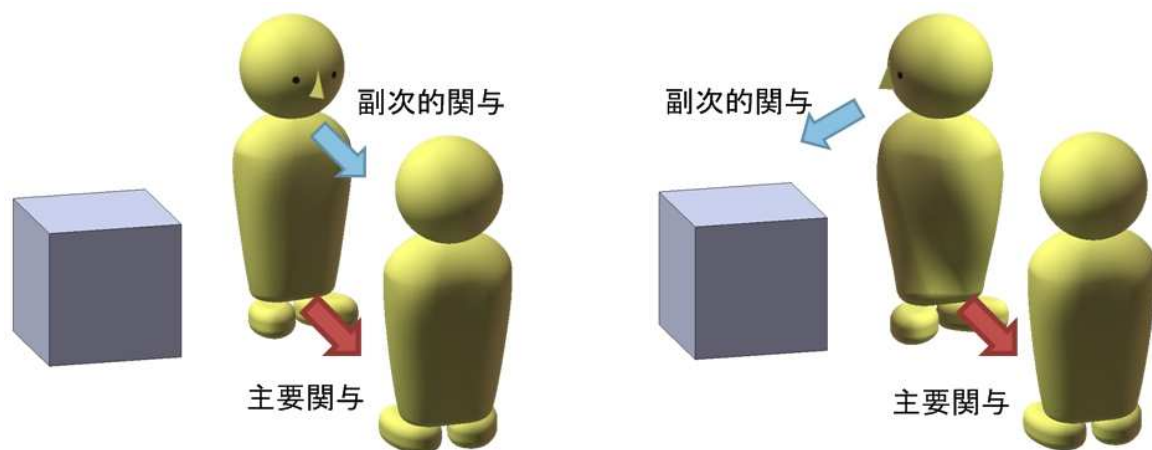


図 2-2 身体ねじり

2.6 行為の連鎖に関わる各概念のまとめと本研究の指針

本節では、前節までに説明した各概念についてまとめ、本研究の指針について説明する。図 2-3 は行為の連鎖に関連する各概念をまとめた図である。まず中央のブロックが話し手による行為と、それにより発生する聞き手の行為から構成される行為の連鎖を示す。ここで、話し手によるある行為が聞き手に適切に理解され行為の連鎖が成立するためには、共同行為の階層の概念 (2.2 節) に基づいて、各階層で基盤化 (2.3 節) が成立することが必要となる。すなわち、話し手が実行した何らかの行動 (提示) に聞き手が着目 (受理) し、着目した行動からそれがどのような意味を持った信号であるかを同定、信号の持つ意味を理解した上で、話し手が提示した提案を聞き手が考慮するという、各階層における基盤化の成立が必要となる。これにより行為の連鎖が成立し、図中右側のブロックで示した目的とする状態 (例えば指さしによる注意誘導の達成等) が達成される。行為の連鎖が成立するためには共同行為の階層の概念で示された階層のうち、最も下位の階層での基盤化 (話し手による行動の提示とそれに対する聞き手の着目) が不可欠である (2.4 節)。ただし、そのために必要な聞き手の注意獲得は容易ではなく (注意の課題)、そのような場合は行為に至る前の段階で注意獲得のための何らかの方策が用いられるという (2.5 節)。すなわち、一対の行為からなる行為の連鎖だけでなく、その前段階の行為を含めた行為の連鎖の編成を考慮することが必要となる。このように、ある行為により目的とする状態を達成するためには、提示された行為により聞き手の行為が誘起されることによって行為の連鎖が成立する必要がある。そして行為の連鎖が成立するためには共同行為の各階層で基盤化が成立する必要がある。さらに、状況に応じて単一の行為の連鎖だけでなく、その前段階の行為を含めた行為の連鎖の編成まで考慮して目的を達成することが必要になる。本研究ではこのような行為の連鎖と共同行為の階層という概念に基づいた対話モデルのことを「行為の連鎖・階層モデル」と呼ぶこととする。

本研究では、ロボットによる非言語的表現の提示について考える際に、図 2-3 で示される行為の連鎖・階層モデルを考慮することとする。これにより、コミュニケーションロボットにより提示された行為がどのようなプロセスで目的達成につながるかを把握し、課題が発生した際にその原因を特定し、効果的な対策を設計することが可能となる。対策の設計においては、例えば課題の原因が注意の課題であれば人間が用いる注意獲得の方策を用いる、というように、人間同士のコミュニケーションに関する社会的な知見を利用することが可能となる。本論文の各研究事例 (鑑賞支援ロボット・ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボット) における具体的な取り組みについては、次章で説明する。

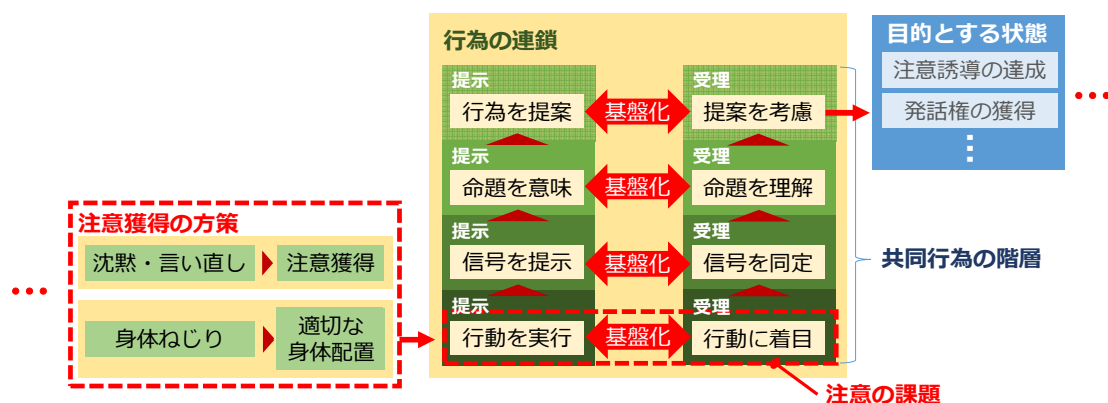


図 2-3 行為の連鎖・階層モデル

第3章 関連研究

本章では本研究の対象とした鑑賞支援ロボットとテレプレゼンスロボットに関する研究について述べる。

3.1 鑑賞支援ロボットに関する研究

Kuno らは博物館において人間のガイドがどのように鑑賞者とコミュニケーションをとっているかを分析し、そこで得られた知見に基づく動作を行う展示案内ロボットを開発した[8]。この研究では、ロボットが各発話の終了時 (TRP: transition relevance place) に鑑賞者の方を向く動作を行うことで、鑑賞者の関与が高まることを見出した。なお、このような TRP における視線の役割は 2.4 節の内容に関連する知見である。Shiomi らは、RFID タグによって得られた情報により、鑑賞者とのインタラクションを決定する展示案内ロボットを開発した[9]。この研究では、展示物の説明を行う際に RFID より取得された鑑賞者の名前等の情報を用いることで、鑑賞者の評価が高まることが示されている。山岡らは、ロボットによる展示物の案内を「人間との距離」、「展示物との距離」、「人間の視界」、「ロボットの視界」によってモデル化し、ロボットの身体位置によって O 空間が調整されるという効果を実験により確認した[10]。この実験においては、ロボットが O 空間を満たすような位置で展示物の説明を行った際に、鑑賞者からの評価が高まることが示されている。これらの研究では社会学・心理学的な知見に基づきシステムを実装した研究が行われており、一部では行為の連鎖に関連した知見を用いられている。ただし、これらの研究は対話者に対してより人間らしい印象を与え親近感等の主観的な評価を向上させることを主な目的としており、特定の状態を達成するために行為の連鎖を利用するという手法には着目していない。

Pitsch らは、鑑賞支援ロボットが指さしによって注意誘導を行う際に、鑑賞者がロボットの動作に気付かず、注意誘導が達成されないという課題を示した[14]。2.6 節で述べた行為の連鎖・階層モデルに当てはめて考えれば、これは共同行為の階層のうち、レベル1の段階で注意の問題が発生したと考えられる (図 3-1)。すなわち、指さしにより注意を特定の方向へ誘導するという鑑賞支援ロボットの提案 (レベル4) に対し、鑑賞支援ロボットが実行した指さしという行為に鑑賞者が注意を向けていない (レベル1) という注意の課題が発生していた。このような場合、図 3-1 に示すように指さしに至る前の段階で何らかの方策を用いて事前に注意を獲得したり、指さしに気付くことが出来る身体配置を構築することが必要となる。そこで本研究では、事前に注目を獲得する方法として「沈黙・言い直し」を利用して、指さしに気付くことが出来る身体配置を構築する方法として「身体ねじり」を利用してコミュニケーションロボットの設計を行った。

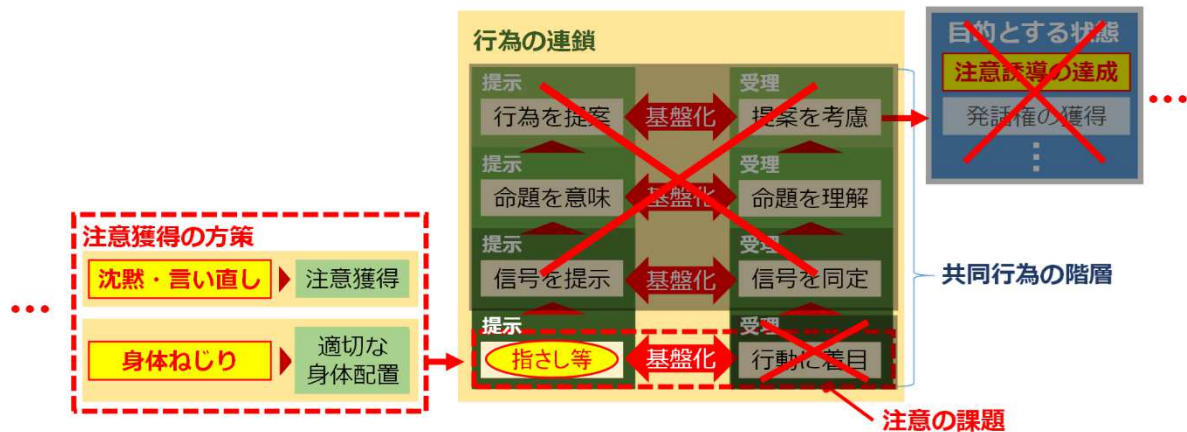


図 3-1 鑑賞支援ロボットにおける課題

なお、筆者らの研究グループでは、これまでにこのような行為の連鎖を考慮したコミュニケーションロボットの研究を進めており、本研究で着目する「沈黙・言い直し」や「F 陣形」と「身体ねじり」に関連する先行研究を進めている[27][28]. ただしこれらの研究では、実験設定やロボットの設計上の課題から、それぞれの方策をコミュニケーションロボットが実施する場合の効果を十分に検証したものではなかった. そのため本研究では、先行研究における課題を解決し、それぞれの方策の効果を明らかにするための取り組みを行った.

3.2 ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットに関する研究

通常ビデオ通話を拡張し、遠隔参加者の存在感や参加を向上させることを目的として、**kubi**に代表されるディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットが開発されている[11]–[13]。これらのディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットは、カメラが搭載されたディスプレイを物理的に回転させる機構を持ち、遠隔参加者は現地側（ロボットが置かれている側）の環境を見渡すことが出来る。同時に、現地側の参加者はディスプレイの方向から遠隔参加者の注視方向を判断することが出来る。このような空間的な参照が伝達可能となることで、三項関係の場において円滑なコミュニケーションが達成され、遠隔参加者の存在感や参加を向上させることが期待されている。

このようなディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットに関する研究として、**Sirkin**らはディスプレイ回転の有無、および回転させる場合の操作インタフェースの影響を評価するための実験を実施した[15]。なお操作インタフェースとしては、マウスを用いて特定の方向にディスプレイを回転させる明示的手法と、操作者の頭部動作と連動してディスプレイを回転させる非明示的手法の2種類を用いた。実験結果より、操作インタフェースによらずディスプレイが回転する条件では特定の方向を示す代名詞に適切に反応可能になることや、固定条件に比べて会話への参加が促進される効果が示されたが、ディスプレイの回転と顔画像の回転が組み合わさることで目が合わないように感じることや、ディスプレイが見えにくくなることで相手の存在感が低下するという課題が示された。このような課題の原因として、**Sirkin**らはディスプレイの回転による注視方向の提示は人間の身体動作に比べて指向性があいまいであることを指摘した。また、**Biehl**らはディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットの効果を明らかにするため、ディスプレイを固定した条件と回転させる条件、および実際に対面で会話を行う条件を比較する実験を行った[16]。実験の結果、ディスプレイを回転させる条件では、発話衝突の頻度や発話のターンの長さが対面で会話を行う条件に近くなることが示されたが、ディスプレイ回転の有無に関わらず、対面の条件よりも参加が低下することが示された。この結果について、**Biehl**らはディスプレイ回転による身体動作の提示は遠隔参加者の参加を促すのに不十分であることを指摘した。

このような、ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットにおける課題に対して、ディスプレイ回転以外の方法で身体動作を提示するテレプレゼンスロボットに関する研究が行われている。**Adalgeirsson**らは、**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[29]。**MeBot**は操作者の頭部動作と連動するディスプレイにより注視方向を示し、同時に専用のコントローラを用いて腕部を使ったジェスチャーの伝達が可能である。ジェスチャー伝達の有無を比較した実験により、腕部を用いたジェスチャーの伝達により遠隔対話者の関与や協調性等の印象が向上することを示した。**Sirkin**らも同様に、ディスプレイの動作だけでなく腕部のジェスチャーを伝達可能なテレプレゼンスロボットを用いて、映像と物理的動作を同期させた表現を行うことにより、相手の親近感や関与等の印象が向上することを示した[30]。ただしこれらの研究では、腕部の動作が遠隔参加者の参加に与える効果は検証されていない。**Hasegawa**らは頭部にディスプレイを搭載した小型のヒューマノイドロボットを用い、**Kinect**を用いて遠隔操作者の腕および胴体の身体動作をロボットに連動させることで、発話に当たって無意識の予備動作を伝達することが出来るテレプレゼンスロボットの開発を行った[31]。実験の結果、予備動作の伝達により、発話

衝突の発生率が低下することが示されたが、遠隔参加者の参与の低下は改善されなかった。この結果より、従来のディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットを拡張し腕部や胴体の動作を提示する手法は、印象の向上等の一定の効果をもつものの、ディスプレイ回転型で見られた参与の課題の解決には効果が低いと考えられる。

このような参与の課題の原因として、本研究ではディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットにおける注視方向伝達に関する課題に着目した。2.4 節で示した通り視線の伝達は基盤化を達成するための手掛かりとして用いられ、話者交替においても重要な役割をはたす。これに対してディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットで用いられるディスプレイの回転による注視方向の伝達は、人間の身体動作に比べて指向性がいまいであり、視線が十分に伝わっていなかった。先行研究[15], [16]で生じた状況を 2.6 節の行為の連鎖・階層モデルに当てはめて考えると、ディスプレイの回転による注視方向の提示は、ディスプレイの回転という行動に対する着目を得ることは出来ているものの、人間の身体動作に比べて指向性がいまいで方向が伝わらないことにより、視線が意図を持った信号として認識されていなかったと考えられる(図 3-2)。例として、Sirkin らの研究ではディスプレイ回転により遠隔参加者の視線の変化には気付くが(レベル1)、「目が合わない」ように感じていたことが示されており(レベル2)、このような場合遠隔参加者が対話者に視線を向けても相互注視が成立せず、基盤化が達成されないことで参与が低下したと考えられる。そこで本研究では、ディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットにおける注視方向伝達の課題を改善するための取り組みを行った。

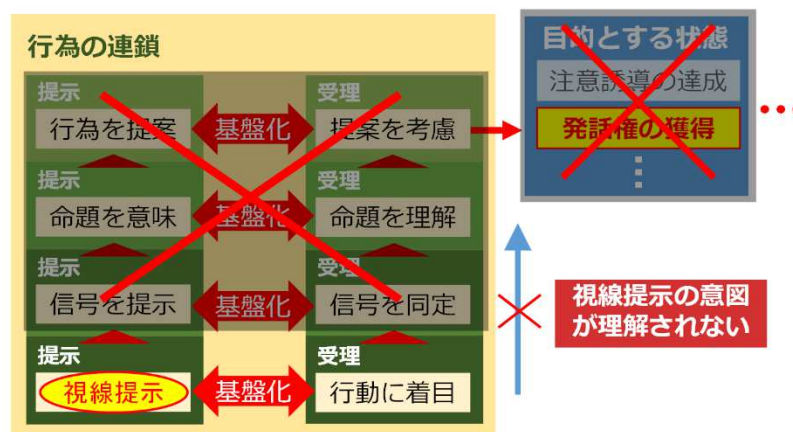


図 3-2 ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットにおける課題

具体的な取り組みとして、始めにディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットにおける注視方向伝達精度の定量的な評価を実施した。これは、既存のディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットでは操作インタフェースの違いにより様々なディスプレイ回転と顔画像回転の組み合わせが生じるが、それぞれの組み合わせにおいて注視方向がどのように認識されるかの定量的な評価が行われていなかったためである。その後、注視方向伝達の課題を解決するため、物理的なインジケータとしてヒューマノイドロボットの頭部を付与する手法を用いたシステムの実装を行い、精度評価と対話状況における効果の検証を行った。

第4章 鑑賞支援ロボットにおける「沈黙・言い直し」 の効果

鑑賞支援ロボットにおいては、ロボットが指さし等の非言語的表現を用いて対象物への注意誘導を行った際、動作に気付かれず注意誘導が達成されない場合があることが指摘されている[14]。これは、鑑賞支援ロボットが実行した指さしという行為自体に鑑賞者の注意が向いていないことが原因であった。人間同士のコミュニケーションにおいては、このような注意の課題が発生した際に、「沈黙・言い直し」という方策を用いて相手の注意獲得を達成した上で、その後の行為を実行していくことが知られている。本研究ではこのような知見に基づき、注意獲得を達成するため鑑賞支援ロボットに「沈黙・言い直し」という方策を導入し、その効果を検証するための実験を行った。なお、本章の実験に先立って、筆者らは同様の方策を用いた研究を実施しているが[27]、実験設定の課題により効果の定量的な評価が行われていなかった。本章では、実験設定を見直し改めて実施した実験により、「沈黙・言い直し」の効果を検証する。

4.1 システム構成

実験に用いたシステムは、身体性を用いた案内を行うためのロボット、発話のためのスピーカ、システムを制御するための動作制御用ノート PC、制御用カメラ、遠隔操作指示者ブースからなる。図 4-1 にシステムの概要を示す。今回の実験では案内ロボットとして SONY の AIBO (ERS-7) を用いた (図 4-2)。AIBO を用いたのは、人々に受け入れられやすい外観と説明動作を示すのに十分な自由度を持ち合わせていたためである。AIBO は腕部に 3 自由度、頭部に 2 自由度を持ち、これは鑑賞者に対してロボットの注意方向を示したり、指差しのジェスチャーを行うのには十分な自由度である。また、フリーのライブラリである OPEN-R SDK を用いることによりロボットのコントロールを行うプログラムの開発を行った。なお実験の際にはロボットの指差しをより明確に示すため、人間が指さしを行う際の指さしの手の形状を模したパーツを右腕に装着して用いた。

ロボットは無線 LAN を通して外部の PC と接続されており、これにより後述の自律モードもしくは遠隔操作モードのいずれかによる制御を行うことができる。制御には、Microsoft Visual C++ を用いて作成した GUI 制御プログラムを用いた。遠隔操作者が利用するロボット制御用 GUI には、自律モードの開始と停止を切り替えるボタンが用意されており、遠隔操作者は任意の時点で簡単に自律モードと遠隔操作モードを切り替えることが出来る。自律モードでは、あらかじめ定義された一連の身体動作および発話を順次実行する。ロボットの発話は、あらかじめ分割して録音された音声ファイルを順次、ロボットの近くに設置したスピーカから再生することで実現した。遠隔操作モードにおいては遠隔地の操作者が遠隔操作指示者ブースを用いてロボットの操作を行うことができる。遠隔操作指示者ブースには 3 面ディスプレイが設置してあり、そこにはロボット後方に配置した 3 眼カメラからの映像を表示した。これにより操作者は約 180 度の視野角を得られ、説明を行う展示物だけでなく展

示物周辺や鑑賞者の様子も同時に知ることができた。また 3 面ディスプレイはタッチセンサーとなっており、指差しを行いたい対象の映像部分に触れると、それにほぼ対応する方向を指さしするようにロボットの腕を動作させた。操作者の頭上にはモーションキャプチャセンサ（サイバース社、ステレオラベリングカメラ）が設置されており、操作者の頭部に装着したマーカの位置を検出することによって、操作者の頭部とロボットの頭部の動作が同期するように制御した。遠隔操作モードでは操作者の発話をロボット側に送信し、スピーカから出力してロボットの発話とした。

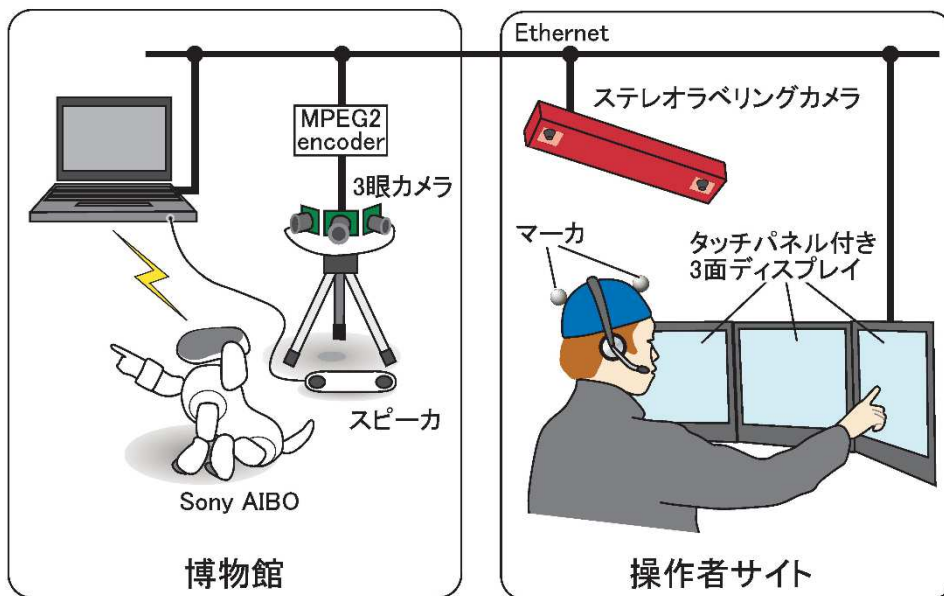


図 4-1 システム概要



図 4-2 案内ロボットの外観

4.2 実験

4.2.1 実験方法

実験は東京都にある科学技術館 3 階にて行った。ロボットは「ガスクエスト」というガスとエネルギーに関する様々な展示を行っているブースに配置され、浮沈子という実験装置についての説明を行った。浮沈子実験装置は水で満たされたペットボトルと、内部の豆電球ほどの大きさの浮き（浮沈子）から構成される。浮沈子は通常ペットボトル上方に浮いているが、ペットボトルが握られるとその圧力により浮沈子の中に水が入り、下方に沈む。

実験に当たってロボットは、事前に録音された人の音声による発話と、設定された身体動作を同時に行う自律モードにより浮沈子の原理の説明を行った。なお浮沈子実験装置は比較的目立たない場所に設置されており、それ自体では鑑賞者を浮沈子の展示に誘導することが困難だったため、各セッション開始時に遠隔操作モードによって、遠隔操作者がロボットを介して、近くにいる鑑賞者の注意を引くように声をかけた。すべてのセッションにおいて、1 名の実験者（20 代前半男性）が遠隔操作者をつとめた。またロボットの発話用音声データは実験者によって事前に録音されたものを用いた。これは予備実験において合成音声と人の発話データを比較したところ、人の発話データを用いた場合の方が被験者が最後まで説明を聞く割合が高まるという傾向が見られたためである。ただし音声の違いが与える影響については今後の研究が必要であると考えられる。

被験者は浮沈子の近くを偶然通りかかった一般の来館者である。各セッション開始時、ロボット操作者は遠隔操作モードによって浮沈子実験装置に近づいた鑑賞者に対して呼びかけを行った。この際操作者は、近づいた鑑賞者の方にロボットの頭を向け、腕を振りながら「こんにちは」という発話を提示した。鑑賞者がそれに気づきロボットに近づいた場合、「まず、こちらのペットボトルを、両手でぎゅっと握ってみてください。」という発話を行い、鑑賞者が発話に従いペットボトルを握ったのを確認した後、自律モードによる説明に移行した。なお自律モード時の音声には遠隔操作を行った実験者の声を用いることにより、モードの切り替えが自然なものとなるようにした。鑑賞者はロボットがどのように制御されているかを知らないため、遠隔操作モードと自律モードがいつ切り替わったのか、気づいている様子はなかった。図 4-3 に実験の様子を示す。



図 4-3 実験の様子

4.2.2 実験条件

ロボットによる発話途中の沈黙と言い直しの効果を調べるため、沈黙と言い直しのある条件 (RP 条件) と沈黙と言い直しのない条件 (通常発話条件) の比較を行った。RP 条件では、展示説明のための一連の発話の中の 1 カ所で沈黙と言い直しを行った。表 4-1 は各条件の説明内容示したスクリプトである。この実験では表 4-1 中 RP 条件欄に示されているように説明中に 2 度の沈黙と 2 度の言い直しを行った。スクリプトに示されているように、ロボットは括弧内に示された時間沈黙し、その後同様な内容の言い直しを行った。

ここで、本実験でロボットにおこなわせた沈黙と言い直しは、人間によるそれとは多少異なるという点には注意が必要である。人の場合は沈黙と言い直しを組み合わせで発話することは比較的少なく、沈黙の時間はより短いことが多い。しかし本実験では Goodwin の知見を参考にしつつ、人の取り得る方策を一部変更し、ロボットに適した沈黙と言い直しの方法を模索することとした。今回の実験で沈黙と言い直しを組み合わせ、さらに沈黙の時間を多少長くしたのは、筆者らがこれまでに実施した予備実験より、十分に効果が得られる時間を経験的に求めた結果である。沈黙と言い直しが単独で用いられた場合や、様々な沈黙の長さに対する影響については、今後の課題とした。

通常発話条件では、RP 条件の沈黙と言い直しの部分のスクリプトを類似した表現の発話に置き換え (表 4-1 中評価範囲参照)、両条件の評価範囲の発話の要する時間が等しくなるようにした。評価範囲の発話に要する時間は 8 秒であり、以下に説明する計測はこの評価範囲のみについて実施された。なお、本章の実験に先立って実施した研究では、通常発話条件と RP 条件で発話内容を統一した条件での評価を実施した [27]。ただし、このような比較条件では評価範囲の時間に差が生じていたことから、条件間での時間的整合性が保たれていないという課題が生じていた。

表 4-1 説明スクリプト

<ul style="list-style-type: none"> ・こんにちは ・まず、こちらのペットボトルを、両手でぎゅっと握ってみてください 		} 遠隔操作
<ul style="list-style-type: none"> ・すると、中に入っている浮きが沈むのが分かりますよね。 ・この浮きのことを浮沈子と言います 		
評価範囲		
<通常発話条件> <ul style="list-style-type: none"> ・では、浮沈子がペットボトルの中で、沈んだり浮かんだりする理由を説明します。 	<RP 条件> <ul style="list-style-type: none"> ・では、浮沈子が下にさが (0.9 秒停止) //沈黙 下にさがる (0.9 秒停止) //言い直し 沈む理由を説明します。 //沈黙 //言い直し 	} 自律モード
<ul style="list-style-type: none"> ・浮沈子を良く見ると、上の方に空気が入っているのが分かると思います。 ・この空気は浮力を持っていて、そのおかげで浮沈子が浮いています。 ・でも、ペットボトルを握ることで生じる力によって、浮沈子の中に水が入ってしまうんですよ。 ・よく観察すると、上の空気が縮んでいるのが分かりますよね。 ・浮沈子に水がはいって重くなるから、沈んでしまうんですね。 ・それではここで、説明を終わりにします。 		

4.2.3 評価項目

実験の様子は、鑑賞者から見てロボットの後方、および横方向からビデオで撮影し、ロボットの発話に対する鑑賞者の反応を記録した。特にロボットの後方から撮影した映像では、ロボットの後ろ姿と鑑賞者の正面からの映像を明瞭に撮影することが出来たため、それをもとに鑑賞者が発話途中の沈黙と言い直しによってロボットを1度でも見た場合に、注意獲得に成功したと判定し、成功した鑑賞者の人数を数えた。その際、計測している時間は表 4-1 中の「評価範囲」のみで、その計測時間の最初から最後までロボットの説明を聞いていた鑑賞者のみを計測の対象とした。また、鑑賞者がロボットを見た継続時間は考慮せず、一瞬でも見た場合は注意獲得に成功したと判定した。この注意獲得の本来の目的は、鑑賞者がロボットに注意を向けた後、ロボットの視線移動や指さし等の身体動作に気がつき、注意誘導を達成することである。しかし、注意獲得の後、鑑賞者がどの程度の長さロボットを見れば、その後の注意誘導に対して十分であるのかということは、今後さらなる検討が必要であるため、本論文においては一瞬でもロボットを見た場合を成功と判定した。

なお、本実験では、一般の鑑賞者の自然な反応を観察することを目的としたため、ロボットとのインタラクションの仕方については特に制限を設けなかった。従って、鑑賞者は一人ではなく家族や友人と一緒に複数で訪れることがあった。この際、同じグループ内であっても評価範囲の時間の最初から最後までロボットの説明を聞いていた鑑賞者のみをデータ計測の対象とした。ただし、同じ説明を2度聞いた被験者については、2度目の鑑賞におけるデータは計測しなかった。さらに、評価範囲に入る前から継続してロボットの方を見ていた鑑賞者、障害物によって映像から視線を確認できなかった鑑賞者、時々スピーカから発生した音声のノイズに対して視線を移動したと思われる鑑賞者、他の鑑賞者の指差し等に反応して視線を向けた鑑賞者など、沈黙と言い直し以外の理由によりロボットを見た事例は、計測の対象外とした。

4.3 実験結果

通常発話条件と、RP条件の2つの条件において、評価範囲の間にロボットの方を見た鑑賞者の数を比較した。結果を表 4-2 に示す。表中で「成功」とはロボットが注意獲得に成功した（鑑賞者がロボットを見た）ことを意味する。「成功率」は各条件の全鑑賞者のうち、「成功」した鑑賞者の割合を示している。

この表が示す通り、RP条件では100人の鑑賞者中58人（58.0%）が計測時間中に一度はロボットの方を見た。一方、通常発話条件においては85人中5人（5.9%）であった。 χ^2 乗検定の結果、2条件間で有意な差があることがわかった（ $p < 0.01$ ）。なお、今回の実験で計測の対象外となった鑑賞者のうち、ロボットの方を見たにもかかわらず説明途中でその場を去った鑑賞者は、RP条件で5名、通常発話条件で1名であった。本実験では人数が少ないために統計的な議論はできないが、発話条件の差と鑑賞の中断との関係については、今後より多くの被験者に対して実験をする必要があると考えている。

表 4-2 評価範囲内でロボットの方を見た鑑賞者数

	成功数	総鑑賞者数	成功率
RP条件	58	100	0.580
通常発話条件	5	85	0.059

4.4 考察

4.4.1 注意獲得確率の時間的な推移

本実験結果より、ロボットが発話の途中で沈黙と言い直しをすることによって、鑑賞者の注意を獲得できる確率が有意に高くなることが示された。そこで、沈黙と言い直しの効果をより詳細に確認するために、ビデオを 0.1 秒単位で分析し、発話に対してどのタイミングで鑑賞者が視線をロボットに向けたかを確認した。図 4-4 に、評価範囲における 0.1 秒ごとの成功率を示す。なお、沈黙の時間は 2.4~3.3 秒と 4.0~5.0 秒である。この図からは、ロボットが沈黙するより前の 1 秒付近から、RP 条件の方が成功例が多いように見えるが、これは 1, 2 名の差であり、偶発的な差であると考えられる。注目すべき点として、RP 条件ではロボットが沈黙してから 0.4 秒後ぐらいから 1 秒後にかけて急激に成功率が増加していることがわかる。一方通常発話条件では、評価範囲を通して成功率が大きく変化した区間はなく、全体の成功率も RP 条件に比べて低かった。これにより、ロボットによる沈黙と言い直しが注意獲得に有効であることが確認された。ただし、今回の実験からは個別の沈黙と言い直しがどの程度の効果を持つのかということは確認できず、これは今後の研究課題である。

(視線獲得率)

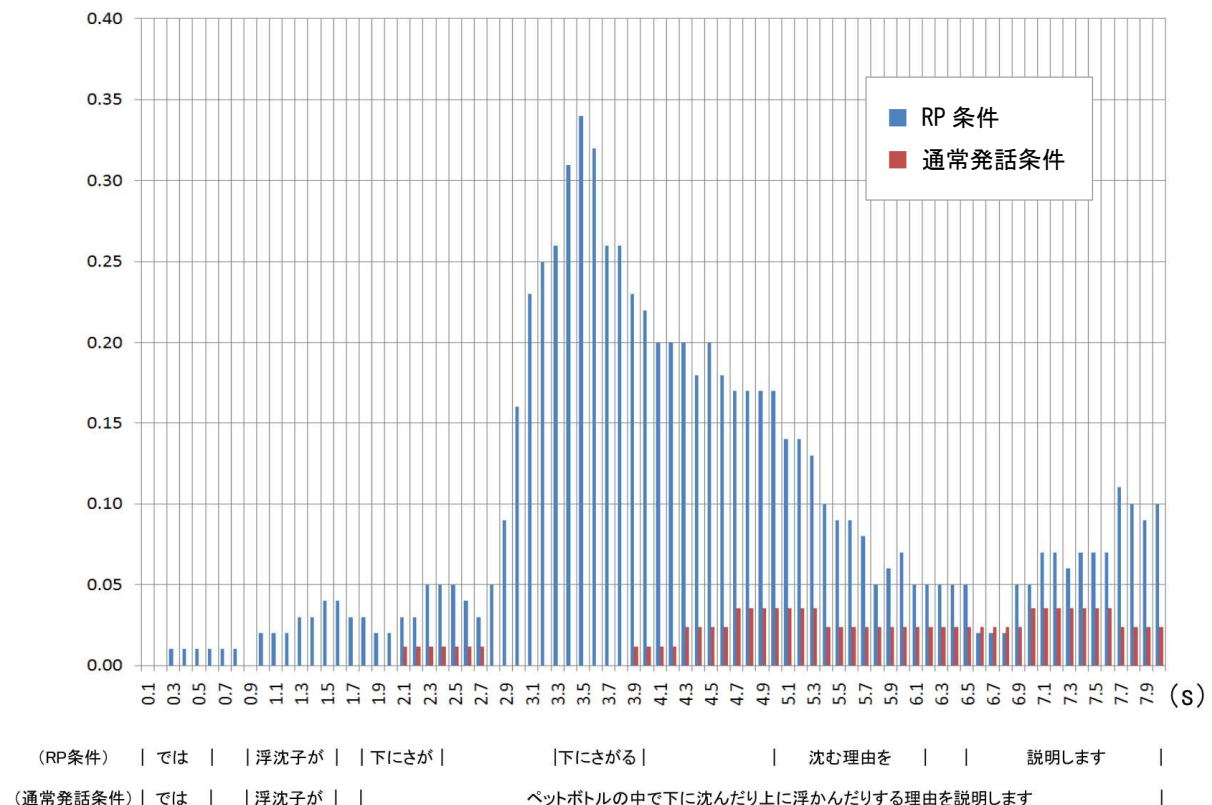


図 4-4 評価範囲において鑑賞者がロボットを見た確率の時間的推移

なお、今回の実験において鑑賞者がロボットに注意を向けた理由は、ロボットに異常が発生したのではないかと鑑賞者が考えた可能性もある。本実験においては、次々と訪れる鑑賞者を対象に実験を実施したため、鑑賞者にその理由をインタビューすることが困難であった。この理由を明らかにすることは、鑑賞者のロボットに対する信頼度にも関わるため、今後の検討が必要である。しかしながら、仮に鑑賞者がロボットに多少の異常を感じたことがロボットに注意を向けた理由であったとしても、本実験で得られた知見は意義のあるものであると考えられる。たとえば Goodwin が挙げている例の中には"anyway, (0.2) uh:, (0.2) we went t- I went to bed "[24]という発話によって、話し手が聞き手の視線を獲得した例が示されている。人間同士の会話であっても、このように繰り返される沈黙と単語の途中での言い直しが、聞き手に異常を感じさせた可能性は否定できない。したがって異常を感じてロボットを見たのだとしても、人間同士の例と本質的に異なるものではない可能性がある。ただし、人間同士の例とは異なりロボットの場合は「異常＝故障」と判断されることもあるため、今後慎重な検討が必要である。

4.4.2 適切さの問題

本研究では、ロボットの発話途中における沈黙と言い直しという方策が鑑賞者の注意獲得に有効であることが確認された。しかしこのような方策を人とロボットのインタラクションの場において適切に用いるためには、今後さらなる検討が必要である。

特に注意すべき点として、同一の鑑賞者に対してこの手法を多用することによってロボットに対する信頼性や親近感を低下させる可能性がある。また、鑑賞者が徐々に慣れてしまい、2回目以降の言い直しや沈黙は効果が大きく減少する可能性も考えられる。そうした問題を避けるためには、鑑賞者の視線を常に計測して[32]、鑑賞者の視線がロボットに向けられていないときのみを利用することが効果的であると考えられる。また状況によっては、沈黙と言い直しだけでなく、従来研究で用いられている「こちらをみてください」という発話のような明示的な指示[9]と組み合わせて利用することも有効であると考えられる。

このように視線検出を利用して自動的にこの手法を実行させる場合に問題となるのが、複数人の鑑賞者に対する対応である。通常、博物館における展示説明では、一人の解説者が複数人の鑑賞者に対して解説をおこなわなければならないが、本手法を実用化するためには、今後この問題に対応することが必要である。鑑賞者の中で視線を獲得できていない人数の割合がある一定値以上の場合にのみ、沈黙と言い直しなどの手法で視線の獲得を試みるといった方法が考えられるが、その効果については今後の実験で確認する必要がある。

なお、展示案内というタスクにおいては部分的な注意誘導の成否だけでなく、説明そのものに対する鑑賞者の注意や興味の向上が重要となる。今回の実験では、展示説明における一連の行動の中の限られた部分において、いかに鑑賞者の注意をロボットに誘導するかということについてしか考察を行っていないが、前述の通り今回提案した手法を多用することによって信頼性や親近感を低下させる可能性もある。そのため、今後は今回提案した手法が鑑賞者にどのような影響を与えるかということも含め、展示案内というタスク全体に対して議論を行っていく必要がある。

4.5 まとめ

本実験では、展示案内ロボットにおける注意の課題に対し、人間同士のコミュニケーションにおいて用いられる注意獲得の方策である発話途中の沈黙と言い直しを実装し、効果の検証を行った。博物館において一般の来館者を対象とした実験を実施した結果、ロボットが発話途中で沈黙と言い直しを行うことで、鑑賞者の注意を獲得する効果があることが示された。沈黙と言い直しを適切に用いることで、コミュニケーションロボットは行為の連鎖の中で非明示的で自然な行為により注意を獲得することが可能になり、三項関係の場において円滑で効果的なコミュニケーションを実現することが可能となる。

今後は、ロボットに対話者の視線を精度良く検出する機能を実装し、鑑賞者の視線に応じて、必要な時にのみ沈黙と言い直しをおこなうようにする必要がある。また、複数の鑑賞者への対応も重要である。それらと同時に、ロボットによるこうした手法が人間に与える影響を調べ、どの様な発話の仕方、あるいは頻度であれば対話者に許容されるのかを明らかにしなければならない。

第5章 鑑賞支援ロボットにおける「身体ねじり」の効果

本章では、鑑賞支援ロボットにおいて、指さし等の非言語的表現に気付かれないという注意の課題に対して、「F 陣形」と「身体ねじり」という概念に着目して実施した研究について述べる。三項関係において鑑賞支援ロボットが鑑賞者の注意を獲得し、対象物を交えたインタラクションを円滑に行うためには、ロボットと鑑賞者および対象物の間に道具的 F 陣形が構築されていることが有効であると考えられる。しかし、鑑賞支援ロボットが展示案内を行う場合には、鑑賞者が説明対象に近づき過ぎ、適切な道具的 F 陣形が構築されない場合があり、これが鑑賞支援ロボットの非言語的表現に気付かない原因となる。これに対して、本研究では人間の説明員が鑑賞支援を行う場合に用いるような、身体の各部位の回転を使い分けて鑑賞者の身体配置の調整を促す手法が有効であると考えた。特に、下半身を固定したまま上半身をねじる「身体ねじり」を用いることで、鑑賞者の移動を抑制しながら、道具的 F 陣形の構築が可能になると考えられる。

なお、本研究の先行研究として、葛岡らは、上半身と下半身の方向を別々に制御できるコミュニケーションロボット *GestureMan-4* を開発し、ロボットの身体方向および身体ねじりによる効果を調べるための実験を行った[28]。この実験では展示案内において、ロボットの下半身方向と身体ねじりが、構成される O 空間にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とした。実験結果からロボットの下半身方向に応じて O 空間が調整されることがわかったが、身体ねじりについては明確な効果は見出されなかった。これは、ロボットの下半身が丸みを帯びたデザインであり、指向性が明らかでなかったことによるものである可能性が示唆されている。

そこで本研究では、上半身と下半身が明確な指向性を示し、自然な身体ねじりを表現できる可能な鑑賞支援ロボットを用いて身体ねじりによる注意誘導を行った場合に、対話者の身体配置がどのように変化するかを定量的に評価することを目的とする。また、ロボットの上半身と下半身それぞれの効果の違いについても比較を行う。検証に当たっては、以下の 3 点の仮説を設定した。

- I. ロボットが全身を対象物の方に回転させる場合、被験者は対象物の方に移動し、F 陣形の再構築が行われる。
- II. ロボットが上半身のみを対象物の方に回転させる場合、被験者の立ち位置は維持されたまま、身体の回転により F 陣形の調整が行われる。また、下半身のみを回転させる場合には、全身を回転させる場合と同様な傾向が見られる。
- III. 被験者の立ち位置が維持される場合、被験者がロボットを見る時間が長くなる。

仮説 I については、従来研究で示された結果[28]を再確認するものである。仮説 II は、身体ねじりの概念に基づき[26]、ロボットが上半身に向けた対象物には副次的関与、下半身が向けられた被験者には主要関与が向けられていると判断され、被験者はロボットとの位置関係を維持したまま、身体の回転により対象物を交えた道具的 F 陣形を再構築すると考えられる。一方で、下半身のみを対象物に向けた場合は、主要関与が対象物に移ったと判断され、全身

を回転させた条件と同様に、移動を伴った F 陣形の再構築が行われると考えられる。仮説Ⅲについては、被験者の立ち位置が維持されるのは、被験者がロボットの主要関与が自分に向いていると判断した場合であり、そのような状況においては被験者のロボットに対する関心も高くなると考えられる。その結果、被験者がロボットを見る時間が増加すると考えられる。これらの仮説が実証されることで、ガイドロボットにおける上半身・下半身の動作指針が得られる。そしてこの動作指針に基づき、ガイドロボットは被験者の立ち位置と身体方向、および関心の方向を自由に制御することが可能になり、より円滑なコミュニケーションが実現される。

5.1 鑑賞支援ロボット「TalkTorque2」

本実験で用いたヒューマノイドロボット TalkTorque2 (以後, TT2) は頭部 3 自由度, 腰部 2 自由度, 腕部各 4 自由度×2 の計 13 自由度を有し, 上半身と下半身を独立して回転させることが可能である。各可動部はロボット用サーボモータにより駆動され (KRS788HV・KRS4014HV (近藤科学), SRM1422Z (三和電子)), コントロールボード RCB-3J (近藤科学) を介して PC から制御を行った。制御に当たっては, 一連の説明動作を自動で再生するため, VC++ で作成した制御プログラムを用いた。この制御プログラムでは, 特定の書式で動作と発話の SCRIPT を記述したテキストファイルを読み込み, 一連の説明を自動で再生することが可能である。なお再生する音声はフリーの音声合成ソフト AquesTalk[33] を用いて作成した。

ロボットの外装は, 展示案内という知的活動にふさわしく, また上半身・下半身を始めとする身体各部の指向性が明示された外観となるよう, デザイナーと連携して設計を行った。特に上半身・下半身の指向性については, 先行研究において形状による影響が示唆されていたことから[28], より人間に近い形状とし, 自然な身体ねじりを再現するための設計を行った。具体的には, 上半身・下半身の断面形状を人間に近い楕円形とした上で, 間を滑らかに接続する調整フレームを配置し, さらに外側を伸縮性をもった服で覆う構成とした(図 5-1)。これにより, 人間に近い自然な身体ねじりの提示が可能である。なお, 各部の外装は, 熱溶解積層方式の 3D プリンタを用いて出力し, 表面処理と塗装を行った。

実験の際には, 測域センサ URG-04LX (北洋電機) を用いて被験者位置のログを取得した。位置取得に当たっては, まず初期値を取得し(図 5-2-①), 予め定めた閾値以上のずれが生じた部分を人がいる領域として認識する(図 5-2-②)。なお今回行った実験では鑑賞者は一名とし, 測域センサは鑑賞者の胸の高さ(約 1400mm) に設置しているため, 検出される領域は一つの連続したデータ群となる。そこで領域の中央を被験者角度とし, その角度の距離に体の中心を求めるため 100mm を足した値を被験者位置と推定している(図 5-2-③)。

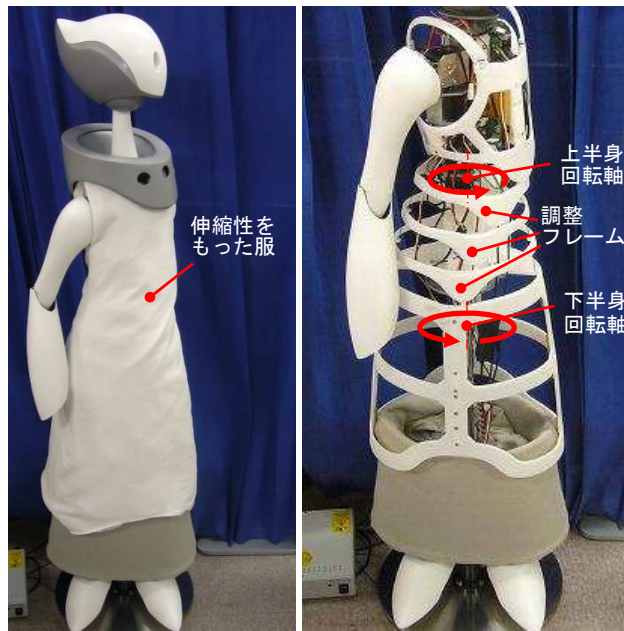


図 5-1 TalkTorque2 の胴体部機構

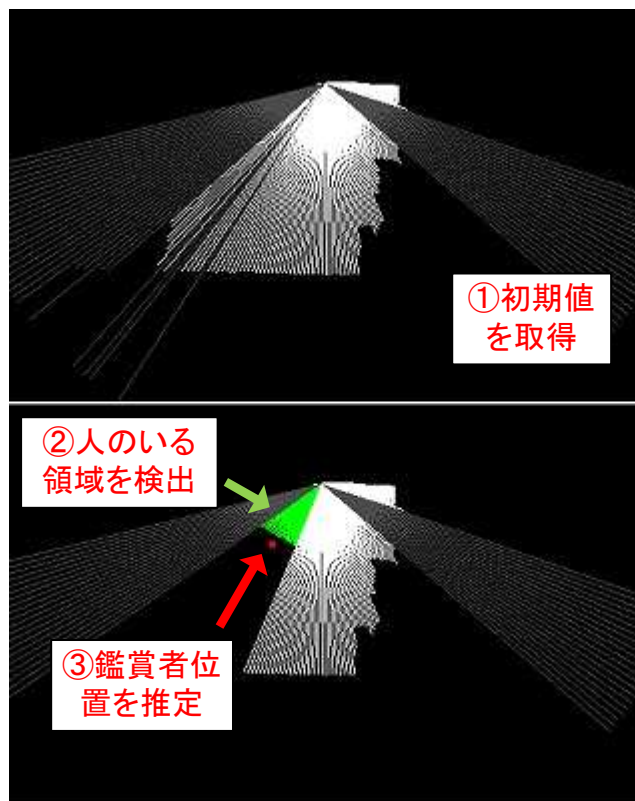


図 5-2 測域センサによる被験者位置の推定

5.2 実験

本章では、開発した TT2 を用いて行った展示案内実験について述べる。この実験では、ロボットの上半身および下半身の指向性がロボットー鑑賞者間の F 陣形に与える影響と身体ねじりの効果について明らかにすることを目的とした。

5.2.1 実験環境

本実験では、大学の研究室内（200cm×250cm）を実験空間とし、TT2 を用いて左右の壁に設置された 2 枚の絵画についての説明を行った。実験環境の詳細を図 5-3 に示す。2 枚の絵画はそれぞれ、クロード・モネ作「睡蓮」（以後、絵画 1）とポール・セザンヌ作「風景」（以後、絵画 2）を用いた。実験環境は高さ 160cm のパーティションを用いて構成した。被験者の行動を記録するためのカメラを図 5-3 右のカメラ 1、2 の位置に設置し、俯瞰から実験環境の撮影を行った。また被験者の初期位置を統一するため、ロボットから 70cm の位置に目印をつけ、実験開始時にはその位置に立つよう指示を行った。この制限は開始時のみとし、その後は自由に行動して良いこととした。また、ロボットの後方 20cm の位置に測域センサを設置し、被験者の位置検出を行った。

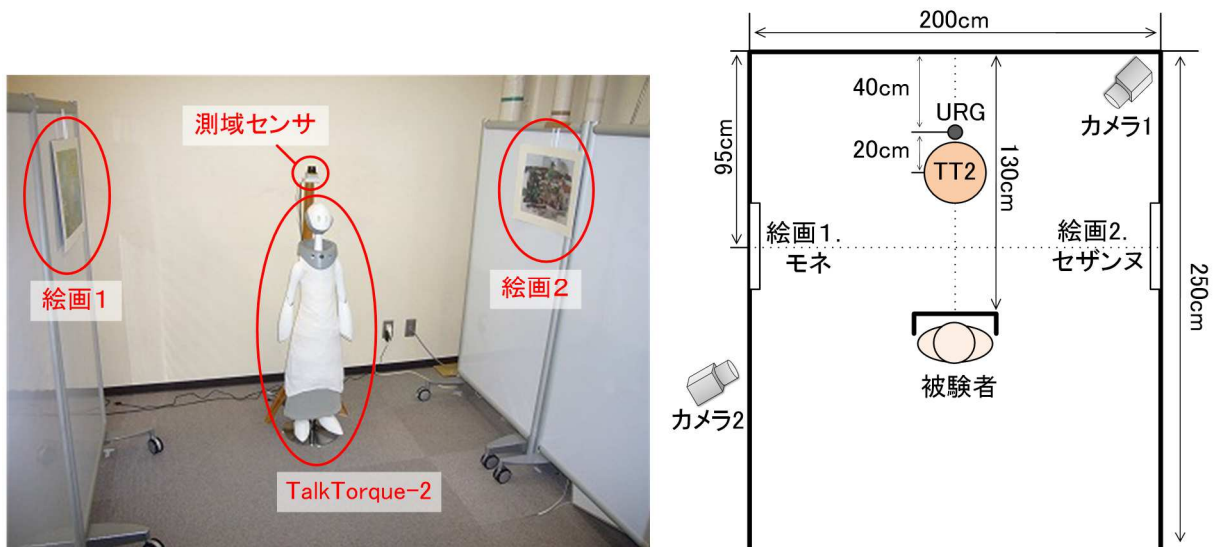


図 5-3 実験環境

(左：実験環境の様子 右：実験環境の寸法)

5.2.2 実験条件

上半身と下半身の指向性による影響と身体ねじりの効果について調べるため、実験は以下の4条件で行った(図 5-4)。それぞれの条件では、説明の最初に展示物を向くときの動作が下記のように異なる。

- ・ **Head** 条件：展示物の方を向くときに頭部のみを動かす。
- ・ **Both** 条件：展示物の方を向くときに上半身と下半身の両方を動かす。頭部は動かさないが、上半身を動かすため頭部も展示物の方を向く。
- ・ **Upper** 条件：展示物の方を向くときに上半身のみを動かす(身体ねじり)。頭部は動かさないが、上半身を動かすため頭部も展示物の方を向く。
- ・ **Under** 条件：展示物の方を向くときに下半身と頭を動かす。

絵画1と絵画2ともにこれらの条件で動作を行った。なおTT2の初期方向(正面方向)と絵画1, 2の間の角度はいずれも70°であり、どちらの説明においても各条件の動作角度は70°とした。この際各条件の動作速度についてもそれぞれ等しく設定した。また、実験条件と関連のない部分については、動作および発話内容等全ての条件を等しく設定した。

被験者数は各条件に対してそれぞれ10名ずつ、合計40名であり(男30名, 女10名)、平均年齢は21.8歳であった。

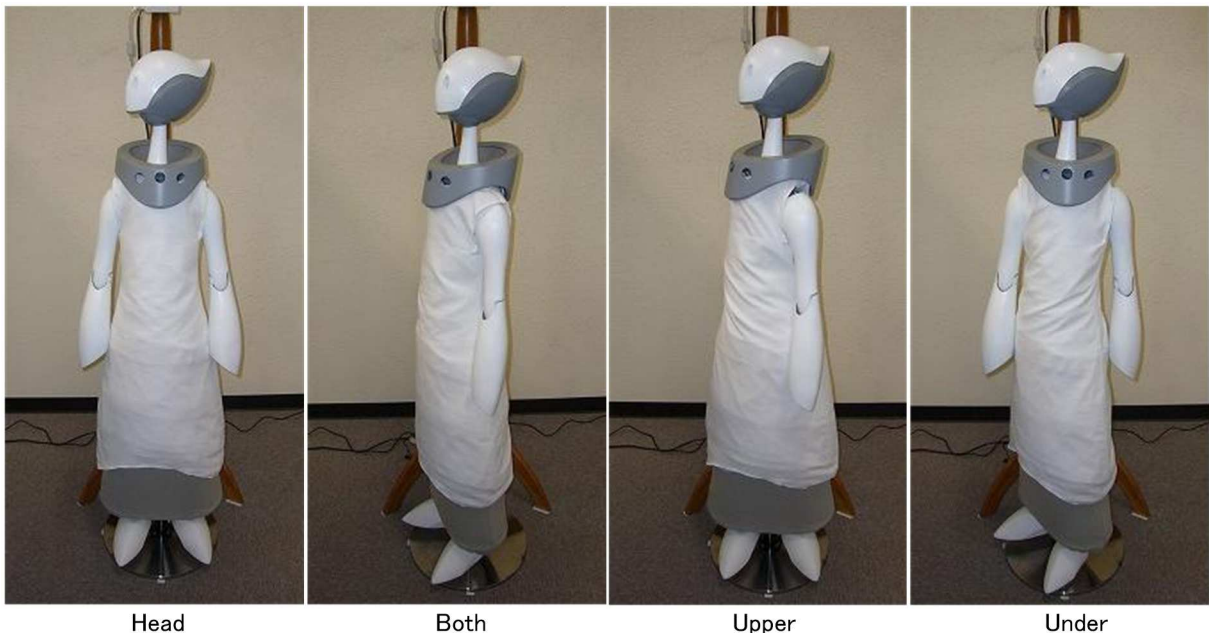


図 5-4 実験条件

5.2.3 実験タスク

実験タスクは、「導入」、「絵画 1 説明」、「絵画 2 説明」、「終了」の 4 つのステージからなる。まず「導入」ステージでは、ロボットが起動、挨拶を行い、今から説明を始めるということを被験者に告げる。次に「絵画 1 説明」ステージでは、最初に実験条件ごとの動作によって絵画の方を向き、それ以降は体の方向は動かさずに説明を行う。「絵画 2 説明」ステージにおいても、「絵画 1 説明」ステージ同様、最初に絵画の方向を向きそれ以降は体の方向を動かさずに説明を行う。最後の「終了」ステージでは、ロボットが体の向きを正面に戻し、お辞儀をして説明を終了する。なお、分析に当たっては、「絵画 1 説明」のみを評価区間として用いた。これは「絵画 2 説明」ステージにおいては、「絵画 1 説明」中の移動による初期値のずれや、タスクへの慣れによる影響が懸念されたためである。

評価区間における発話・動作の詳細とそれぞれの所要時間を表 5-1 に示す。ここで、説明開始直後の、条件動作により注意誘導を行う発話区間を「注意誘導フェーズ」、その後絵画の説明を行う一連の発話区間を「説明フェーズ」と定義し、評価に利用した。評価区間において、ロボットは最初に条件動作により絵画の方向へ注意誘導を行う。体の方向はこの動作以降固定し、頭と腕のみを動かしながらその後の説明を行う。なお、表中の「頭（腕）→被験者（絵画）」という記載は、ロボットの頭（腕）を被験者（絵画）の方向に向けたことを表す。

表 5-1 評価区間のスクリプト

フェーズ	発話内容(発話時間)	動作	時間(sec)
注意誘導フェーズ (7.8 sec)	まず、こちらの絵は、クロード・モネによって描かれた「睡蓮」です。 (5.2 sec)	条件動作	2.0
		停止	2.6
		頭→被験者	2.1
		停止	1.0
説明フェーズ (32.9 sec)	モネは印象派の画家で、同じモチーフを時間毎に描き分け光と色の変化を追った連作と呼ばれる作品を数多く制作しています。 (11.8 sec)	停止	13.0
		頭→絵画 腕→絵画	2.0
	この「睡蓮」はその中でも代表的な作品で、200 点以上も制作されたうちの 1 点です。 (7.6 sec)	停止	3.6
		頭→被験者	2.0
		停止	1.9
	明るい色彩で丹念に描きこまれた画面からは、時々刻々と変化する水面の様子が伝わってくるようです。 (9.1 sec)	頭→絵画	2.0
		停止	3.3
		腕下ろす	3.9
		停止	1.2

5.2.4 評価項目

ロボットの上半身および下半身の方向がロボット-被験者間の F 陣形に与える影響を分析するため、実験の様子を図 5-3 で示した位置に設置した 2 台のビデオカメラによって記録し、被験者が体の配置（位置，方向）を調整するために足を動かした歩数（以後，調整歩数）と，視線方向の分析を行った。また，測域センサにより取得された実験中の被験者の位置データをログとして保存し，被験者の立ち位置座標の推移について分析を行った。さらに，実験後には質問紙を用いてロボットの動作および説明内容についての印象評価を実施した。

5.3 実験結果

5.3.1 調整歩数

ビデオ映像から，注意誘導フェーズと説明フェーズそれぞれにおける調整歩数の確認を行った。まず，各フェーズの終了時点までに被験者が身体方向を調整した割合を図 5-5 に示す。ここで，被験者が身体方向を調整した割合の算出にあたっては，先行研究における定義をもとに[28]，2 歩以上足を動かした場合に身体方向を調整したと判定した。得られた割合について，各フェーズで χ^2 乗検定を行ったところ，注意誘導フェーズにおいて有意差が見られた（ $\chi^2=10.128$, $df=3$, $p=0.018$ ）。下位検定としてライアンの方法による多重比較を行ったところ，head-both 条件間において有意差が見られた（ $\chi^2=9.899$, $df=1$, $p=0.012$ ）。図 5-5 より，注意誘導フェーズ終了時点において both, upper, under 条件では過半数の被験者が身体方向を調整しているのに対し，head 条件ではほとんどの被験者が身体方向を調整していないことが示された。なお，説明フェーズ終了時においては head 条件でも 6 割の被験者が身体方向を調整している。

次に各フェーズにおける調整歩数についての分析を行った。解析に当たっては，注意誘導フェーズと説明フェーズで所要時間に差があるため，それぞれのフェーズにおける調整歩数を所要時間で割った値を用いた。そして，条件（4 水準），フェーズ（2 水準）を要因として，2 要因の分散分析を行った。その結果，フェーズ要因と条件要因の主効果，および条件 - フェーズ間の交互作用が有意であった（ $F(1,36) = 39.241$, $p < 0.001$, $F(3,36) = 2.964$, $p = 0.045$, $F(3,36) = 3.698$, $p = 0.020$ ）。そこで下位検定として，各フェーズにおける条件間の多重比較と，各条件におけるフェーズ間の比較を行った。それぞれの結果をまとめたグラフを図 5-6 に示す。各フェーズにおける条件間の多重比較では，注意誘導フェーズにおいて both 条件の調整歩数が head 条件に比べて有意に多いことが示された（ $p=0.014$ ）。また，各条件におけるフェーズ間の比較では，head 条件を除く 3 条件（both, upper, under）において，注意誘導フェーズにおける調整歩数がその後の説明フェーズに比べて有意に多いことが示された（ $p < 0.001$, $p = 0.007$, $p = 0.004$ ）。

これらの結果から，head 条件を除く 3 条件（both, upper, under）では注意誘導フェーズにおいて調整歩数が増加し，身体方向が調整されているのに対し，head 条件では調整歩数の増加は見られず，身体方向も調整されていないことが示された。

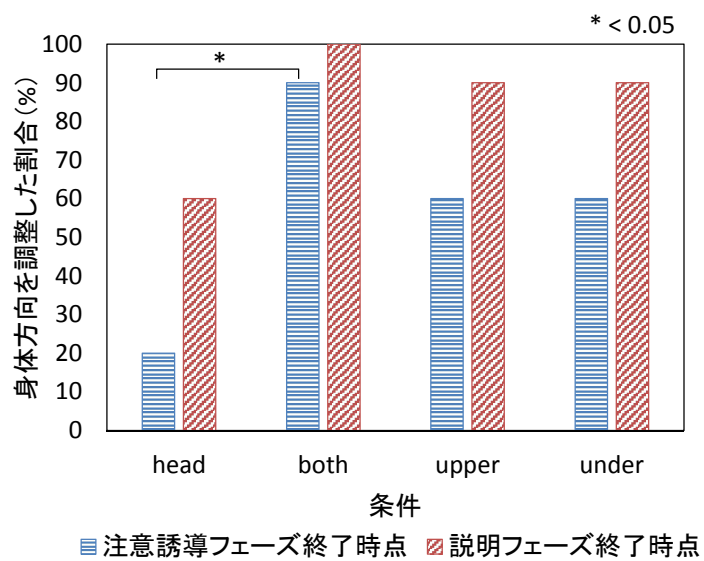


図 5-5 各フェーズ終了時点で身体方向を調整した割合

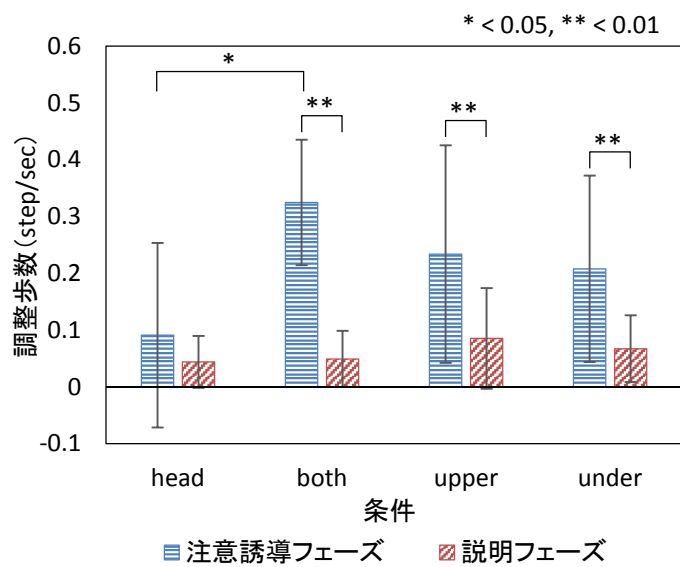


図 5-6 各フェーズにおける平均調整歩数

5.3.2 被験者と絵画の距離

被験者位置のログデータより，説明開始時と注意誘導フェーズ後，および説明フェーズ後の各時点における被験者と絵画の間の距離を測定した．なお，検定に当たってはログデータの取得に失敗した試行を除外したため，被験者数は head, both, upper 条件それぞれ 9 名，under 条件 10 名の計 37 名であった．ここで，条件（4 水準），フェーズ（3 水準）を要因として，2 要因の分散分析を行った．その結果，フェーズ要因の主効果，および条件 - フェーズ間の交互作用が有意であった（ $F(2,32) = 32.637, p < 0.001$ ， $F(6,66) = 2.659, p = 0.023$ ）．そこで下位検定として，各フェーズにおける条件間の多重比較と，各条件におけるフェーズ間の比較を行った．それぞれの結果をまとめたグラフを図 5-7 に示す．

各フェーズにおける条件間の多重比較では，いずれの条件間でも有意差は見られなかった．各条件におけるフェーズ間の比較では，まず both 条件において説明開始時 - 注意誘導フェーズ後間，および説明開始時 - 説明フェーズ後間で有意差（ $p = 0.001, p = 0.030$ ）が見られた．また upper 条件においては説明開始時 - 説明フェーズ後間で有意差（ $p = 0.009$ ），注意誘導フェーズ後 - 説明フェーズ後間で有意傾向（ $p = 0.091$ ），under 条件においては説明開始時 - 説明フェーズ後間および注意誘導フェーズ後 - 説明フェーズ後間で有意差（ $p = 0.001, p = 0.001$ ）が見られた．なお，head 条件においてはフェーズ間で有意差は見られなかった．これらの結果から，both 条件では注意誘導直後に被験者が絵画に近づき説明終了までそのままの距離を維持するのに対し，upper・under 条件では注意誘導直後には被験者は移動せず，その後の説明フェーズにおいて移動が行われていることが示された．

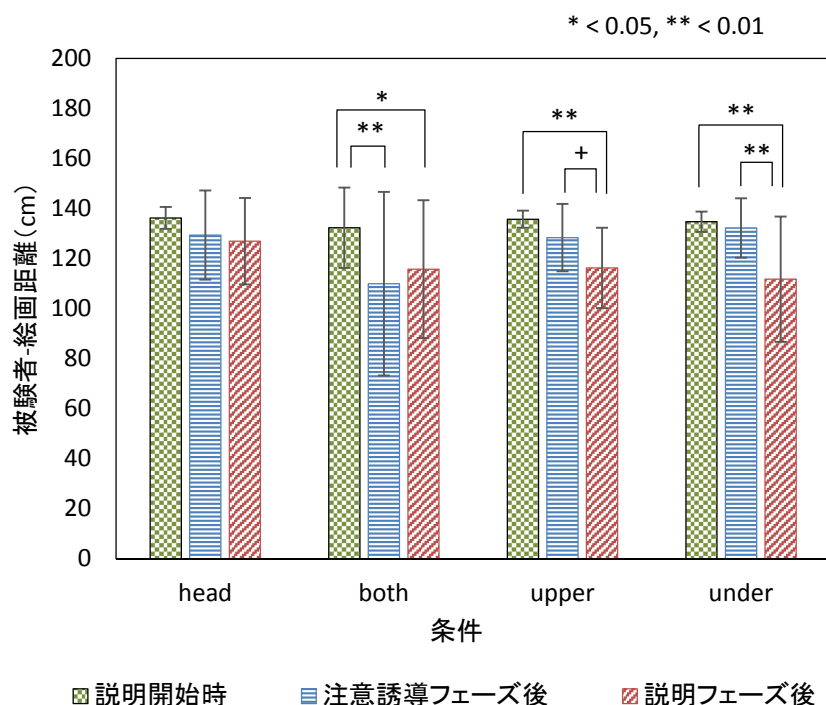


図 5-7 各フェーズにおける被験者・絵画距離の平均

5.3.3 視線方向

ビデオ映像から、絵画 1 説明中の各時刻に被験者がロボットの方を見ていたかを 1 フレーム (1/30sec) ごとに判定し、説明中にロボットを見ていた総時間を測定した。図 5-8 に、各条件におけるロボットを見た時間の平均を示す。ここで、各条件に対して一元配置の分散分析を行ったところ、有意差が見られた ($F(3,36) = 4.131, p = 0.013$)。そこで下位検定として各条件間での多重比較を行ったところ、head-upper 条件間と head-under 条件間でそれぞれ有意差、head-both 条件間で有意傾向が示された ($p = 0.036, p = 0.001, p = 0.056$)。このことから、身体のいずれかの部位を動かさず条件では (both, upper, under), head 条件と比べてロボットを見る時間が減少することが示された。

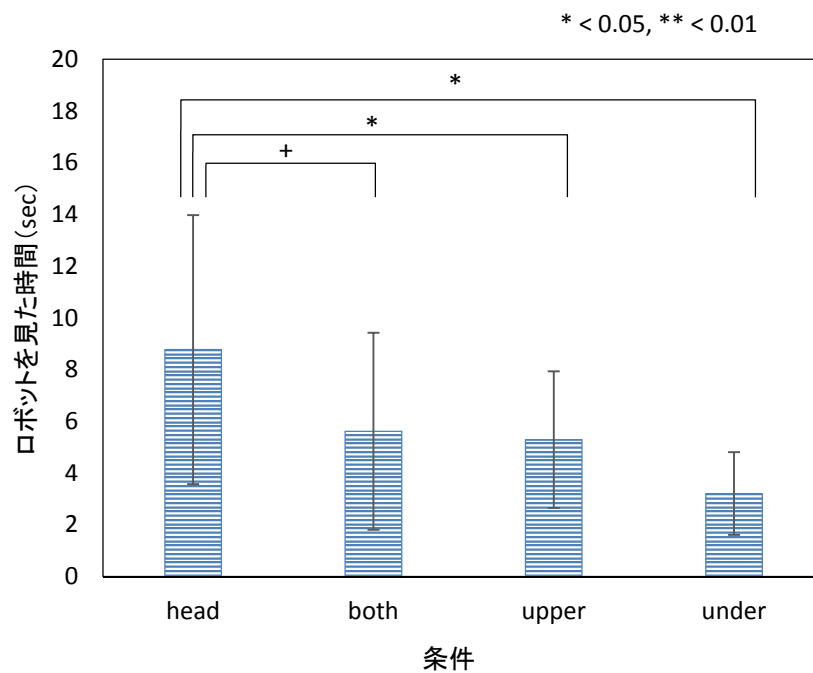


図 5-8 各条件におけるロボットを見た時間の平均

5.3.4 アンケート

実験終了後に行ったアンケートは通常の質問項目と印象評価，および自由記述からなる．質問項目は表 5-2 (1) に示す 9 項目を用い，7 段階評価で，肯定的な評価が高くなるように 1 から 7 までを数値化して比較を行った．印象評価には，表 5-2 (2) に示す 19 個の形容詞対からなる SD 法を用いた．形容詞対は，肯定的な形容詞が高くなるよう 1 から 7 までを数値化して比較を行った．

表 5-2 アンケート項目

(1) 質問項目

Q1.	ロボットによる説明は理解できましたか？それとも理解できませんでしたか？
Q2	ロボットによる説明は信頼できましたか？それとも信頼できませんでしたか？
Q3	ロボットによる説明は長かったですか？それとも短かったですか？
Q4	ロボットの動作は自然でしたか？それとも不自然でしたか？
Q5	ロボットの動作は適切でしたか？それとも不適切でしたか？
Q6	ロボットが説明しているとき，あなたは展示物に注目しましたか？ それとも注目しませんでしたか？
Q7	ロボットが説明しているとき，あなたはロボットに注目しましたか？ それとも注目しませんでしたか？
Q8	ロボットはあなたに対して，興味を持っているように感じましたか？ それとも感じませんでしたか？
Q9	ロボットは展示物に対して，興味を持っているように感じましたか？ それとも感じませんでしたか？

(2) 印象評価の形容詞対

No	形容詞対	
1	悪い	良い
2	こわい	やさしい
3	にくらしい	かわいらしい
4	つまらない	面白い
5	冷たい	暖かい
6	近づきやすい	近づきがたい
7	機械的な	人間的な
8	不愉快な	愉快的な
9	親しみにくい	親しみやすい
10	嫌いな	好きな

No	形容詞対	
11	難解な	平易な
12	感じのわるい	感じのよい
13	愚かな	賢い
14	地味な	派手な
15	暗い	明るい
16	消極的な	積極的な
17	堅苦しい	打ち解けた
18	退屈な	興味深い
19	遅い	速い

表 5-2 (1) の各質問項目に対する条件ごとの平均値を図 5-9 に示す。ここで各質問に対して一元配置の分散分析を行ったが、いずれの項目においても有意差は見られなかった。また、表 5-2 (2) の形容詞対に対して因子分析を用いた印象評価を行った。反復因子法を用いて求めた固有値に基づいて 3 因子解と仮定し、各因子の因子得点を計算したが、いずれの因子においても各条件間で有意な差は見られなかった。

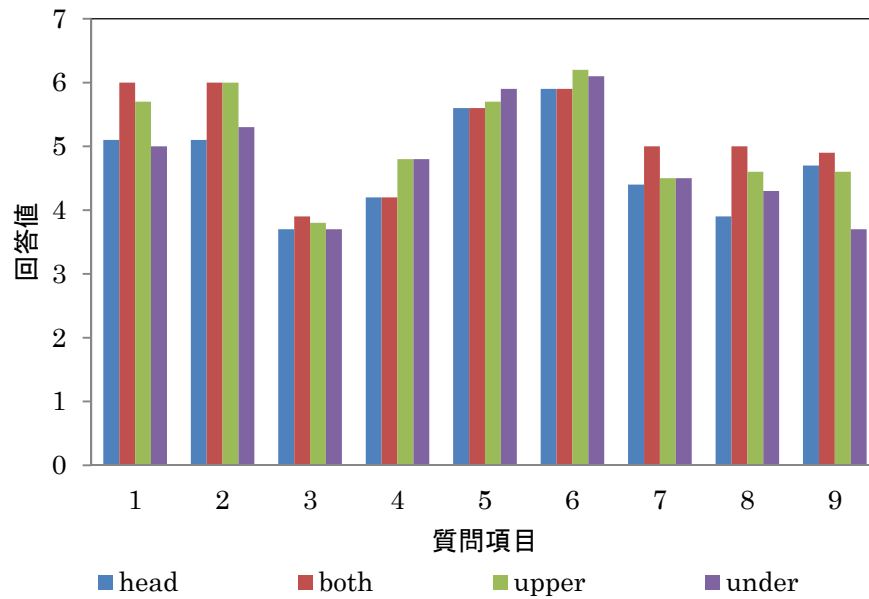


図 5-9 各質問項目の平均得点

5.4 考察

5.4.1 F 陣形の再構築に関する考察

5.3.1 調整歩数, 5.3.2 被験者と絵画の距離の評価結果より, ロボットの各部位の回転が F 陣形の再構築にどのような影響を与えたかの考察を行う. まず調整歩数の結果より, head 条件を除く 3 条件 (both, upper, under) では注意誘導フェーズにおいて身体方向が調整され, F 陣形の再構築が行われていると考えられる. この際, 被験者と絵画の距離の評価結果より, both 条件においては移動を伴った F 陣形の再構築が行われたのに対し, upper, under 条件においては移動を伴わず, その場で回転し F 陣形の再構築が行われたと考えられる. これらの結果より, 本研究の仮説 I は実証され, 仮説 II については一部が実証された. 仮説 II においては, 下半身が主要関与, 上半身が副次的関与を示すとする Schegloff の定義に基づき[26], upper 条件でのみ移動を伴わない F 陣形の再構築が行われると予測したが, 本実験の結果においては upper 条件と under 条件の間に異なる傾向は見られなかった. この原因として, 今回の under 条件動作が実際の人間の動作と異なる動きであったことが挙げられる. 通常, 人間が下半身を動かさず場合は上半身を含めた全身の回転が伴うため, 上半身のみを回転する場合と比べて動作が大きくなる. そのため, 大きな動作を伴う下半身の動作がより大きな意味を持ち, 主要関与を示すこととなる. これに対して, 今回用いたロボットは 2 足歩行型ではなく, 固定された台座上で上半身・下半身の外装を回転させることで体の回転を表現しているため, upper, under 条件間の動作の大きさはほぼ等しい. そのため, upper, under 条件共に同様な傾向となったと考えられる. なお, 説明終了時の被験者と絵画の距離の評価結果より, upper, under 条件においても最終的には移動が行われていることが示された. これは, 上半身, もしくは下半身の回転を長時間 (説明フェーズ中約 30 秒間) 維持したためであると考えられる. Schegloff によれば, 身体ねじりは副次的関与を一時的に示す場合に使用されるとされており[26], 今回の実験では身体ねじりを長時間維持したことで, 主要関与が絵画に移ったと判断されたと推測される. そのため, 被験者の移動を長時間抑制するためには, 上半身・もしくは下半身の方向を定期的に被験者の方向へ戻すことが有効であると考えられる.

これらの結果から, 注意誘導の際に上半身・下半身のいずれか一方のみを回転させることで, 被験者の立ち位置を維持したままで F 陣形の再構築を促すことが可能であることが明らかになった. この知見に基づき, ロボットの身体方向を適切に変化させることで, 説明タスクをより円滑に進めることが可能となる. 例えば, 複数の対象物が存在する状況において, 一つのものに集中して説明を行う場合には全身を回転させ, 移動を伴う F 陣形の再構築を促すことが有効である. 一方, 途中で説明対象を切り替えながら複数のものを説明する場合には, 上半身・下半身のいずれか一方を回転させ, 移動を伴わない F 陣形の再構築を促すことが有効である. このように, 状況に応じて回転させる体の部位を使い分けることで, 説明タスクをより円滑に進めることが可能になる.

5.4.2 被験者の視線方向に関する考察

5.3.3 視線方向の評価結果より、身体のいずれかの部位を動かす条件 (**both, upper, under**) と、**head** 条件の間に有意な差が示された。仮説Ⅲでは、被験者の立ち位置が維持される場合、被験者がロボットを見る時間が長くなると予測したが、被験者の立ち位置が維持された **upper, under** 条件と **both** 条件の間の差は示されなかった。これは、上半身もしくは下半身の方向を長時間維持したことで被験者が移動したことによる影響であると考えられる。そのため、今後は 5.4.1 項で提案したように上半身もしくは下半身の方向を定期的に被験者の方に戻すことで被験者の移動を抑制した状態で、視線の評価を行う必要がある。

5.5 まとめ

本研究では、上半身と下半身を独立して回転させる機構を持った鑑賞支援ロボットを用いて身体ねじりにより注意誘導を行った場合に、対話者の身体配置がどのように変化するかの評価を行った。評価に当たっては、自然な身体ねじりを提示可能なヒューマノイドロボット **TT2** を用い、被験者に絵画の説明を行う研究室内実験を実施した。この際、身体の各部位の回転による効果を比較するため、頭だけを回転させる **head** 条件、全身を回転させる **both** 条件、上半身のみを回転させる **upper** 条件、下半身のみを回転させる **under** 条件という 4 条件で比較を行った。

実験の結果、全身を回転させる **both** 条件においては、誘導動作の直後に被験者が移動を伴って **F** 陣形の再構築を行ったのに対し、身体ねじりを用いた条件 (**upper** 条件・**under** 条件) では、被験者の移動を抑制した状態で **F** 陣形の再構築が行われた。これらの結果より、状況に応じて回転させる体の部位を変化させることで、対話者の立ち位置と方向を制御し、身体配置の調整を促すことが可能となる。これにより、鑑賞者の関心がロボットと対象物の双方に維持される道具的 **F** 陣形を構築・維持することが可能となり、三項関係の場において円滑で効果的なコミュニケーションを実現することが可能となる。

ただし今回の実験では、身体ねじりを用いた条件においても身体の方向を長時間維持することで徐々に被験者は移動を行っており、今後は身体ねじりを維持する時間による影響等を考慮した動作指針の検討が必要である。

第6章 ディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットに 表示される顔画像の注視方向評価

人同士の対話では、視線一致[34]、共同注意[22]、ゲイズアウェアネス[35]などの概念に代表されるように、行為の連鎖の中で視線が重要な役割を果たすことが知られている。特に三項関係において、注視方向の伝達は話し手として発話を行う際の提示・および聞き手としての受理に関わり、これらの視線のインタラクションにより話者間で基盤化が達成されることが円滑なコミュニケーションを達成するための前提となることから[20]、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は、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[3]。このような問題を緩和する手段の一つとして、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の多くは、遠隔操作者の顔画像が表示された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を提示する[11]–[13], [15], [16]。これにより、三項関係の場において円滑なコミュニケーションを達成し、遠隔参加者の存在感や参与を向上させることが期待されている。ただし、[15], [16]の研究においては、それらの効果が限定的であることが示されている。

その原因として、ディスプレイの回転による注視方向の伝達が十分に機能していなかったことが考えられる。Sirkinらは、平坦なディスプレイの回転による注視方向の提示は、人間の頭や体を用いた注視方向の提示に比べて、物理的な指向性のアフォーダンスが限定的であることを指摘した[15]。また、ディスプレイに提示された顔画像を斜めから見る場合、注視方向が誤認されることが知られており[36]、ディスプレイ回転により注視方向を伝達する場合も注視方向が正しく伝達されていなかったと考えられる。特に既存のテレプレゼンスロボットでは、操作インタフェースに応じ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み合わせが生じるが、それらの組み合わ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等の定量的な調査は行われていなかった。

そこで本章では、注視方向伝達の課題を改善するための基礎的な知見を得るために、既存のテレプレゼンスロボットを想定して、複数のディスプレイ回転と遠隔対話者の顔画像の回転の組み合わせた場合に、観察者が遠隔対話者の注視方向をどのように知覚するかということを定量的に評価する実験を実施する。

6.1 ディスプレイに表示された顔画像の注視方向認知に関する研究

本研究での評価内容に関連する研究として、Anstis ら[37]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（TV0°, 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ずれ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[38]や真覚ら[39]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。例えば、実験者が被験者からみて右側 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[40]や Gibson ら[41]も同様の結果を報告している。

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み合わせが限定的である (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み合わせが想定される。
- ・ 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、それらの組み合わせによって特定方向への注視が行われる。この時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 6-1)、杉江[42]や山田[43]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。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。

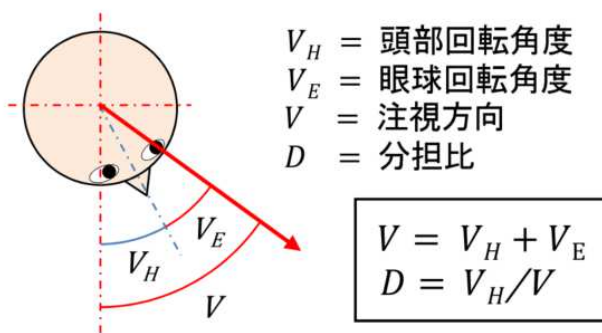


図 6-1 分担比

6.2 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み合わ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[43]、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(6.2.3項参照)、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

6.2.1 実験条件

本実験では、以下の5条件の比較を行った(図6-2)。

C1. 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(6.2.3項参照)で求めた分担比で注視する。

C2. 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。

C3. 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。

C4. 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。

C5. 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。この時、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。

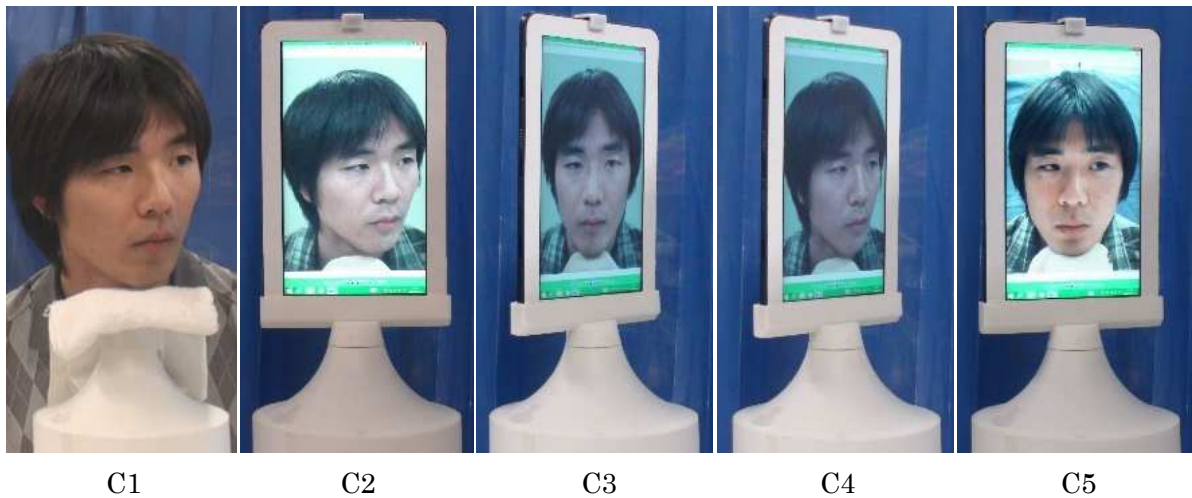


図 6-2 各実験条件の刺激提示 (45°)

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[38]、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6.2.3項参照）。なお、C2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[44][45]を設置し、遠隔操作者がこれに対して自然な見回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。C3はKubi[11]やPorta-person[12]の遠隔操作ユーザーインターフェースを想定しており、これらのユーザーインターフェースでは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などを利用してロボットを操作するため、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。C4はiRIS[13]やMebot[29]の遠隔操作インターフェースを想定した条件である。これらのユーザーインターフェースでは、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。ただし、ユーザーインターフェースはC2と同様に広視野角をカバーするものを想定している。C5はC2とC4の中庸の条件として、本研究のために特に設定した。

6.2.2 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 6-3）。ディスプレイには 10.8 イ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[11][46]。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（6.3 節参照）。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。

構築した実験環境を図 6-4 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 82.5cm 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[47]。また、41.25cm（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ルールを設置した（図 6-3 参照）。ル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。

実験に当たっては、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ルールは、被験者から見て実験者の目が隠れることがないように、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 度下に下がるが、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[40]、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、注視用ル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全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。

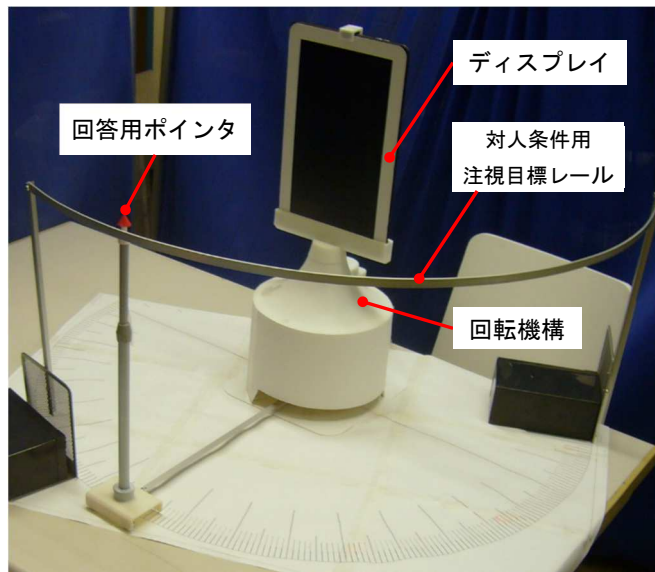


図 6-3 実験装置

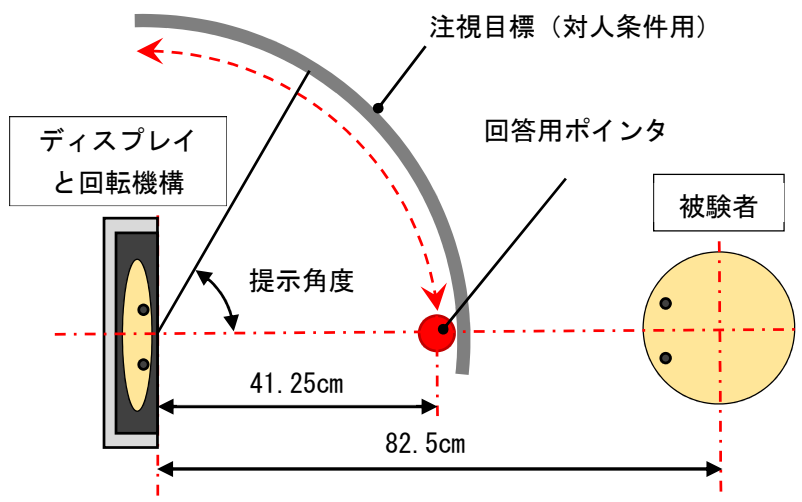


図 6-4 実験環境

6.2.3 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、あご寄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、あご寄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6-5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[42], [43]。

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当たっても、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。

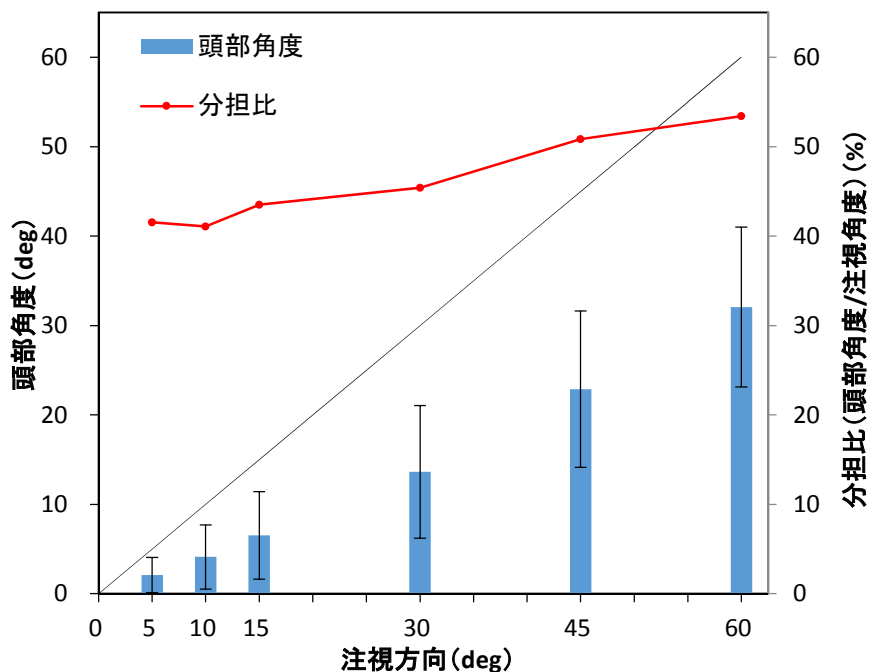


図 6-5 分担比計測の結果 (図中の直線は提示角度)

6.2.4 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一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）。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。

6.3 実験結果

各条件・角度ごとの全回答の平均値を示したグラフを図 6-6 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指す。

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、提示角度毎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 6-7 に示す。

図 6-7 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 度では両方回転 (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。

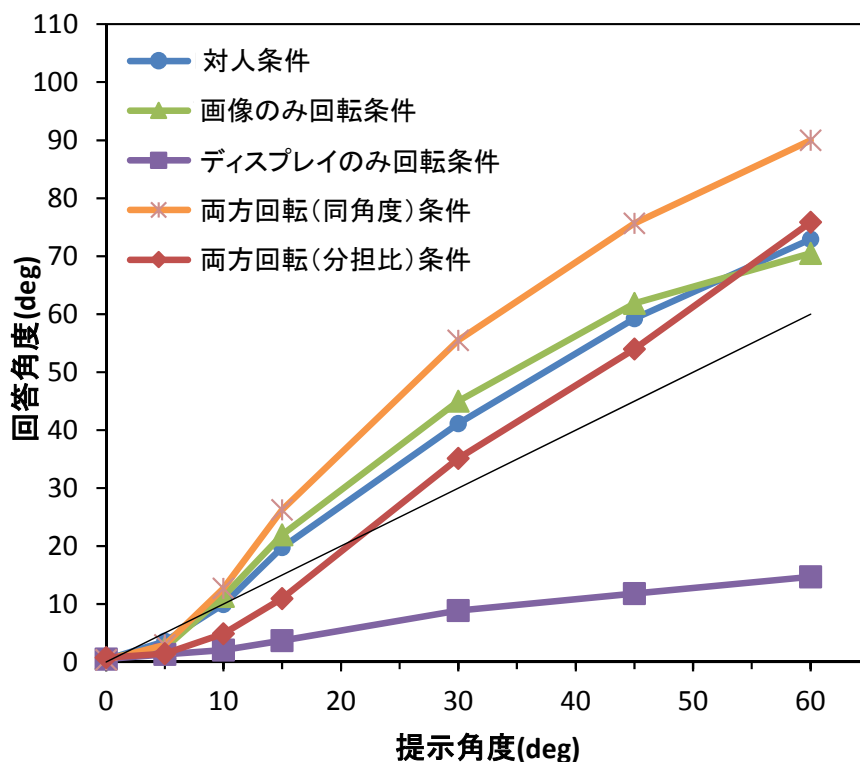


図 6-6 全回答の平均 (図中の直線は提示角度)

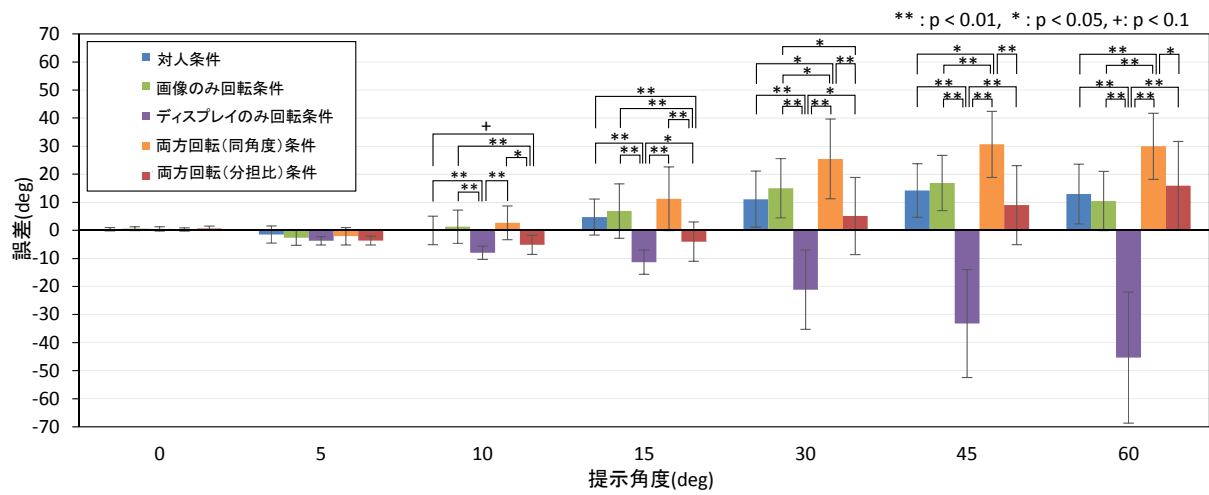


図 6-7 角度毎の条件間多重比較結果

6.4 考察

6.4.1 条件ごとの考察

対人条件

図 6-6 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 [37]–[39]、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。

画像のみ回転条件

同様に図 6-6 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 [48]、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も、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づらいことから、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、6.2.2 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。

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わかった。被験者の回答角度は、提示角度に関わらず 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、常に自分の方向を見ているように感じられる心理的效果）により、常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も隅々ま

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を用いている場合 [11], [12]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わかった。

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わかった。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。なお、画像のみ回転条件と両方回転(同角度)条件との比較より、平面ディスプレイ回転効果の影響を求めることが出来る。例として、提示角度 30° の場合を考えると、知覚される角度は画像のみ回転条件で約 45° 、両方回転(同角度)条件で約 55° であり、平面ディスプレイ回転効果の影響は約 10° 程度である。このことから、注視方向の知覚に当たっては、ディスプレイの回転よりも顔画像の回転の影響が支配的であると考えることが出来る。

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わかった。

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 6-6 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[37],[38]、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。

6.4.2 複数の方向からシステムを見る場合の課題

今回の結果から示唆される重大な課題として、複数の方向からシステムを見る場合、見る角度に応じて知覚される注視方向に差が生じる可能性が挙げられる。例として、図 6-8 のように同じ刺激を複数の方向から見る状況を想定すると、まずディスプレイを 0° 方向から確認する場合は 30° の刺激が過大評価により約 45° と知覚される。一方、 -30° 方向から同じ刺激を確認する場合は本実験における両方回転条件の 30° の結果より、 -30° の位置を基準として約 55° と知覚される。これは、 0° の位置から見て 25° の方向となる。また、今回の実験では未評価だが、 30° の位置から同じ刺激を確認した場合、さらに異なる方向に知覚されることが予想される。このように見る角度により知覚される方向にばらつきが生じるのは、6.4.1 項の両方回転（同角度）条件の考察で示したように、方向の知覚においてはディスプレイの角度よりも顔画像の角度が支配的であることによる。

このような、見る角度に応じて知覚される注視方向が変化し一意に定まらないという性質により、通常のビデオ通話システムやディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットは特定の方向への空間的参照を提示することが困難となることが明らかになった。

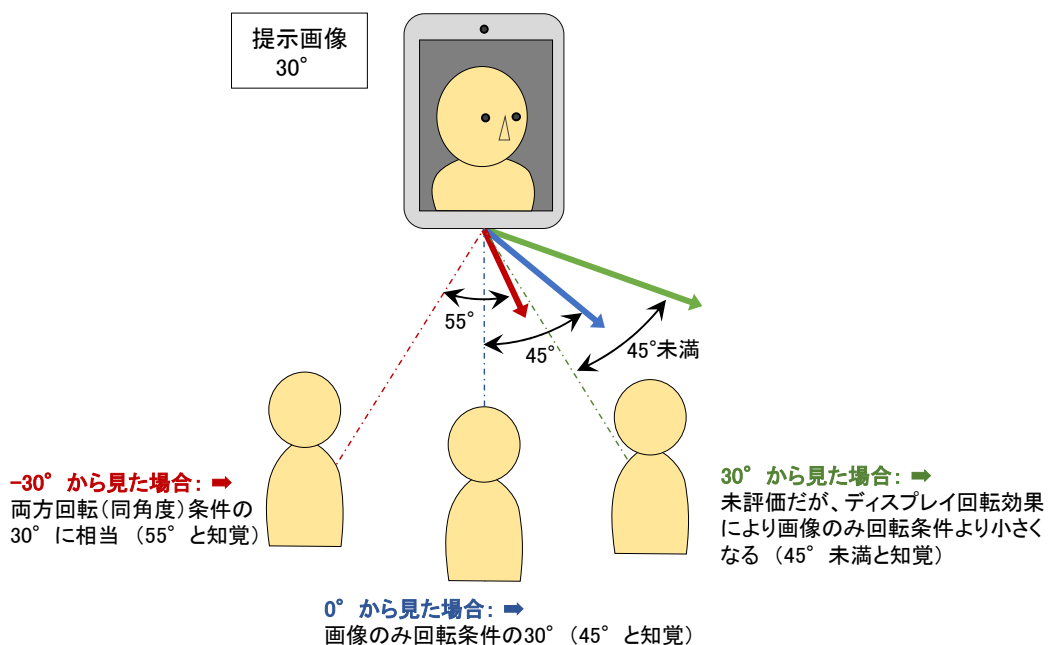


図 6-8 複数方向から画像を見た場合に知覚される方向のばらつき

6.5 まとめ

本章では，ディスプレイ回転型の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，それらの組み合わ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み合わ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，「順方向の頭部回転効果」「モナリザ効果」「平面ディスプレイ回転効果」により，いずれの条件においても知覚される注視方向に誤差が生じることが示された．そして，複数の方向からシステムを見る場合，見る角度に応じて知覚される注視方向が変化し一意に定まらないということも示された．三項関係の場において円滑なコミュニケーションを達成するためには，これらの注視方向伝達に関わる課題の改善が必要となる．

第7章 ヒューマノイドロボットの頭部を付与した テレプレゼンスロボットの提案

第6章の実験結果より、既存のテレプレゼンスロボットで用いられているディスプレイ回転と顔画像回転の組み合わせによる注視方向提示では、いかなる組み合わせにおいても知覚される方向に誤差が生じることと、複数の方向からシステムを見る場合、見る角度に応じて知覚される注視方向が変化し一意に定まらないことが明らかになった。三項関係の場において、注視方向の伝達は話し手として発話を行う際の提示、および聞き手としての受理に関わり、これらの視線のインタラクションにより話者間で基盤化が達成されることが円滑なコミュニケーションを達成するための前提となる。しかしながらディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットにおいては、注視方向伝達の課題により提示された注視が意図を持った信号として適切に認識されず基盤化が達成されない場合があり、これにより存在感や参与率の低下が生じていたと考えられる。そのため本研究では、これらの注視方向伝達の課題を改善することを目的とし、物理的なインジケータとしてヒューマノイドロボットの頭部を付与したテレプレゼンスロボットの提案を行う。提案手法の効果検証のため、第6章の内容を踏襲した注視方向伝達精度の評価実験（実験Ⅰ）と、実際の対話状況における影響を検証するための対話実験（実験Ⅱ）を実施した。

7.1 物理的なインジケータとしてのヒューマノイドロボット頭部付与

テレプレゼンスロボットにおける注視方向伝達の課題に関連して、Sirkin らはディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットを用いた対話実験の結果より、ディスプレイの回転により方向を示す手法は、人の身体が持つアフォーダンスと比較して効果が限定的であり、存在感の低下やアイコンタクトの不成立の原因となっていることを指摘した。そしてそれらの課題を達成するための設計提案として、ディスプレイは回転させずに何らかの物理的なインジケータを用いて方向を示す手法を提案している[15]。

7.1.1 関連研究

遠隔対話において注視方向を正確に伝達する手法として、Misawa らは人の頭部形状を計測して作成した立体スクリーンに対話者の顔映像を投影して遠隔対話を行うシステム LiveMask を開発した[49]。Livemask は立体スクリーンに遠隔対話者の顔映像をリアルタイムで投影し、さらに立体ディスプレイ自体をモータにより動作させることで、注視方向を物理的に提示することが可能である。効果検証の実験より、Livemask を用いることで注視方向の伝達精度の改善やアイコンタクトの伝達が可能になることが示された。ただし、個人に合わせた立体スクリーンが必要になるという汎用性の問題や、表情の変化に伴う顔形状の変化に対応できないという機能上の問題が明らかになっており、ディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットの改善に用いるのは困難である。

また、Kuzuoka らはロボットの頭部を用いて注視方向を伝達する遠隔作業支援ロボット GestureMan-3 を開発した[50]。GestureMan-3 は胸部に3眼カメラを搭載し、遠隔参加者に対してローカル環境側の広視野角映像を提供する。ロボットの頭部はモーショントラッカにより取得された遠隔操作者の頭部動作と連動し、遠隔操作者が見ている方向への注視を提示する。システムを用いた遠隔作業指示実験において、ロボットの頭部動作より被験者が対象を予期し、明示的な指示の前に対象へ視線を移動させる動作が示された。この結果より、ロボットの頭部は人間の頭部と同様な物理的アフォーダンスを示し、行為の連鎖を誘起する効果を持つと考えられる。

7.1.2 システム構成

関連研究に基づき，本研究ではビデオ通話用のディスプレイの上部に物理的なインジケータとしてヒューマノイドロボットの頭部を付与する構成を採用した．ロボットの頭部をインジケータとして用いることにより，物理的に方向を示す役割だけでなく，人間の頭部が持つ物理的なアフォーダンスを再現し，相互注視や共同注意等の行為の連鎖を誘起する効果が期待される．実装したシステムの外観を図 7-1 に示す．

ディスプレイ部には 10.1 インチのタブレット PC (Diginnos DG-D10IW3S) を用い，その上部にヒューマノイドロボットの頭部を実装した．ロボット頭部はサーボモータ 2 個と制御基板 (ARDUINO Pro Mini) を内蔵し，pan-tilt 方向の動作が可能である．外形は直径 100mm 程度の球に収まるサイズであり，目は縦 20mm × 横 4mm の楕円形である．なお，視線提示を行う上では頭部のサイズやデザインの影響を受ける可能性があるが，最適な形状を導き出すためには膨大なパターンを検証が必要である．そこで本研究では，比較的シンプルな頭部のデザイン 1 種類のみを採用し，最適形状の導出については本研究では扱わないこととした．



図 7-1 システム外観

7.2 実験 I : 注視方向伝達精度の評価

7.2.1 実験方法

物理的なインジケータとしてヒューマノイドロボットの頭部を付与する手法を用いた場合の注視方向伝達精度を評価するため、第 6 章で実施した実験に基づく評価実験を実施した。実験システムの基本的な配置・手順は第 6 章の実験と統一し、システムから被験者までの距離は 82.5cm, 回答用ポインタまでの距離は 41.25cm とした。なお、実験に当たっては、6.4.2 項で示された複数の方向からシステムを見る場合の課題について検証するため、第 6 章の実験内容を拡張し、複数方向 (-30° , 0° , 30°) から刺激を確認することとした (図 7-2)。

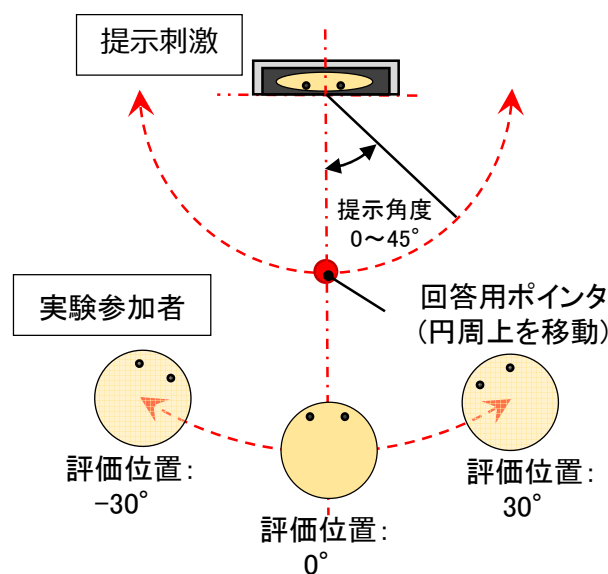


図 7-2 複数方向からの評価の概要

7.2.2 実験条件

C1. 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 (6.2.3 項参照) で求めた分担比で注視する。

C2. 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。なお、この条件では 7.1.2 項で説明した提案システムからロボットの頭部を外したシステムを使用した。

C3. ロボット頭部付与条件 (Robot Head) :

被験者は液晶ディスプレイにヒューマノイドロボットの頭部を付与したシステム (7.1.2 項参照) と対面し、システムが提示する注視方向を推定する。ディスプレイには画像のみ回転条件と同一の顔画像を表示した上で、ディスプレイ上のヒューマノイドロボットの頭部が提示方向に回転する。



図 7-3 実験条件

各条件の外観を図 7-3 に示す。これらの 3 条件それぞれについて、 0° 、 15° 、 30° 、 45° の 4 方向の刺激を提示した。また、各条件においてこれらの 4 方向の刺激を 3 方向 (-30° 、 0° 、 30°) から確認することとし、1 条件当たり 12 回の試行を行った。実験は被験者内配置の実験計画とし、各被験者は条件 (3) \times 角度 (4) \times 評価位置 (3) = 36 試行を実施し、全体の所要時間は 30 分程度であった。なお、順序効果を考慮し、各被験者の条件順序および条件毎の試行順序はランダム化した。被験者は正常な視力を有する大学生、大学院生の 10 名 (男性 10 名) で、平均年齢は 22.4 歳であった。

なお本実験においては、テレプレゼンスロボットを想定し 6 章の実験で用いたディスプレイのみ回転条件および両方回転条件は用いていない。これは、6 章の結果よりこれらの条件では伝達精度が画像のみ回転条件よりも低下することが示されていたためである。

7.2.3 実験結果

評価位置毎に各条件・各角度の全回答の平均値を示したグラフを図 7-4 に示す。統計的な分析にあたっては、評価位置毎に各条件における全回答の平均絶対誤差を算出し、評価位置（3水準）と条件（3水準）を要因として2要因の分散分析を行った。2要因の分散分析の結果、評価位置と条件のそれぞれについて、主効果が有意であった（それぞれ $F(2,18) = 33.036, p < 0.01$; $F(2,18) = 19.750, p < 0.01$ ）。また、評価位置と条件の交互作用が有意であった（ $F(4,36) = 8.998, p < 0.01$ ）。そこで下位検定として、評価位置毎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 7-5 に示す。

図 7-5 に示すように、全ての評価位置において画像のみ回転条件の誤差が他の条件よりも大きく、評価位置 -30° では対人条件およびヒューマノイド頭部付与条件との間に有意傾向（ $p < 0.1$ ）、評価位置 0° ではヒューマノイド頭部付与条件との間に有意傾向（ $p < 0.1$ ）、評価位置 $+30^\circ$ においては、対人条件およびヒューマノイド頭部付与条件との間に有意差が見られた（ $p < 0.01$ ）。

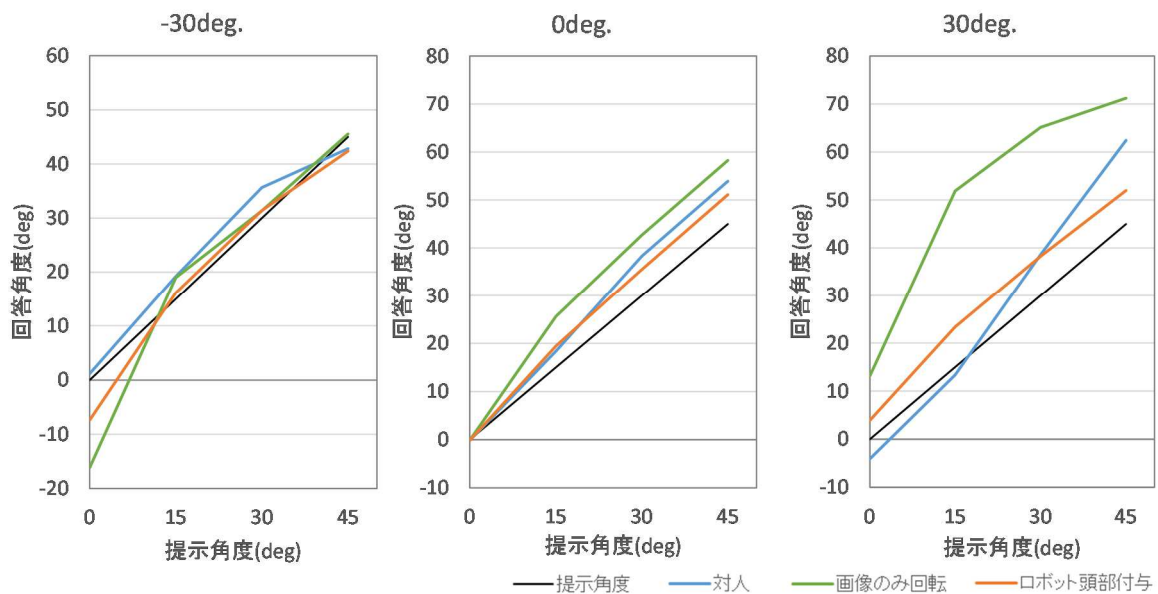


図 7-4 評価位置毎の全回答の平均

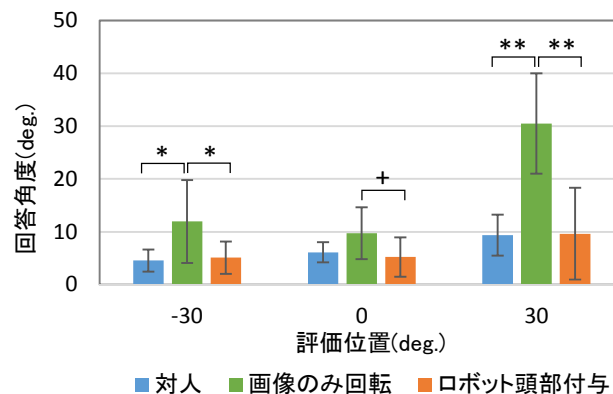


図 7-5 評価位置毎平均絶対誤差の条件間多重比較

7.2.4 考察

図 7-5 のグラフより、画像のみ回転条件では評価位置 -30° と 30° において対人条件よりも平均絶対誤差が大きくなる傾向が見られたことから、画像のみ回転条件ではシステムを斜めから見た場合に対人条件よりも視線の伝達精度が低下することが示された。特に、評価位置 30° において誤差が著しく大きくなるという精度のばらつきがみられ、6.4.2 項で指摘した通り見る角度によって知覚される注視方向が変化し一意に定まらないという課題が示された。これに対して、画像のみ回転条件にヒューマノイドロボットの頭部を付与したロボット頭部付与条件では、全ての評価位置で画像のみ回転条件よりも誤差が小さく、対面条件とほぼ等しい結果が得られた。

これらの結果より、通常のビデオ通話映像に、物理的なインジケータとしてヒューマノイドロボットの頭部を付与し方向を提示することにより、複数の方向からシステムを見る場合に見る角度に応じて知覚される注視方向が変化し一意に定まらないという課題が改善されることが示された。

なお、今回の実験ではテレプレゼンスロボットを想定したディスプレイを回転させる条件の検証は行っていないが、画像のみ回転条件の結果よりディスプレイを見る角度による伝達精度のばらつきが示されていること、また第 6 章の結果よりディスプレイを回転させた場合さらなる過大評価が発生することから、ディスプレイを回転させる手法は注視方向の提示には不適切であると考えられる。

7.3 実験Ⅱ：対話実験

物理的なインジケータとしてヒューマノイドロボットの頭部を付与する手法が実際の対話状況でどのような効果を持つかを検証するため、実際にシステムを用いて三項関係の場で遠隔対話を行う評価実験を実施した。既存手法と提案手法の比較を行うことを目的として、実験条件は固定ディスプレイ条件、回転ディスプレイ条件、ロボット頭部付与条件の3条件とした（詳細は7.3.2項参照）。評価に当たっては、質問紙を用いた印象評価とアイトラッカーを用いた被験者の視線方向分析を行った。これにより、視線提示からの相互注視および共同注意という行為の連鎖が誘起されたかを確認することにより、提案手法が基盤化に与える効果を検証する。

7.3.1 実験方法

実験では、遠隔参加者と現地側参加者で現地側のボードに貼られた2枚の写真についての対話を行うタスクを実施した。構築した実験システムの構成を図7-6に、実際の実験環境を図7-7に示す。システムは現地側のロボットと遠隔地側の操作インタフェースから構成され、skypeを用いたビデオ通話とインジケータによる方向提示を行う。タスク中、遠隔参加者は頭部に三軸加速度・三軸ジャイロセンサモジュールを搭載したヘッドセットを装着し、頭部角度（Pan）を取得する。現地側システムのインジケータは取得された遠隔参加者の頭部方向に連動して視線の提示を行う。遠隔参加者側の映像提示には大型のディスプレイ（40インチ）を用い、映像中の特定の場所を見るために自然な頭部の回転が誘起されるようにした。なお、第6章の予備実験より、特定の方向を見る際の分担比は約50%であったことから、インジケータの操作に当たっては取得された遠隔参加者頭部の実角度を2倍した角度を用いた。また、現地側のインジケータの方向を遠隔参加者にフィードバックするため、ディスプレイ中の映像にインジケータの現在角度を示す赤枠を表示した。

タスクでは、始めに遠隔参加者が現地側のボードに貼られた2枚の資料についての説明を行う（説明フェーズ）。その後、現地側の対話者は説明された2枚の資料のうち、どちらが良いと感じたかについて遠隔参加者に意見を伝える（回答フェーズ）。このようなタスク構成を採用しタスク中に話し手と聞き手の役割を交替させることで、それぞれの役割における提案システムの効果を検証することが出来る。

なお、本実験においては遠隔参加者を実験協力者とし、タスク中は事前に定めた発話および動作の指針に沿って会話を進めるよう指示した。これは、双方に被験者を配置した場合発話の内容や動作にバラつきが生じ、各条件間で統制がとった比較が困難になることが懸念されるためである。実際の発話内容と動作指針の例を表7-1に示す。なお、タスク中の動作指針は、行為の連鎖に関連する社会学的知見に基づき決定を行った[20]。

タスク中は、アイトラッカー（tobii pro glasses 2）を用いて被験者の注視方向の記録を行った。また、各条件の終了時に質問紙を用いた印象評価を行った。

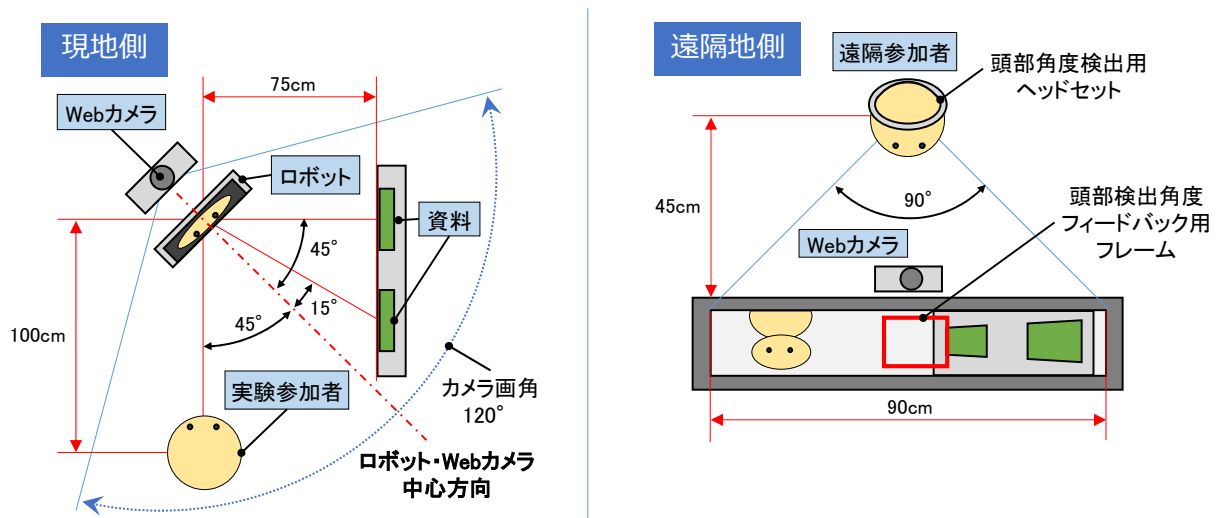


図 7-6 実験システムの構成

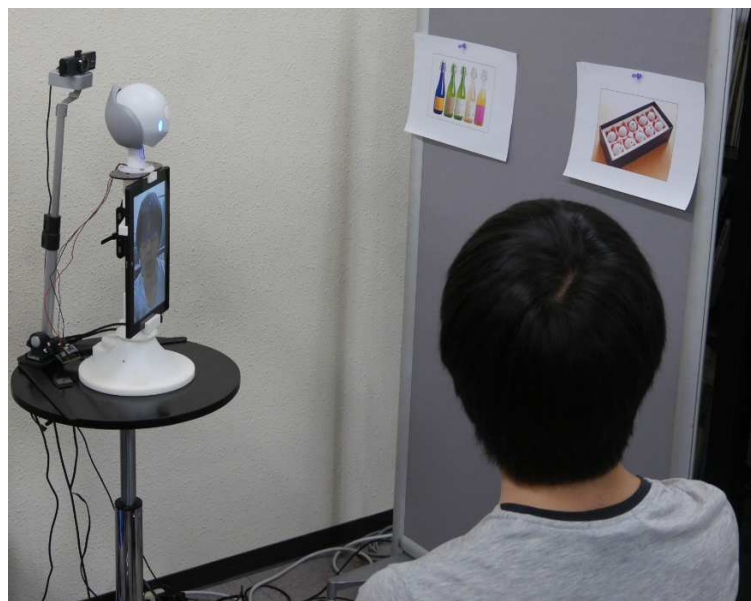


図 7-7 実験環境の外観

7.3.2 実験条件

本実験では、既存手法と提案手法の比較を行うことを目的として、以下の3条件で比較を行った。各条件の外観を図7-8に示す。

C1. 固定ディスプレイ条件 (Fixed Display) :

7.1.2項で説明した提案システムからロボットの頭部を外して用いる。ディスプレイの回転機構は用いず、遠隔参加者が現地側の特定の方向へ注視を向ける動作は、ディスプレイ中の映像として提示される。システムの中心方向は現地側参加者と2枚の資料から構成される実験環境の中央に固定する(図7-6参照)。本条件はskype等の通常のビデオ通話を想定した条件である。

C2. 回転ディスプレイ条件 (Turn Display) :

7.1.2項で説明した提案システムからロボットの頭部を外した状態で、ディスプレイの回転をインジケータとして用いる。遠隔参加者が現地側の特定の方向へ注視を向ける動作は、ディスプレイ中の映像とディスプレイの回転により提示される。ビデオ通話条件と同様にシステムの中心方向は現地側参加者と2枚の資料から構成される実験環境の中央とし、そこを原点としてディスプレイを回転させる。本条件はSirkinらが実験で用いた頭部連動型のディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットを想定した条件である。

C3. ロボット頭部付与条件 (Robot Head) :

7.1.2項で説明した提案システムを用いて、ヒューマノイドロボットの頭部をインジケータとして用いる。遠隔参加者が現地側の特定の方向へ注視を向ける動作は、ディスプレイ中の映像とロボット頭部の回転により提示される。他の条件と同様にシステムの中心方向は現地側参加者と2枚の資料から構成される実験環境の中央とし、そこにディスプレイを固定した状態でロボット頭部を回転させる。

実験は被験者内配置の実験計画とし、各被験者は3条件を実施し全体の所要時間は30分程度であった。なお、順序効果を考慮し、各被験者の条件順序はランダム化した。被験者は正常な視力を有する大学生、大学院生の12名(全て男性)で、平均年齢は21.4歳であった。

なお本実験においては、テレプレゼンスロボットを想定し第6章の実験で用いた条件のうち、ディスプレイのみ回転条件を除外した。これは、この条件で想定するインタフェースではマウス操作やキー入力等の意図的な操作が必要となることから、遠隔操作者の頭部と連動する他の条件と動作指針を統一することが不適切であると考えたためである。また、第6章の結果より、モナリザ効果が発生することで注視方向の伝達には不適切であると考えられる。



図 7-8 各注視方向における各条件の外観

7.3.3 評価項目

質問紙を用いた印象評価

各条件における対話の印象を評価するため、以下の 31 項目からなる質問紙を用いた印象評価を行った (表 7-2)。各質問項目はそれぞれ、視線の判別性 (Gaze: Q1~Q5)、対面している感覚 (Face to Face: Q6~Q11)、同じ場所にいる感覚 (Co-presence: Q12・Q13)、直接性 (Immediacy: Q14~Q17)、影響度 (Affect: Q18~Q22)、親密度 (Similarity/Depth: Q23~Q27)、受け手性 (Receptivity /Trust: Q28~Q31) についての質問項目であり、各質問について 7 段階のリッカートスケールを用いて回答を取得した。これらの質問項目のうち、Q1~Q5 (視線の判別性) は行為の連鎖の知見に基づき本研究で独自に設定したものである。Q6~Q13 (対面している感覚, 同じ場所にいる感覚) は Garau らの研究の中で CG エージェント越しの遠隔対話で相手の印象を評価するために用いられた項目である [51]。Q14~Q31 (直接性, 影響度, 親密度, 受け手性) は対人コミュニケーションにおいて相手の印象を評価するために作成された項目 [52] であり、テレプレゼンスロボットの評価においても用いられている項目である [30]。

表 7-2 質問項目

No		
1	視線判別性	対話相手の見ている方向の変化に気付いた
2		対話相手が自分の方を見ている時、それが容易に分かった
3		対話相手が自分の方を見ている時、目があるように感じた
4		対話相手が写真の方を見ている時、どちらをみているか容易に分かった
5		自分が写真を見ている時、対話相手も同じ方向を見ているように感じた
6	対面している感覚	対話相手が私の話を聞いているかどうか容易に分かった
7		好きなタイミングで会話をコントロールすることが出来た
8		会話に貢献することは簡単だった
9		会話は非常にインタラクティブであるように感じた
10		頻繁に不適切な中断があった
11		システムを使った会話は通常の会話と同じように感じられた
12	同じ場所にいる感覚	対話相手と直接会って話しているように感じた
13		対話相手の存在を意識した
14	直接性	対話相手は会話に熱心に参加していた
15		対話相手は会話が刺激的であると感じていた
16		対話相手は私と熱心に話していた
17		対話相手は退屈そうであった
18	影響度	対話相手は私に対して、「温かく」というよりは、「冷たく」接した
19		対話相手は私との会話に興味をもっていた。
20		対話相手は私とより深く関わることを望んでいなかった
21		対話相手は私に魅力を感じていなかった
22		対話相手は私と距離を置いていた。
23	親密度	対話相手は私たちが良い友人同士であるように振る舞った
24		対話相手はもっと会話することを望んでいるように見えた
25		対話相手はとても友好的に振る舞った
26		対話相手は会話の内容をより深めようとした
27		対話相手には、私に似ていると感じさせるものがあった
28	受け手性	対話相手はとても正直に話をしていた
29		対話相手は喜んで私の話を聞いていた
30		対話相手は誠実だった
31		対話相手は私の考えを受け入れていた

視線方向の分析

アイトラッカーを用いて取得した被験者の視線方向の分析データより、説明フェーズにおける一枚目の資料への注意誘導達成時間と相互注視達成率、および回答フェーズにおいて被験者がシステムを見ていた割合の評価を行った。

まず一枚目の資料への注意誘導達成時間は共同注意達成に関わる評価項目であり、システムの注視方向伝達精度が高いほど注意誘導達成時間が短くなると考えられる。評価に当たっては、説明フェーズにおいて遠隔対話者がシステムを用いて一枚目の資料に注視を向けた後、被験者が説明対象を見て共同注意が達成されるまでの時間を計測した。計測はシステムの注視動作が完了した時点を開始時点とし、アイトラッカーの計測結果より被験者の視線が説明対象の領域に入った時点を終了時点とした。ただし、被験者が説明対象を特定できていないと判断される場合（2枚の資料を見比べている場合等）は説明対象の領域に入ったとしても注意誘導が達成されたとは判断せず、対象の資料に視線を固定した時点を終了時点とした。また、まれに注視を向ける前から被験者が説明対象を見ている場合もあったが、そのような場合においても被験者はシステムの注視動作に気付き、システムの方を見て注視方向を確認し説明対象に視線を向ける動作を行ったため、システム確認後説明対象に視線を向けるまでの時間を注意達成時間とした。

説明フェーズにおける相互注視達成率については、説明フェーズの各文末において遠隔対話者がシステムを介して被験者の方へ視線を向けた場合に、被験者もシステムの方に視線を向け相互注視が達成されたかを評価した。2.4節で述べたように相互注視を含む視線のやり取りは話し手と聞き手が共同行為として会話を進行していく上で重要な役割を果たす。本評価項目は、システムが話し手としての注視伝達に与える影響を評価するための項目である。本研究では、提案手法により注視方向の伝達が改善し遠隔対話者からの視線がより明確に伝わる場合、受理の合図としての被験者の視線にも影響を与え、相互注視の達成率が変化すると考えた。

これに対して、回答フェーズにおいて被験者がシステムを見ていた割合は、システムが聞き手としての注視伝達に与える影響を評価するための項目である。本研究では、提案手法により注視方向の伝達が改善し遠隔参加者の聞き手としての受理がより明確に伝わる場合、被験者の話し手としての視線の提示に影響を与え、システムを見ていた割合が変化すると考えた。分析に当たっては、タスクにおける回答フェーズの所要時間のうち、被験者がシステムの方を見ていた時間の割合を評価した。

7.3.4 実験結果

質問紙を用いた印象評価

統計的な解析に当たり、視線の判別性に関する Q1~Q5 については個別の質問項目がそれぞれ、視線のウェアネス、相互注視の判別性および印象、共同注意の判別性および印象に対応しているため、各質問項目について一要因の分散分析を行った。Q6~Q31 については、参考にした先行研究に基づき、それぞれのカテゴリ（対面している感覚等）内の全回答を平均して算出したカテゴリ評価値について一要因の分散分析を行った。各質問項目およびカテゴリ評価値の結果を図 7-9・図 7-10 に示す。

まず視線の判別性に関する項目については、Q1, Q2, Q4, Q5 において、固定ディスプレイ条件と回転ディスプレイ条件・ロボット頭部付与条件の間に有意差が見られた ($p < 0.01$)。Q3 においては固定ディスプレイ条件とロボット頭部付与条件の間に有意差 ($p < 0.01$)、回転ディスプレイ条件とロボット頭部付与条件の間に有意傾向が見られた ($p < 0.1$)。

カテゴリ値については、対面している感覚において固定ディスプレイ条件とロボット頭部付与条件の間に有意差がみられた ($p < 0.01$)。同じ場所にいる感覚においては、ロボット頭部付与条件と固定ディスプレイ条件・回転ディスプレイ条件の間に有意差が見られた ($p < 0.01$, $p < 0.05$)。また親密度においては、固定ディスプレイ条件とロボット頭部付与条件の間に有意傾向が見られた ($p < 0.1$)。

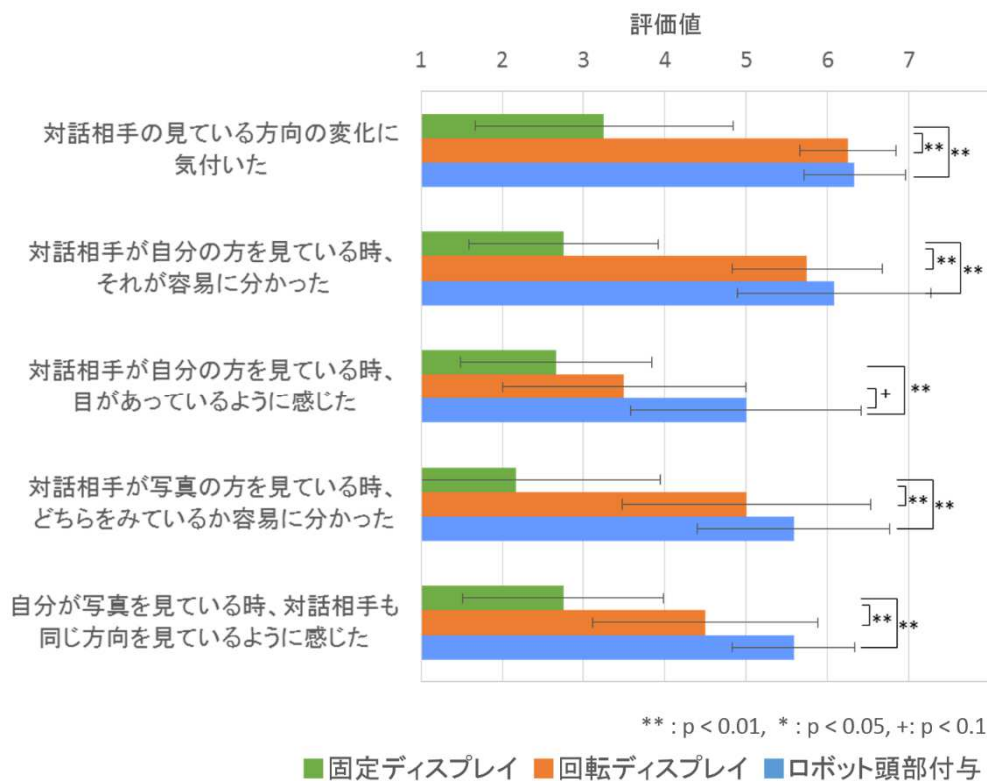


図 7-9 視線判別性に関する各質問の平均評価値

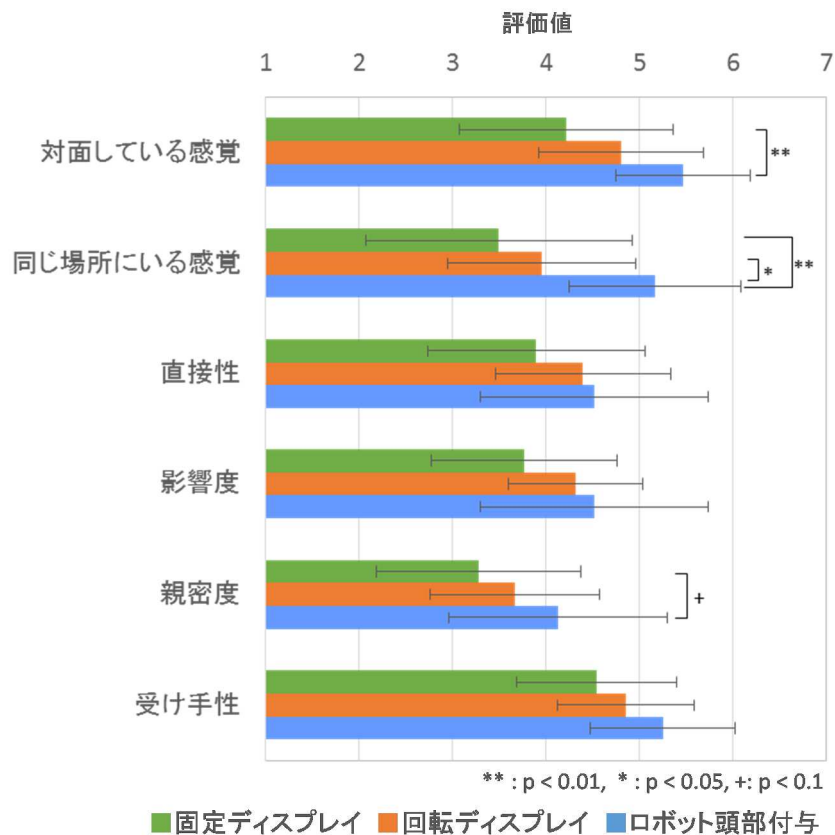


図 7-10 各カテゴリの平均評価値

視線方向の分析

まず、説明フェーズにおける注意誘導達成時間の評価結果を図 7-11 に示す。各条件間の達成時間の差を分析するため一元配置の分散分析を実施した結果、有意差がみられた ($p < 0.01$)。下位検定として多重比較を行った結果、回転ディスプレイ条件およびロボット頭部付与条件では固定ディスプレイ条件よりも注意誘導達成時間が有意に短くなることが示された ($p < 0.05$)。説明フェーズにおける各条件の相互注視達成率を

表 7-3 に示す。各条件間の比率の差を分析するため χ^2 乗検定を実施した結果、有意差がみられた ($\chi^2 = 27.053$, $df = 2$, $p < 0.01$)。下位検定として残差分析を行った結果、固定ディスプレイ条件では相互注視達成率が有意に低く ($p < 0.01$)、ロボット頭部付与条件では相互注視達成率が有意に高くなることが示された ($p < 0.01$)。

回答フェーズにおいて被験者がシステムを見ていた時間の割合を図 7-12 に示す。各条件間の割合の差を分析するため、1 要因の分散分析を実施したところ有意差は見られなかった。

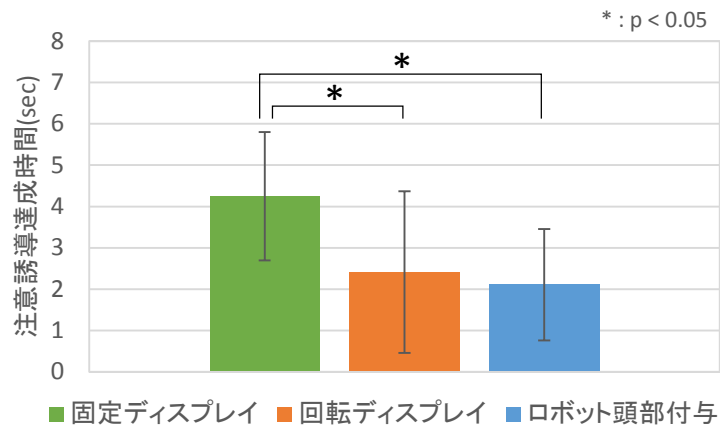


図 7-11 説明フェーズにおける注意誘導達成時間

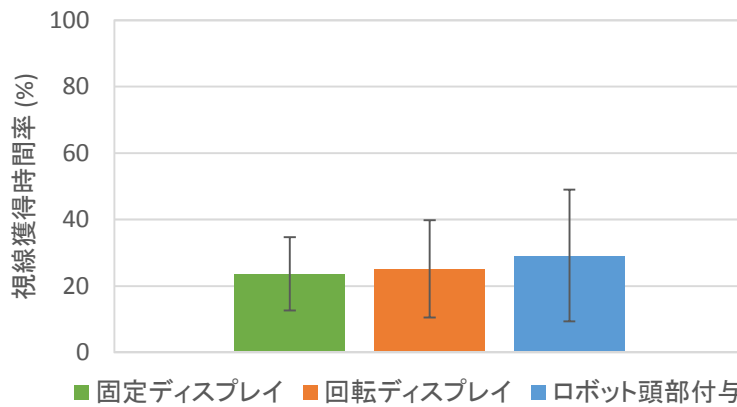


図 7-12 回答フェーズにおけるシステムの視線獲得時間率

表 7-3 説明フェーズにおける相互注視達成率についての χ^2 乗検定と残差分析

X 二乗検定の結果					残差分析の結果			
	固定ディスプレイ	回転ディスプレイ	ロボット頭部付与	合計	固定ディスプレイ	回転ディスプレイ	ロボット頭部付与	
成功	14	33	40	87	-5.04**	1.46	3.66**	
失敗	50	27	20	97	5.04**	-1.46	-3.66**	
合計	64	60	60	184				** : p < 0.01

$\chi^2(2) = 27.053, p < 0.01$

7.3.5 考察

印象評価の結果と視線方向の分析結果より、本実験におけるロボットの頭部を用いた注視方向伝達手法の効果について考察する。

相互注視に関わる印象評価の結果 (Q3) より、提案手法であるロボット頭部付与条件ではビデオ通話条件やディスプレイ回転条件よりも「目が合っている」感覚が強く伝達されることが示された。また、印象評価の項目のうち、対面している感覚および同じ場所にいる感覚においても、同様にロボット頭部付与条件の評価がビデオ通話条件やディスプレイ回転条件よりも高くなることが示された。ここで目が合っている感覚と、対面している感覚および同じ場所にいる感覚との関連を調べるために相関分析を行った。相関分析の結果より、目が合っている感覚と対面している感覚の間 ($r=0.586, p<0.01$)、および目が合っている感覚と同じ場所にいる感覚の間 ($r=0.502, p<0.01$) の両方で正の相関がみられた。この結果より、目が合っている感覚の改善が対面している感覚および同じ場所にいる感覚の向上に影響を与えたと考えることが出来る。これらの結果と関連して、視線方向の分析結果よりロボット頭部付与条件では説明フェーズにおける相互注視の達成率が有意に高くなることが示された。すなわち、目が合っている感覚や対面している感覚および同じ場所にいる感覚の向上により、遠隔対話者が被験者を見た際に視線を向け返すという行為の連鎖が誘起されたと考えられる。

一方で、目が合っている感覚以外の視線に関わる印象評価項目 (Q1, Q2, Q3, Q4) では、ロボット頭部付与条件だけでなくディスプレイ回転条件においてもビデオ通話条件より評価が高くなることが示された。また、共同注意達成に関わる注意誘導達成時間についても、同様にロボット頭部付与条件およびディスプレイ回転条件でビデオ通話条件よりも達成時間が短くなることが示された。これらの結果より、ロボット頭部付与条件とディスプレイ回転条件はいずれも注視伝達のアウェアネスを向上させる効果があり、三項関係において対象物への注視を提示する上で有効であると考えられる。

ただし、7.2 節の注視方向伝達精度の評価より、ディスプレイ上の顔画像により注視方向を伝達する場合には、見る角度によって知覚される注視方向が変化することから、異なる配置で対話を行う場合には対象物への注視の伝達精度が低下することが懸念される。また、同様の理由により、複数人の参加者を想定する状況では全ての参加者に正しく注視方向を伝達することは困難となる。

7.4 ロボット頭部付与の効果の考察

視線の伝達精度評価の結果と対話実験の結果より、提案手法であるロボットの頭部を用いた注視方向伝達手法の効果について考察する。7章では2つの実験により、以下の結果が示された。

- ・ ロボット頭部付与条件では、複数の方向からシステムを見る場合に見る角度に応じて知覚される注視方向が変化し一意に定まらないという課題が改善される
- ・ ロボット頭部付与条件では、目が合っている感覚・対面している感覚・同じ場所にいる感覚が向上し、遠隔対話者が被験者を見た際に視線を向け返すという行為の連鎖（相互注視）が誘起される。
- ・ ロボット頭部付与条件とディスプレイ回転条件はいずれも注視伝達のアウェアネスを向上させる効果があり、三項関係において対象物への注視を提示する上で有効である。

本研究で得られた結果のうち、ディスプレイ回転条件に関する結果は Sirkin らの研究[15]で得られた知見と共通点を持つ。すなわち、ディスプレイの回転は注視方向を提示するのにある程度有効であるが、同じ場所にいる感覚の向上や相互注視の達成にはつながらない。Sirkin らは、このような結果の原因として、平坦なディスプレイの回転による注視方向の提示は、人間の頭や体に比べて、指向性があいまいであることを指摘した。そしてこれらの視線の課題は Biehl らの研究[16]で見られたような遠隔参加者の参与率の低下に影響を及ぼしていると考えられる。これに対して本研究で提案したヒューマノイドロボットの頭部を付与する手法では、目的とした注視伝達に関する課題の解決と、各種印象（目が合っている感覚、対面している感覚、同じ場所にいる感覚）を向上させる効果が示された。また、提案手法はタスク中の被験者の行動にも影響を与え、遠隔対話者が被験者を見た際に視線を向け返すという行為の連鎖（相互注視）が誘起されることが示された。これらの結果より、本研究で提案したヒューマノイドロボットの頭部を付与する手法により、提示された遠隔参加者の視線が信号として適切に認識され基盤化が達成されたと考えられる。

提案手法により基盤化が促進されることにより、従来のディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットにおける参与の課題を改善させる効果が期待される。ただし、本実験は実験協力者を対象とした限定的な対話状況での検証であり、会話への参与に与える効果の検証は行っていないため、今後は実際の会話状況を想定した自由対話状況において提案手法の効果検証を行っていく。

7.5 まとめ

本章では，第 6 章において示された既存のディスプレイ回転型ロボットにおける注視伝達の課題を解決するため，物理的なインジケータとしてヒューマノイドロボットの頭部を付与したテレプレゼンスロボットの提案を行った．提案手法の効果を検証するため，第 6 章の内容を踏襲した注視方向伝達精度の評価実験（実験Ⅰ）と，実際の対話状況における影響を検証するための対話実験（実験Ⅱ）を実施した．2つの実験で得られた結果より，提案手法により注視伝達の課題が改善され，各種印象（目が合っている感覚や対面している感覚・同じ場所にいる感覚）が向上することが示された．また，遠隔対話者が被験者を見た際に視線を向け返すという行為の連鎖が誘起されることが示された．これらの結果より，提案手法はディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットで発生していた注視伝達の課題を改善し，これにより提示された視線が信号として適切に認識され基盤化が達成されることが示された．

このような提案手法の効果は従来のディスプレイ回転型テレプレゼンスロボットにおける参与の課題を解決するために有効であると考えられる．そこで今後は実際の会話を想定した自由対話状況における提案手法の効果検証を行っていく．

第8章 行為の連鎖を考慮した設計の有効性に関する考察

本章では、本論文における各研究事例に基づき、行為の連鎖を考慮した設計の有効性について考察する。

8.1 本研究における取り組みと得られた成果

本研究では、始めに Schegloff により提唱された行為の連鎖 (Sequence) の概念に基づき、行為の連鎖に関連する概念である共同行為の階層性や基盤化、注意獲得のための方策についてまとめ、それらが行為の連鎖において相互にどのように関連しているかを整理した行為の連鎖・階層モデルを示した (図 8-1)。行為の連鎖・階層モデルに当てはめて考えることにより、ある行為 (指さし等) について考える際に、目的の達成に必要なプロセスを把握することが可能となる。これにより何らかの課題が発生した場合にはプロセスのどの部分で課題が発生しているかを把握することができ、課題が発生している部分に焦点を当てた検証と対策を行うことが可能となる。

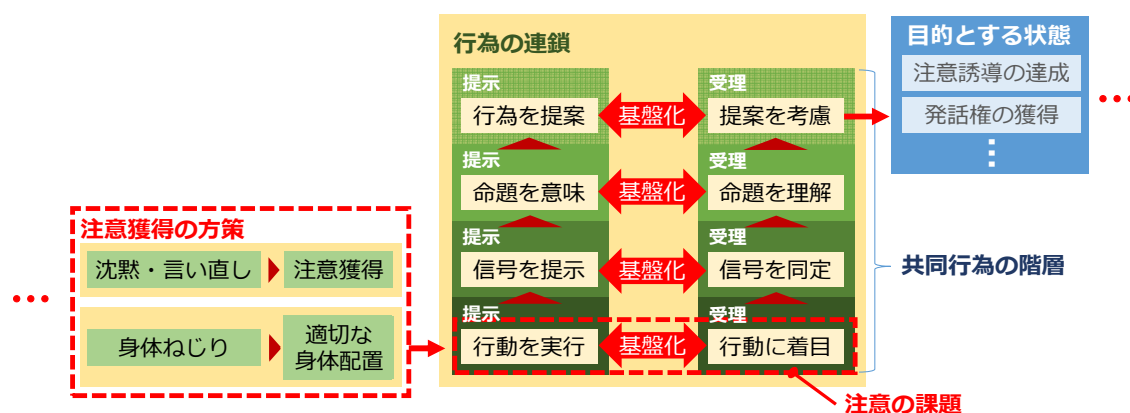


図 8-1 行為の連鎖・階層モデル (再掲)

まず、第 4 章・第 5 章で扱った鑑賞支援ロボットにおいては、ロボットが指さし等の非言語的表現を用いて対象物への注意誘導を行った際、動作に気付かれず注意誘導が達成されない場合があった[14]。行為の連鎖・階層モデルを考慮すれば、これは指さしという行為が目的を達成する上で必要となる鑑賞者の注意獲得が達成されていなかったことによる。このような注意の課題 (attention problem) は人間同士のコミュニケーションにおいても発生することが知られており、その対策として様々な方策が用いられる。本研究では、人間同士のコミュニケーションにおいて用いられる方策 (沈黙・言い直し, 身体ねじり) をコミュニケーションロボットに適用しその効果の検証を行った。そしてそれらの行為がコミュニケーションロボットにおいても有効であり、注意獲得につながる行為の連鎖を誘起することが示された。

次に、第6章・第7章で扱ったテレプレゼンスロボットに関しては、先行研究において、ディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットを用いることで三項関係の場において代名詞を用いたインタラクションが可能になる等の一定の効果が示されたものの、遠隔参加者の存在感や参与が向上しないという課題が示されていた。行為の連鎖・階層モデルに当てはめて考えると、ディスプレイの回転による注視方向の提示はディスプレイの回転という行動に対する着目を得ることは出来ているものの、人間の身体動作に比べて指向性がいまいで方向が伝わらないことにより、視線が意図を持った信号として認識されていなかったと考えられる。このような課題に対して、本研究では、基盤化の達成に関わる注視方向伝達の課題を解決することを目的とし、ヒューマノイドロボットの頭部を付与したテレプレゼンスロボットの提案を行った。また目的に対する提案手法の効果を定量的に評価するため、基盤化の証拠となる相互注視と共同注意に着目し、既存手法との比較評価を行った。評価結果より、提案手法により注視方向の伝達精度が向上し、目が合っている感覚や同じ場所にいる感覚等の印象が改善すること、さらに基盤化の証拠となる相互注視の達成という行為の連鎖が誘起されることが示された。

これらの結果より、本研究で提案する行為の連鎖を考慮した設計の効果をまとめると、以下の3点が挙げられる。

- (1) ある行為によって目的を達成しようとする場合に、単独の行為に着目するだけでなく行為の連鎖・階層モデルに基づいて考察することで目的達成に至るプロセスを把握でき、課題の原因がモデルのどの部分にあるのかを同定することが出来る。
- (2) 課題の原因（行為の連鎖・階層モデルにおける問題の発生箇所）が同定されることで対策が立てやすくなるとともに、対策によりどのような行為の連鎖が誘起されれば良いかが分かるため、誘起されるべき対話者の特定の行動を計測することで効果検証が可能となる。
- (3) 目的を達成するために必要な具体的な行為の考察においては、行為の連鎖に関わる社会的な知見や、人間同士のコミュニケーションの観察・分析結果が適用できるため、人間が用いる自然で非明示的な方策の候補を得ることが出来る。

鑑賞支援ロボットにおいては、注意誘導が達成されないという課題を行為の連鎖・階層モデルに当てはめて考えることによって、その原因が注意の課題であることが同定された(1)。そして課題に対する対策として、注意の課題に対して人間が用いる方策（沈黙・言い直し、身体ねじり）を用いる設計指針を得ることができ、用いた方策により誘起される対話者の行為（視線の移動、身体配置の調整）に着目して分析を行うことにより、その有効性の検証を効率的に行うことが出来た(2)。ここで用いた方策（沈黙・言い直し、身体ねじり）は、従来コミュニケーションロボットでは用いられていなかったものであり、これらの効果が示されたことでより自然で非明示的なインタラクションを実現することが出来た(3)。

ディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットにおいては、参与や存在感の向上が達成されないという課題を行為の連鎖・階層モデルに当てはめて考えることによって、視線が意図を持った信号として正しく認識されないことが課題の原因であることが同定された(1)。そしてその対策として、人間の頭部が持つ物理的なアフォーダンスを再現するためヒューマノ

イドロボットの頭部を付与する手法の提案を行った。効果の検証に当たっては、質問紙による印象評価だけでなく、システムの動作により誘起される視線の移動に着目して分析を行うことにより、その有効性を定量的に評価することが出来た (2)。

8.2 行為の連鎖を考慮した設計指針

本研究で実施した研究事例に基づき、コミュニケーションロボットにおいて課題が発生した場合の設計指針を整理すると、以下の4段階からなる設計が有効であると考えられる。

- (1) 行為の連鎖・階層モデルに当てはめて、ある行為によって目的を達成しようとする場合にどのようなプロセスで目的が達成されるかを把握する。
- (2) 把握した目的の達成に至るプロセスに照らし合わせ、コミュニケーションロボットにおいて発生した課題の原因がどこにあるかを同定する。
- (3) 同定された課題の原因に対して対策を行う。ここで、人間同士のコミュニケーションにおいても同様な課題が発生することが分かっているならば、人間が用いる方策を確認し、対策の方針を決定する。
- (4) 目的の達成に至るプロセスに照らし合わせ、対策によりどのような行為の連鎖が誘起されれば良いかを把握し、誘起されるべき対話者の特定の行動を計測し効果の検証を行う。

(1) については、社会学や心理学等の分野で人間のコミュニケーションを理解するための多くの研究がなされている。そのため、それらの知見に基づいて目的とする状態に至るプロセスを把握することが可能である。また、鑑賞支援などの特定の状況における活用を目的とする場合には、Kunoらの研究事例のように、対象とする状況における人間同士のコミュニケーションを観察することが有効であろう[8]。

(2) については、同じ課題であってもプロセスのどの部分で課題が発生しているかによって全く異なる対策が必要となるため、把握したプロセスと照らし合わせて課題が発生している原因を特定することが重要となる。例えば指さしという行為における課題について考える場合、本研究のように動作自体に気付かれないということもあれば（共同行為の階層のレベル1：行動の実行と着目における課題）、動作自体には気付くものの動作の意図が伝わらず注意誘導が達成されない状況も起こり得る（共同行為の階層のレベル2：信号の提示と同定における課題）。

(3) については、(2) で特定した課題の原因に対して効果のある対策を行うことが重要となる。先の指さしの例であれば、動作自体には気付くものの意図が伝わらないという状況は、ロボットの外観や動作が十分な指向性を有していないことが原因であると考えられ、信号の提示と同定という基盤化が達成されるようロボットのデザインを変更することが必要になる。なお、ここで示したようなロボット自体に課題の原因がある場合以外に、注意の課題のように人間同士のコミュニケーションにおいても同様な課題が発生する場合がある。そのような場合、課題に対して人間が用いる対策を確認し、ロボットにおいても同様な方策を用いることで、より自然で非明示的なインタラクションを実現することが出来る。

(4) については、コミュニケーションロボットによるインタラクションを評価する場合、様々な要因が複雑に影響するため、最終的な出力として目的とする状態が達成されたかを確認するだけでは実施した対策の効果を検証することが難しい。これに対して、目的とする状態が達成されたかだけでなく、対策により誘起されるべき行為の連鎖に着目することで、実施した対策の効果を定量的に評価することが可能となる。

このような行為の連鎖を考慮した設計により、課題の原因を特定し、対策と効果の検証を効率的に行うことができ、また人間の用いる方策を参考にしたより自然で非明示的なインタラクションが実現される。このような設計は本研究で扱った鑑賞支援ロボットやテレプレゼンスロボットだけでなく、他の目的を持ったコミュニケーションロボットにおいても有効であると考えられる。

8.3 本研究の制約と今後の課題

最後に本研究における制約と、それぞれの研究事例の中で示された今後の課題についてまとめる。

提案した設計指針の制約

本研究で示した行為の連鎖を考慮した設計指針(8.2節)は、何らかの課題が発生していることを前提として、その課題の位置の特定・および対策を行うことを前提とした指針となっており、その適用範囲に制約がある。ただし、新規システムの開発や、新たな事例へのコミュニケーションロボットの適用に当たっては、初めから完璧な設計を実現し課題が全く生じない状況はほぼ起こり得ないであろう。そういった観点から、本研究で示した設計指針は様々な事例への適用が可能な知見であると考えられる。

また、(1)の「行為の連鎖・階層モデルに当てはめて、ある行為によって目的を達成しようとする場合にどのようなプロセスで目的が達成されるかを把握する。」という指針は新規システムの開発に当たっても始めに考慮することが有効であると考えられる。そのため、新規システム開発に当たっては、(1)に基づきプロトタイプを作成した後、そこで見つかった課題に対して(2)～(4)のプロセスでシステムの改善を行っていくという形で今回示した設計指針を活用していくことが可能であると考えられる。

・全体を考慮した最適化

本研究を通して得られた結果のうち、鑑賞支援ロボットに関する研究で得られた「沈黙・言い直し」と「身体ねじり」の効果については、それぞれの表現が注意の獲得や適切な身体配置の構築・維持に有効であるという方策自体の有効性は示せたものの、鑑賞支援というタスクの中でどのようなタイミング・頻度で用いれば良いかというタスク全体を考慮した方策の最適化までは行えていない。そのため、今後はそれぞれの方策について、鑑賞者の視線や動作の検出機能を実装した上で、適切な使用のタイミング・頻度の検証を行っていく必要がある。

自由対話状況における効果の検証

本研究で得られた結果のうち、テレプレゼンスロボットに対するヒューマノイドロボット頭の付与については、視線伝達精度の改善とそれに伴う対話者の印象向上・および相互注視の変化が見られたものの、それが実際の会話の中でどのような影響を与えるかの検証までは行えていない。そのため、今後は実際の会話を想定した自由対話状況における提案手法の効果検証を行っていく必要がある。

第9章 結論

本研究では、三項関係の場において用いるコミュニケーションロボットの設計に当たって、人間同士のコミュニケーションにおける「行為の連鎖」という概念に着目した。始めに Schegloff により提唱された行為の連鎖 (Sequence) の概念に基づき、行為の連鎖に関連する概念である共同行為の階層性や基盤化、注意獲得のための方策についてまとめ、それらが行為の連鎖において相互にどのように関連しているかをまとめた。これにより得られた行為の連鎖・階層モデルに基づき、従来研究において課題が示されていた鑑賞支援ロボットとテレプレゼンスロボットを対象とした研究を行った。

鑑賞支援ロボットに関する研究においては、鑑賞者が指さし等の非言語的表現に気付かず、注意誘導が適切に行われないう課題に着目した。行為の連鎖・階層モデルを考慮すれば、人間はこのような課題に対して、目的の行為を行う前の段階で何らかの方策を用いて聞き手の注意を獲得した上でその後の行為を実行する。本研究では、人間が用いる注意獲得に関わる方策として、「沈黙・言い直し (restart and pause)」という方策と、「F 陣形 (F formation)」および「身体ねじり (body torque)」という概念に着目し、それらをコミュニケーションロボットが用いる場合の効果の検証を行った。実験結果から、「沈黙・言い直し」により鑑賞者の注意が獲得されること、「身体ねじり」により鑑賞者の立ち位置を維持した状態で F 陣形の再構築が行われることが示され、これらの行為がコミュニケーションロボットにおいても有効であり、注意獲得につながる行為の連鎖を誘起することが示された。

テレプレゼンスロボットに関する研究では、ディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットを用いる場合に、目的とした遠隔参加者の存在感や参与が達成されないという課題に着目した。行為の連鎖・階層モデルを考慮すれば、これは注視方向がうまく伝わらないことで、話し手と聞き手の間での基盤化が成立しなかったことが原因であると考えられる。そこで本研究では、基盤化の達成に関わる注視方向伝達の課題を解決することを目的とし研究を実施した。具体的な取り組みとして、まず既存のテレプレゼンスロボットで想定される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み合わせにおける注視方向伝達精度の評価を行った。評価の結果、モナリザ効果やディスプレイ回転効果などの複数の要因により、いずれの条件においても注視方向の誤認が生じること、またディスプレイを複数方向から見た場合、見る角度に応じて知覚される注視方向が変化し、一意に方向を示すことが出来ないことが示された。このような課題に対して、本研究ではヒューマノイドロボットの頭部を付与したテレプレゼンスロボットの提案を行った。評価結果より、提案手法により注視方向の伝達精度が向上し、目が合っている感覚や同じ場所にいる感覚等の印象が改善すること、さらに基盤化の証拠となる相互注視の達成という行為の連鎖が誘起されることが示された。

上記の研究事例より、本研究で実施した行為の連鎖を考慮した設計の有効性として、以下の三点を示した。

- (1) ある行為によって目的を達成しようとする場合に、単独の行為に着目するだけでなく行為の連鎖・階層モデルに基づいて考察することで目的達成に至るプロセスを把握でき、課題の原因がモデルのどの部分にあるのかを同定することが出来る。
- (2) 課題の原因（行為の連鎖・階層モデルにおける問題の発生箇所）が同定されることで対策が立てやすくなるとともに、対策によりどのような行為の連鎖が誘起されれば良いかが分かるため、誘起されるべき対話者の特定の行動を計測することで効果検証が可能となる。
- (3) 目的を達成するために必要な具体的な行為の考察においては、行為の連鎖に関わる社会的な知見や、人間同士のコミュニケーションの観察・分析結果が適用できるため、人間が用いる自然で非明示的な方策の候補を得ることが出来る。

また、本研究で実施した研究事例に基づいて、コミュニケーションロボットにおいて課題が発生した場合の設計手法を整理し、以下の4段階からなる設計手法を示した。

- (1) 行為の連鎖・階層モデルに当てはめて、ある行為によって目的を達成しようとする場合にどのようなプロセスで目的が達成されるかを把握する。
- (2) 把握した目的の達成に至るプロセスに照らし合わせ、コミュニケーションロボットにおいて発生した課題の原因がどこにあるかを同定する。
- (3) 同定された課題の原因に対して対策を行う。ここで、人間同士のコミュニケーションにおいても同様な課題が発生することが分かっているならば、人間が用いる方策を確認し、対策の方針を決定する。
- (4) 目的の達成に至るプロセスに照らし合わせ、対策によりどのような行為の連鎖が誘起されれば良いかを把握し、誘起されるべき対話者の特定の行動を計測し効果の検証を行う。

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導やご助言を頂きました，筑波大学大学院システム情報工学研究科の葛岡英明教授に深く感謝いたします。また，本研究にご助言頂きました，筑波大学大学院システム情報工学研究科の大澤博隆助教，グローバル教育院エンパワーメント情報学プログラムの大槻麻衣助教に深く感謝いたします。そして，実験に参加していただいた皆様，筑波大学大学院システム情報工学研究科グループウェア研究室・ヒューマンエージェントインタラクション研究室の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Vargas, *Louder than words: An introduction to nonverbal communication*. Iowa State Pr, 1986.
- [2] 高梨克也, 基礎から分かる会話コミュニケーションの分析法. ナカニシヤ出版, 2016.
- [3] C. Heath and P. Luff, “Disembodied conduct: communication through video in a multi-media office environment,” in *CHI '91 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1991, pp. 99–103.
- [4] F. Kaplan and V. Hafner, “The challenges of joint attention,” *Interact. Stud.*, vol. 7, no. 2, p. pp.135-169, 2006.
- [5] B. Scassellati, “Investigating models of social development using a humanoid robot,” in *Proceedings of the Neural Networks, 2003.*, 2003, pp. 2704–2709.
- [6] H. Kozima, “Infanoid: A babybot that explores the social environment,” in *Socially Intelligent Agents*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 157–164.
- [7] O. Sugiyama, T. Kanda, M. Imai, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Three-layer model for generation and recognition of attention-drawing behavior,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 5843–5850.
- [8] Y. Kuno, K. Sadazuka, and M. Kawashima, “Museum guide robot based on sociological interaction analysis,” in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 2007, p. pp.1191-1194.
- [9] M. Shiomi, T. Kanda, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Interactive humanoid robots for a science museum,” in *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*, 2006, p. pp.305-312.
- [10] F. Yamaoka, T. Kanda, H. Ishiguro, and N. Hagita, “How close?: model of proximity control for information-presenting robots,” in *Proceedings of the 3rd ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, 2008, p. pp.137-144.
- [11] R. Robotics, “kubi.” [Online]. Available: <https://www.revolverobotics.com/>.
- [12] N. Yankelovich, N. Simpson, and J. Kaplan, “Porta-person: telepresence for the connected conference room,” in *In CHI'07 extended abstracts on Human factors in computing systems*, 2007, pp. 2789–2794.
- [13] H. Kawanobe, Y. Aosaki, and H. Kuzuoka, “iRIS: a remote surrogate for mutual reference,” in *Proceedings of the 8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, 2013, pp. 403–404.
- [14] K. Pitsch and S. Wrede, “When a robot orients visitors to an exhibit. Referential practices and interactional dynamics in real world HRI,” in *2014 RO-MAN: The 23rd IEEE International Symposium on. IEEE*, 2014, p. pp.36-42.
- [15] D. Sirkin, G. Venolia, J. Tang, and G. Robertson, “Motion and attention in a kinetic videoconferencing proxy,” in *Human-Computer interaction- INTERACT2011*, 2011, pp. 162–180.
- [16] J. Biehl, D. Avrahami, and A. Dunnigan, “Not really there: Understanding embodied communication affordances in team perception and participation,” in

- CSCW '15 Proceedings of the 18th ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work & Social Computing*, 2015, pp. 1567–1575.
- [17] E. Schegloff, *Sequence organization in interaction: Volume 1: A primer in conversation analysis*. Cambridge University Press, 2007.
- [18] H. Clark, *Using language*. Cambridge University Press, 1996.
- [19] 石崎雅人伝康晴, 談話と対話. 東京大学出版会, 2001.
- [20] A. Kendon, *Conducting interaction: Patterns of behavior in focused encounters*. Cambridge University Press, 1990.
- [21] G. Nielsen, *Studies in self-confrontation*. Munksgaard, 1964.
- [22] C. Moore and P. Dunham, *Joint attention: Its origins and role in development*. Psychology Press, 2014.
- [23] C. Goodwin, “The Interactive Construction of a Sentence in Natural Conversation,” *Everyday Lang. Stud. Ethnomethodology*, vol. 37, p. pp.97-121, 1979.
- [24] C. Goodwin, *Conversational organization: Interaction between speakers and hearers*. Academic Press, 1981.
- [25] D. McNeill, “Gesture, gaze, and ground,” in *Machine Learning for Multimodal Interaction*, 2006, pp. 1–14.
- [26] E. Schegloff, “Body torque,” *Soc. Res. (New. York) .*, vol. 65, no. 3, pp. 535–596, 1998.
- [27] H. Kuzuoka, K. Pitsch, Y. Suzuki, I. Kawaguchi, K. Yamazaki, A. Yamazaki, Y. Kuno, P. Luff, and C. Heath, “Effect of restarts and pauses on achieving a state of mutual orientation between a human and a robot,” *Proc. ACM 2008 Conf. Comput. Support. Coop. Work - CSCW '08*, p. 201, 2008.
- [28] H. Kuzuoka, Y. Suzuki, J. Yamashita, and K. Yamazaki, “Reconfiguring spatial formation arrangement by robot body orientation,” in *Proceedings of the 5th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, 2010, pp. 285–292.
- [29] S. Adalgeirsson and C. Breazeal, “MeBot: a robotic platform for socially embodied presence,” *Proc. 5th ACM/IEEE ...*, 2010.
- [30] D. Sirkin and W. Ju, “Consistency in physical and on-screen action improves perceptions of telepresence robots,” *HRI '12 Proc. seventh Annu. ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interact.*, p. pp.57-64, 2012.
- [31] 長谷川 孔明 and 中内 靖, “テレプレゼンスロボットによる無意識的身ぶりの表出が発話交替に与える影響,” 日本機械学会論文集, vol. 80, no. 819, p. pp.1-12, 2014.
- [32] T. Yonezawa, H. Yamazoe, and A. Utsumi, “GazeRoboard: Gaze-communicative guide system in daily life on stuffed-toy robot with interactive display board,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008*, 2008, p. pp.1204-1209.
- [33] 株式会社アクエスト, “テキスト音声合成ミドルウェアAquestalk.” [Online]. Available: <http://www.a-quest.com/products/aquestalk.html>.
- [34] C. Goodwin, “Professional vision,” *Am. Anthropol.*, vol. 96.3, p. pp.606-633, 1994.

- [35] H. Ishii, M. Kobayashi, and J. Grudin, "Integration of interpersonal space and shared workspace: ClearBoard design and experiments," *ACM Trans. Inf. Syst.*, vol. 11.4, pp. 349–375, 1993.
- [36] O. Divorra, J. Civit, F. Zuo, and H. Belt, "Towards 3D-aware telepresence: Working on technologies behind the scene," *New Front. Telepresence Work. ACM CSCW*, 2010.
- [37] S. Anstis, J. Mayhew, and T. Morley, "The perception of where a face or television'portrait'is looking," *Am. J. Psychol.*, vol. 82.4, p. pp.474-489, 1969.
- [38] 鉄谷信二森井精啓, 岸野文郎, "眼の CG アニメーションと視線の知覚に関する検討," *電子情報通信学会論文誌 A*, vol. 78.4, p. pp.512-522, 1995.
- [39] 真覚健, 丸山欣哉, 桐田隆博, "他者の視線方向の知覚," in *日本心理学会第 54 回発表論文集*, 1990, p. 513.
- [40] M. Cline, "The perception of where a person is looking," *Am. J. Psychol.*, vol. 80.1, pp. 41–50, 1967.
- [41] J. Gibson and A. Pick, "Perception of another person's looking behavior," *Am. J. Psychol.*, vol. 76.3, p. pp.386-394, 1963.
- [42] 杉江昇, "眼球運動系のシステム解析," *電気試験所研究報告*, vol. 693, pp. 59–75, 1968.
- [43] 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. 75.5, pp. 971–981, 1992.
- [44] 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: Enosphered 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. 4.3, p. pp.479-486, 1999.
- [45] Cisco Systems, "Cisco TelePresence TX9000 シリーズ." [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/ja_jp/products/collaboration-endpoints/telepresence-tx9000-series/index.html.
- [46] R. Robotics, "Double." [Online]. Available: <https://revolverobotics.com>.
- [47] E. T. Hall, *The Hidden Dimension*, 日高 敏隆, 佐藤信行. Doubleday&Company, 1966.
- [48] C. Gale and A. Monk, "Where am I looking? The accuracy of video-mediated gaze awareness," *Attention, Perception, Psychophys.*, vol. 62.3, pp. 586–595, 2000.
- [49] K. Misawa, Y. Ishiguro, and J. Rekimoto, "Livemask: A telepresence surrogate system with a face-shaped screen for supporting nonverbal communication," *Inf. Media Technol.*, vol. 8.2, pp. 617–625, 2013.
- [50] H. Kuzuoka, J. Kosaka, K. Yamazaki, Y. Suga, A. Yamazaki, P. Luff, and C. Heath, "Mediating dual ecologies," in *Proceedings of the 2004 ACM conference on Computer supported cooperative work - CSCW '04*, 2004, pp. 477–486.
- [51] M. Garau, M. Slater, S. Bee, and M. Sasse, "The impact of eye gaze on communication using humanoid avatars," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 2001, pp. 309–316.
- [52] J. P. Dillard, D. H. Solomon, and M. Palmer, "Structuring the concept of relational communication," *Commun. Monogr.*, vol. 66, no. 1, pp. 49–65, 1999.

公表論文リスト

査読付き雑誌論文

- ・ 川口一画, 葛岡英明, 鈴木祐也, 中尾誉, 山下淳, ピッチカローラ, 山崎敬一, 「ロボットの発話途中の沈黙と言い直しによる人の注意誘導」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 14 (3) , 2009, pp.257-263
- ・ 川口一画, 葛岡英明, 鈴木雄介, 「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」, 情報処理学会論文誌, 56 (3) , 2015, pp.1059-1067

査読付き国際会議論文

- ・ Ikkaku Kawaguchi, Hideaki Kuzuoka, and Yusuke Suzuki, “Study on Gaze Direction Perception of Face Image Displayed on Rotatable Flat Display.”, In proc. CHI2015, Seoul, Apr. 2015, pp.1729-1737
- ・ Ikkaku Kawaguchi, Yuki Kodama, Hideaki Kuzuoka, Mai Otsuki, and Yusuke Suzuki, “Effect of Embodiment Presentation by Humanoid Robot on Social Telepresence”, In Proc. HAI2016, Biopolis, October, pp. 253-256

査読付き国内会議論文

- ・ 川口一画, 葛岡英明, 山下淳, 鈴木雄介, 「ロボットによる身体ねじりが対話者の身体配置に与える影響に関する研究」, 情報処理学会インタラクション 2016 予稿集, 東京, 2016 年 3 月, pp.21-28

その他の公表論文

- ・ 川口一画, 葛岡英明, 鈴木雄介, 「テレプレゼンスロボットに表示される顔画像の注視方向知覚に関する研究」, GN Workshop 2014 論文集, 静岡, 2014 年 11 月
- ・ 川口一画, 遠藤優, 大槻麻衣, 葛岡英明, 鈴木雄介, 「遠隔会議における遠隔参加者の参与を支援するテレプレゼンスロボットシステムの開発」, 情報処理学会インタラクション 2016 予稿集, 東京, 2016 年 3 月, pp.739-743 (デモ発表)
- ・ 川口一画, 遠藤優, 葛岡英明 「Next Room: 扉型インタフェースを用いた遠隔コミュニケーション支援システムの提案」, 情報処理学会インタラクション 2016 予稿集, 東京, 2016 年 3 月, pp.744-745 (デモ発表)
- ・ 川口一画, 山中敏正, 「ヒカリツミキ: 光による情報可視化手法を用いたハードウェア学習用モジュール型玩具」, 日本デザイン学会デザイン学研究作品集 (22号採録予定)

受賞

- ・ 2014年11月, GNWS2014 ベストペーパー賞, 情報処理学会 GN 研究会
- ・ 2014年12月 GUGEN2014 (自作ハードウェアコンテスト) グッドアイデア賞, p-ban.com
- ・ 2015年3月, 情報処理学会論文誌 特選論文賞, 情報処理学会
- ・ 2016年3月, 筑波大学大学院システム情報工学研究科 研究科長賞
- ・ 2017年3月, 筑波大学大学院人間総合科学研究科感性認知脳科学専攻 優秀修士論文賞

研究助成金

- ・ 平成27年度 総務省 SCOPE 異能vationプログラム 本採択
- ・ 平成28年度～平成29年度 科学研究費補助金 特別研究員奨励費