

遠隔会議支援ロボットシステムの注意喚起能力評価

鈴木 雄介^{†1} 福島 寛之^{†1}
深澤 伸一^{†1} 竹内 晃一^{†1}

筆者らは遠隔コミュニケーションで失われがちな、参加者の身体による情報表現を、物理的な実体で補完し、コミュニケーションを円滑にする可能性を持つ要素として、ロボット技術に注目して研究開発を行っている。開発中のロボットは撮像のためのパンチルトカメラと、移動のための台車を主な要素として構成されている。ロボット機能のコミュニケーションにおける効果を確認するため、ロボットと同様に空間内で物理的に動作する要素である、通常のパンチルトカメラを比較対象として、基礎的な評価実験を実施した。ロボット動作への反応時間や、反応と同時に実施する音声復唱課題の得点などを計測指標とする実験によって、ロボットの移動機能が、遠隔地間のコミュニケーションのきっかけとなる、参加者への注意喚起能力を向上させる可能性があることを確かめたので報告する。

Can Robot-movement Draw Person's Attention Better Than Pan-tilt Camera Movement?

YUSUKE SUZUKI,^{†1} HIROYUKI FUKUSHIMA,^{†1}
SHIN-ICHI FUKASAWA^{†1} and KOICHI TAKEUCHI^{†1}

We have been developing a teleconference supporting system with robots that represent participants' presence and orientation. In our system participants operate the robot that is mainly composed of a mobile vehicle and a pan-tilt camera. An operator of the robot is able to express a direction of their gaze and an arrangement of body through the robot. The robot provides several functions to support remote collaborations, however the detail of the robot function's effect on remote collaborations was still unclear. To confirm one of the effects, we conducted an experiment focused on robot's ability of grabbing attention that initiates communication between participants. In this paper, we explained our prototype robot system overview and reported the experiment that aimed to confirm our hypothesis that robot's movements provide a better ability of drawing attention from the participants than a conventional pan-tilt camera's movements. In the experiment we measured subjects' response time

for robot's movement and a score of a sound task conducted simultaneously with the response task. The result of experiment supported our hypothesis.

1. はじめに

企業活動のグローバル化などの流れを受けて、企業内の業務活動に関わるコミュニケーションは多様化しており、別拠点の部署や他企業など、物理的に距離が離れている拠点間で、業務上、単純な業務連絡以上の複雑なコミュニケーションを必要とすることも一般的になりつつある。一方で、出張経費の削減や業務効率の向上の必要性から、企業においてネットワークを利用した遠隔会議システムが利用される機会が増加している。

現在、普及している遠隔会議システムは、映像通信と音声通信とを併用した構成が一般的である。しかし、現状のビデオ遠隔会議システムに対しては、以前より問題点が多数指摘されてきた。たとえば、対面した会議では自然に行われている、参加者間での視線を一致させて共同的な注意を向けるという行為が、遠隔会議の状況では、視線が正しく伝達できないことによって達成されなくなること¹⁾、参加者の身体の動きなどによって表現されるジェスチャーの伝達が困難になること²⁾、映像を介して情報を送受信する場合に、コミュニケーションが非対称になること³⁾などの問題が広く知られている。

筆者らが注目している問題は、特に遠隔会議の参加者数が多人数対少人数というように、不均衡である場合に生じるものである。たとえば、本社のチームと地方支社、小規模のベンチャー企業、個人経営のホームオフィスなどと協業する場合が考えられる。このような場合、本社の十数名のグループに対して、数名以下の人々と遠隔会議をするという状況が発生する。類似した状況において、筆者らは、遠隔地の少人数の参加者が、本社の大人数の参加者による会話に参加しにくくなるという問題を経験した。こうした実際にビデオ会議を行う中で経験した問題をきっかけとして、筆者らは会話への参加のしにくさが生じる原因の1つとして遠隔参加者の動作への「注意」の問題に注目している。

本論文では「注意」とは、ある対象に対してその存在や動作に気づくこととする。ビデオ会議における「注意」の問題の一部は、Heathらによって指摘されている。すなわち、ビデオを用いた会議では、通常平面のディスプレイ上に遠隔地の参加者の姿が表示されるが、

^{†1} 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.

遠隔参加者が通常の会議と同様にジェスチャなどの動作を行っているだけでは、映像を見ている側に気づかれず、情報が伝わらない。また、情報が伝わらない状態が続くと、場合によっては遠隔参加者のジェスチャが徐々に大きくなって、注意を引こうとする傾向がある。筆者らの経験によれば、会議の参加人数が不均衡である場合には、参加人数が多い側における会話が活発になったときに、大半の参加者は、少人数の遠隔参加者が表示されているディスプレイに注目しなくなってしまう。このため、ジェスチャなどを通して現れる遠隔参加者の発言意図に気づかなくなり、結果として少人数側が会話に積極的に参加することが難しくなるといった状況が発生する。筆者らは、ビデオ会議において、遠隔参加者に「注意」することが困難になる問題の解決方法として、ロボットを導入することを提案してきた。本論文では、ロボットの移動機能が「注意」の問題に対して効果があるのかを確認するための基礎的実験を行ったので報告する。以下、本論文では、ロボットがその動作を人に気づかせる能力を「注意喚起能力」と定義する。

本論文の目的は、ロボットの移動機能が、遠隔コミュニケーションで用いられるパンチルトカメラの姿勢変更と比較して、

- ロボットと同一空間に存在する会議参加者に対する注意喚起能力が高い
- また、その注意喚起によって会議作業を妨げる副作用が少ない

ことを、実験室内における評価実験結果から示すことである。

本論文では、まず2章で遠隔対話における「注意」に関係する問題を、先行研究と筆者らが実際に体験した事例から説明する。またこの「注意」の問題を、ロボットを利用して解決を試みている先行事例を紹介し、これに基づいて「注意」の問題に対するロボットの効果に関する仮説を提示する。3章では開発中の遠隔会議支援ロボットシステムの機能について述べ、4章で実施した評価実験の内容について詳説する。5章で評価実験の結果についてまとめ、6章で考察を述べる。

2. 遠隔対話における「注意」の問題

2.1 先行研究

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

Heathらはビデオを利用したシステムにおける参加者のジェスチャを観察し、ビデオ会議

利用者によって行われるジェスチャは、相手の「注意」を引くことを目的としたものが多くなること、ジェスチャはディスプレイ上に表示されるので参加者の「注意」を引きにくく、そのため、通常の空間を共有した状況でなされるジェスチャよりも大きく、誇張されたものに变化していく傾向があるが、それでも「注意」を引くことができず多くのジェスチャは伝わらないままであることを報告している。Gaver¹⁾はHeathらの研究を引用して同様の問題について述べ、大型のモニタを導入することでジェスチャに対する気づきやすさを高めることはできるが、モニタの大きさ自体によって生じる圧迫感で、遠隔参加者への心理的距離は逆に大きくなる、と指摘している。また、実際の会議では大型のスクリーンにはプレゼンテーションの資料を提示することが多く、必ずしも大型のスクリーンに遠隔参加者を大きく表示できるとは限らない。

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

たとえばIshiiらは、共有ワークスペースとして作業を行う共有画面上に、遠隔参加者の視線を正しく再現した顔画像と手振りを重畳することができるClearBoard⁴⁾を開発した。この研究でIshiiらは、対話者同士の視線一致や、視線から共有作業空間に対する注意の方向に気づくこと(gaze awareness)の重要性を指摘した。またLuffらはagora⁵⁾というテーブル型の遠隔コミュニケーションシステムについて報告している。agoraでは、共有ワークスペースが表示されたデスクトップに対して垂直に設置されたスクリーンに等身大で遠隔参加者を表示することによって、共有されたデスクトップへのgaze awarenessを支援している。

筆者らは、「注意」の問題を解決するために、ロボットを用いる構成を提案している。この理由の1つとして、遠隔会議の最中に、会議で利用されている遠隔操作可能なパンチルトカメラが、参加者の「注意」に影響する事例が観察されたことがあげられる。パンチルトカメラは、実空間内で物理的な動作をするという点で、ロボットと共通する部分を持つ。次節で、筆者らの体験に基づいた事例を説明する。

2.2 筆者らが体験した事例

筆者らは業務内で遠隔会議を行う機会が多く、実際に会議を行う中で、本論文で指摘した問題を体験している。本節ではそうした例について説明する。筆者らが所属する組織は関東地区(埼玉県)と関西地区(大阪府)に分かれた2拠点があり、メンバ全員で直接対面し

表 1 遠隔会議の状況
Table 1 Situation of Teleconference.

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

て会議や打ち合わせなどのコミュニケーションを行うことは困難であった．そのため遠隔会議を定期的に行う必要があった．行われた会議の状況について表 1 に示す．特筆すべき点は，2 拠点で参加人数が不均衡であったことである．初年度は 11 名対 2 名，後に 16 名対 5 名とそれぞれ増加した．また，会議司会者はつねに関東側に存在していた．こうした状況では，会議の主導権が関東側にあったため，関西側からの参加は受動的なものになりがちであった．その結果，関東側が関西側の挙動，すなわちディスプレイに注意を向ける機会が減少し，ディスプレイに表示された関西側の意図に気づきにくくなった．すると，発言意図に気づかれないので，関西側からの発言がさらに少なくなるといった悪循環が起り，円滑なコミュニケーションが行われなかった例が見られた．同様の事例は先行研究⁶⁾でも報告されている．

実際の会議中に，関東側が関西側の挙動に気づいて，意図を理解するまでに時間を要した例を，図 1 を用いて説明する．この例の場合，関東側参加者は 16 名，関西側の参加者は 5 名であった．図 1 は遠隔会議中に関東側の会議室を撮影したものであり，画面内スクリーン脇のディスプレイに関西側を撮影した映像が表示されている．正面スクリーンは全画面をプレゼンテーションに利用するため，関西側の環境表示には利用できず，また配線の問題からディスプレイの位置を大きく変更することは困難であった．ディスプレイ近傍に，関西側からの操作で動作し，関西側に映像を送信するパンチルトカメラ（表 1）が配置されていた．

映像 a は，関東側で 1 人の話者（画面外）が，プレゼンテーションを行うため座席を変更し，準備を行っている最中の光景である．映像 a 中の関西側ディスプレイの中には，関西側参加者が新規話者に興味を持ち，リモートコントローラに手を伸ばし，カメラ操作の準備を行っている光景が映っているが，関東側でディスプレイ映像中のこの動きに気づいていない様子はない．リモコン取得後 3 秒経過時点（映像 b）から，カメラが動作を始めていることが映像に記録されているが，この時点では関東側ではこの動きに気づいていない．その

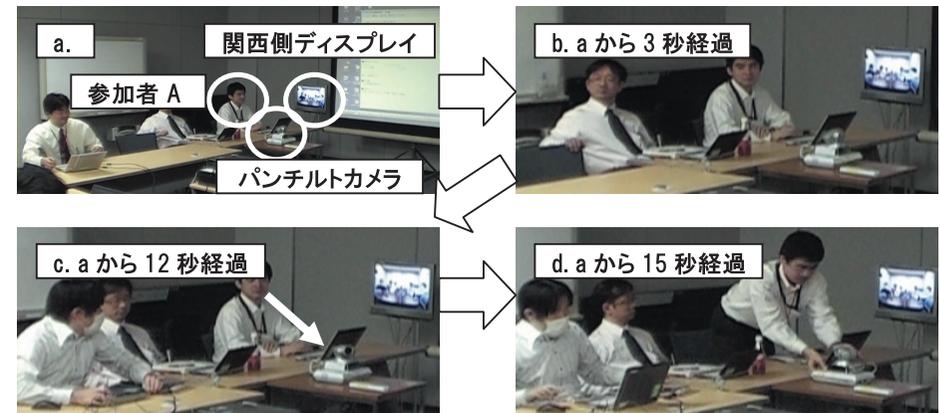


図 1 パンチルトカメラを経由したコミュニケーション
Fig.1 Communication via Pan-tilt camera.

後も関西側参加者は話者の方向にカメラを向けようと，カメラを断続的に動かしているが，関東側参加者はそれに気づかない．カメラが動作しはじめてから約 12 秒程度経過してから（映像 c），関東側の参加者 A が関西側の参加者がカメラを話者に向けようとしていること，カメラが動作範囲の限界に達しておりこれ以上話者の方向に届くことができないことに気づいた．参加者 A の視線の方向を映像 c 中に矢印で示した．最終的に参加者 A はカメラ配置を変更して関西側の問題を解決した（映像 d）．このように，関西側からの会議に参加しようとする意図が，関東側に気づかれず，適切に伝わらないと，関西側が会議に積極的に参加しようという意識を保てず，発言の量も減少することにつながるのである．

この事例は筆者らの研究のきっかけとなる多くの示唆を含んでいた．

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

本例ではカメラの動作開始から 12 秒経過してようやく気がつくといった状況であった．また，同様の問題が発生しながら，注意を喚起できず，数分間援助を得られなかったために，

コミュニケーションが成立しなかった事例も複数存在した。ただし興味深いのは、カメラが動作していることにいったん気がつけば、状況、およびカメラの動作から遠隔操作者の意図を理解することは容易であったということである。この事例は、空間内で動作をする物体は注意喚起および、その後の gaze awareness を支援するが、現状のパンチルトカメラのように固定された場所で回転動作をするだけでは、注意喚起に対する効果は限定的であること、を示唆している。

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

2.3 「注意」の問題解決にロボットを用いた先行研究

gaze awareness や気づきなど、遠隔コミュニケーションにおける共通した問題を解決する1つの方法として、遠隔参加者の身体的情報を代理して表現するロボットを利用するというアプローチが複数提案されている。Kuzuoka らは GestureCam⁷⁾ や GestureMan⁸⁾ を開発している。これらは遠隔地にいる人に対し熟練者が作業指示をしたり、教育を行ったりする用途に使われるロボットである。GestureMan は自由に移動する台車と、遠隔操作者の視線や興味の方角を表現するための、人間の頭や腕を模した要素が一体化され、社会学でいうところの「志向」(どこを向いているか、どこを指しているか)⁹⁾ をロボットの身体によって表現することができる。ロボットと空間を共有する参加者がロボットの身体による表現に自然に気がつき、またロボット操作者の意図を理解することができる。

Paulos らは PRoP¹⁰⁾ とよばれるシステムを開発している。飛行船や移動台車にディスプレイやカメラを搭載し、遠隔コントロール可能な物理的な実体であるロボットを利用する利点について報告している。Jouppi¹¹⁾ も同様の観点から移動車両にディスプレイやカメラを搭載して、コミュニケーションを支援するシステムを開発している。渡辺ら¹²⁾ は身体を持つロボットが頷き・瞬きや身振りなど身体全体で反応することで、対話者が円滑に話せるようになることを示している。

このように、遠隔コミュニケーションで生じる問題をロボット技術で解決しようとする研究は多く行われており、また一定の効果をあげている。そこで筆者らも遠隔参加者の存在

感、発言意図、どれ、あるいはどこに興味を持って注目しているかということに対する気づきを支援するための要素としてロボットを採用することとした。先に紹介した実際の筆者らの体験事例でも、カメラの動作から遠隔地の参加者の意図に気がついていることから、一定の効果は期待できるであろう。コミュニケーションを支援するロボットは多数の機能を持ち、通常のビデオ会議で生じる問題を解決する可能性を持つ。しかし、実際にロボットのどの機能が、どの問題の解決に有効であるのかを整理して評価した研究は必ずしも多くない。

Nakanishi¹³⁾ らはロボットが前後方向に移動する機能が、ロボット操作者が強い社会的プレゼンスを感じるのに有効であることを主観評価実験によって示した。森田ら¹⁴⁾ はロボットを介してプレゼンテーションを支援するという枠組みの中で、ロボットの身体動作からロボット利用者の興味を推定することができるかを、主観評価や、注視頻度を指標として検討している。本論文ではこうした研究に類似した問題意識と、説明した実際の遠隔会議の経験から、研究の初期段階として、ロボットの機能による「注意」喚起に対する効果についてのみを評価することとした。

2.4 仮説

前述の事例より、ロボットの動作は参加者の注意を喚起するのに効果がある。しかし、現状のパンチルトカメラ程度の姿勢変更では、その効果は十分とはいえない。筆者らは、参加者の視界内でロボットが前後移動や左右回転することによって、注意喚起能力が強化されると推測した。そこで、ロボットが注意喚起に対して持つ効果に対して以下の仮説を立てた。仮説1 ロボットの移動機能によって、パンチルトカメラの参加者に対する注意喚起能力を強化することができる。

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

仮説2 ロボットの移動は会議参加者の会議参加への妨げとなる。

3. 開発中のシステム

3.1 システムの特徴とその背景

筆者らが開発中の遠隔会議を支援するロボットシステムは下記のような特徴を持つ。

- ロボットを操作する人間は複数である。会議に参加する全員がロボットを操作可能とする。

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

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

などの問題からロボットの配置数には制限があると考えられる．この制限から会議に参加する人数とロボットの台数がつねには一致しないことになる．1 台のロボットに対して複数人が操作権を持ち，ロボットは複数人の身体を切り替えて表現しなくてはならない．そのため，たとえば館らのテレサフォン¹⁵⁾のようにロボットに操作者の顔を表示する立体型ディスプレイを備えて，ロボットを操作する個人に合わせて表示を変更するなどして，顔などの身体的表現を個人ごとに変更可能にするか，またはある程度抽象的な共通する身体要素を表現できる必要がある．本論文では方針として後者を選択した．開発するロボットは人間の身体を忠実に再現することより「志向」を表現するのに重要度の高い動作を表現するための単純化された機構と，LED ディスプレイなどの表示機能によってロボットが現在だれの身体を表現しているのかを提示する機能を持つ．

3.2 システムの詳細説明

本システムは，遠隔会議を行う 2 拠点双方に存在し，各拠点の会議参加者に共有される．システムの動作イメージを図 2 に示す，システムは映像と音声を利用する通常の遠隔会議



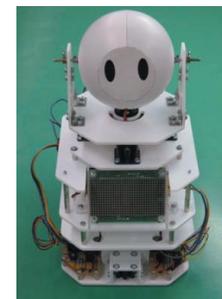
図 2 2 拠点間での遠隔会議
 Fig. 2 Image of Teleconference between two distant cities.

システムと併用され，「ロボット」，「操作インタフェース」から構成される(図 3)．ロボットは人間の頭部を模した形状のパンチルト動作するカメラと，それを搭載した台車から構成され，遠隔地における自身の分身として働く．将来的には全方向移動台車を利用する構成も考えられるが，まずは注意喚起に対する効果を検討することを目的としているため，現状は 2 輪による差動駆動台車を利用している．

図 4 に開発中のロボットの外形と特徴を示す．ユーザはロボットを使って遠隔地側の興味のあるものを「見る」ことができ，その「見る」ための行為がロボットの身体的動作として表現され，遠隔地側に伝わる．遠隔参加者の「見る」という行為と，それにとまろうロボットの移動やロボットカメラの姿勢変更という行為によって，自然に存在感が提示され，また何に対して興味を持っているのかといった「志向」の表現を自然に行うことが期待され



図 3 システム構成
 Fig. 3 Image of system structure.



- ロボットの持つ機能
- ・本体そのもの (3 次元に存在する実体)
 - ・2 輪による移動機能
 - ・映像取得機能
 - ・カメラ姿勢変更機能など

図 4 開発中のロボットの外形
 Fig. 4 Appearance of prototype robot.

る．ロボットの移動機能によって、カメラが固定されている場合と比較して撮影可能な範囲を拡大する効果も期待できる．カメラを空間内に複数配置しても同様に撮像範囲を拡大できるが、前章で説明したように、パンチルトカメラによる注意喚起能力は限定的であり、複数配置によってそれが解決できるかは不明である．また Gaver¹⁶⁾ らに指摘されているように、特に複数台のカメラによって撮影された映像を、離散的に切り替えて使用するような構成の場合、複数のカメラの空間内における配置関係が、ユーザにとって分かりにくくなるなどの問題を新たに生ずる可能性がある．本構成のように、空間内を連続的に移動するロボットを用いることでこの問題を回避できる可能性がある．

4. 実験

4.1 実験概要

2章で説明した仮説を検証するための実験について説明する．実験参加者に遠隔会議参加状況を模した副課題を課した状況で、ロボットに移動、またはパンチルトカメラと同様の姿勢変更を行わせ、参加者がロボットの動作に気づいて反応するまでの時間を計測することによって、動作の種類と注意喚起能力の関係を明らかにする．ロボットが動作したことに気づき、ボタンを押して反応することが主課題となる．以下、ロボットの「移動」とは車輪による台車の前後移動・左右回転、「姿勢変更」とはカメラ部分のパンチルト回転を意味する(図5参照)．

4.2 音声課題

副課題として音声課題を採用した．遠隔会議は聴覚、視覚を利用する複雑な作業であり、ロボットの動作に反応する作業は主として、視覚的な情報処理であると考えられる．副課題として音声課題を加えることで、主課題と副課題で負荷が加わる情報経路を別にでき、また実際の会議に近い作業を模擬できると考えた．

4.2.1 単語復唱課題

定量評価に適した音声課題の設定には、西本ら¹⁷⁾ によるインタフェース評価研究を参考にした．図6に概略を示す．参加者は一定時間ごとに提示される音声を記憶して、その数秒後に提示されるピープ音による指示にあわせて復唱する．復唱の順序は提示順序と同一でなくてもかまわないとした．本実験では音声刺激として1秒間隔で4単語を提示、刺激の提示後に2秒間隔で4回のピープ音を提示した．参加者応答は実験者によって記録され、正答数の全セット平均値を点数とした．実験終了まで5~7セットの提示が行われた．練習時に単独課題として参加者に行わせた場合には、平均的に4点獲得できた．そのため得点減の度合いによって主課題による音声課題への影響を評価できる．

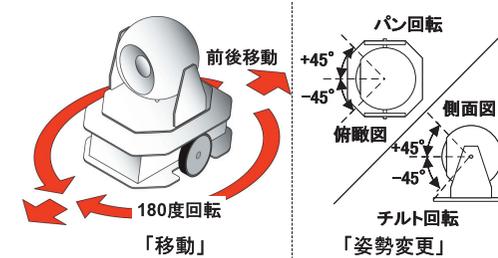


図5 ロボットの「移動(左)」と「姿勢変更(右)」

Fig. 5 Robot's movements (left) and camera's movement (right).

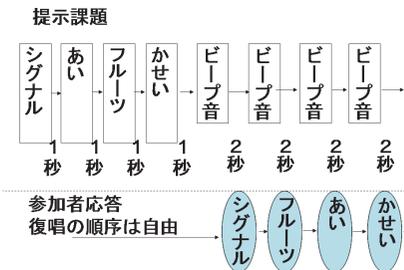


図6 音声復唱課題の概略

Fig. 6 Overview of sound task.

4.2.2 課題に利用する音声データ

単語復唱課題の語彙サイズは270単語とした．音声単語親密度5.0以上の語¹⁸⁾の中から、単語の頭文字が濁音を除く50音としてバランス良く出現するように2~5モーラの普通名詞をランダムに選択し、聞き取りにくいものを除いた．音声データはテキスト音声変換ソフトウェア「OKI SMARTTALK 3.0^{*1)}」を使用して作成した．発話話者設定は「男性1」とした．

4.3 ロボット反応課題

実験参加者が机上のノートPCに提示される注視点を見つめながら音声復唱課題を実施中、5~15秒のランダム時間経過ごとにロボットが動作(「移動」または「姿勢変更」)す

*1 OKI SMARTTALK は沖電気工業(株)の登録商標．

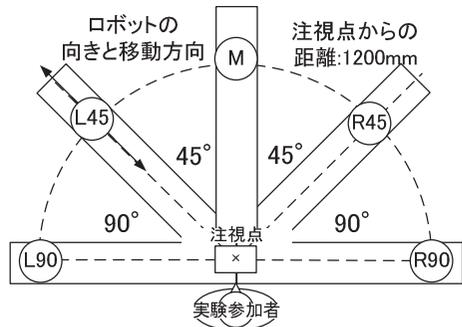


図 7 ロボットと実験参加者の位置関係
Fig. 7 Relative positions of a subject and the robot.

る．参加者はロボットの動作に気づいたら，できるだけ早くボタン押しで反応する．

参加者との位置関係の影響を調べるためロボットの配置位置を複数定めた．注目点からの距離は 1,200 mm で一定，正面，正面から左右に 45 度と 90 度の角度の異なる 5 つの位置に配置し，ロボットが注目点の方向を向くようにした（図 7 参照）．距離は一般的な会議卓の両端（1,800 mm）に人がそれぞれ座った状況での，参加者身体の中心間の距離を基にして定めた．

予測による反応を避けるため，条件を満たす刺激に対しては反応し，それ以外には反応しないという「Go/No-Go タスク」を採用した．ロボットの各動作条件で複数種類の動作を行わせ，視覚的判断を行わせる．「移動」（図 5 左）では前後移動と 180 度の回転を行わせた，前後移動の方向はロボットが配置される机の長手方向に制限した．「姿勢変更」（右）ではパン回転とチルト回転を行わせた．

1 試行ごとにロボットに 12 回の「移動」または「姿勢変更」を行わせた．Go 刺激は「移動」では前後移動，「姿勢変更」ではパン回転とした．No-Go 刺激として「移動」に 180 度回転，「姿勢変更」にチルト回転を 12 回中 2 回混入した．順序効果を防ぐため刺激の提示順はランダムとした．

4.4 実験環境

実験環境を図 8，図 9 に示す．実験参加者は机の前に座り，カナル型イヤホン（Etymotic Research 社製 ER-6i）を装着し，その上からヘッドホン型の耳栓（PELTOR 社製 OPTIME2）を装着する．カナル型イヤホンと耳栓によってロボットの動作音，外部雑音を遮蔽する．イ

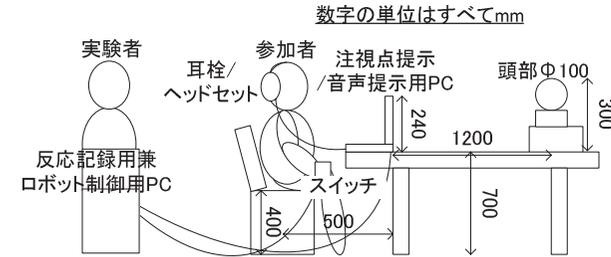


図 8 実験環境
Fig. 8 Setup of the experiment.



図 9 実際の実験風景
Fig. 9 Image of environment of experiment.

ヤホンは机上のノート PC に接続され，ノート PC で動作するプログラムにより音声刺激が提示される．またノート PC のディスプレイ上には注目点が常時表示されている．

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

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

4.5 実験参加者と実験手順

実験は都内国立大学の教室で行った。男女 23 名が実験に参加した。平均年齢は 22 ± 4 歳、男性 15 名、女性 8 名であった。平均視力（自己申告式、矯正後）は 1.0 ± 0.4 であった。Chapman の利き手テスト¹⁹⁾ を実施した結果 20 名が右利き、3 名が左利きと判定された。

参加者は、実験室に入り利き手テストを行った後、実験全体について説明を受けた。続いて音声課題についての説明と、出力音声の調整、音声課題の練習を行い、ロボットの動作についての説明ビデオを見た後、実験に参加した。教示ではロボット反応課題を音声復唱課題より優先するよう指示した。図 7 の配置 5 条件、動作 2 条件（「移動」/「姿勢変更」）の組合せで計 10 条件の試行を行った。各条件の実施順序は参加者ごとにランダムとした。5 条件の試行終了後、1 回 5 分間程度の休憩をとらせた。実験終了後に口頭による主観評価への回答とインタビューを行った。

分析した主観評価の質問は 2 種 4 問であり、

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

Q1 「首の動きは」、Q2 「体全体の動きは」

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

Q3 「首の動きは」、Q4 「体全体の動きは」

というものであった。実験終了まで休憩を含めて 1 時間程度の時間を要した。

4.6 分析方法

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

5. 実験結果

図 10 に配置ごとの反応時間、反応エラー率、音声課題の得点の平均値のグラフを示す。横軸はロボットの配置を示し、縦軸は各値、エラーバーは標準偏差を示す。

5.1 反応時間の結果

平均反応時間は「移動」条件が 0.931 秒、「姿勢変更」条件が 1.100 秒であった。分散分

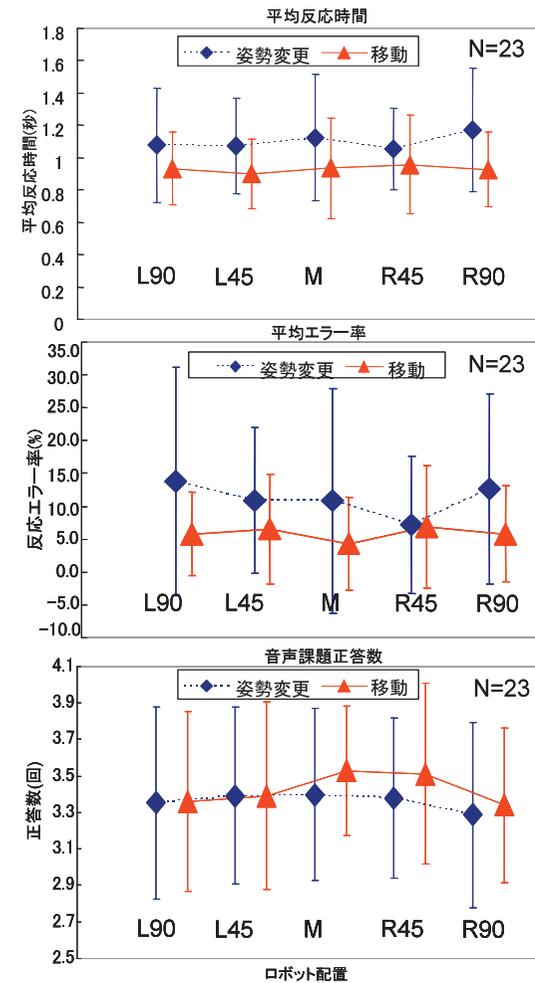


図 10 ロボット配置ごとの各データ
Fig. 10 Data on each robot configuration.

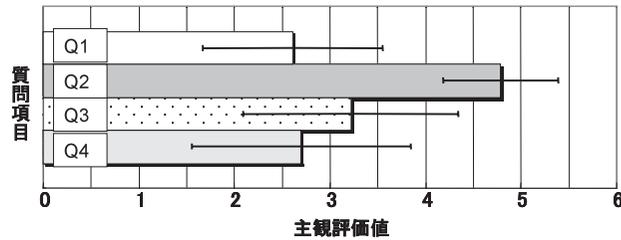


図 11 主観評価結果

Fig. 11 Subjective assessment.

析の結果、動作条件に対して 1%水準で有意な主効果が見られた（動作条件： $F(1, 22) = 32.365$, $p < .01$ ）。一方、交互作用および配置条件主効果は有意ではなかった（交互作用： $F(4, 88) = 0.573$, $p = 0.683$, 配置条件： $F(4, 88) = 0.445$, $p = 0.776$ ）。

5.2 反応エラーの結果

反応エラー率は「移動」条件が 5.9%（12 回の刺激中平均 0.704 回）、「姿勢変更」条件が 11.1%（同：1.330 回）であった。反応エラー率の平方根を、逆正弦関数で角変換して正規化した値について分散分析した。結果、動作条件に対し 5%で有意な主効果が見られ、交互作用および配置条件主効果は有意ではなかった（交互作用： $F(4, 88) = 0.888$, $p = 0.475$, 動作条件： $F(1, 22) = 7.150$, $p = 0.014$, 配置条件： $F(4, 88) = 0.854$, $p = 0.495$ ）。反応回数に関しても同様の結果を得た。

5.3 音声課題の結果

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

5.4 主観評価の結果

主観評価の結果を図 11 に示す。「Q1」「Q2」の回答平均値について対応のある t 検定を行った結果、1%水準で有意差が見られた（ $t(22) = 9.033$, $p < .01$ ）。しかし「Q3」「Q4」間に有意差は認められなかった（ $t(22) = 1.331$, $p = 0.197$ ）。

5.5 反応データの相関

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

6. 考 察

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

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

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

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

- 「移動」によって「姿勢変更」より早く注意喚起できる。
- 「移動」による注意喚起による、音声課題への悪影響は「姿勢変更」と比較して少ない。しかし、実際の会議においての有効性を示すにはさらなる検討が必要になる。たとえば、
- 複数台のロボットを利用する場合

- 「注意喚起」と同時に行う課題として視覚的課題が与えられた場合
- 実際の会議で利用した場合

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

遠隔参加者が興味を持っている対象物や、興味の方向の変化を、空間内に物理的に存在する要素、すなわちロボットの動作に反映させて注意を喚起するという方法には一定の有効性がありそうだが、現状では課題も多い。なかでも、遠隔参加者が興味を示す対象物が変わったなどの、興味の変化を、ロボットへの操作指令に変換するための、適切なインタフェースをどう設計するかは重要な課題である。たとえば、ユーザの操作ミスなどによる、コミュニケーション上の意味を持たないロボットの動作に対してユーザが反応して、会議の阻害となることがないように、ロボットを必要なときだけ動作させて、不必要なときにはなるべく動かさないようにインタフェースを工夫するなどが考えられる。また、操作インタフェースを利用せず、参加者を観測するセンサなどの手段を用いるべきかはシステムの構成の変更も含めた検討課題である。最終的なロボットの動作をどう設計するか、必要な動作だけでなく誇張などを加える必要があるかなども検討を要する課題である。

7. ま と め

本論文では開発中の遠隔会議ロボットシステムの概要とその開発背景となった遠隔会議例について説明した。ロボット同様に物理的に情報を提示する要素として現状の遠隔会議システムで利用されるパンチルトカメラに着目し、利用状況の観察から空間を共有する参加者の注意を喚起できることの重要性を検討した。

注意喚起能力の強化方法として開発中のロボットの移動機能を検討し、パンチルトカメラの姿勢変更機能との注意喚起能力を比較する評価実験を行った。その結果、移動機能が、副課題、すなわち音声の記憶や復唱などの作業への悪影響を低く抑えたまま、注意喚起能力を高められるという結果を得た。

今回の実験で得た知見をより有用な遠隔会議ロボットシステムの設計に結び付ける。またシステムの利用条件に近い形でロボットの機能を再度評価し、最終的にロボットシステムの導入で遠隔会議の「質」を高めることを目標として開発を進める。

謝辞 実験に協力いただいた参加者の方々、筑波大学葛岡教授、東京大学中邑研究室メンバとの有益な議論に感謝する。また本論文を改善する助けとなった匿名の査読者のコメントにも感謝する。

参 考 文 献

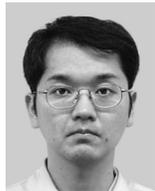
- 1) Gaver, W.W.: The Affordances of Media Spaces for Collaboration, *Proc. CSCW'92*, pp.17-24 (1992).
- 2) Ou, J., Fussell, R.S., Chen, X., et al.: Gestural Communication over Video Stream: Supporting Multimodal Interaction for Remote Collaborative Physical Tasks, *Proc. ICMI'03*, pp.242-249 (2003).
- 3) Heath, C. and Luff, P.: Disembodied Conduct: Communication through video in a multi-media environment, *Proc. CHI'91*, pp.99-103 (1991).
- 4) Ishii, H. and Kobayashi, M.: ClearBoard: A Seamless Media for Shared Drawing and Conversation with Eye-Contact, *Proc. CHI'92*, pp.525-532 (1992).
- 5) Luff, P., Heath, C., Kuzuoka, H., et al.: Handling Documents and Discriminating Objects in Hybrid Spaces, *Proc. CHI'06*, pp.561-570 (2006).
- 6) Yankelovich, N., Simpson, N., Kaplan, J. and Provino, J.: Porta-person: Telepresence for the connected conference room, *CHI'07 Extended Abstracts*, pp.2789-2794 (2007).
- 7) Kuzuoka, H., Kosuge, T. and Tanaka, M.: GestureCam: A video communication system for sympathetic remote collaboration, *Proc. CSCW'94*, pp.35-43 (1994).
- 8) Kuzuoka, H., Oyama, S., Yamazaki, K., Suzuki, K. and Mitsuishi, M.: GestureMan: a mobile robot that embodies a remote instructor's actions, *Proc. CSCW'00*, pp.155-162 (2000).
- 9) Schegloff, E.: Body Torque, *Social Research*, Vol.65, No.5, pp.535-596 (1998).
- 10) Paulos, E. and Canny, J.: PRoP: Personal Roving Presence, *Proc. SIGCHI'98*, pp.296-303 (1998).
- 11) Jouppi, P.N.: First steps Towards Mutually Immersive Mobile Telepresence, *Proc. CSCW'02*, pp.354-363 (2002).
- 12) 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基, 堀井昌子: 身体的インタラクションロボット InterRobot によるコミュニケーション, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演会論文集, 1P1-77-118, pp.1-2 (2000).
- 13) Nakanishi, H., Murakami, Y., Nogami, D., et al.: Minimum Movement matters: Impact of Robot-Mounted Cameras on Social Telepresence, *Proc. CSCW'08*, pp.303-312 (2008).
- 14) 森田友幸, 間瀬健二, 平野 靖, 梶田将司, 岡留 剛: ヒューマノイドロボットを用いた遠隔コミュニケーションにおける注目伝達, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12,

pp.3849–3858 (2007).

- 15) 館すすむ, 川上直樹, 関口大陸, 梶本裕之, 多田隈理一郎: 相互テレグジスタンスロボット「テレサフォン」, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2, p.177 (2006).
- 16) Gaver, W., Sellen, A., Heath, C. and Luff, P.: One is not enough: Multiple views in a media space, *Proc. INTERCHI'93*, pp.335–341 (1993).
- 17) 西本卓也, 高山元希, 荒木雅弘: 音声インタフェースにおける認知的負荷測定法とその評価, 情報処理学会研究報告, 2002-SLP-45-5, pp.29–34 (2003).
- 18) 天野成昭, 近藤公久 (編著): 日本語の語彙特性, 第1期, 第1巻, 三省堂 (1999).
- 19) 八田武志: 左利きの神経心理学, pp.24–30, 医歯薬出版 (1996).

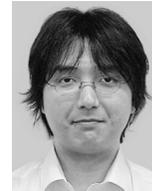
(平成 21 年 4 月 20 日受付)

(平成 21 年 10 月 2 日採録)



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。



福島 寛之

2006 年筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年沖電気工業株式会社に入社。バーチャルリアリティおよびヒューマンインタフェースの研究開発業務に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。



深澤 伸一

2008 年千葉大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。在学中は主に定量的生理・心理計測手法を用いたヒトの音声情報処理に関する研究に従事。同年沖電気工業株式会社に入社。遠隔コミュニケーションシステムのデザインや評価に関わる研究開発業務に従事。



竹内 晃一 (正会員)

1993 年慶應義塾大学大学院理工学研究科管理工学専攻修士課程修了。同年沖電気工業株式会社に入社。1998 ~ 2000 年 Stanford 大学 CSLI (Center for the Study of Language and Information) 客員研究員。東京大学工学系研究科先端学際工学専攻博士課程在学中。情報通信機器のユーザビリティ・アクセシビリティおよび遠隔コミュニケーションシステムのデザインや評価に関わる研究開発業務に従事。ヒューマンインタフェース学会会員。