

自律・遠隔操作の曖昧化によるロボット操作者との対話感覚の創出

田中 一品^{1,2} 山下 直美³ 中西 英之^{1,a)} 石黒 浩⁴

受付日 2015年6月17日, 採録日 2016年1月12日

概要: ヒューマノイドロボットの遠隔操作と自律操作の本質的な違いは遠隔地にいる操作者の存在の有無と考えることができる。この存在の有無をユーザがどのように判断しているのかはいまだよく分かっていない。その判断のメカニズムを明らかにすることによって、自律ロボットとの対話を人との対話のように感じさせることが本研究の目的である。被験者が遠隔操作状態と自律状態のロボットとそれぞれ対話する実験を行った。その結果、自律状態のロボットとの対話における操作者の存在感は、遠隔操作状態であると“信じて”同じロボットと対話した事前の経験に基づいて判断されることが分かった。自律状態での対話の質が事前の経験での対話の質と乖離していると操作者の存在感は低下してしまうが、事前の対話において自律システムが操作者を装ってユーザと対話し、両状態を曖昧化することで、操作者の存在感を効果的に生み出すことができた。

キーワード: 遠隔操作ロボット, 自律ロボット, チューリングテスト, テレプレゼンス

Blurring Autonomous and Teleoperated Produces the Feeling of Talking with a Robot's Operator

KAZUAKI TANAKA^{1,2} NAOMI YAMASHITA³ HIDEYUKI NAKANISHI^{1,a)} HIROSHI ISHIGURO⁴

Received: June 17, 2015, Accepted: January 12, 2016

Abstract: It could be considered that the essential difference between teleoperated and autonomous humanoid robots is the presence or absence of a remote operator. It has remained unclear how the user who is talking with a robot judges this difference. The purpose of this study is to produce the sense of talking with a remote operator when talking with an autonomous humanoid robot by finding the user's judgment mechanism. We conducted experiments in which subjects talked with autonomous and teleoperated robots. As a result, we found that the presence/absence of a remote operator is tended to be judged by the user's "beliefs" that he/she had been interacting with a remote operator through the robot. The gap of quality between the prior talking and the subsequent talking with an autonomous robot decreased a presence of remote operator. In conclusion, experiencing talking with an autonomous robot under the guise of a remote operator blurred the gap and effectively produced the presence of remote operator when later talking with the autonomous robot.

Keywords: teleoperated robot, autonomous robot, turing test, telepresence

1. はじめに

ヒューマノイドロボットの種類には大きく分けて遠隔操作ロボットと自律ロボットがある。遠隔操作ロボットは操作者の存在感を伝えるものであるのに対し [12], [14], 自律ロボットは人間のような存在感を生み出すものである [2]。したがって、両者の本質的な違いは操作者の存在の有無と考えることができる。この違いをロボットと対話するユーザがどのように判断しているかは明らかになっていない。本研究の目的は、その判断のメカニズムを明らかにし、自律ロボットとの対話でも人と話しているようにユーザに感

¹ 大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita,
Osaka 565-0871, Japan
² 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
CREST, Japan Science and Technology Agency, Chiyoda,
Tokyo 102-0076, Japan
³ NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories, Souraku, Kyoto
619-0237, Japan
⁴ 大阪大学大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University,
Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
a) nakanishi@ams.eng.osaka-u.ac.jp

じさせることである。

遠隔操作ロボットの特徴は、物理的実体（以下、実体と呼ぶ）のあるロボットで操作者の身体動作をユーザに提示できる点である。先行研究では、他の遠隔コミュニケーションメディアに対する遠隔操作ロボットの優位性がいくつか報告されている [8], [12], [14]。存在感伝達もその1つであり、人の外見に酷似した遠隔操作ロボットはビデオチャットやボイスチャットよりも高いソーシャルプレゼンス（遠隔地にいる人と対面している感覚 [4]）を生み出すことが分かっている [12]。また、人と分かる顔を持つが特定の人物の外見を持たない匿名のロボットであっても、アバターチャットやボイスチャットよりも高いソーシャルプレゼンスを生み出すことも分かっており、実体で身体動作を提示することがソーシャルプレゼンスを強化する要因と考えられている [14]。

ロボットとの対話では、ビデオチャットとは異なり相手の外見や振舞いを直接見ることができない。したがって、自律ロボットの発話動作が人間らしければ、その動作が操作者の振舞いに基づいているとユーザに信じさせることができるかもしれない。社会心理学の分野では、他者（ロボットを含む）についての推測は過去の経験に基づいて行われることが知られている [1], [7]。この知見から、我々は操作者の存在の有無に関する推測と、遠隔操作状態のロボットと対話した経験との関係に着目した。つまり、遠隔操作状態のロボットと対話した後に、自律状態の同じロボットと対話すると、遠隔操作状態で感じた操作者の存在感が自律状態での対話で想起されるのではないかと考えた。たとえば、1人暮らしのユーザの話し相手になる介護ロボットの場合 [11], [15]、ユーザが遠隔介護者と遠隔操作状態で対話すると、自律状態に切り替えた後でも遠隔介護者の存在が感じられ、効果的に孤独感が低減されるかもしれない。また、遠隔講義ロボットの場合 [5]、最初に遠隔講師が遠隔操作状態で生徒と挨拶を交わすと、その後の講義が自律的に再生されたとしても、生徒は講師の存在が感じられ、真面目に講義を受けるかもしれない。一方、遠隔介護者や遠隔講師にとっては、自律モードの間は他の仕事に従事できるという利点がある。遠隔操作と自律の両方の状態を備えたヒューマノイドロボットはすでに提案されているが [11]、それらの状態を切り替えることによる操作者の存在感への影響は調査されていない。

自律ロボットが操作者の存在感を生み出す要因として、実体での発話動作の提示と遠隔操作ロボットと対話した経験が有効であると予想した。本研究では、この予想をチューリングテストに類似した3つの実験（3, 4, 5章）で検証した。一般的なチューリングテストでは、被験者は自律システムに人間同様の知的能力があるかどうかを判断するのに対し、我々の実験では、被験者は自律システムに人間同様の存在感があるかどうかを判断する [14]。我々はこ

れをソーシャルテレプレゼンステストと名づけた。

2. 対話モード

発話動作を生成するアルゴリズムを提案した研究のほとんどは顔の動作（首や唇の動作）に注目していた。それらは対話における最も基本的な動作であると考えられるため、本研究においてもそれらの動作を扱った。既存の遠隔操作ロボットの多くはそれらの動作を提示できる頭部を備えており [5], [10], [12], [18]、本研究では、人のような顔を持つが特定の人物の外見を持たない Telenoid を使用した [10]。このロボットは3自由度の首と1自由度の口を備えている。本研究では、ロボットが操作者に同期して動作する状態を遠隔操作モード、被験者の音声に自動で相槌を打つ状態、および録音音声に基づいて発話動作を自動生成する状態を自律モードと定義し、これらのモードでロボットを操作した。後述の3つの実験では、被験者の事前知識を統制するため、遠隔操作モードと自律モードについて説明する紙を実験の前に被験者に提示し、口頭でも同様の説明を行った。

2.1 遠隔操作モード

フェイストラッキングソフトである faceAPI で取得した操作者の顔のトラッキングデータに基づいて 30 fps でロボットの首と口の角度をコントロールする。このソフトは別の部屋に設置した端末で動作し、Web カメラによって操作者の首と口の動きを取得する。

2.2 自律モード

対話における役割には聞き手と話し手があり、それらの役割における主な動作はそれぞれ傾きと発話であると考えられることができる。それらを自律化するため、我々は相槌のタイミングを話し手の発話から検出する相槌システムと、話し手の録音音声とロボットの口の動きを同期させるリップシンクシステムを構築した。操作者の存在感を生み出す要因を単純な技術を用いて明らかにすることができれば、より自然で多様な発話動作を生成する技術を用いた場合でもそれらの要因が有効にはたらくと考え、我々は相槌システムとリップシンクシステムを可能な限り単純化した。

2.2.1 相槌システム

相槌のタイミングを検出する多くの方法が存在し、そのタイミングの判断材料として発話の途切れ [9], [13], [16], [18]、基本周波数 [9], [16], [17] が主に用いられている。発話の途切れは、相槌のタイミングとして適切と思われる文章の切れ目や末尾を判断する有効な手がかりであるため、我々の方法は発話の途切れのみを使用した。

相槌のタイミングの検出は次のルールに基づいて行う。まず、音圧の高/低に基づいて発話と途切れを判断する。1つの途切れの継続時間を t_1 とする。0.6 秒以上の t_1 を相槌の候補とし、それより短い途切れは無視する。発話の開

始から相槌の候補となる途切れまでの時間を発話継続時間 t_2 とし、 t_2 が 2.0 秒以上のとき、途切れを相槌のタイミングと判断する。つまり、このルールは 2.0 秒以上発話が継続した後の途切れを相槌のタイミングと判断するものである。 t_2 は相槌のタイミングが決定した場合と t_1 が 1.2 秒以上になった場合にゼロにリセットする。

相槌のタイミングにおいて、ロボットは頷き動作とあらかじめ録音した相槌の音声「はい」を再生する。予備実験では、1 種類の頷き動作と音声を用いたが、被験者からロボットの相槌が一定であることを指摘された。そこで、ピッチ角度と速度の異なる 3 種類の頷き動作と、音程がわずかに異なる 2 種類の音声を用意し、それらを相槌のタイミングでランダムに再生した。この方法により、相槌が一定であることを被験者に指摘されることはなくなった。

2.2.2 リップシンクシステム

人の発話から唇の動きを生成し、ロボット [6], [18] やコンピュータグラフィックスのアバタ [3], [18] の口を操作する様々なリップシンクシステムが提案されている。本研究で使用するロボットの口は 1 自由度であり、単純なシステムでリップシンクを行った。

我々のシステムは、人の発話の音圧を測定し、その大きさに合わせてロボットの顎の角度を変化させるものである。実験では、このシステムを用いてあらかじめ録音した操作者の発話からロボットの口の動きを生成した。

3. 実験 1

自律ロボットとの対話で操作者の存在感を生み出す要因を、1) 操作者とロボットを介して対話した経験と、2) 実体のあるロボットによる発話動作の提示であると予想した。実験 1 ではこれらの要因を検証する。

3.1 実験条件

図 1 に示すように、ロボットを机の前に設置し、被験者をその反対側に座らせた。被験者の発話を取得する指向性マイクはその机の上面に埋め込み、被験者から直接見えないように布で覆った。操作者の発話を再生するスピーカは

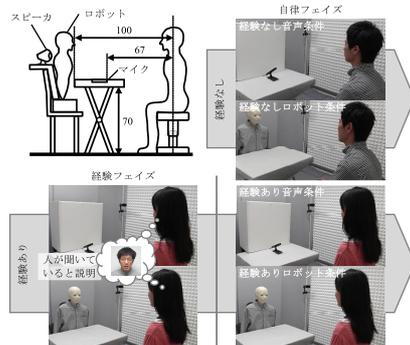


図 1 実験 1 の条件

Fig. 1 Conditions of Experiment 1.

ロボットの背後に設置した。

実験条件は 2 つの音声条件と 2 つのロボット条件の計 4 条件を設定した (図 1)。実体をともなって発話動作を提示する効果を検証するため、実体も発話動作も提示しない音声条件をロボット条件の比較条件とした。ロボット条件では、被験者の発話に対しロボットが録音音声の相槌と頷き動作を再生した。これに対し、音声条件では、録音音声の相槌のみを再生した。この条件では、ロボットは使用しないため白い箱で隠した。その代わりに、被験者の発話を実験者が聞いている (または録音されている) ことを示すため、ダミーのマイクを机上に設置した。

実験は、遠隔操作モードで実験者と対話する経験フェイズ、自律モードで対話する自律フェイズに分けて行った。経験フェイズは経験あり条件にのみ含まれている。この経験フェイズの前に、遠隔地にいる実験者とシステム/ロボットを介して対話することを被験者に説明した。しかし、被験者の発話に対して実験者が相槌を返した場合、相槌のタイミングを統制することが困難であったため、実際には経験フェイズでも自律モードを使用して相槌を返した。すべての被験者が我々の説明を信じたことは 3.4 節で述べる操作チェックで確認した。一方、自律フェイズはすべての条件に含まれている。自律フェイズの前に、自律モードのシステム/ロボットが相槌を返し、被験者の発話が録音されることを被験者に説明した。自律フェイズでは、この説明のとおり自律モードで実験を行った。経験フェイズを含む経験あり条件と経験フェイズを含まない経験なし条件を比較することで、操作者との対話経験の効果を検証した。

3.2 被験者

実験 1 には 16 人の学部生が被験者として参加した。8 人 (女性 5 人、男性 3 人) は音声/ロボット経験なし条件に参加した。この条件では、被験者は経験フェイズと自律フェイズにおいて音声のみの対話とロボットを介した対話の両方を行った。残りの 8 人 (女性 4 人、男性 4 人) は音声/ロボット経験あり条件に参加し、自律フェイズにおいて音声のみの対話とロボットを介した対話を行った。

3.3 タスク

実験の開始時、電子機器について意見を述べるようにスピーカを通して録音音声で被験者に指示を与えた。この指示や相槌は当研究室のメンバの音声を録音したものである。ロボット条件では、音声を再生するだけでなく、リップシンクシステムによってロボットの発話動作を被験者に提示した。経験フェイズにおける話題は携帯音楽プレイヤーとロボット掃除機、自律フェイズにおける話題はスマートフォンと 3DTV とした。話題と音声/ロボット条件の組合せ、および実施順はカウンターバランスをとった。

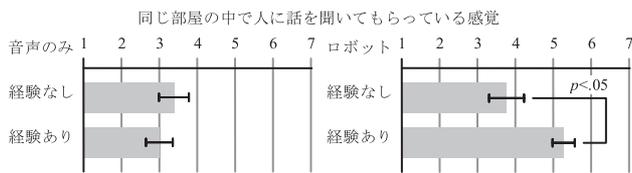


図 2 実験 1 の結果

Fig. 2 Result of Experiment 1.

3.4 アンケート

1つの話題について話した後、被験者が正しく実験設定を理解していることを確認するため、はい/いいえで回答する次の項目で操作チェックを行った。

- 先ほどの実験では、別の部屋に人がいて、あなたの話を聞いていた。
- 先ほどの実験では、別の部屋にはおらず、あなたの話は録音されていた。

自律フェイズの後、被験者が自律フェイズで感じた操作者の存在感を計測するアンケートを実施した。アンケートの項目は次のとおりであり、被験者は7段階のリッカート尺度で回答した(1:まったくあてはまらない, 4:どちらともいえない, 7:非常によくあてはまる)。

- 同じ部屋の中で人に話を聞いてもらっているように感じた。

3.5 結果

操作チェックの結果、すべての被験者が正しく実験設定を理解していた。実験1の結果を図2に示す。グラフはアンケートスコアの平均値であり、エラーバーは標準誤差を示す。また、経験なし条件と経験あり条件を対応なしt検定で比較した結果を図中に示す。音声のみの対話では、経験なし条件と経験あり条件の間に有意な差はなかった($t(14) = 0.664$, n.s.)。一方、ロボットを介した対話では、経験あり条件は経験なし条件よりも有意に高いことが示された($t(14) = 2.575$, $p < .05$)。これは、ロボットの顔き動作を見ることができた場合には、操作者の存在感が自律フェイズであっても生み出されたことを意味している。

この実験1では、経験フェイズにおいて操作者の代替として自律システムを使用した。そのため、自律フェイズにおける操作者の存在感は、操作者との実際の対話経験ではなく、操作者と対話していると信じた経験によって生み出されたと考えられる。しかし、音声条件の経験フェイズでも被験者は操作者と対話していると信じていたが、その効果は得られなかった。これらの結果から、自律システムによる相槌でも操作者の存在感を生み出すことが可能であり、操作者との対話であると信じてロボットと対話した経験、および、実体を持つロボットによる発話動作の提示がその存在感生成の要因であることが示唆された。

経験あり条件の対話は経験・自律フェイズの2回だったが、経験なし条件の対話は1回のみであったため、対話経

験や実体の要因のほかに、対話回数の要因が実験結果に影響を与えていた可能性が考えられる。しかしながら、音声のみの対話においても対話の回数に差があったが、経験なし条件と経験あり条件の差は有意ではなかったため、自律フェイズにおいて操作者の存在感を生み出したのは対話経験の効果であったと考え、実験2では、各条件の対話回数を統制し、次の仮説を検証することにした。

仮説1: 操作者と対話していると信じてロボットと対話した経験が、自律ロボットとの対話で操作者の存在感を生成する。

実験1のように被験者への説明のみで操作者との対話であると信じさせる場合に対し、実際に操作者がユーザの発話に応えた場合には、自然で多様な反応を返すことが可能であるため、操作者の存在をより強く印象付けることができる。操作者が確かに存在するという印象は、自律フェイズにおいてより高い存在感を生み出す可能性がある。操作者との事前の対話を「信じた」経験と「実際に行った」経験の効果を切り分けて調査するため、実験2では、次の仮説も検証した。

仮説2: 操作者を装った自律ロボットと対話した経験と比較し、実際に遠隔操作ロボットと対話した経験は自律ロボットとの対話で操作者の存在感を向上させる。

実験1の経験あり条件では、両フェイズともに相槌システムを使用していたにもかかわらず、アンケートの自由記述によると、8人全員が相槌のタイミングから遠隔操作か自律を判断していた。これに対し、ロボットが話者となって録音音声と発話動作を再生する場合には、相槌のタイミングのような明確な判断基準が存在しないため、ユーザにとって操作者の存在を感じにくいことが予想される。実験3(5章)では、ロボットが話者となった場合においても操作者の存在感を生成できるか検証することにした。

4. 実験2

この実験では、前章の実験1で浮かび上がった仮説1, 2を検証する。実験1との違いは、事前の経験の有無ではなく、事前の経験の違いを比較する点である。

4.1 実験条件

仮説1, 2を検証するため、図3に示す3つの条件を設定した。自律条件は、実験1の経験なしロボット条件に相当するが、被験者は自律モードのロボットとの対話を2回行った。曖昧条件は、実験1の経験ありロボット条件に相当する。これらの条件では、両方のフェイズにおいて自律モードでロボットをコントロールした。経験フェイズの前に、自律条件の被験者には自律モードであると正しい説明を行ったが、曖昧条件の被験者には遠隔操作モードであると偽った説明を行った。つまり、これらの条件の差は経験フェイズにおける被験者への説明のみであった。曖昧条件

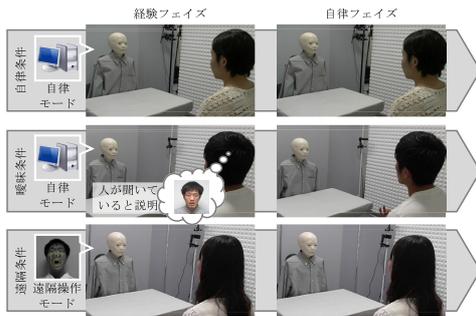


図 3 実験 2, 3 の条件

Fig. 3 Conditions of Experiments 2 and 3.

の被験者には、遠隔操作モードと自律モードでの対話の質に明確な違いが感じられず両モードの差が曖昧化されたといえるためこの条件の名前を曖昧条件とした。これらの条件を比較することで仮説 1 を検証した。

仮説 2 の検証のため、新たに遠隔条件を追加した。この条件の経験フェイズでは、実験者が遠隔操作モードを用いて被験者の発話に対して実際に相槌を打ち、さらに、被験者の意見を繰り返す、言い換えて確認する等、多様な反応を返す。

ロボットの対話モードがどちらであるかという実験設定は、各フェイズの対話の直前に被験者に説明した。

4.2 被験者

実験 2 には 30 人の学部生が被験者として参加した。10 人（女性 6 人、男性 4 人）は自律条件に参加した。10 人（女性 5 人、男性 5 人）は曖昧条件に参加した。残りの 10 人（女性 5 人、男性 5 人）は遠隔条件に参加した。

4.3 タスク

タスクは基本的に実験 1 と同様である (3.3 節)。自律条件と曖昧条件では、ロボットは当研究室のメンバの録音音声を再生した。遠隔条件の経験フェイズでは、同じメンバが操作者となり、被験者への話題の指示や相槌を実際に行った。経験フェイズと自律フェイズにおける話題はそれぞれ 3DTV とスマートフォンとした。

4.4 アンケート

実験後、被験者が正しく各フェイズの実験設定を理解していたか確認するため、はい/いいえで回答する次の項目で操作チェックを実施した。

- 1 回目の実験では (自律フェイズに対しては「2 回目の実験では」)、ロボットは遠隔操作モードで動いていた。
- 1 回目の実験では、ロボットは自律モードで動いていた。

実験 1 のアンケートの自由記述では、自律的にロボットが相槌を返しているように感じた点と、操作者が相槌を返しているように感じた点を両方記述する場合がいくつか見られた。そこで、これらの感覚を別々に評価できるように

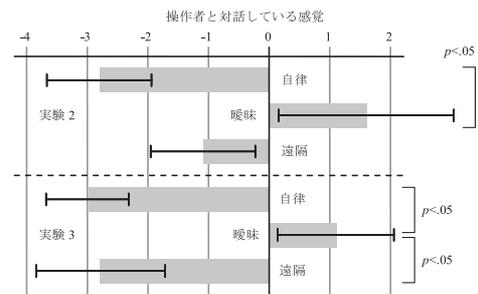


図 4 実験 2, 3 の結果

Fig. 4 Result of Experiments 2 and 3.

次の 2 つの項目を用意した。

- ロボットは自動で相槌を打っている感じがした。
- ロボットは質問者の相槌を伝えている感じがした。

被験者は 7 段階のリッカート尺度で回答し、その理由を自由記述欄に記述した。2 つ目の項目のスコアから 1 つ目の項目のスコアを引いた値を「操作者と対話している感覚」とし、この値を条件間で比較した。

4.5 結果

操作チェックの結果、すべての被験者が正しく実験設定を理解していた。実験 2 の結果を図 4 上部に示す。グラフは「操作者と対話している感覚」の平均値を示し、エラーバーは標準誤差を示す。また、3 つの条件の比較を対応なし一元配置分散分析で行い、ボンフェローニ補正法を用いて多重比較を行った。その結果を図中に示す。

分散分析の結果、3 つの条件間の差が有意であった ($F(2, 27) = 4.881, p < .05$)。多重比較の結果、曖昧条件は自律条件よりも有意に高いことが示された ($p < .05$)。これは、操作者と対話していると信じて自律ロボットと対話した経験によって操作者の存在感が生み出されたことを意味している。この結果は仮説 1 (3.5 節) を支持し、実験 1 の結果が対話回数の差によるものではなかったことが示された。一方、遠隔条件と自律条件および曖昧条件の差は有意ではなかったため、仮説 2 (3.5 節) は示されなかった。

5. 実験 3

実験 1, 2 では、被験者が話し手でありロボットが聞き手であった。実験 3 では、これらの役割を反対にして仮説 1, 2 を検証する。相槌のようなフィードバックが自律ロボットから得られない非インタラクティブな対話においても、事前の経験の違いによって操作者の存在感の度合いの違いが生じるかを確認することが実験 3 の目的である。

5.1 実験条件

実験条件は実験 2 と同様であり、図 3 に示す 3 つである。この実験では、ロボットは被験者の発話に应答する必要がないため、自律モードではリップシンクシステムのみを使用した。遠隔操作モードを使用する遠隔条件の経験フェ

イズでは、操作者が話していることを被験者に印象付けるため、操作者は意見を述べるだけでなく簡単な質問（たとえば「3D映画を見たことはありますか」等）を3回行い、被験者の返答に対して「はい」と発言した。

5.2 被験者

実験3には30人の学部生が被験者として参加した。各10人（女性5人、男性5人）はそれぞれ自律条件、曖昧条件、遠隔条件に参加した。

5.3 タスク

自律条件、曖昧条件では、ロボットは電子機器について意見を述べる録音音声再生し、発話動作を提示した。この意見は当研究室のメンバの音声を録音したものである。これらの条件では、被験者はロボットの発話動作を見ながら再生された音声を聞くのみである。遠隔条件の経験フェイズでは、同じメンバが操作者を務め、電子機器について意見を述べる中で質問も行ったため、被験者はそれに返答した。実験2と同様に、経験フェイズと自律フェイズにおける話題はそれぞれ3DTVとスマートフォンとした。

5.4 アンケート

実験設定に関する被験者の理解を確認するため、実験2と同様に4.4節で述べた操作チェックを実施した。

被験者が自律フェイズで感じた「操作者と対話している感覚」を評価するため、以下の2つの項目を用意した。

- ロボットは自動で発話動作を実行している感じがした。
- ロボットは遠隔操作で話者の発話動作を伝えている感じがした。

被験者は7段階のリッカート尺度で回答し、その理由を自由記述欄に記述した。2つ目の項目のスコアから1つ目の項目のスコアを引いた値を「操作者と対話している感覚」とし、この値を条件間で比較した。

5.5 結果

操作チェックの結果、すべての被験者が正しく実験設定を理解していた。実験3の結果を図4下部に示す。グラフは「操作者と対話している感覚」の平均値を示し、エラーバーは標準誤差を示す。また、3つの条件の比較を対応なし一元配置分散分析で行い、ボンフェローニ補正法を用いて多重比較を行った。その結果を図中に示す。

分散分析の結果、3つの条件間の差が有意であった ($F(2,27) = 5.806, p < .01$)。多重比較の結果、曖昧条件は自律条件よりも有意に高いことが示された ($p < .05$)。この結果は実験2と同様であり、ロボットが話者となってユーザに発話動作を提示する対話でも仮説1(3.5節)が支持された。また、曖昧条件は遠隔条件よりも有意に高く ($p < .05$)、遠隔条件と自律条件との差は有意ではなかつ

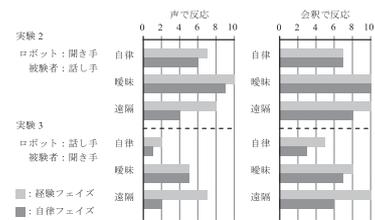


図5 ロボットの挨拶に応じた被験者数

Fig. 5 Subjects who replied to robot's greeting

た。つまり、事前の対話経験において操作者の存在を印象付けるよりも、操作者との対話と自律ロボットとの対話を曖昧化することが操作者の存在感生成に有効であることが分かった。これは仮説2(3.5節)に反する結果である。

6. ロボットの挨拶に対する反応の分析

実験2, 3において、観察データの分析を行った。これらの実験では、ロボット（または操作者）は対話の最後に「ありがとうございました」という音声で被験者に挨拶をした。被験者が操作者と対話していると感じていた場合にはその挨拶に応じることを期待し、被験者の反応を観察した。多くの被験者がロボットの挨拶に対して「ありがとうございました」といいながら会釈を行ったが、声または会釈のみで挨拶に応じた被験者もいたため、これらの反応を別々に数えることとした。その結果を図5示す。

挨拶に応じた被験者の数は全体的に実験2よりも実験3の方が少ないことが見受けられる。これは実験タスクの違いによる影響と思われる。実験3では、曖昧条件の経験フェイズを除いて、被験者はロボットの発話を一方的に聞くだけであり、操作者の存在を感じにくかったため、挨拶に応じた被験者が少なかったと考えられる。実際、遠隔条件の経験フェイズでは、操作者とのやりとりがあったため、実験2, 3ともにほぼすべての被験者が挨拶に応じていた。

遠隔条件の自律フェイズでは、他の条件と比較し、挨拶に応じた被験者数が経験フェイズから大きく減少している。また、自律条件では、両方のフェイズにおいて挨拶に応じた被験者数が少ないことが見受けられる。これらの結果は、自律モードのロボットに対しては操作者の存在を感じにくく、ロボットの挨拶を無視したものと推測される。一方、曖昧条件では両方のフェイズにおいて挨拶に応じた被験者数が多く、自律フェイズに移行した後もその被験者数の減少が見られなかった。つまり、曖昧条件のみが両フェイズを通して高い存在感を維持できたと考えられる。

7. 考察

3つの実験の結果から、ロボットと対話するユーザは、操作者の存在の有無を事前の経験に基づいて判断していることが分かった。ロボットを介して操作者と対話したと信じた事前の経験によって、たとえ自律ロボットと対話していると分かっているユーザは操作者の存在を感じるこ

ができる。しかし我々の予想に反し、自然で多様なやりとりを行う対話で操作者の存在を印象付けた経験は効果的ではなかった。自律フェイズにおいて自律ロボットと対話したと感じた理由として、遠隔条件に参加した実験2, 3の被験者(各10人)の半数が、ロボットからの様々な反応や問いかけが自律フェイズで減少したことに自由記述で言及していた。つまり、遠隔条件では、経験フェイズと自律フェイズの間でインタラクションの度合いにギャップがあったことが操作者の存在感を減少させたと考えられる。

実験2の結果(図4上部)を見ると、差は有意ではなかったが、遠隔条件の平均値は自律条件よりも高く、曖昧条件よりも低かった。この結果は、操作者と実際に対話したことによるプラス効果が、インタラクションのギャップによるマイナス効果によって減少したものと考えられる。実験2の遠隔条件に参加した10人中4人の被験者は、相槌のタイミングは経験フェイズと自律フェイズで大きな差はなかったと述べており、自律モードの適切な相槌がインタラクションのギャップをある程度軽減させたと思われる。一方、実験3の結果(図4下部)を見ると、遠隔条件と自律条件はほぼ同じであり、曖昧条件よりも有意に低かった。この実験3の自律フェイズでは、被験者はロボットの話の聞くだけであったため、遠隔条件でのインタラクションのギャップが実験2よりも大きく、そのマイナス効果の増加により、操作者と実際に対話したことによるプラス効果が完全に打ち消されたものと考えられる。6章で述べた観察データの分析においても、ロボットの挨拶に応じた被験者数の減少としてこのギャップの効果が表れている。

一方、曖昧条件では、ほとんどの被験者がロボットの挨拶に応じており、自律フェイズにおいてその被験者数の減少は見られなかった。曖昧条件に参加した被験者は、経験フェイズにおいて自律ロボットとの対話を操作者との対話であると信じていたため、経験フェイズと自律フェイズのギャップを感じることはない。実際、実験2と3の曖昧条件にそれぞれ参加した10人中5人と6人の被験者は、自律フェイズで操作者の存在を感じた理由として、経験フェイズとほとんど変わらなかったと述べており、両フェイズのギャップを曖昧にしたことが操作者の存在感を生み出すうえで有効にはたらいたと考えられる。

自律フェイズでは、ロボットは2.2節で述べた非常に単純な方法で発話動作を生成した。より自然で多様な発話動作を生成できる技術を自律ロボットとのインタラクションに利用した場合、実際に操作者と対話するインタラクションに近づけることが可能になると思われる。したがって、発話動作生成に関する技術の進歩によって、遠隔条件も操作者の存在感を生み出すうえで有効にはたらくかもしれない。この仮説の検証は、Wizard of Oz法を用いて、経験フェイズと自律フェイズの両方で操作者が被験者と対話するが、自律フェイズでは自律システムでロボットが動作す

ると被験者に説明する条件を追加して実験を行うことで可能だと考えられる。この検証は今後の課題である。

実験1の結果から、実体のあるロボットで身体動作を提示することが操作者の存在感を生み出す要因であることが分かった。しかし、実体はないが身体動作を提示できるコンピュータグラフィックスのアバタでも同様の効果が得られるかは明らかになっていない。先行研究では、身体動作をアバタで提示するよりもロボットで提示した方が、ソーシャルテレプレゼンスが向上することが報告されている[14]。また、自律ロボットのソーシャルプレゼンスは映像上の自律エージェントよりも高いことも報告されている[2]。したがって、操作者の存在感を自律システムによって生み出す場合においても、映像上のアバタより実体のあるロボットを用いることが効果的であると予想される。

8. まとめ

本研究では、ロボットが自律的に動いているのか操作者によってコントロールされているのかを人が判断するメカニズムの解明を目指し、我々が提案するソーシャルテレプレゼンステストに基づいた実験を行った。実験の結果、実体のあるロボットによる発話動作の提示、遠隔操作されていることを信じてロボットと対話した事前の経験がソーシャルテレプレゼンステストに合格する要因であることが分かった。人は事前の対話経験に基づいて操作者の存在の有無を判断しており、その経験で感じた操作者の存在感が、自律ロボットによる身体動作の物理的提示によって想起されると考えられる。しかし、事前の対話経験と、その後の自律ロボットとの対話においてインタラクションの度合いにギャップがあると、自律ロボットとの対話で感じられる操作者の存在感が減少することも分かった。このギャップは事前の対話において自律システムが操作者を装ってユーザと対話することによって曖昧化することができ、自律ロボットとの対話でも操作者の存在感を生み出すことが可能になる。また、発話動作を生成する技術の進歩によって、ロボットの振舞いの自然さや多様さを向上させることでもこのギャップを改善できる可能性がある。我々は、本研究によってテレロボティクスと知能ロボティクスの研究が相互に促進されることを期待している。

謝辞 本研究は、JST CREST「人の存在を伝達する携帯型遠隔操作アンドロイドの研究開発」、科学研究費補助金 No. 26280076, No. 15K12081, KDDI 財団, 倉田記念日立科学技術財団からの支援を受けた。

参考文献

- [1] Baum, A. and Andersen, S.M.: Interpersonal roles in transference: Transient mood effects under the condition of significant-other resemblance, *Social Cognition*, Vol.17, No.2, pp.161–185 (1999).
- [2] Bainbridge, W.A., Hart, J., Kim, E.S. and Scassellati,

- B.: The benefits of interactions with physically present robots over video-displayed agents, *International Journal of Social Robotics*, Vol.3, No.1, pp.41–52 (2011).
- [3] Cao, Y., Tien, W.C., Faloutsos, P. and Pighin, F.: Expressive Speech-Driven Facial Animation, *ACM Trans. Graphics*, Vol.24, No.4, pp.1283–1302 (2005).
- [4] Finn, K.E., Sellen, A.J. and Wilbur, S.B.: *Video-Mediated Communication*, Lawrence Erlbaum Associates (1997).
- [5] Hashimoto, T., Kato, N. and Kobayashi, H.: Development of Educational System with the Android Robot SAYA and Evaluation, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.8, No.3, pp.51–61 (2011).
- [6] Ishi, C., Liu, C., Ishiguro, H. and Hagita, N.: Evaluation of formant-based lip motion generation in tele-operated humanoid robots, *Proc. IROS2012* (2012).
- [7] Lee, S.L., Lau, I.Y.M., Kiesler, S. and Chiu, C.Y.: Human mental models of humanoid robots, *Proc. ICRA2005*, pp.2767–2772 (2005).
- [8] Morita, T., Mase, K., Hirano, Y. and Kajita, S.: Reciprocal Attentive Communication in Remote Meeting with a Humanoid Robot, *Proc. ICMI2007*, pp.228–235 (2007).
- [9] Noguchi, H. and Den, Y.: Prosody-Based Detection of the Context of Backchannel Responses, *Proc. IC-SLP1998* (1998).
- [10] Ogawa, K., Nishio, S., Koda, K., Balistreri, G., Watanabe, T. and Ishiguro, H.: Exploring the Natural Reaction of Young and Aged Person with Telenoid in a Real World, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.15, No.5, pp.592–597 (2011).
- [11] Ranatunga, I., Torres, N.A., Patterson, R.M., Bugnariu, N., Stevenson, M. and Popa, D.O.: RoDiCA: A Human-Robot Interaction System for Treatment of Childhood Autism Spectrum Disorders, *Proc. PETRA2012* (2012).
- [12] Sakamoto, D., Kanda, T., Ono, T., Ishiguro, H. and Hagita, N.: Android as a Telecommunication Medium with a Human-like Presence, *Proc. HRI2007*, pp.193–200 (2007).
- [13] Takeuchi, M., Kitaoka, N. and Nakagawa, S.: Generation of Natural Response Timing Using Decision Tree Based on Prosodic and Linguistic Information, *Proc. Interspeech2003* (2003).
- [14] Tanaka, K., Nakanishi, H. and Ishiguro, H.: Physical Embodiment can Produce Robot Operator's Pseudo Presence, *Frontiers in ICT*, Vol.2, No.8 (2015).
- [15] Tanaka, M., Ishii, A., Yamano, E., Ogikubo, H., Okazaki, M., Kamimura, K., Konishi, Y., Emoto, S. and Watanabe, Y.: Effect of a human-type communication robot on cognitive function in elderly women living alone, *Medical Science Monitor*, Vol.18, No.9, CR550–CR557 (2012).
- [16] Truong, K.P. and Poppe, R. and Heylen, D.: A rule-based backchannel prediction model using pitch and pause information, *Proc. Interspeech2010*, pp.26–30 (2010).
- [17] Ward, N. and Tsukahara, W.: Prosodic Features which Cue Back-channel Responses in English and Japanese, *Journal of Pragmatics*, Vol.32, No.8, pp.1177–1207 (2000).
- [18] Watanabe, T., Okubo, M., Nakashige, M. and Danbara, R.: InterActor: Speech-Driven Embodied Interactive Actor, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol.17, No.1, pp.43–60 (2010).



田中 一晶 (正会員)

2006年京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科卒業。2008年同大学大学院工芸科学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。2011年同大学院工芸科学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。同年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻特任助教。2015年より関西学院大学理工学部特任講師。人とインタラクションを行うエージェントやロボットの設計に興味を持つ。



山下 直美 (正会員)

1999年京都大学工学部情報工学科卒業。2001年同大学大学院情報学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話(株)コミュニケーション科学基礎研究所入所。博士(情報学)。CSCW, HCIの研究に従事。



中西 英之 (正会員)

1996年京都大学工学部情報工学科卒業。1998年同大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。2001年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻博士課程修了。博士(情報学)。同年同専攻助手。2006年より大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻准教授。空間共有や存在感伝達のためのアバタやロボットに興味を持つ。2002年度坂井記念特別賞。2004年度テレコムシステム技術賞。2006年度文部科学大臣表彰科学技術賞。



石黒 浩 (正会員)

1991年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。その後、京都大学情報学研究科助教授、大阪大学工学研究科教授等を経て、2009年より大阪大学基礎工学研究科教授。2013年大阪大学特別教授。ATR 石黒浩特別研究所客員所長(ATRフェロー)。専門は、ロボット学、アンドロイドサイエンス、センサネットワーク等。2011年大阪文化賞受賞。2015年文部科学大臣表彰受賞。