



| | |
|--------------|---|
| Title | ビデオ会議映像の部分的ロボット化による空間連続性創出と存在感伝達 |
| Author(s) | 大西, 裕也 |
| Citation | 大阪大学, 2020, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/76536 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

ビデオ会議映像の部分的ロボット化による
空間連続性創出と存在感伝達

大西裕也

2020年1月

大阪大学大学院工学研究科

要旨

映像技術，情報通信技術の発達により，職場やプライベートの環境でもビデオ会議が使われるようになった．しかし，ディスプレイに映し出されているのはリモート空間にいる人の姿であり，実際に対面して会話する時と比べ，ビデオ会議では対話相手の存在感が低下する．そのためソーシャルテレプレゼンス（遠隔地にいる相手とあたかも同じ部屋の中にいるかのような感覚になることができるという現象）が欠落する恐れがある．これは，遠隔地側の空間であるリモート空間とユーザ側の空間であるローカル空間の境界であるディスプレイが窓のような役割を持ち，二つの空間を分離させていることが原因ではないかと考えられる．本論文では，ディスプレイに映し出された空間を「リモート空間」，ユーザ側の空間を「ローカル空間」，ディスプレイを「境界面」，リモート空間とローカル空間にある物体が境界面で繋がっているかのように提示することを「空間の連続性を示す」と定義し，空間の連続性を示すデバイスとして，参加者の映像の一部をロボット化し，参加者の映像とそのロボットが空間の境界面で繋がっているように見えるシステムを提案する．これは，ビデオ会議の参加者がリモート空間とローカル空間の境界面を貫通しているように見えるデバイスである．

本論文の研究課題は，以下の3つである．1つ目は提案するシステムが従来のビデオ会議よりソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的に働くかどうかの調査，2つ目は境界面を貫通するものがどこまで複雑な形状をもっている必要があるのかの調査，3つ目は境界面が変形・移動するとソーシャルテレプレゼンスにどのような影響を及ぼすのかの調査である．

1つ目の研究課題に対し，空間の連続性を示すために用いる境界面を貫通するロボットハンドの設置位置について映像の表示面内と表示面外のどちらがソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的かを調査する予備実験と，開発したデバイスの有効性を確認するため，従来のビデオ会議や先行研究で提案された手法と比較する実験を行った．予備実験により，ディスプレイ面から対話相手の腕が飛び出るようなデザインがソーシャルテレプレゼンスを強化することがわかった．さらに，従来のビデオ会議や先行研究で提案された手法より本研究で開発したデバイスがソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的であることを確認した．しかし，境界面を貫通する物体が人の腕のような固有の/複雑な形状をもつ必要があるのかは不明であった．

そこで、2つ目の研究課題である境界面を貫通する物体がどこまで複雑な形状をもっている必要があるのかの調査を行った。実験では、境界面であるディスプレイを貫通しているように見せる物体が、身体以外の固有の形状をもつ指示棒である手法、固有の形状をもたないレーザポインタの光である手法を提案し比較した。結果より、ロボットアームといった複雑な形状だけではなく指示棒といった単純な形状をもった物体を提示する方法でも十分な効果があること、また、レーザポインタの光のような固有の形状をもたない物体を提示する方法では効果がないことがわかった。

3つ目の研究課題に対し、複数のディスプレイを組み合わせることで境界面を変形させることにより貫通オブジェクトが境界面に干渉する度合いと、境界面の位置により変化するローカル空間の領域の広さについて、それぞれ存在感がどの程度伝達されているのかを調査する実験を行った。実験結果より、1) リモート空間あるいはローカル空間にいるユーザの身体動作が二つの空間の境界面に干渉する量を増やすこと、2) 身体動作が二つの空間の境界面に干渉する時にローカル空間の領域を増やすことの2つの要因がソーシャルテレプレゼンスを強化に効果があることが明らかになった。また、身体拡張型ビデオ会議では、ローカル空間にいるユーザが境界面に干渉する時にローカル空間の領域を減っているため、ユーザがリモート空間にいるように感じられることも明らかになった。

本論文では、これらの研究の結果を示し、空間の連続性を創出するデバイスとリモート空間にいる人の存在感をローカル空間に伝達する方法について論じる。

目次

| | |
|--------------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 背景 | 1 |
| 1.2 研究課題 | 5 |
| 1.3 論文の構成 | 6 |
| 第2章 関連研究 | 8 |
| 2.1 ビデオ会議とソーシャルテレプレゼンス | 8 |
| 2.2 机上映像表示によるソーシャルテレプレゼンスの強化 | 9 |
| 2.3 ビデオ会議の多人数同時利用 | 9 |
| 2.4 鏡型ビデオ会議とビデオ会議映像の重畳 | 10 |
| 2.5 テレプレゼンスロボットによる存在感の伝達 | 11 |
| 2.6 ビデオ会議の映像のロボット化による存在感の伝達 | 12 |
| 第3章 ビデオ会議映像を部分的にロボット化するデバイスの構造 | 13 |
| 3.1 遠隔指差しロボットアーム | 13 |
| 3.2 遠隔指相撲ロボットハンド | 16 |
| 3.3 レーザポインタによる遠隔ポインティング | 19 |
| 3.4 指示棒による遠隔ポインティング | 21 |
| 3.5 空間重畳型ビデオ会議システム | 22 |
| 3.5 身体拡張型ビデオ会議システム | 24 |
| 第4章 身体の部分的ロボット化に関する調査 | 27 |
| 4.2 身体の部分的ロボット化の効果の検証 | 27 |
| 4.2.1 仮説 | 27 |
| 4.2.2 実験条件 | 28 |
| 4.2.3 実験環境 | 28 |
| 4.2.4 実験内容 | 29 |
| 4.2.5 被験者 | 30 |

| | |
|----------------------------|----|
| 4.2.6 実験結果 | 30 |
| 4.1.1 予備実験 | 31 |
| 4.1.1 仮説 | 32 |
| 4.1.2 実験条件 | 33 |
| 4.1.3 実験環境 | 34 |
| 4.1.4 実験内容 | 35 |
| 4.1.3 被験者 | 36 |
| 4.1.4 実験結果及び考察 | 36 |
| 第5章 存在感を伝達するミニマルデザインに関する調査 | 38 |
| 5.1 仮説 | 40 |
| 5.2 実験環境 | 40 |
| 5.2 実験 5-1 | 41 |
| 5.3.1 実験 5-1 内容 | 42 |
| 5.3.2 実験 5-1 被験者 | 42 |
| 5.3.3 実験 5-1 結果 | 43 |
| 5.4 実験 5-2 | 45 |
| 5.4.1 実験 5-2 内容 | 45 |
| 5.4.2 実験 5-2 被験者 | 45 |
| 5.4.3 実験 5-2 結果 | 46 |
| 5.5 考察 | 48 |
| 5.5.1 貫通オブジェクトを提示する効果 | 48 |
| 5.5.2 空間を差されている感覚 | 49 |
| 5.5.3 距離感 | 49 |
| 第6章 存在感の伝達をより強化する方法に関する調査 | 51 |
| 6.1 仮説 | 52 |
| 6.2 実験 6-1 | 53 |
| 6.2.1 実験 6-1 条件 | 53 |
| 6.2.2 実験 6-1 環境 | 54 |
| 6.2.3 実験 6-1 内容 | 54 |
| 6.2.4 実験 6-1 被験者 | 56 |
| 6.2.5 実験 6-1 結果 | 56 |

| | |
|-------------------------|----|
| 6.3 実験 6-2 | 58 |
| 6.3.1 実験 6-2 条件 | 58 |
| 6.3.2 実験 6-2 環境 | 58 |
| 6.3.3 実験 6-2 内容 | 60 |
| 6.3.4 実験 6-2 被験者 | 61 |
| 6.3.5 実験 6-2 結果 | 61 |
| 6.4 考察 | 62 |
| 6.4.1 ソーシャルテレプレゼンス | 62 |
| 6.4.2 実験中に見られた被験者の行動 | 64 |
| 第 7 章 考察 | 65 |
| 7.1 空間の連続性とソーシャルテレプレゼンス | 65 |
| 7.2 空間の連続性を示すデバイスの応用例 | 67 |
| 7.3 バーチャルエージェントの存在感強化 | 70 |
| 第 8 章 総括 | 72 |
| 参考文献 | 74 |
| 業績リスト | 83 |
| 謝辞 | 86 |

第1章 序論

1.1 背景

ビデオ会議は遠隔地にいる人とお互いの顔を見ながらリアルタイムに双方向の対話ができるシステムである。映像技術、情報通信技術の発達により、職場やプライベートの環境でもビデオ会議が使われるようになった。しかし、ディスプレイに映し出されているのは遠隔地にいる人の姿であり、実際に対面して会話する時と比べ、ビデオ会議は対話相手の存在感が低下する [1]。つまり、ソーシャルテレプレゼンスが欠落する恐れがある。ソーシャルテレプレゼンスとは、遠隔地にいる相手とあたかも同じ部屋の中にいるかのような感覚になることができるという現象である [2]。また、ソーシャルテレプレゼンスは、同室感と表現することもできる。ソーシャルテレプレゼンスを強化するためには、遠隔地にいる対話相手の存在感をもう一方の空間であるユーザ側の空間に伝達する必要がある。過去のビデオ会議の研究によって、等身大映像を表示したり、アイコンタクトを成立させるようにすることでソーシャルテレプレゼンスを強化することがわかっている。しかし、一般的なビデオ会議でソーシャルテレプレゼンスが不十分である理由は、遠隔地側の空間とユーザ側の空間の境界であるディスプレイが窓のような役割を持ち、二つの空間を分離させているためではないかと考えられる。

本論文では、ディスプレイに映し出された空間を「リモート空間」、ユーザ側の空間を「ローカル空間」、ディスプレイを「境界面」と定義する。ソーシャルテレプレゼンスを強化するためには、2つの異なる空間があたかも同じの空間のように、空間の中にいるユーザが感じる必要がある。ここで、空間 A と空間 B が繋がっている状態を考える（図 1-1）。

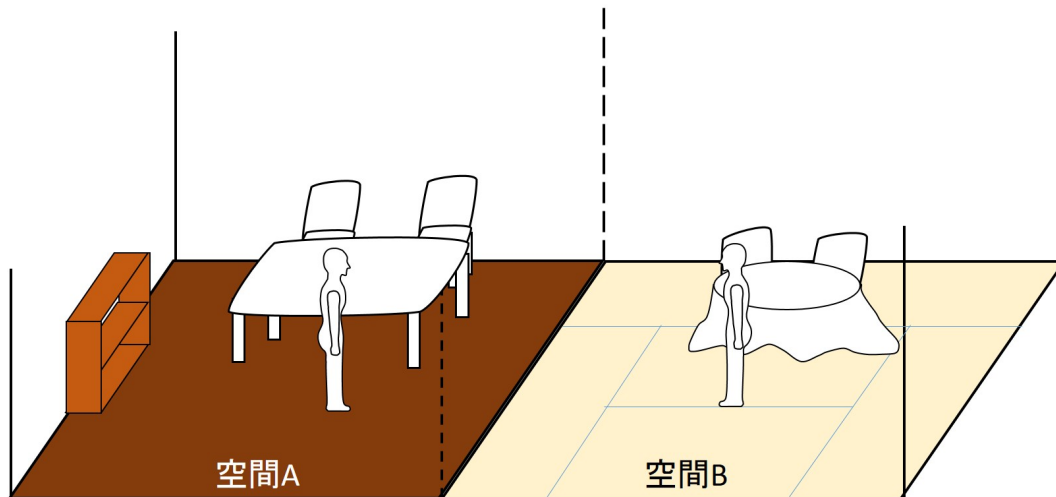


図 1-1 二つの空間を繋げる（実環境）

これは、和室と洋室，学生部屋と作業部屋といった役割の異なる2つの部屋が壁や扉などがなく隣接している状態を示している．空間Aにいるユーザは空間Bにいるユーザと同じ空間にいると感じ，同様に空間Bにいるユーザは空間Aにいるユーザと同じ部屋にいると感じる．これは，空間Aと空間Bの間に壁や扉といった部屋の境界面がないため，役割の異なる2つの空間が1つの空間であるように見えるからである．ビデオ会議では，空間Aがローカル空間，空間Bがリモート空間となり，ビデオ会議で用いるディスプレイが境界面となる（図1-2）．

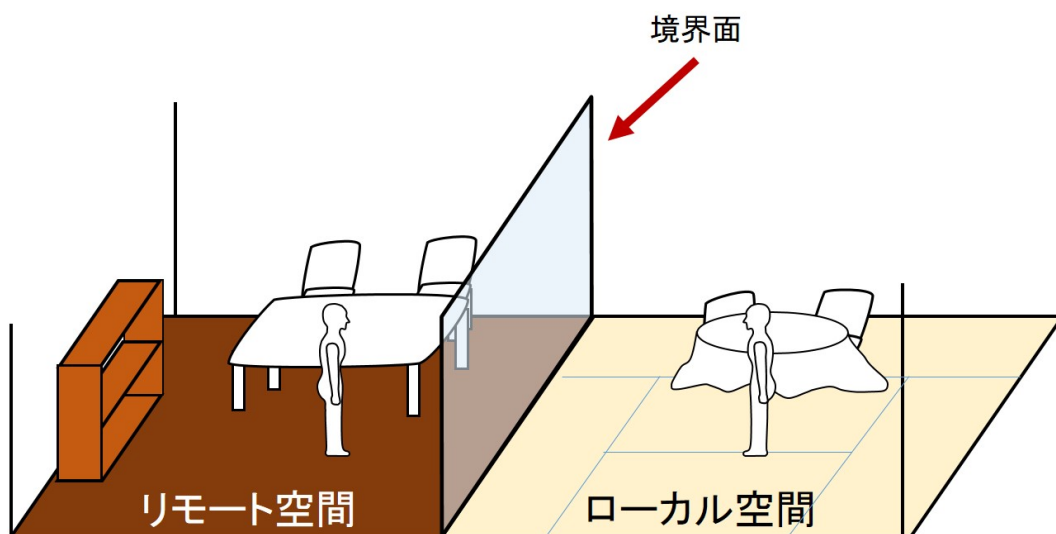


図 1-2 二つの空間を繋げる（ビデオ会議）

ビデオ会議は、リモート空間とローカル空間が繋がっているように見ることは難しい。これの原因は2つ考えることができる。1つ目は、一般的にビデオ会議で使用しているディスプレイのサイズは部屋の壁ほど大きくなく、ディスプレイの枠の存在により、ディスプレイが窓のように見えてしまい、結果的に2つの空間が分離しているように感じてしまうことである。また、図1-1に示すような部屋の壁ほどのサイズのあるディスプレイを設置することは現実的ではない。このような問題を解決するための一つの方法として、テレプレゼンスロボットがある（図1-3）。テレプレゼンスロボットは、ユーザの顔映像と人の形を模したロボットが首で接続されているデバイスである。リモート空間にあるテレプレゼンスロボットをローカル空間にいるユーザが遠隔操作することができる。つまり、テレプレゼンスロボットとは、遠隔地にユーザの分身を送ることができるデバイスである。しかし、テレプレゼンスロボットのディスプレイに映し出された映像は遠隔操作者の顔のみであるため、テレプレゼンスロボットを設置している側の空間のユーザは遠隔操作者の空間の様子を確認することができない。そのため、和室であれば座椅子や茶菓子など、洋室であればテーブルやクッションなど、学生部屋であれば参考書、作業部屋であれば工具といったそれぞれ異なる空間にある物を異なる空間にいるユーザが双方向的に見る、指さす、渡すことは難しい。ビデオ会議は、お互いの空間をそれぞれのユーザが確認することができるが、前述のように、2つの空間が分離しているように感じてしまう。

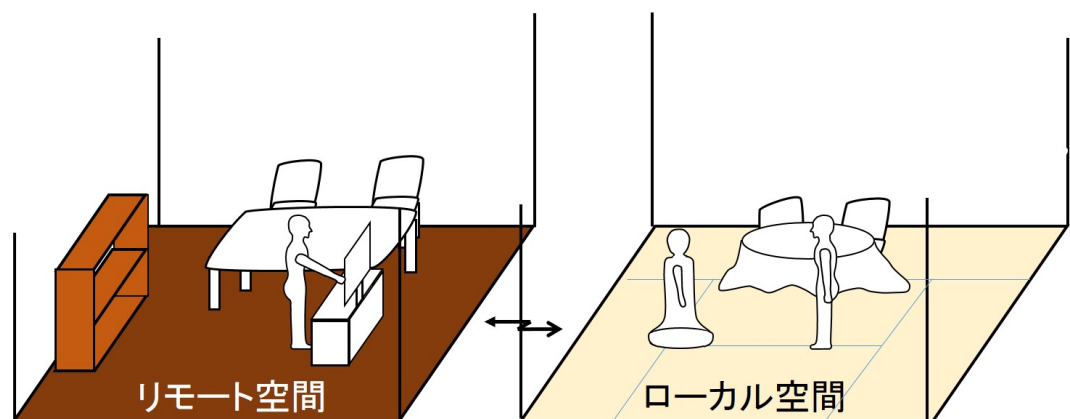


図 1-3 二つの空間を繋げる（遠隔操作ロボット）

2つ目は、境界面にディスプレイがあるため、それぞれの空間にいるユーザはもう一方の空間に物理的にアクセスすることができないことである。前述にあった和室と洋室の例では和室にいるユーザは洋室にアクセスすることができ、洋室の空間的な認識は容易であ

る。しかし、境界面がディスプレイであると映像でしか確認ができないため、もう一方の空間の空間的認識は難しい。本研究では、ビデオ会議において空間 A にいるユーザが空間 B にいるユーザにアクセスできるようなデバイスを提案する。具体的には、リモート空間である空間 A にいるユーザの一部がローカル空間である空間 B に境界面を貫通し、境界面への意識を軽減させることで、同じ部屋にいる感覚つまりソーシャルテレプレゼンスの強化を試みる。リモート空間にいるユーザが境界面を貫通し、ローカル空間にアクセスしている様子を示す概念を図 1-2 に示す。リモート空間にいる人の身体やリモート空間にある物の一部が、境界面であるディスプレイを超えてローカル空間にあり、空間が繋がっているように見える。境界面を貫通しているように見せるために、リモート空間にいる人の身体やリモート空間にある物をローカル空間に提示し、それが映像と繋がっているように見せる必要がある。本研究では、参加者の映像の一部をロボット化し、参加者の映像とそのロボットが空間の境界面で繋がっているように見えるシステムを提案する。図 1-3 にその一例を示す。これは、対面における指差し動作を遠隔地間で再現することで、リモート空間にいる人の映像とロボットによる指示動作を両方提示することにより、ビデオ会議の参加者がリモート空間とローカル空間の境界面を貫通しているように見えるデバイスである。また、リモート空間にある人や物の一部をロボット化しビデオ会議の映像表示面に付加したデバイスであり、従来のテレプレゼンスロボットのようリモート空間にいる人の顔映像を映すディスプレイを人の形状を模したロボットの頭部に取り付けたものとは異なる。本論文では、図 1-2 で示したようリモート空間とローカル空間の境界面を貫通するデバイスの有効性を調査するとともに、こういったデザインが存在感の伝達に効果的であるのかについて議論する。

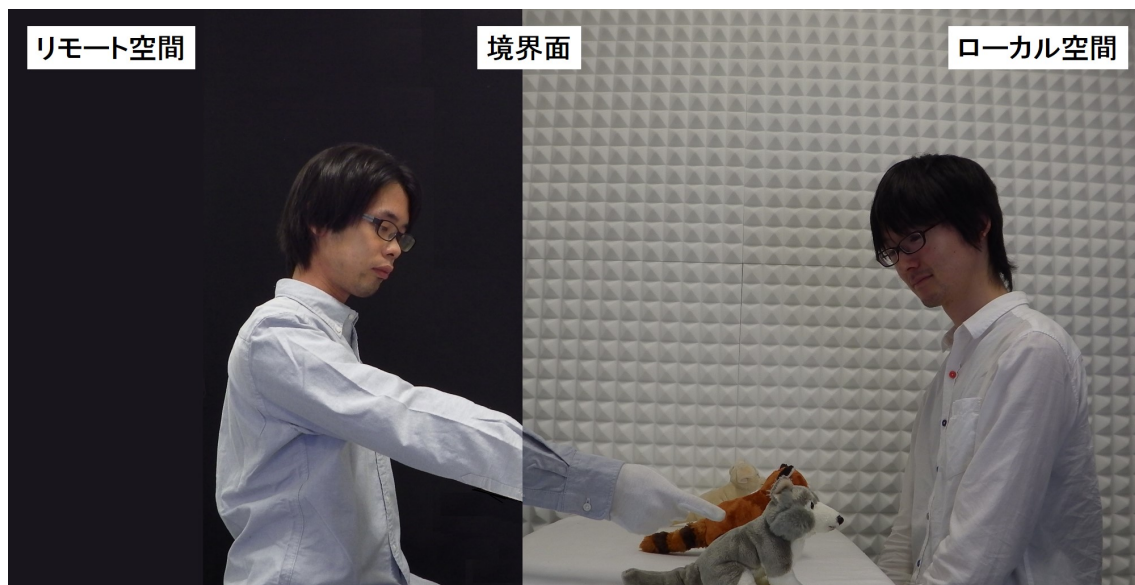


図 1-4 異なる空間へのアクセス



図 1-5 身体の一部のロボット化したデバイスの一例

1.2 研究課題

本研究の目的はビデオ会議においてこういったデザインが存在感の伝達に効果的に働くのかを調査することである。この目的を調査するため、以下の3つの研究課題を設定し、調査を行った。

1つ目の研究課題は、ディスプレイに映されたユーザの身体の一部をロボット化したデバイスを提案し、提案するシステムが従来のビデオ会議よりソーシャルテレプレゼンスの強

化に効果的に働くかどうかの調査である．開発したデバイスの有効性を確認するため，従来のビデオ会議や先行研究で提案された手法と比較する実験を行った．さらに，境界面を貫通するロボットハンドの提示方法はこういったデザインにすべきなのかを調査した．境界面を貫通するロボットハンドの設置位置について映像の表示面内と表示面外のどちらがソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的かを調査する実験を行った．

2つ目の研究課題は，境界面を貫通するオブジェクトが身体のように複雑な形状をもっている必要があるのかの調査である．1つ目の研究課題では，リモート空間にいる人の腕をロボット化し，リモート空間からローカル空間へ境界面を貫通しているように見えるデバイスを提案した．しかし，境界面を貫通する物体が人の腕のような固有の/複雑な形状をもつ必要があるのかは不明であった．2つ目の研究課題では，境界面であるディスプレイを貫通しているように見せる貫通オブジェクトについて，身体以外の固有の形状をもつ指示棒である手法，固有の形状をもたないレーザーポインタの光である手法を新たに提案し，人の腕のような固有の/複雑な形状をもつロボットハンドと比較する実験を行った．

3つ目の研究課題は，境界面が変形・移動するとソーシャルテレプレゼンスにどのような影響を及ぼすのかの調査である．複数のディスプレイを組み合わせることで境界面を変形させることにより貫通オブジェクトが境界面に干渉する度合いと，境界面の位置により変化するローカル空間の領域の広さについて，それぞれ存在感がどの程度伝達されているのかを調査する実験を行った．

1.3 論文の構成

本論文の構成について説明する．第1章では，テレプレゼンス技術及びソーシャルテレプレゼンスの強化についての背景を述べ，存在感を伝達するための課題についてまとめている．第2章では，テレプレゼンス技術やソーシャルテレプレゼンスについての関連研究をまとめ，本研究の位置づけについて述べている．第3章では，本研究で開発した複数のデバイスの構造についてまとめている．第4章では，境界面を貫通するロボットハンドの設置位置について映像の表示面内と表示面外のどちらがソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的かを調査する予備実験と，開発したデバイスの有効性を確認するため従来のビデオ会議や先行研究で提案された手法と比較する実験を行った結果についてまとめている．第5章では，ソーシャルテレプレゼンスの強化に境界面を貫通する物体が固有の形状をもつ必要

があるのか，また貫通する物体の形状が複雑である必要があるのかを調査する実験を行った結果についてまとめている．第6章では，複数のディスプレイを組み合わせる境界面を変形させることにより貫通オブジェクトが境界面に干渉する度合いと，境界面の位置により変化するローカル空間の領域の広さについて，それぞれ存在感がどの程度伝達されているのかを調査する実験を行った結果についてまとめている．第7章では，研究全体の考察と貫通オブジェクトを使用したデバイスの応用例についてまとめている．第8章では，研究全体の総括を行っている．

第2章 関連研究

本章では，ソーシャルテレプレゼンを強化する関連研究を紹介し，本研究の位置づけを述べる．

2.1 ビデオ会議とソーシャルテレプレゼンス

ビデオ会議は，NLS(oN-Line System)が起源とされており，遠隔地間で音声や映像を用いて対話を可能とした [3]．一方，テレプレゼンスは，人間の代わりに危険地域を作業する遠隔操作ロボットが発端とされており，主に宇宙開発や原子力発電で使用することを目的とした研究であった [4]．遠隔地の人間が立ち入れない場所へ身体能力を拡張する技術として，Marvin Minsky は遠隔地にいるかのような感覚をテレプレゼンスと提唱した [5]．この頃は，遠隔地にあるロボットの操作性を向上することを目的としてテレプレゼンスという言葉が使用されていた．テレプレゼンスが現在のような使われ方になったのは，遠隔操作に人間の視点を加えたことにある [6]．Buxton は，離れた場所のユーザと共有する感覚をテレプレゼンスと述べており [7]，遠隔地間の対人コミュニケーションの研究へ発展させた．De Greef は，ソーシャルテレプレゼンスについて言及し，遠隔地間にいるユーザ同士が同じ部屋にいる感覚は，遠隔地にユーザの存在感を伝達することによって強化され，それらの測定手法について述べている [2]．

これまでにソーシャルテレプレゼンスを強化する様々な方法が提案されてきた．ビデオ会議は，遠隔地に映像や音声をリアルタイムで送信することで対面環境を仮想的に実現する方法 [8] [9] であり遠隔地の人の映像を等身大で提示する方法 [10] や，アイコンタクトが成立するようにカメラとディスプレイを設置する方法 [11] [12]，目線の高さを合わせる方法 [13] によって，ソーシャルテレプレゼンスが強化されることがわかっている．また，遠隔地にいるユーザの上半身の映像は，顔映像よりも強い一体感を生み出すことがわかっている [14]．

2.2 机上映像表示によるソーシャルテレプレゼンスの強化

ビデオ会議の研究は共同作業支援にも発展してきた。Rapport では、音声と共同描画ソフトウェアを組み合わせ、遠隔共同作業システムを提案した [15]。このシステムでは、ビデオ会議ではなく、ユーザは顔写真で表示され、音声による会話とテレポインタを使用していた。TeamWorkStation [16] では、机上的様子をデスクトップ上に表示し、画面を半透明化し重畳させることで、お互いの作業の様子がわかるようになった。このシステムでは、対話相手の映像と作業している手元の映像が異なるウィンドウで表示されていた。ClearBoard [17] や Video Whiteboard [18] では、ガラスの板やホワイトボードを挟んで向かい合っている状況を想定したシステムが提案された。これらは、ユーザの上半身と描画面を一つのウィンドウに表示することによりアイコンタクトの成立や相手がどこに注目しているのかを確認することを可能とした。また、机上にリモート空間の映像を表示する方法が提案されている。VideoDraw [19]、VideoArms [20]、C-Slate [21]、DIGITABLE [22] などの研究では机上に対話相手の腕の映像を表示し、ジェスチャーの有用性を検証した [23] [24]。DIGITABLE では、従来のビデオ会議に加えて机上に対話相手の腕の映像を表示することで水平面の空間を共有した [22]。VideoArms では、スタイラスペンと映像を組み合わせることで接触跡を追加しスケッチを可能にした [20]。Agora では、遠隔地の対話相手の正面映像に加え、机上の共有領域を用いた資料やジェスチャーの提示によって、身体動作と資料の結びつきを提示した [25]。LazySusan [26] や Telematic Dinner Party [27] では遠隔地間で同期回転するテーブルを用意し、テーブル上の様子をお互いに投影する方法が提案された。また、Remote Lag という手法によりジェスチャー映像が実物や人の手などに隠れて見えなくなってしまう状況を緩和し [28]、高さの表現を付加することや [29] [30]、指示対象を色や形で視覚的に提示することで [31]、ジェスチャーの解釈を改善できることが示された。また、指示棒の影を投影することで遠隔地間の机上で指示を共有する投影映像を用いる方法が提案された [32]。これらの方法は全てリモート空間にいるユーザの様子を映像のみで伝えられていた。

2.3 ビデオ会議の多人数同時利用

大型のディスプレイやスクリーンを用いることで複数人が会話できるシステムも提案されている。VideoWindow [33] や MedeiSpace [34] では、遠隔地間のアウェアネスなどを支援

し、複数人が会話できるように大型のスクリーンを配置し空間そのものを常時接続した。これらは、臨場感通信会議とも呼ばれ [35], Cruiser [36] [37] や Montage [38] では、インフォーマルな会話支援を行った。t-Room では、等身大の人物像を表示できる大画面のディスプレイを、表示面を内側に向けて円環上に配置した [39]。これらの研究は、ユーザの振る舞いは映像の中で完結されている。

2.4 鏡型ビデオ会議とビデオ会議映像の重畳

また、ビデオ会議の表示面であるディスプレイを窓や鏡に見立ててリモート空間の映像を表示する方法が提案されてきた。例えば、映像表示面を窓とみなし、窓越し映像を生成する方法 [40] が提案されている。また、映像表示面を鏡とみなし、鏡越しで会話している感覚を生み出す鏡型ビデオ会議が提案されている。代表的なシステムとして HyperMirror (超鏡) がある [41]。これは、使用者のいる空間を鏡像で撮影した映像に遠隔地の対話相手の人物領域を切り出して合成するものである。このように鏡像を用いて共有空間を提示するシステムは多数存在する [42] [43] [44] [45]。Well というシステムでは、井戸を覗き込むと水面に顔が反射するというメタファに基づいて、合成映像を提示するディスプレイを水平に設置し、上から覗き込むと使用者と遠隔地の対話相手がそのディスプレイに映るようになっている [46]。Shadow Communication では使用者の正面にある障子インターフェースに使用者および遠隔地の対話相手の影が投影され、影を存在のエージェントとして双方向での共有空間を提案している [47]。指示者鏡像型映像を用いた手法により遠隔協調作業をする際に生じるオクルージョン問題を緩和させた [48]。また、リモート空間とローカル空間の映像の境界部に同じ物体をつながっては位置することで、別々の空間にある物体が1つの物体であるかのような感覚を創出する方法が提案されている [49] [50]。

また、遠隔地間で取得した映像を仮想空間で重畳させソーシャルテレプレゼンスを強化する方法も提案されている [51] [52] [53] [54]。Holoportation によって対話相手の空間に全身を重畳する方法 [55] や、ドア型のインタフェースを用いて重畳表示を行い、相手が遠隔地から侵入される感覚を生み出す方法 [56] が提案されている。

これらの手法は、ディスプレイを窓や鏡と表現することや拡張現実によって表現することで、リモート空間とローカル空間を1つの空間であるように提示していた。

2.5 テレプレゼンスロボットによる存在感の伝達

また、ロボットを介して遠隔コミュニケーションを支援する様々な研究が提案されている。MM-Spaceでは、空間を隔てた会話の状況を実世界に再構成するためのシステムである[57]。これは、透過型スクリーンに等身大の人物像が投影され、そのスクリーンはアクチュエータが接続されており、遠隔参加者の顔の動きに合わせて人物を投影したスクリーンをパン・チルトすることが可能となっており、ユーザの視線方向をより分かりやすくすることを目指した。

また、ロボットを介した遠隔コミュニケーションの代表的なシステムとしてテレプレゼンスロボットがある。テレプレゼンスロボットとは、物理空間を遠隔操作によって移動できるビデオ会議端末である。テレプレゼンスロボットは、その端末の移動が存在感の強化に有効であり[58]、カメラの前後移動によって生じる運動視差や[59]、対話相手の前後移動に同期したディスプレイの物理的な移動が[60]、ソーシャルテレプレゼンスを強化することがわかっている。これまで、様々なテレプレゼンスロボットが開発されてきた[61][62][63][64][65]。GestureManでは、テレプレゼンスロボットに搭載したレーザポインタで指示する方法[66]が提案されている。テレプレゼンスロボットではなく、ウェアラブルデバイスとして首にかけるTelepointer[67]や肩にカメラを乗せるWACL[68]がレーザポインタで指示する方法が提案されている。また、遠隔操作者に着目し、リモート空間にあるロボットの視覚・聴覚・触覚をロボットの操作者にフィードバックされるテレイグジスタンスロボットが提案されている[69]。また、JackIn Spaceでは、ヘッドマウントディスプレイを装着することにより、リモート空間の映像を1人称視点と3人称視点を切り替えて見ることにより遠隔地の状況を理解しやすくするようにした[70]。しかし、テレプレゼンスロボットやテレイグジスタンスロボットは活用が期待される一方、会場への立ち往生や音声調整の問題など、自律移動型システムでありながら、人の手を必要とすることが多いという問題点もある[71]。また、人間に近い外見を備えたものに、アンドロイドロボットがある。アンドロイドロボットは人型ロボットのことであり、モデルにした本人そっくりの見た目を持つ[72]。これらの研究は、ユーザの分身となるロボットを遠隔地から操作することで、リモート空間にいるユーザの存在感を伝達しており、ソーシャルテレプレゼンスを強化とは異なる手法である。

2.6 ビデオ会議の映像のロボット化による存在感の伝達

ビデオ会議の映像の一部をロボット化する方法も提案されている。これらの研究は、ビデオ会議とロボットを組み合わせるといったテレプレゼンスロボットと同じ共通点をもつが、人型ロボットにビデオ会議機能を付加したデバイスとビデオ会議にロボットを付加することで機能を拡張したデバイスという違いがある。ビデオ会議に握手用のロボットハンドを組み合わせ、身体接触の機能を付加する方法 [73] やテーブルに鉛直方向に可動式のピンを格子状に配置し、そのピンの個々の高低差によって遠隔地側の腕先の形状を描写する方法が提案されている [74]。また、リモート空間にいるユーザの映すディスプレイに凹凸表現を加えるにより、映像に臨場感を持たす研究も提案されている [75] [76]。ディスプレイの下部に窓口を設け、遠隔地間で紙資料を共有する方法が提案されている [77]。これらの研究は、リモート空間にいるユーザや物の一部をロボット化しローカル空間に提示されているが、こういった提示方法が最も適切なのかについて調べられていない。本研究では、ビデオ会議映像の一部をロボット化するとともに、どのようなデザインがソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的であるのかについて調査する。

第3章 ビデオ会議映像を部分的にロボット化するデバイスの構造

本研究では，参加者の映像の一部をロボット化し，参加者の映像とそのロボットが空間の境界面で繋がっているように見える複数のデバイスを開発した．これらのデバイスは，第1章で述べた研究課題に取り組むために開発しており，備わった機能を単純化している．本章では，開発した複数デバイスの構造や特徴について説明する．

3.1 遠隔指差しロボットアーム

まず初めに，遠隔指差しロボットアームの構造について説明する．遠隔指差しロボットアームはリモート空間にいるユーザの腕をロボット化し，ローカル空間にそのロボットアームを提示する（図3-1）．ロボットアームがリモート空間にいるユーザの腕の動きと同期しており，ロボットアームがユーザの腕であるように見えるデバイスである．実験では，身体の部分的ロボット化することによる効果を調べるため，開発したデバイスと従来のビデオ会議や先行研究で提案されている手法を比較する実験を行った．本節では遠隔指差しロボットアームの構造の構造について述べ，調査の内容については4章で述べる．

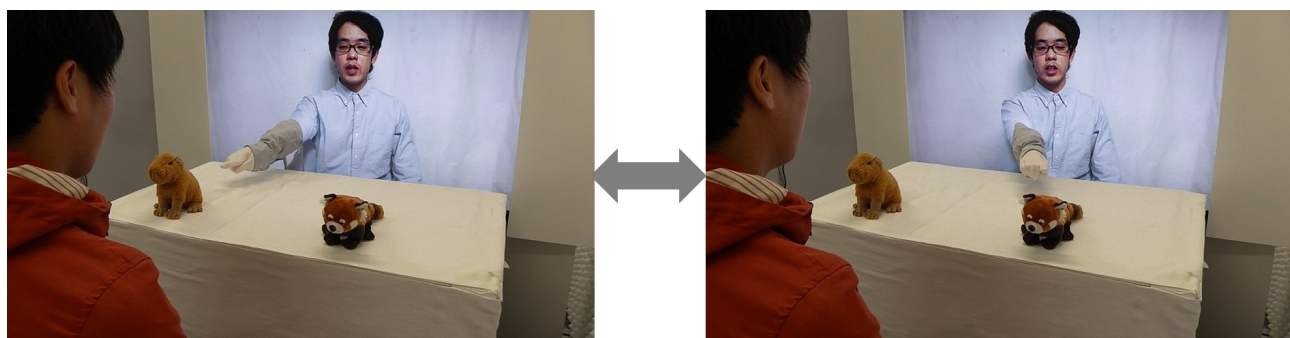


図 3-1 遠隔指差しロボットハンドの外観

遠隔指差しロボットアームは、リモート空間にいるユーザの映像を表示したディスプレイ上にユーザの腕の動きに同期して移動・回転・伸縮するロボットアームを付加したデバイスである。リモート空間にいるユーザの映像を等身大でディスプレイに表示し、そのディスプレイの下に直動位置決め機構を設置する（図3-2）。また、直動位置決め装置には、肘から先のロボットアームがアクリル板を介して接続されている。ロボットアームの根本にヨー方向に回転する1自由度の機構を備えている。位置決め機構とロボットアームの回転機構により、映像内の対話相手の腕の動きに同期してロボットアームがディスプレイの表示面を移動・回転する。その際、腕の角度によって画面から飛び出している部分の長さが変化するため、ロボットアームが映像に映った人の右肩の位置にあるときはロボットアームの長さが最も長く、ロボットアームが映像表示面の両端の位置にあるときはロボットアームの長さが最も短くなるように、伸縮機構によって長さを調整する（図3-3）。これは、ワイヤを巻き取り装置で引くことで伸縮させる機構であり、ワイヤは目立たないようにアクリル板のふちに沿わせるようにする。また、このデバイスは指示行為をロボット化しているため、ロボットアームの手部分は人差し指のみを伸ばした状態である指の形に固定し、身体接触を伴わないため、指や手のひらの内部はスポンジで埋めた。また、手の部分は手袋を覆い自然に見えるようにした。

リモート空間にいるユーザの腕の動きは画像解析によってリアルタイムに取得し、映像の腕とロボットアームが同期して動く。そのため、遠隔指相撲ロボットハンドのようにリモート空間にいるユーザはセンサを装着する必要はない。映像とロボットアームとの境界面から先の腕の映像は不要であるため、クロマキー合成によって消去する（図3-4）。消去した部分の映像は、予め用意した背景の映像で埋める。また、映像に映されている人の腕とロボットアームの接続位置は、ロボットアームが移動しているときでも常に一致している必要がある。そのため、直動位置決め機構は指示するにあたり腕を振る最高速度に追従するように設計している。しかし、ロボットアームが最高速度のまま移動するとロボットらしさが出てしまうため、腕振りの終点位置には移動速度を遅くするように制御した。回転・伸縮機構も同様に腕の振り始めは速く、振り終わりは遅くなるように回転・伸縮速度を制御した。

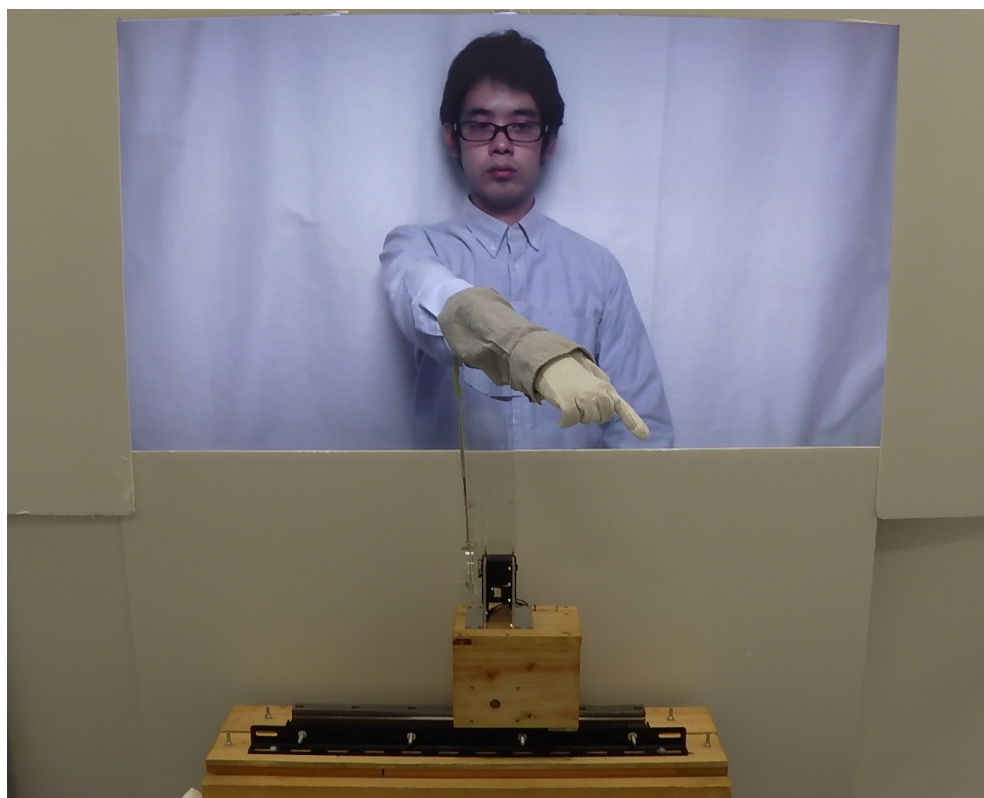


図 3-2 遠隔指差しロボットハンドの直動位置決め機構

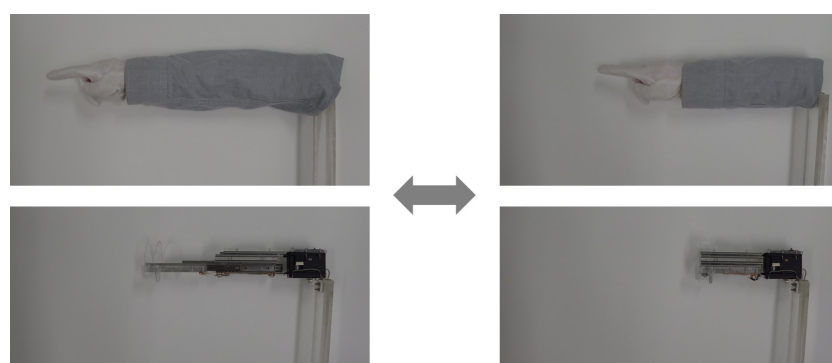


図 3-3 遠隔指差しロボットハンドの伸縮機構

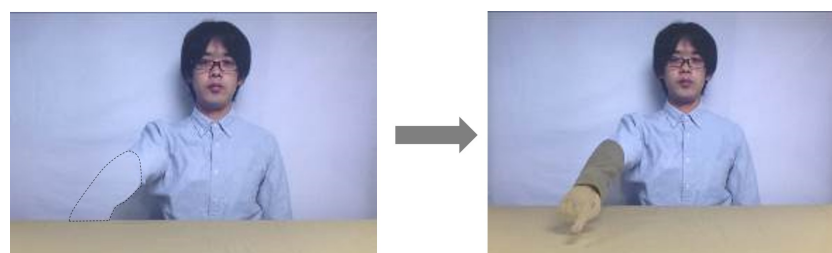


図 3-4 腕の映像消去と遠隔指差しロボットハンドの接続

3.2 遠隔指相撲ロボットハンド

先行研究 [73] でビデオ会議に握手用のロボットハンドを組み合わせ身体接触の機能を付加することによってソーシャルテレプレゼンスの強化を行った。この実験で使用した装置は、リモート空間にいる人を映したディスプレイの下から手を出している位置にロボットハンドを設置したものであった。この研究は、身体接触についての効果を調査しており、ロボットハンドの設置位置については調査されていなかった。ロボットハンドの設置位置を調査するため、遠隔指相撲ロボットハンドを開発した（図3-5）。指相撲を採用した理由は、指相撲は握手のようにユーザ同士が対面した時の身長や姿勢に考慮する必要がなく、手や腕の位置を固定する手遊びインタラクションであるためである。実験では、指相撲ロボットハンドの設置位置について映像の表示面内と表示面外のどちらがソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的かを調査した。本節では遠隔指相撲ロボットハンドの構造について述べ、調査の内容については4章で述べる。

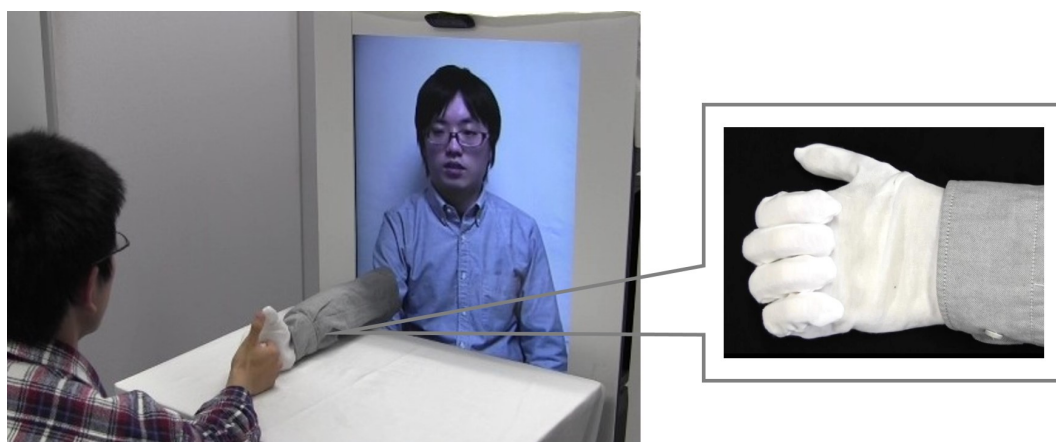


図 3-5 遠隔指相撲ロボットハンドの外観

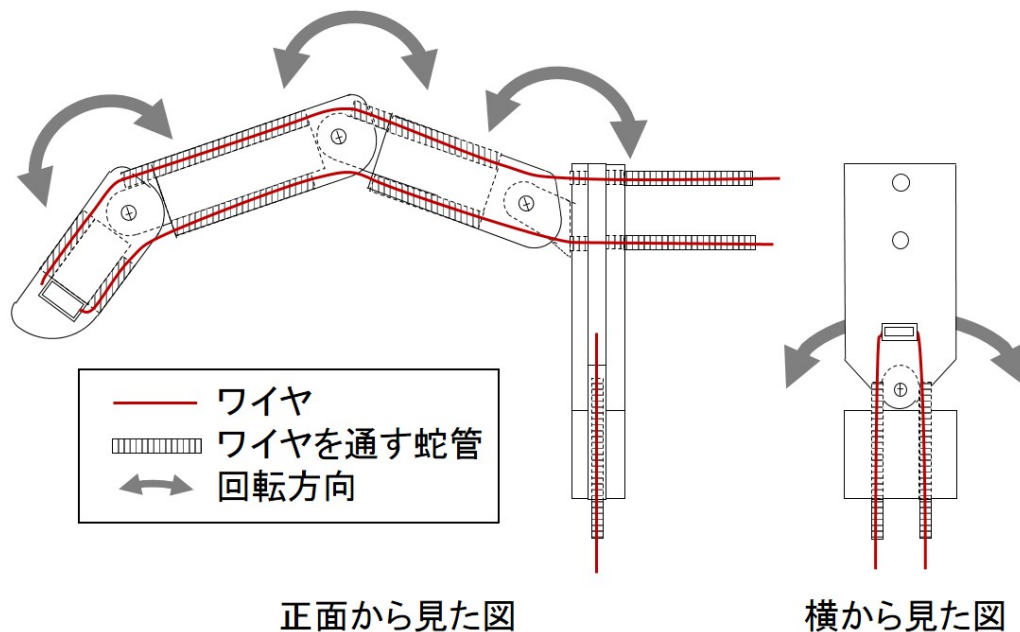


図 3-6 遠隔指相撲ロボットハンドの親指の構造

遠隔指相撲ロボットハンドは、指相撲を実現するためにロボットハンドの親指が自由に動く構造になっている。リモート空間にいる人の映像を等身大でディスプレイに表示し、ロボット化しているハンドの肘が、リモート空間にいる人の右肘と繋がって見えるように設置する。リモート空間とローカル空間にいる人が座る位置や姿勢を固定化させるため、ロボットハンドが動作するのは親指のみとし、他の指や肘や手首は動かないようにしている。親指の自由度は、上下方向の屈伸運動と、左右方向の回転運動の、合計2自由度となっている。図3-6に指を動かす機構を示す。正面から見た図は親指の屈伸運動を示しており、横から見た図では親指の回転運動を示している。ロボットハンドの親指には屈伸運動用と回転運動用のワイヤがそれぞれ通っており、内部で固定されている。ワイヤの另一端はモータに固定されており、モータでワイヤを引っ張ることで、屈伸運動や回転運動を行なっている。また、ワイヤは摩擦を軽減するために指の内部に埋め込まれた蛇管の中を通っている。また、遠隔指相撲ロボットハンドは、曲げセンサと加速度センサを用いてリモート空間にいるユーザの動きに同期させている。親指が動作している様子を図3-7に示す。



図 3-7 遠隔指相撲ロボットハンドの親指の動き

遠隔指相撲ロボットハンドを用いるには、相手にロボットハンドへの不自然さを感じさせないことが重要である。そのためには、ロボットハンドが人間の手に近い見た目や接触時に人間の手に近い感覚であることが望ましい。先行研究 [73] では、ロボットハンドの見た目は白の手袋をすることで違和感のない形にし、手に触れるコミュニケーションを行う場合、柔らかさや温かさが必要であることが分かっている。また、人肌ゲルを用いた柔らかいロボットハンドを用いることで、良い印象を与えることが示唆されている [1]。開発した遠隔指相撲ロボットハンドの外観は、図 3-1 のように手袋をし自然に見えるようにした。また、図 3-8 に示すように人肌の柔らかさに近いとされる硬度 0 の人肌ゲルで手の全体を覆うことで、柔らかさを再現した。手のひらの部分にはスポンジが埋め込まれている。また、柔らかさを感じることで、人工物であるという感覚が緩和される。また、遠隔指相撲ロボットハンドは、握った際に接触面から人肌のような温度を感じることができる。手の全体を温かくするために、指の下の面と手の平にフィルムヒータが貼り付けてある。このフィルムヒータに電圧をかけることによって、温度を再現した。温度を一定に保つために、実験の前後で温度計を用いて温度を測定した。先行研究 [73] に行った実験では、ロボットハンドの表面温度を、人肌の温度といわれる約 32℃ に設定していたが、温度に気づく被験者が少なく、温度を 37℃ よりも高くしたところ、熱いと感じる被験者が多かった。そのため、温度に気付き、熱すぎると感じない、約 37℃ となるように設定した。



図 3-8 遠隔指相撲ロボットハンドの内部構造

3.3 レーザポインタによる遠隔ポインティング

遠隔指相撲ロボットハンド及び遠隔指差しロボットアームは，リモート空間にいる人の身体の一部である腕を境界面を貫通してローカル空間に提示していた．次に提案するレーザーポインタによる遠隔ポインティングデバイスは，身体以外の物体で貫通オブジェクトを提示するシステムである（図 3-9）．これは，リモート側にいるユーザが把持したレーザーポインタを使ってローカル側の対象物に照射することができ，身体で行う指差しと同じような役割を果たすことができる．また，このデバイスはレーザー光によって境界面を貫通しているように提示したものであり，このデバイスでもソーシャルテレプレゼンスの強化に効果があるのかを調査した．本節ではこのデバイスの構造について述べ，調査の内容については第 5 章で述べる．

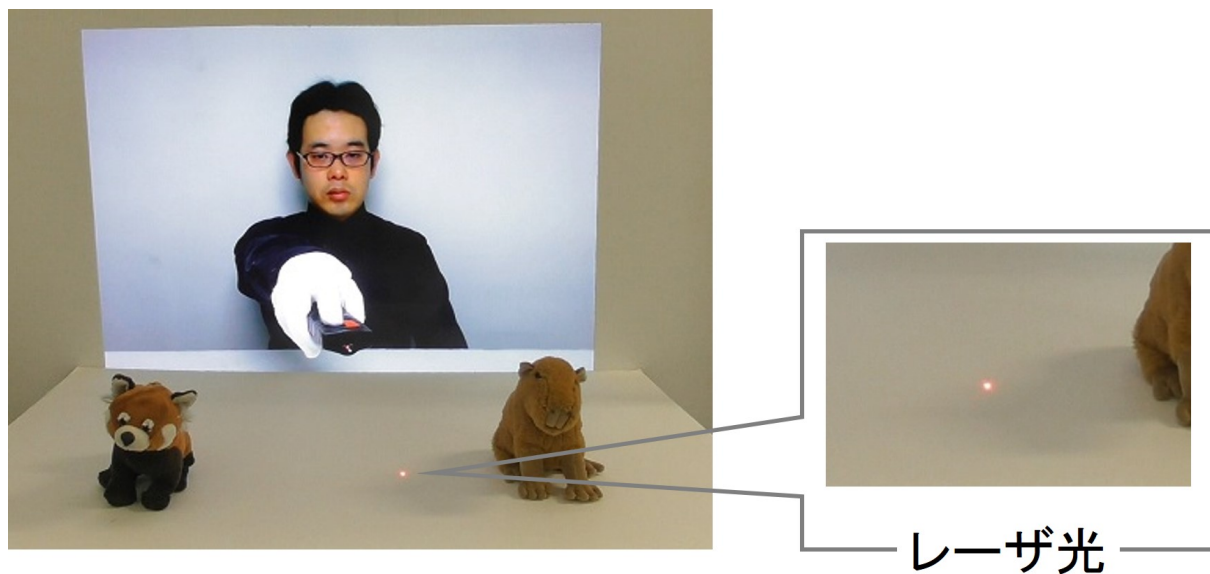


図 3-9 レーザポインタによる遠隔ポインティング

レーザーポインタによる遠隔ポインティングでは，リモート側にいるユーザが把持したレーザーポインタを使ってローカル側の対象物に照射することができる．レーザーポインタは，リモート側とローカル側それぞれ一つずつあり，リモート側はユーザが把持し，ローカル側は天井に設置されている．リモート側には，ウェブカメラを2台設置している．リモート側にいるユーザの正面のカメラから得られた映像をローカル側に設置したディスプレイに等身大で表示する．また，リモート側にいるユーザの腕を撮影するカメラをユーザの上部に設置している．レーザーポインタには赤いマーカが付いており，リモート側に対話相手の腕を撮影するカメラの画像からレーザーポインタの位置つまり座標の情報を画像処理によってピクセル単位でリアルタイムに習得する．ローカル側の天井に設置されたレーザーポインタはサーボモータと接続されており，リモート側の水平映像から得た腕の座標情報に同期して動く（図 3-10）．これによりレーザーポインタは左右方向に照射することができる．また，被験者の頭上にレーザーポインタが設置してあることを悟られないようにするため，被験者とレーザーポインタの間には目隠しとなるカバーが設置されている．

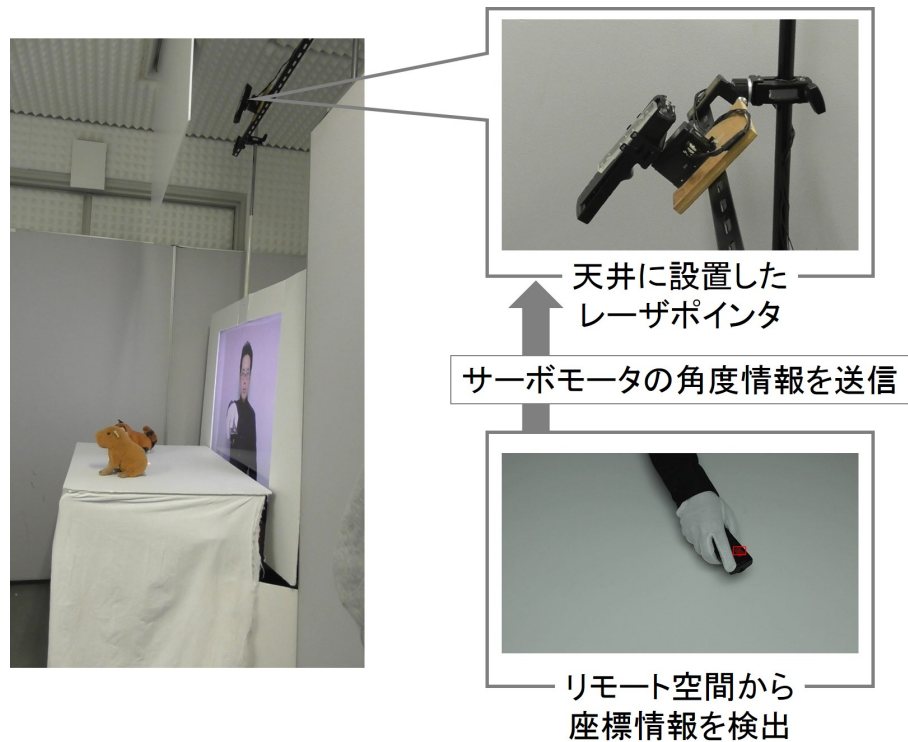


図 3-10 レーザポインタによる遠隔ポインティングの構造

3.4 指示棒による遠隔ポインティング

次に指示棒による遠隔ポインティングデバイスの構造について説明する（図 3-9）。これは、リモート側にいるユーザが把持した指示棒を使ってローカル側の対象物に指示することができる。身体で行う指差しやレーザポインタによる指示と同じような役割を果たすことができる。またこのデバイスは、身体といった複雑な形状をもった物体ではなく、単純な形状をもった物体が、境界面を貫通しているように提示したデバイスであり、このデバイスでもソーシャルテレプレゼンスの強化に効果があるのかを調査した。本節ではこのデバイスの構造について述べ、調査の内容については第 5 章で述べる。

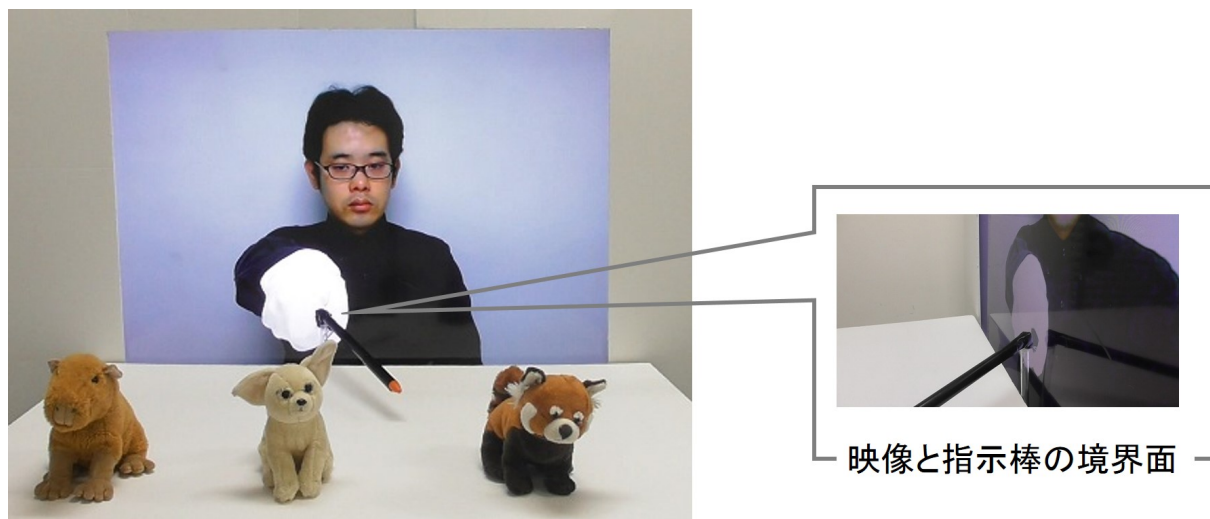


図 3-11 指示棒による遠隔ポインティング

指示棒による遠隔ポインティングデバイスは、対話相手が把持する指示棒が映像から飛び出して指差しをしているように見せることができる。このデバイスは、遠隔指差しロボットアームを指示棒に入れ替えたものである。指示棒は、リモート側とローカル側それぞれ一つずつあり、リモート側ではユーザが把持し、ローカル側はディスプレイの前に設置されている。また、指示棒は映像内で把持しているように見せ、ローカル空間に提示するのは指示棒のみとした。そのため、リモート側にいるユーザが把持する指示棒は短く持つようにした。ローカル側に設置された指示棒は、映像内の対話相手の動きに同期して鉛直方向のディスプレイの表示面を移動・回転する。鉛直方向のディスプレイの下に直動位置決め装置及び回転機構を設置し、アクリルパイプを介して指示棒に接続されている。遠隔指差しロボットアームと同様に、直動位置決め装置及び回転機構は、ポインティングをするにあたり腕を振る最高速度で追従するように設計している。指示棒が最高速度のまま追従するとロボットや機械らしさが出てしまうため、腕を振る終点の位置では追従する速度を遅くするように制御した。

3.5 空間重畳型ビデオ会議システム

次に境界面に干渉する度合いを調査するにあたり、空間重畳型ビデオ会議システムを開発した(図 3-12)。このデバイスは、複数のディスプレイを組み合わせて境界面を変形させることにより、貫通オブジェクトが境界面を干渉する度合いを変えることができる。また、境

界面の干渉の度合いを調査するため、腕を奥行き方向に動かす、つまりリモート空間にいる人がローカル空間にいる人に向けて把持したものを差し出す行為を行うようにした。本節ではこのデバイスの構造について述べ、貫通オブジェクトが境界面を干渉する度合いの調査については第6章で述べる。



図 3-12 空間重畳型ビデオ会議システム

空間重畳型ビデオ会議の構造を図3-13に示す。空間重畳型ビデオ会議は、2枚のディスプレイを組み合わせており、鉛直方向に設置したディスプレイはリモート空間にいるユーザの顔映像を、2つの鉛直面の間を斜めつないでいるように設置したディスプレイは手元映像を等身大に映している。さらに、リモート空間にいるユーザとローカル空間にいるユーザの間には机を配置し、手元映像を映すディスプレイにもそれを表示している。ロボットアームは、手元を映すディスプレイに遮られて見るできない位置に設置している。対話相手の手首には赤いリストバンド状のマーカを付け、腕の位置を画像処理によりピクセル単位でリアルタイムに取得し、映像の腕とロボットアームが同期して動く。また、このロボットアームはスライドレールを含むリンク機構で構成させており、サーボモータの回転

により手前や奥方向に伸縮する．ロボットアームが伸びる最大の距離は，映像内の成人男性が腕を伸ばせる最大の距離に対応させた．さらに，出現したロボットアームに機械的な印象を与えないようにするため，ロボットアームには白い手袋で覆い，会話中に提示するぬいぐるみを軽く握るような動きを追加した．これは手を開く・閉じる動きに相当するが，把持していたぬいぐるみを落とさない程度のわずかな開閉である．

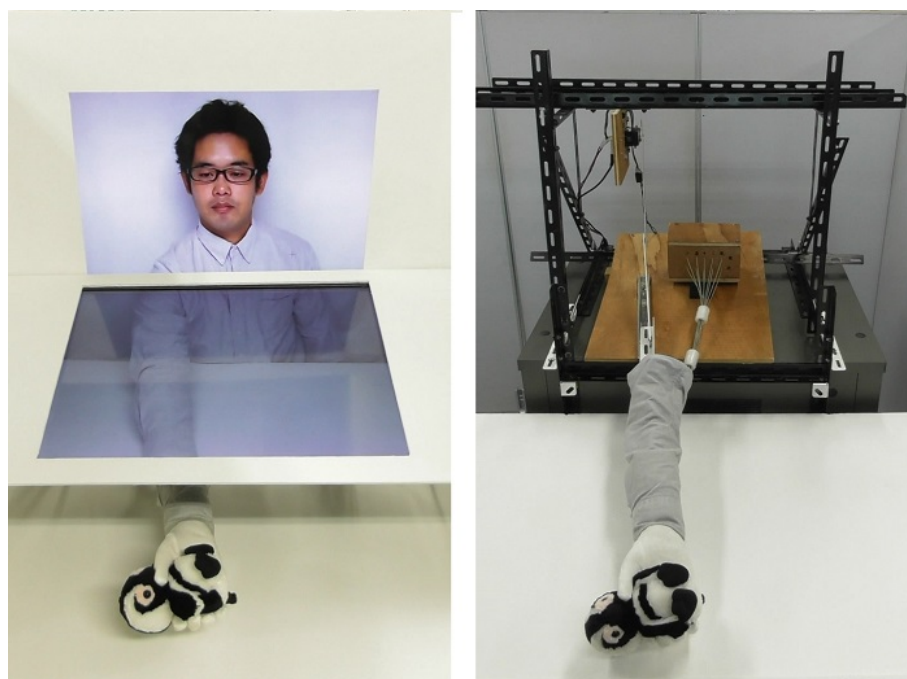


図 3-13 空間重畳型ビデオ会議の構造

3.5 身体拡張型ビデオ会議システム

次に境界面の位置により変化するローカル空間の領域の広さを調査するにあたり，これまで提案してきた実体提示型ビデオ会議システムと対になる身体拡張型ビデオ会議システムを開発した(図 3-14)．開発したデバイスは，3.2 で述べた遠隔指差しロボットアームを身体拡張型ビデオ会議に対応させている．本節では身体拡張型ビデオ会議の構造について述

べ，境界面の位置により変化するローカル空間の領域の広さを調査については第6章で述べる．

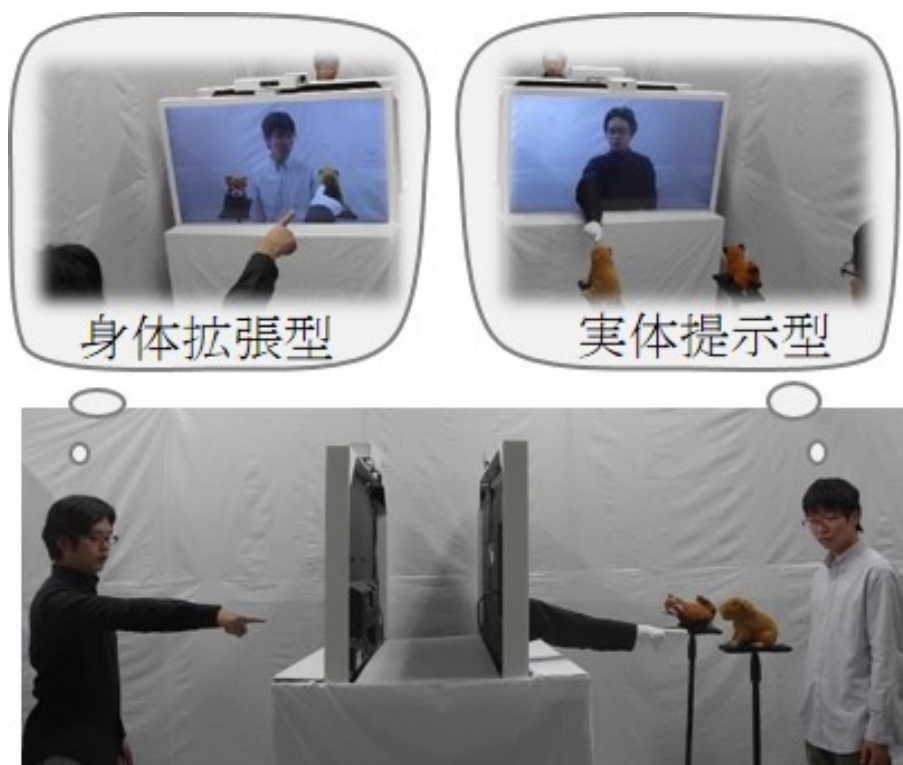


図 3-14 身体拡張型ビデオ会議と実体提示型ビデオ会議

身体拡張型ビデオ会議では，ロボットアームはリモート空間に設置し，ローカル空間にいるユーザの指示行為に同期してリモート空間のロボットアームが同期して動く．ローカル空間にいるユーザは，ロボットアームが同期して動いている様子を映像によって確認することができる．ローカル空間にいるユーザがロボットアームを動作させている様子を図 3-15 に示す．ローカル空間のディスプレイの上に Microsoft 社の Kinect を設置し，骨格検知の機能によって被験者の右腕の動きをトラッキングする．検知された右腕の肩と指先の位置情報を基に，被験者の右腕の動きとリモート空間にあるロボットアームに同期させる．ロボットアームは，ピッチ方向とヨー方向の2自由度で動く．被験者は自身が腕を上げた時にロボットアームを映像内で確認することができ，右腕を左右に振ることでロボットアームの同期を確認することができる．

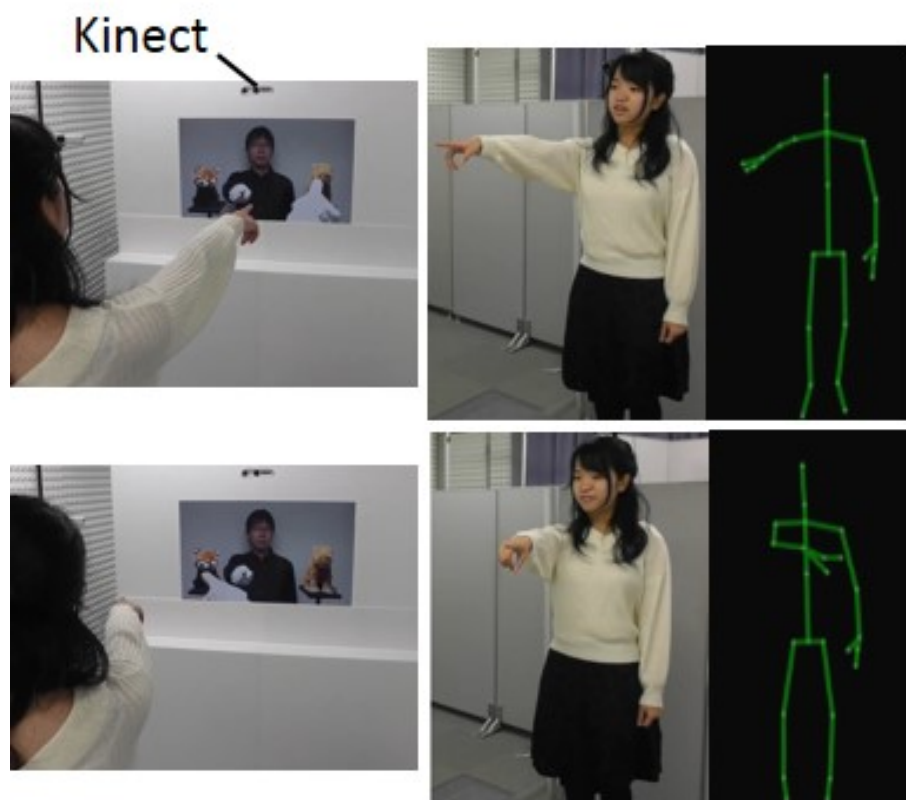


図 3-15 身体拡張型ビデオ会議の構造

第4章 身体の部分的ロボット化に関する調査

本章では、ビデオ会議におけるリモート空間にいるユーザの身体を部分的ロボット化したデバイスの効果について検証した内容についてまとめている。まず、開発したデバイスの有効性を確認するため従来のビデオ会議や先行研究で提案された手法と比較する実験を行った。そして、境界面を貫通するように提示するロボットハンドについて、提示方法と設置位置の二つの観点から最適なデザインについて調査した。

4.2 身体の部分的ロボット化の効果の検証

本節では、ビデオ会議におけるリモート空間にいるユーザの身体を部分的ロボット化したデバイスの効果を検証する。この効果を検証するにあたり、リモート空間にいるユーザの右腕をロボット化し、ローカル空間にポインティングができる遠隔指差しロボットアームを使用した。遠隔指差しロボットアームが、従来のビデオ会議や先行研究で提案された机にリモート空間の映像を表示したデバイスより、ソーシャルテレプレゼンスの強化に有効であるかどうかを調査する。

4.2.1 仮説

遠隔指差しロボットアームは、対話相手の腕をロボットアームとして提示しており、ディスプレイの境界面を超えて指示している。また、対人距離は人間が他者との社会的接触を試みる時にとられる物理的距離の事であり、他者と対話する距離を約 120cm 未満と分類されている [79]。ビデオ会議において、被験者とディスプレイに映った実験者の間に感じる距離感は仮想距離と呼ばれており適切な設計が必要であるといわれている [80]。開発した遠隔指差しロボットアームは境界面であるディスプレイよりも手前に相手の身体を提示するので、従来のビデオ会議よりも対話相手との距離が短く感じられると考えられる。そして、ロボットによるジェスチャが本物の人間によって行われたというリアリティを生み、ソーシャルテレプレゼンスが向上することが考えられる。これより以下の仮説が考えられる。これより以下の仮説が考えられる。

仮説 4-3: 身体の一部をロボット化することで、ソーシャルテレプレゼンスが強化される。

仮説 4-4：身体の一部をロボット化することで、自分のいる空間を指されているように感じる。

仮説 4-5：身体の一部をロボット化することで、相手との距離を短く感じる。

これらの仮説を明らかにするため、3条件を被験者内実験で比較を行った。

4.2.2 実験条件

仮説を調査するため比較した3つの条件は以下である。

鉛直条件：従来のテレビ会議である鉛直方向に設置したディスプレイのみを使用する条件である。

水平条件：既存研究で提案されている条件で、垂直方向に設置されたディスプレイに加え水平方向にディスプレイを設置する事で腕が繋がって見えるようにする。

実体条件：本研究で提案する垂直方向に設置されたディスプレイに加え PopArm を組み合わせた条件で、予備実験の結果より映像の中の対話相手と実体のあるロボットアームが一体化して見えるようにする。

4.2.3 実験環境

実験環境を図 4-1 示す。実験参加者である被験者はローカル空間におり、実験者はリモート空間にがいる。ローカル空間とリモート空間はそれぞれ別の部屋である。リモート空間とローカル空間の両方に、マイクとスピーカがあり、音声通話ソフトを用いて遠隔地間で会話を行うことができる。被験者側のスピーカは画面の方向から音声が聞こえるように、ディスプレイの後ろに設置した。ウェブカメラより実験者の胸部から上の映像が送信され、ローカル側のディスプレイに表示される。ディスプレイに表示される実験者を等身大の映像にするため、顔の縦の長さが 22cm となるように調節した。ローカル側のディスプレイに枠を取り付け、テーブルで下部を遮った。

水平条件では、鉛直方向に設置したディスプレイと水平方向に設置したディスプレイそれぞれに対して同じ性能のウェブカメラを用意した。また、鉛直方向に設置したディスプレイと水平方向に設置したディスプレイで腕が繋がっているようにみせるためにウェブカメラの位置を調節し、水平方向に設置したディスプレイの高さは、対話相手の腕が自然に見えるように調節した。

実体条件では、ローカル空間のディスプレイの下にロボットアームの直動位置決め装置

を設置する．このとき被験者から直動位置決め装置を見えないようにするため，机の側面は布で覆った．直動位置決め装置はサーボによって駆動しており機械音が発生するため，位置決め装置の周りを吸音材で覆い防音させた．実験者と同じ部屋にいる感覚を増すために，実験者の服とロボットアームの袖を同じ服で統一した．テーブルとディスプレイに隙間はあまりなく，ロボットハンドがディスプレイから出ていることを意識させるようにした．

また，水平条件と実体条件において，垂直ディスプレイから飛び出ている腕の長さは実験者が正面を指差している時で40cmに統一した．

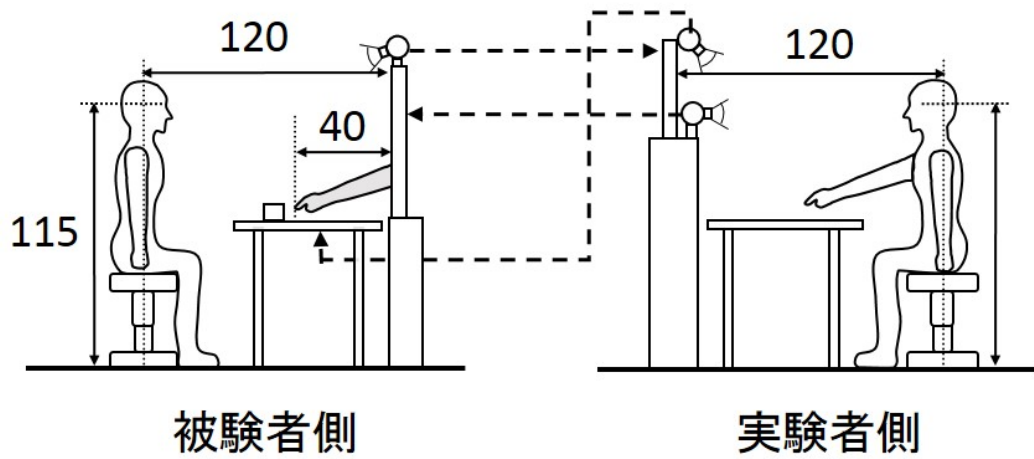


図 4-1 実験環境（単位：cm）

4.2.4 実験内容

全ての条件において，指示する対象物であるぬいぐるみを2個設置し，それに関して簡単な会話と質問をした．実験者は会話の途中で指差す対象を変えるタスクを設定した．統制された実験を行うためには，全ての実験で，会話時間を等しくする必要がある．会話が長いことや，会話中の質問が多くなると，そばにいる感じで高いスコアがつけられやすくなり，天井効果が発生しやすくなるため，会話は短く，会話中の質問の数は少なくした．実験後にアンケートを実施し，それを実験の評価として用いた．仮説を検証するためそれぞれの仮説に対応するように以下の質問項目を設定した．

- 実際に同じ部屋の中で相手があなたのそばにいる感じがした．
- 相手がこちら側の空間の物を指している感じがした．
- 対話相手との距離はどれくらいに感じましたか．

1, 2 番目の項目では7段階のリッカート尺度を用いた。これは、予備実験で行った評価方法と同じものである。3 番目の項目の質問では、対話相手との距離を数値（単位: cm）で記入させた。全ての項目には自由解答欄を用意し、被験者にスコアを付けた理由を記入してもらった。また、アンケート終了後に点数を付けた理由についてインタビューで尋ねた。

4.2.5 被験者

また、身体接触の影響を受けないようにするため、本実験の被験者と予備実験の被験者は異なる被験者に実験に参加してもらった。実験は、我々の大学キャンパスの近くに住む18歳から24歳の大学生12名（男性6名、女性6名）に実験に参加してもらった。このとき実験条件の順序による影響が起らないようにカウンタバランスをとった。

4.2.6 実験結果

実験結果を図4-2に示す。3つの条件は、一要因分散分析を用いて比較した。棒グラフは各項目のスコアの平均値を表し、エラーバーは標準誤差を表す。また、棒グラフの凡例は、実験条件の写真の色と対応付けている。3つの条件は、一要因分散分析を用いて比較した。主効果が有意であった質問項目については、ボンフェローニ補正法による多重比較を行った。その結果、ソーシャルテレプレゼンスの項目では、($F(2, 11) = 24.792, p < .01$)で有意な差が見られた。多重比較の結果、実体条件が他条件よりも高いことが分かった（それぞれ、 $p < .01, p < .01$ ）。

指差されている感覚の項目($F(2, 10) = 13.174, p < .01$)においても有意な差が見られた。多重比較の結果、実体条件が他条件よりも高いことが分かった（それぞれ、 $p < .01, p < .01$ ）。これは指差しを実体として提示することで空間を越えて指差されている感覚が強化されたと考えられる。

相手との距離感の項目($F(2, 11) = 7.57, p < .01$)においても有意な差が見られ、多重比較の結果、垂直条件より他条件が遠くに感じる事が分かった（それぞれ、 $p < .01, p < .05$ ）。しかし、水平条件と実体条件では、対人距離に大きな差が見られなかった。以上から、被験者と遠隔地にいる対話相手との距離は、垂直ディスプレイよりも腕が前に提示されていたかどうかで違いが現れる結果になった。

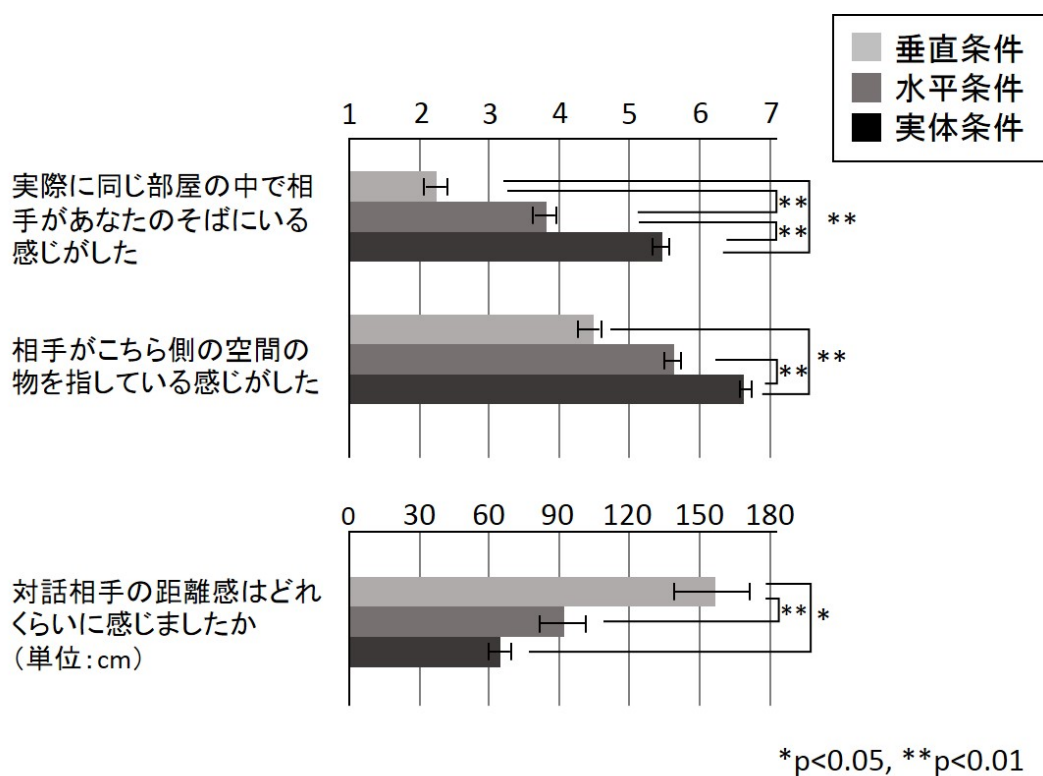


図 4-2 実験のアンケート結果

4.1 予備実験

予備実験では、映像とロボットハンドが繋がって見えるデザインがソーシャルテレプレゼンスにどのような影響を与えるか検証する予備実験を行った。予備実験を行うにあたり、遠隔指相撲ロボットハンドを使用した。指相撲を採用した理由は、指相撲は握手のようにユーザ同士が対面した時の身長や姿勢に考慮する必要がなく、手や腕の位置を固定する手遊びインタラクションであるためである。

4.1.1 仮説

映像の中の腕とロボットアームが繋がって見えるようにした場合，映像の中の対話相手とその身体の代替であるロボットアームが一体化するように感じるのではないかと考えられる．このことから，以下のような仮説をたてた．

仮説 4-1：ロボットハンドと映像の腕が一致しているように見えた方がより自然な対面インタラクションを提供する．

また、ロボットハンドをディスプレイの外側に置いた場合より、内側に置いた場合の方が自然な体勢で手を出しているように見えると考えたことから、以下の仮説を立てた。

仮説 4-2：ロボットハンドをディスプレイの画面上に設置した方がより自然な対面インタラクションを提供する。

4.1.2 実験条件

4.1.1 で述べた仮説を明らかにするために、対話相手の映像内の腕の位置（ロボットアームの設置位置と一致させる、もしくはロボットアームと同期しているように見せる）と、ロボットハンドを設置する位置（ディスプレイの内側：映像を表示するディスプレイ上、もしくはディスプレイの外側：映像を表示しないディスプレイのまわりの枠）に要因を分け、4条件の被験者内実験で比較を行った（図 4-3）。以下がその4条件である。

内側一致条件： 対話相手の映像を表示したディスプレイ上にロボットアームを設置し、映像内の対話相手の腕の位置は、ロボットアームの設置位置と一致させる。

内側同期条件： 対話相手の映像を表示したディスプレイ上にロボットアームを設置し、映像内の対話相手の腕は、操作している様子が被験者に見えるようにする。

外側一致条件： 対話相手の映像を表示したディスプレイの外側にロボットアームを設置し、映像内の対話相手の腕は、操作している様子が被験者に見えるようにする。

外側同期条件： 対話相手の映像を表示したディスプレイの外側にロボットアームを設置し、映像内の対話相手の腕は、操作している様子が被験者に見えるようにする。



図 4-3 予備実験の実験条件

4.1.3 実験環境

実験環境を図4-4示す．実験参加者である被験者はローカル空間におり，実験者はリモート空間にがいる．ローカル空間とリモート空間はそれぞれ別の部屋である．リモート空間とローカル空間の両方に，マイクとスピーカがあり，音声通話ソフトを用いて遠隔地間で会話を行うことができる．被験者側のスピーカは画面の方向から音声が聞こえるように，ディスプレイの後ろに設置した．ウェブカメラより実験者の胸部から上の映像が送信され，ローカル側のディスプレイに表示される．ディスプレイに表示される実験者を等身大の映像にするため，顔の縦の長さが22cm となるように調節した．ローカル側のディスプレイに枠を取り付け，テーブルで下部を遮った．また，ローカル空間には指相撲ロボットハンドがあり，条件によって設置位置が異なる．ロボットハンドの袖は実験者の服と同じ服になるように統一し，ディスプレイの枠は実験者側の背景の色と合わせて白くした．被験者の座る位置はディスプレイから100cmとし，視線の高さを110cm になるように椅子の高さを調節した．また，条件によって指相撲をする場所を変えないように，被験者から見てテーブルの左上から下に30cm，右に25 c mの位置で指相撲を行うようにした．

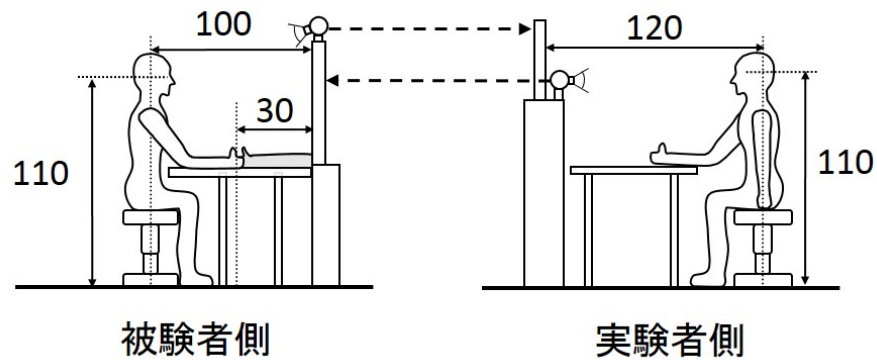


図 4-4 予備実験の実験環境（単位：cm）

4.1.4 実験内容

予備実験では、被験者にディスプレイを用いてビデオ会議を行いながら指相撲を行うタスクを設定した。実験の本番の前に事前練習を行った。事前練習では、ルールの説明を行い、内側同期条件の環境で練習を行った。これは、実際にロボットハンドが実験者と同じ動きをしていることの確認も兼ねているからである。事前練習で説明した指相撲のルールは以下である。

- ロボットハンドは別の部屋にいる人が操作しており、親指の動きが同期している。（実際に動かしている様子を見せる）
- 指相撲をしているときは、手は机に付けたまま腕を上げないようにする。
- 指相撲の開始のタイミングは、被験者が合図する。
- 勝負の勝ち負けは、実験者が見て判断し、「勝ちました/負けました」と宣言する。
- 指相撲は各条件で3回行う。（事前練習は1回のみ）

各条件で指相撲を3回行った理由は、各条件で指相撲をしている時間を平均化するためである。また、勝敗の判定に被験者が不快感を抱くことを避けるため、最後に判定の是非を問う質問を行った。

実験後にアンケートを実施し、それを実験の評価として用いた。ソーシャルテレプレゼンスや存在感などの主観評価はアンケートによって計測される[78]。本研究では先行研究[60][73]に基づいてアンケートの質問項目を設定した。アンケートには以下の質問項目を設定した。

- 実際に同じ部屋の中で相手と指相撲をしている感じがした。

- 実際に同じ部屋の中で相手と話している感じがした。
- 実際に同じ部屋の中で相手があなたのそばにいる感じがした。

アンケートでは7段階のリッカート尺度を用いた。1は全くあてはまらない、2はあてはまらない、3はややあてはまらない、4はどちらともいえない、5はややあてはまる、6はあてはまる、7は非常によくあてはまる、に対応させた。全ての項目には自由解答欄を用意し、被験者にスコアを付けた理由を記入してもらった。また、アンケート終了後に点数を付けた理由についてインタビューで尋ねた。

4.1.3 被験者

我々の大学のキャンパス付近に住む18歳から24歳の大学生10人（男性5人、女性5人）に実験に参加してもらった。このとき実験条件の順序による影響が起こらないようにカウンタバランスをとった。

4.1.4 実験結果及び考察

実験結果を図4-5に示す。棒グラフは平均値で、バーは標準誤差を表す。映像内における対話相手の腕の位置の要因と、ロボットハンドの設置する位置の要因を、それぞれ映像要因、ロボットハンド要因とし、2要因分散分析を行った。その結果、映像要因において、指相撲をしている感じ ($F(1,9) = 10.32, p < .01$)、話している感じ ($F(1,9) = 5.65, p < .05$)、の主効果で有意、そばにいる感じ ($F(1,9) = 3.36, p = 0.099$) の項目で主効果が有意傾向であった。この結果は、映像内の対話相手の腕をロボットアームと同期しているように見せる場合よりも、ロボットアームの設置位置と一致させている場合の方が違和感を与えないことを示しており、仮説1を支持している。同期しているように見せた場合よりも、一致しているように見せた場合の方が違和感を与えなかった理由は、アンケートの後に行ったインタビューによると、操作する腕を見せていたことによって対話相手の腕が2本に見えることによる違和感であることが分かった。この結果から、ロボットアームがどのように操作されているのかよりも、映像から腕が飛び出しているように見せることがもっとも違和感を与えないデザインであると考えられる。

また、ロボットハンド要因において、そばにいる感じ ($F(1,9) = 5.00, p = 0.052$) の項目で主効果が有意傾向であった。この結果は、ロボットハンドをディスプレイの外側に設置した場合よりも、内側に設置した場合の方が違和感を与えないことを示しており、仮説2を概

ね支持している．内側にロボットハンドを設置した場合の方が，外側にロボットハンドを設置した場合よりも違和感を与えなかった理由として，ディスプレイの外側に設置した場合に，ロボットハンドが枠から出ているように設置していたことが考えられる．ディスプレイの枠からロボットハンドが出ていることで，被験者が枠のことを内側に設置した場合よりも強く意識したことで，違和感を与えてしまったと考えられる．以上のことから，対話相手の映像とロボットアームの接続位置を一致させ，さらにディスプレイの内側から腕を飛び出させるように見せることでもっとも違和感を与えないデザインであることがわかった．

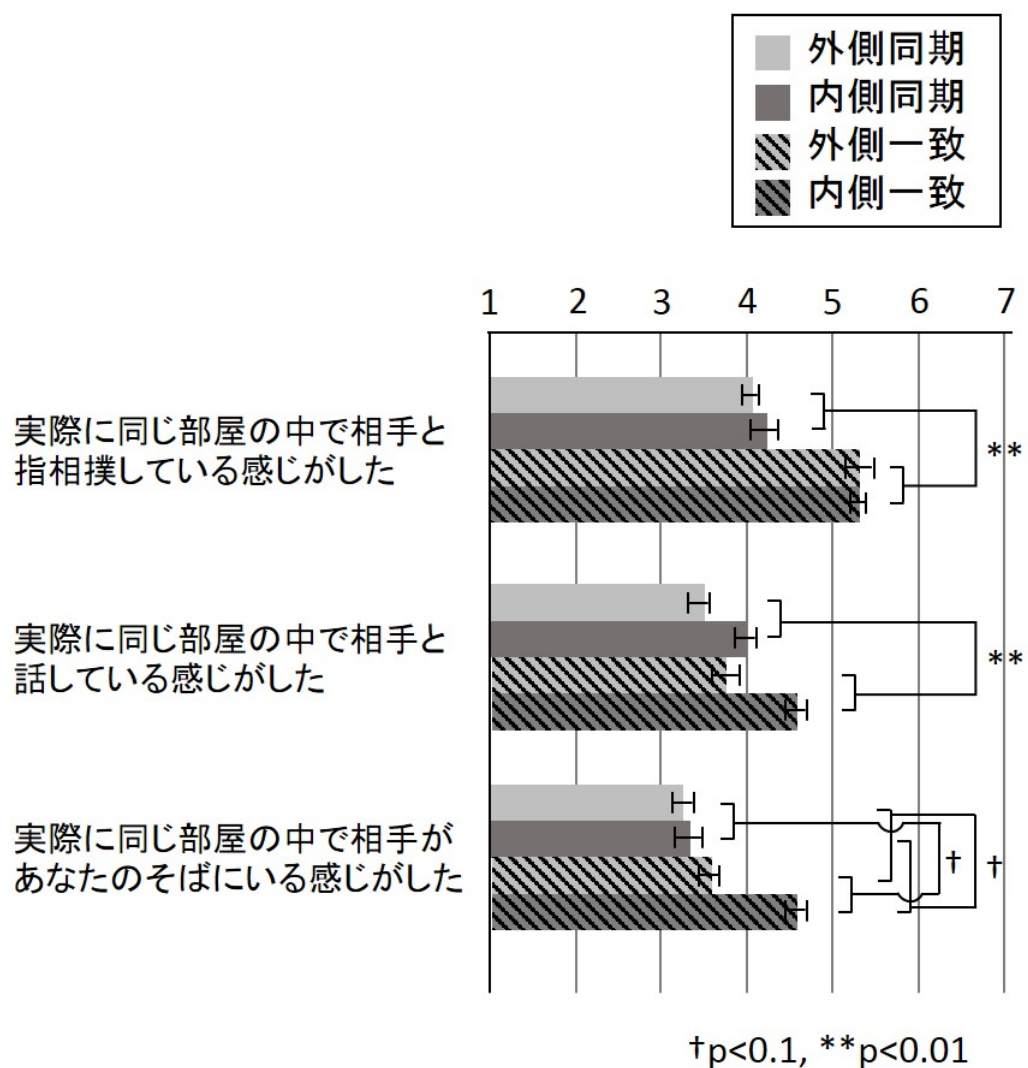


図 4-5 予備実験のアンケート結果

第5章 存在感を伝達するミニマルデザインに関する調査

第4章より，ビデオ会議参加者の身体の一部をロボット化することでソーシャルテレプレゼンスが強化されることがわかった．第4章の実験で使用したデバイスは，ロボットアームという固有の形状をもった物体を用意する必要があった．しかし，必ずしもロボットアームのような固有の形状をもった物体が必要であるとは限らない．例えば，固有の形状をもたない物体として風・水・光などが挙げられる [66] [82]．

また，第4章の実験で使用したロボットアームは複雑な形状であった．より単純な形状をもった物体をローカル空間に提示すること，つまりミニマルデザインにすることによる効果については確認していなかった．よりミニマルなデザインを目指すのであれば，例えば棒のような単純な形状の物体を使用する方法が考えられる [66] [32]．

以上より，本章ではソーシャルテレプレゼンスの強化に境界面を貫通する物体が固有の形状をもつ必要があるのか，また貫通する物体の形状が複雑である必要があるのかを調査した内容について議論する．実験では，固有の形状をもたない物体を用いる方法，単純な形状をもった物体を用いる方法，複雑な形状をもった物体を用いる方法を比較し，ソーシャルテレプレゼンスが強化されるのかについて調査する．これらの方法を比較するため，レーザーポインタ・指示棒・ロボットアームによって，リモート空間にいる対話相手がローカル空間の対象物を指差すジェスチャ行為を用いて検証する．実験で比較する遠隔指示のデザインを図5-1に示す．比較する遠隔指示のデザインは以下の4つである．

水平条件：鉛直方向に設置されたディスプレイに加え水平方向にディスプレイを設置することで腕が繋がって見えるようにする．画面を貫通する物体はなく対話相手の指差しは映像のみで完結している．

レーザー条件：鉛直方向に設置されたディスプレイにレーザーポインタを組み合わせた条件で，固有の形状をもたない物体で画面の貫通を提示する方法である．映像の中の対話相手がレーザーポインタを把持して，レーザーポインタの光のみが被験者側の空間に現れる．

指示棒条件：鉛直方向に設置されたディスプレイに指示棒を組み合わせた条件で，単純な形状をもった物体で画面の貫通を提示する方法である．実体として提示するのは指示棒のみで，映像の中の対話相手が実体のある指示棒を把持して見えるようにする．

アーム条件：鉛直方向に設置されたディスプレイに加えロボットアームを組み合わせた条

件で、複雑な形状をもった物体で画面の貫通を提示する方法である。映像の中の対話相手と実体のあるロボットアームが繋がって見えるようにする。

ソーシャルテレプレゼンスの強化の度合いを調査するには一般的なビデオ会議と比較することが望ましい。しかし、第4章の実験より、水平条件はビデオ会議よりソーシャルテレプレゼンスが強化されることがわかっている。そのため、本章では水平映像を統制条件として設定した。レーザ条件・指示棒条件は、アーム条件と同様の効果が期待できるのではないかと考えられる。本章では実験を2つに分け、実験5-1では貫通オブジェクトの有無と固有の形状をもつかもたないかについて調査し、実験5-2では固有の形状をもつ物体でも形状が単純か複雑かについて調査した。第4章において、ソーシャルテレプレゼンスと対話相手との距離感に相関性が示唆されていることから、対話相手との距離感も合わせて調査する。

被験者は、実験5-1では12人（男性7名、女性5名）、実験5-2では18人（男性9名、女性9名）の合計30人が参加した。また、各被験者は第4章の実験及び実験5-1、5-2のいずれかの実験に参加してもらい、実験を複数経験した被験者はいないようにした。

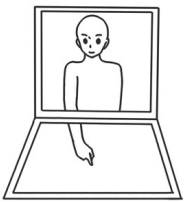
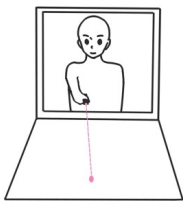
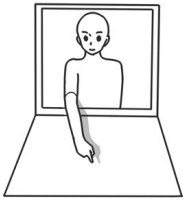
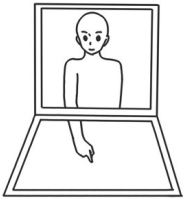
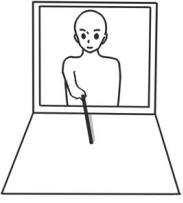
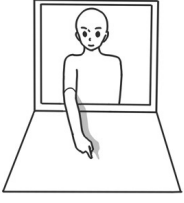
| | 画面を貫通する 物体がない | 画面を貫通する 物体がある | | |
|-----------|---|--|---|--|
| | | 固有の形状を もたない物体 | 固有の形状を もった物体 | |
| | | | 物体の形状が 単純 | 物体の形状が 複雑 |
| 実験 5-1 |  水平条件 |  レーザ条件 | |  アーム条件 |
| | | | | |
| 実験 5-2 |  水平条件 | |  指示棒条件 |  アーム条件 |
| | | | | |

図 5-1 遠隔ポインティングにおけるデザイン

5.1 仮説

本章で述べる研究課題は、境界面を貫通するものがどこまで複雑な形状をもっている必要があるのかの調査である。第4章より、対話相手の映像とその身体の代替であるロボットアームを繋がって見えるように提示することで従来のビデオ会議よりソーシャルテレプレゼンスが強化することが分かっている。このロボットアームは対話相手の身体の一部が実体として提示しており、ディスプレイの境界面を超えて指差しをしている。しかし、レーザーポインタの光でも境界面を越えて指示することが可能である。つまり、固有の形状をもたない物体を用いることでも境界面を貫通しているように提示することが可能である。これより以下の仮説が考えられる。

仮説 5-1: 固有の形状をもたない物体を用いて境界面を貫通しているように提示することで、水平条件よりソーシャルテレプレゼンスが強化される。

また、固有の形状をもった物体であっても、ロボットアームのような複雑な形状である必要はない。指示棒のような単純な形状の物体でも、境界面を貫通しているように提示できれば水平条件よりもソーシャルテレプレゼンスが強化されることは十分に考えられる。

仮説 5-2: 固有の形状をもった物体を用いて境界面を貫通しているように提示することで、水平条件よりソーシャルテレプレゼンスが強化される。

また、第4章の結果よりソーシャルテレプレゼンスと対話相手との距離感に相関があると示唆されていた。そのため、ソーシャルテレプレゼンスの効果が確認された時は、従来のビデオ会議の時よりも対人距離が短く感じられると考えられる。これより以下の仮説が考えられる。

仮説 5-3: ソーシャルテレプレゼンスと対話相手との距離感に相関がある。

5.2 実験環境

実験環境を図5-2に示す。実験環境は概ね第4章の実験と同じである。本節では、第4章の実験環境と異なる点について述べる。

レーザー条件において、レーザーポインタは、リモート側とローカル側それぞれ一つずつあ

り，リモート側はユーザが把持し，ローカル側は天井に設置されている．被験者の頭上にレーザポインタが設置してあることを悟られないようにするため，被験者とレーザポインタの間には目隠しとなるカバーが設置されている．ローカル空間のレーザポインタの光がぬいぐるみの背面に照射すると被験者がレーザ光を見失う可能性があったため，レーザポインタの光の左右方向の可動域をぬいぐるみの側面までとした．

指示棒条件において，指示棒は，リモート側とローカル側それぞれ一つずつあり，リモート側ではユーザが把持し，ローカル側はディスプレイの前に設置されている．また，指示棒は映像内で把持しているように見せ，ローカル空間に提示するのは指示棒のみとした．そのため，リモート側にいるユーザが把持する指示棒は短く持つようにした．この条件は，アーム条件のロボットアームをを指示棒に入れ替えたものである．

水平条件とアーム条件は第4章と変わらない様にした．

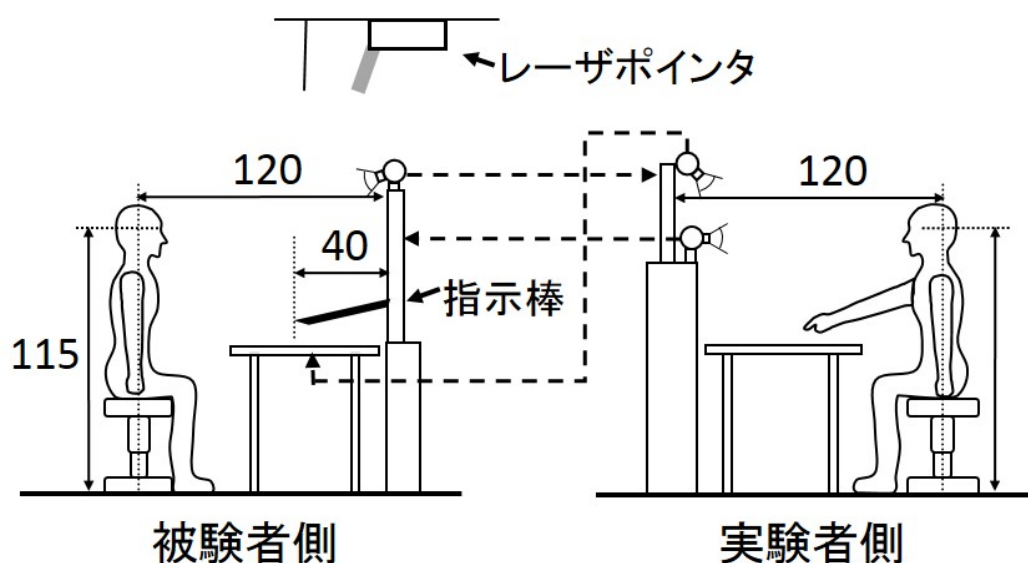


図 5-2 実験環境（単位：cm）

5.3 実験 5-1

実験 5-1 では，水平条件，レーザ条件，アーム条件の比較を行った．レーザ条件とアーム条件は，ディスプレイという境界面を超えてユーザ側の空間に指示をしているが，指示の方法が，固有の形状をもたないレーザ光か固有の形状をもったロボットアームかという違いがある．本実験では仮説 5-1・仮説 5-3 について調査する．

5.3.1 実験 5-1 内容

実験は被験者内実験によって行った。条件間の違いをはっきりさせる、つまりより多く腕を動かすために、指示の対象物であるぬいぐるみを多く設置することが望ましい。しかし、レーザ条件でぬいぐるみによってレーザポインタの光を見失うオクルージョンが発生したため、設置したぬいぐるみの個数は最小の2個にした。また、ぬいぐるみの種類によって被験者の印象が変化しを避けるため、全ての条件で同じぬいぐるみを設置した。実験者は会話の途中で指差す対象を変え、被験者はそれに対する説明を受けるタスクを設定した。統制された実験を行うために、全ての条件で会話時間を等しくし、被験者への質問数は等しくした。実験のクオリティ（映像・音声・対話の分かりやすさ）に関する質問と仮説1、仮説3に対応する以下の質問項目を設定した。

- 映像は十分にきれいだと感じた。
- 音声は十分にきれいだと感じた。
- 対話相手の説明はわかりやすかった。
- 相手がこちら側の空間の物を指している感じがした。
- 同じ部屋の中で実際に対話相手が目の前にいる感じがした。
- 対話相手との距離はどれくらいに感じましたか。

第4章の実験より、ソーシャルテレプレゼンスの強化の要因が、ユーザ側の空間を指されている感覚であることが分かっている。そのため、空間を指されている感覚について尋ねる質問項目をアンケートに加えた。アンケートでは7段階のリッカート尺度を用いた。1は全くあてはまらない、4はどちらともいえない、7は非常によくあてはまる、に対応させた。距離感の項目の質問では、対話相手との距離を数値（単位: cm）で記入させた。また、被験者内実験は各条件の対する印象の差を調査しているため、基準となる距離を被験者に知らせなかった。アンケートには自由解答欄を用意し、被験者にスコアを付けた理由を記入してもらった。また、アンケート終了後に点数を付けた理由についてインタビューで尋ねた。

5.3.2 実験 5-1 被験者

被験者は我々の大学キャンパスの近くに住む18歳から24歳の大学生12人（男性7名、女性5名）が参加した。また、第4章で行った実験とは異なる被験者に参加してもらい、両方

の実験を経験した被験者はいないようにした。各実験では、条件の順序による影響が起こらないようにカウンタバランスをとった。

5.3.3 実験 5-1 結果

実験結果を図 5-3 に示す。棒グラフは各項目のスコアの平均値を表し、エラーバーは標準誤差を表す。また、棒グラフの凡例は、実験条件の写真の色と対応付けている。3つの条件は、一要因分散分析を用いて比較した。主効果が有意であった質問項目については、ボンフェローニ補正法による多重比較を行った。実験のクオリティに関する質問では各条件で違いが無かったことを確認した。ソーシャルテレプレゼンスの項目では、($F(2, 11) = 3.38, p < .05$)で有意な差が見られた。多重比較の結果、水平条件がレーザ条件よりもスコアが高いことがわかった ($p < .05$)。それに加え、アーム条件がレーザ条件よりもスコアが高い傾向であることがわかった ($p < .1$)。アーム条件のスコアをレーザ条件のスコアより低くつけた被験者が2名いたため、有意傾向となった。アーム条件のスコアを低くつけた理由として、服の色を黒くしたことで映像内の肩からロボットアームの肘が伸びているように感じた点、アーム条件・水平条件・レーザ条件の順でシステムを体験し慣れによって後に体験したシステムを高く評価した点が挙げられた。

また、指差されている感覚の項目 ($F(2, 11) = 5.111, p < .01$) においても有意な差が見られた。多重比較の結果、アーム条件がレーザ条件よりも高いことがわかった ($p < .05$)。しかし、水平条件のスコアが高くなり、水平条件と他条件との間でスコアの差は見られなかった。相手との距離感の項目 ($F(2, 11) = 14.97, p < .01$) においても有意な差が見られ、多重比較の結果、レーザ条件が他条件より高い、つまり遠くに感じることもわかった (それぞれ、 $p < .01, p < .01$)。しかし、水平条件とアーム条件では、対人距離に大きな差は見られなかった。これは、鉛直方向に設置したディスプレイよりも腕が前に提示されていたかどうかの違いであるという第4章の実験結果と同様の解釈ができる結果となった。

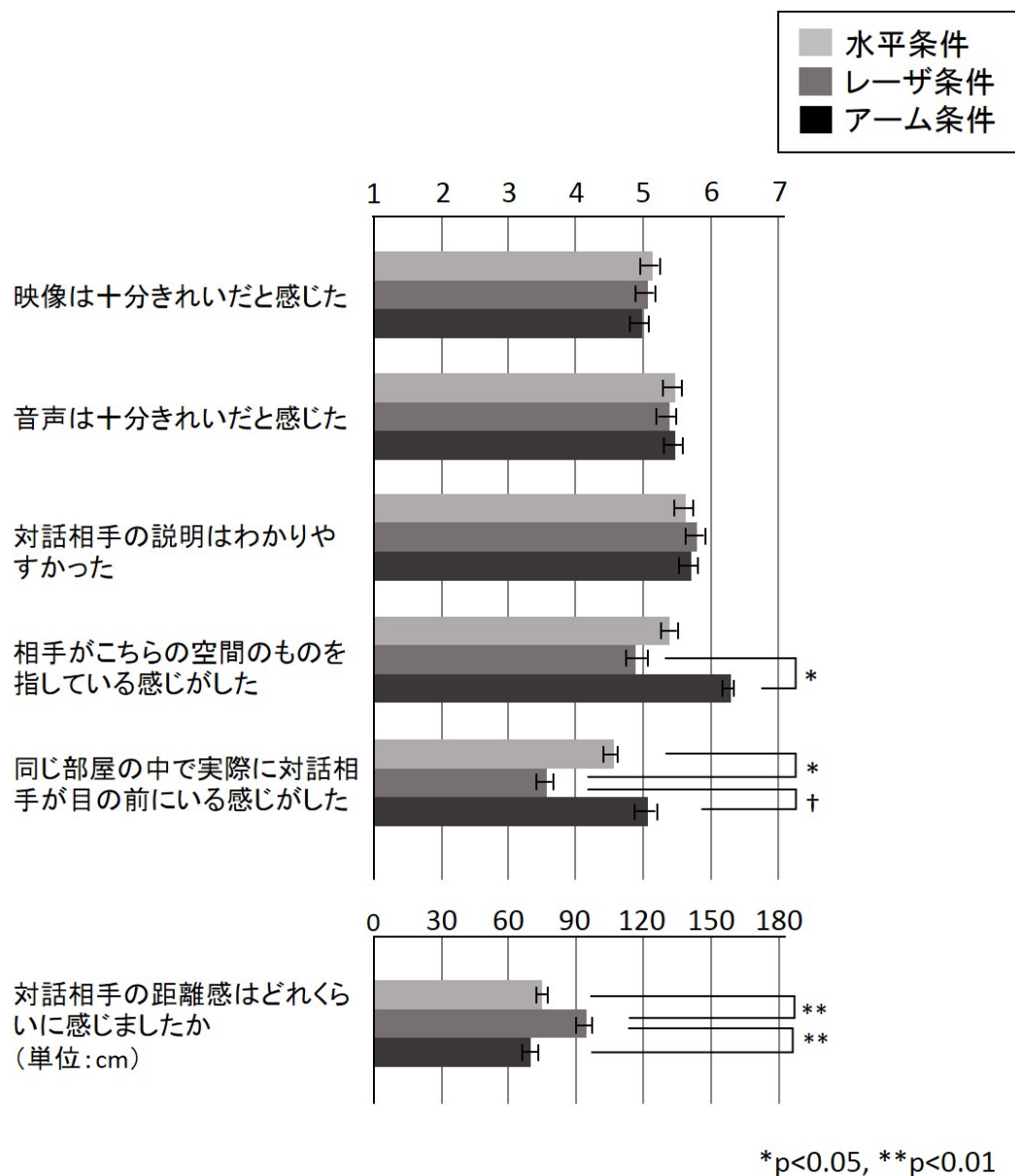


図 5-3 実験 5-1 アンケート結果

5.4 実験 5-2

実験 5-2 では、水平条件、指示棒条件、アーム条件の 3 条件で実験を行った。アンケートでは、実験のクオリティに関する質問を設定し、それに加えて仮説 2、仮説 3 に対応する以下の質問項目を設定した。

- 映像は十分にきれいだと感じた。
- 音声は十分にきれいだと感じた。
- 対話相手の説明はわかりやすかった。
- 同じ部屋の中で実際に対話相手が目の前にいる感じがした。
- 対話相手との距離はどれくらいに感じましたか。

ユーザ側の空間を指されている感覚についての質問項目は、実験 5-1 よりレーザー光ではなく固有の形状をもった物体を提示することが効果的であることがわかったため、実験 5-2 では削除した。

5.4.1 実験 5-2 内容

実験内容は概ね実験 5-1 と同様である。指示棒条件では、レーザーポインタの光のようなオクルージョンが発生しないため、全ての条件において指示する対象物であるぬいぐるみを 3 個設置した。実験者は会話の途中で指差す対象を変え、被験者はそれに対する説明を受けるタスクを設定した。実験後にアンケートを実施し、それを実験の評価として用いた。

5.4.2 実験 5-2 被験者

被験者は我々の大学キャンパスの近くに住む 18 歳から 24 歳の大学生 18 人（男性 9 名、女性 9 名）が参加した。また、第 4 章と実験 5-1 で行った実験とは異なる被験者に参加してもらい、両方の実験を経験した被験者はいないようにした。各実験では、条件の順序による影響が起こらないようにカウンタバランスをとった。

5.4.3 実験 5-2 結果

実験結果を図 5-2 に示す。3つの条件は、一要因分散分析を用いて比較した。棒グラフは各項目のスコアの平均値を表し、エラーバーは標準誤差を表す。また、棒グラフの凡例は、実験条件の写真の色と対応付けている。実験のクオリティに関する質問では各条件で違いが無かったことを確認した。

ソーシャルテレプレゼンスの項目では、($F(2, 17) = 12.95, p < .01$) で有意な差が見られた。多重比較の結果、アーム条件が水平条件よりも高いことがわかった ($p < .01$)。さらに、指示棒条件が水平条件よりも高いことがわかった ($p < .05$)。インタビューより、映像とロボットアーム及び指示棒との間で遅延を指摘する被験者がいないことを確認した。このことから、リモート空間とローカル空間の境界面を貫通しているように提示した場合、ロボットアームのような複雑な形状だけではなく、指示棒のような単純な形状の物体でも効果があることがわかった。

相手との距離感の項目 ($F(2, 17) = 4.47, p < .05$) においても有意な差が見られ、多重比較の結果、指示棒条件より水平条件が高い、つまり遠くに感じることをわかった ($p < .05$)。しかし、それ以外の条件では、対人距離のスコアに大きな差が見られなかった。

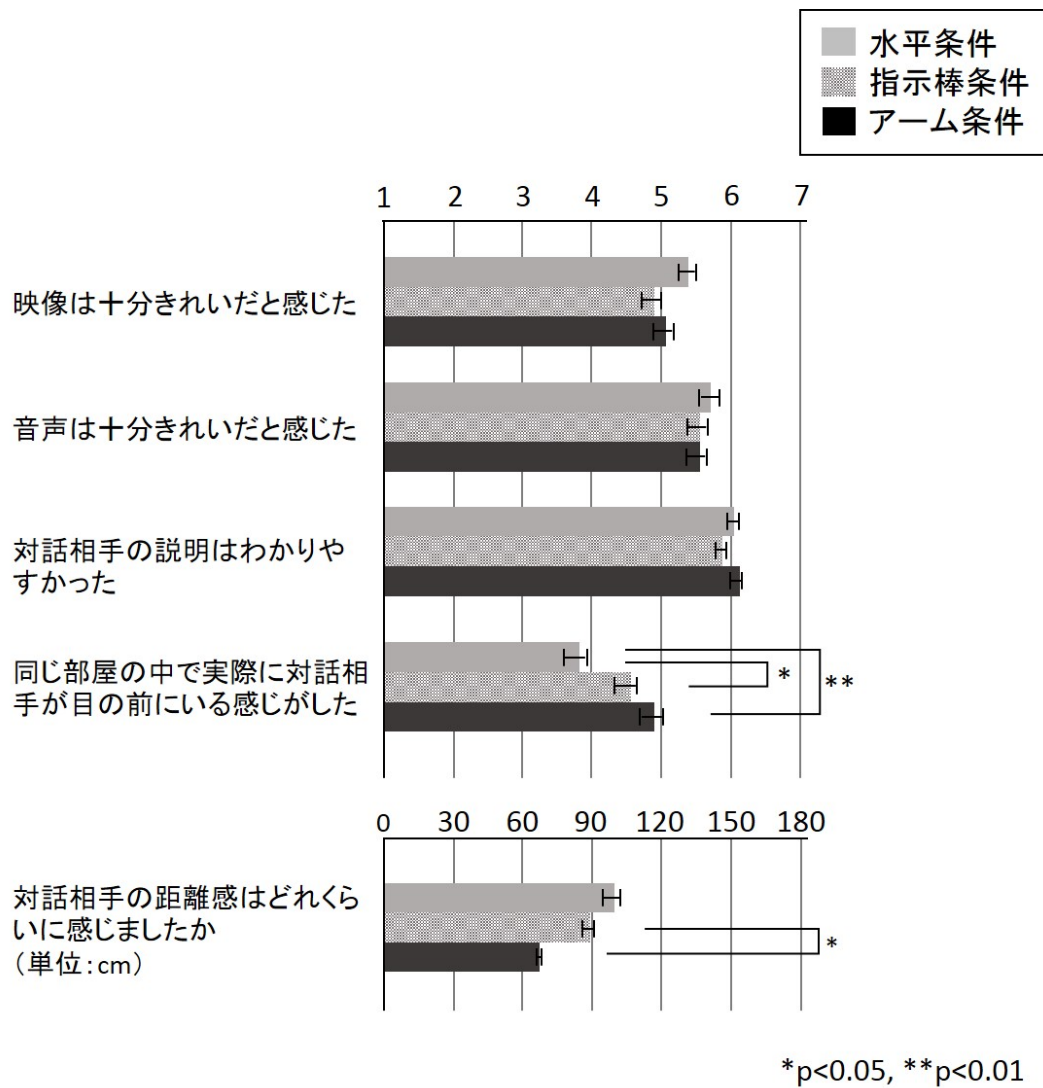


図 5-4 実験 5-2 アンケート結果

5.5 考察

5.5.1 貫通オブジェクトを提示する効果

第4章で比較した3つの条件（垂直条件・水平条件・アーム条件）は全て対話相手の腕による指差しであった．本章で追加したレーザ条件及び指示棒条件は，リモート空間にいる実験者が物を把持しローカル側である被験者の空間に指示を行うという点，ディスプレイという境界面への意識をなくし2つの空間が一体であるように見せるという点は共通であった．しかし，実験では異なる結果を得た．実験5-1のインタビューより，レーザ光が被験者側の空間にあるので相手の指示動作がこちら側の空間に反映されているが，遠くから指示されているように感じた被験者がいたことから仮説5-1が棄却された．一方，実験5-2のアンケートより，指示棒を使った指差しは，固有の形状をもった指示棒がローカル空間にあったことにより，被験者は実験者が目の前にいると感じていたことから仮説5-2が支持された．固有の形状をもった物体がローカル空間にあった場合，指示棒でもロボットアームでもソーシャルテレプレゼンスは同等であると感じた被験者が一定数いた．境界面を貫通しているように提示することができる場合，単純な形状である指示棒を提示するようなミニマルデザインでも効果があると考えられる．

また，指示棒やロボットアームは鉛直方向に設置したディスプレイから繋がって見えるようになっていた．しかし，レーザポインタを使用した条件では，レーザポインタと光は直接的には連続しておらず，被験者は光の繋がりを補完する必要があった．つまり，レーザ光の光跡が見えていたらソーシャルテレプレゼンスが強化された可能性が考えられる．本研究ではレーザポインタの光を使った実験を行ったが，固有の形状をもたない物体は他にも考えられる．例えば影などが挙げられる [32]．影を提示する場合，空間を連続して提示する必要があるので，ソーシャルテレプレゼンスが強化される可能性がある．映像と固有の形状をもたない物体を連続して提示することによる効果の検証は今後の課題である．本実験は物理的な接触を伴わない，つまり視覚のみから得られた印象によって評価するタスクで実験を行った．本研究では固有の形状をもたない物体としてレーザポインタの光を採用したが，風のような身体への接触や温度の感知などの視覚以外の感覚が加わると同様の結果が得られるとは限らない．レーザポインタのような固有の形状をもたない物体の視覚的な印象だけでは期待する効果が得られないことが考えられる．

また，第4章で行った実験と本章で行った2つの実験結果を比較した時，実験5-1の水平条件のスコアは他の実験の水平条件のスコアと一致していないことが分かる．本研究は全

て被験者内実験で行っており、被験者内実験では条件の組み合わせが原因で同じ条件でも実験ごとにスコアが揃わない場合がある。実験5-1の比較対象であったレーザ条件は、被験者側の机にレーザ光しか照射されておらず、実験者が遠くの場所から指示しているという印象を被験者から受けた。そのため、実験5-1ではレーザ条件のスコアが低く、水平条件及びアーム条件のスコアが高くなった。この結果は、机の上に提示された腕が水平映像か固有の形状を持ったロボットアームかという違いより、レーザポインタを把持した実験者が遠くにいるという印象が強かったため発生したと考えられる。

5.5.2 空間を差されている感覚

遠隔地から指差されている感覚の項目では、第4章の実験結果より、アーム条件が他の条件よりもスコアが上回った。実験5-1でも、アーム条件が他の2条件よりもスコアが上回った。インタビューによると、レーザ条件は、光で指示を行っており、他条件では腕がディスプレイよりも前に提示したため、離れた位置から指示された印象を受けたと答えた被験者がいた。遠隔地から指差されている感覚はディスプレイを境界面とした窓越しの会話に感じているかに基づくのではないかと考えられる。実験2ではこの質問項目を削除していた。しかし、ディスプレイの境界面を超えて対話相手の指示動作を実体として提示していることは、指示棒条件もアーム条件も共通であるため、指示棒条件でもアーム条件と同様の効果が得られると考えられる。

5.5.3 距離感

実験5-1、実験5-2より、ソーシャルテレプレゼンスと距離感には相関関係がある傾向となった。しかし、実験5-2ではアーム条件と指示棒条件の間しかスコアに有意な差が見られなかった。インタビューによると、ソーシャルテレプレゼンスに基づいて距離感を回答した被験者と、対話相手の腕の先端の位置に基づいて回答した被験者がいた。水平条件・アーム条件では鉛直方向に設置したディスプレイより手前に対話相手の腕を提示し、レーザ条件・指示棒条件では鉛直方向に設置したディスプレイ内に対話相手の腕を提示していた。そのため、目の前にあるのは指示棒であって対話相手は遠くに感じた被験者もいた。対人距離は対話相手の腕の先端からの距離に強く影響されることが考えられる。以上より、仮説5-3は棄却されることがわかった。一般的なビデオ会議とレーザ条件・指示棒条件を直接比較はしていないが、本章の実験の結果より、一般的なビデオ会議とレーザポインタを用いた手法では対人距離は変わらないと考えられる。しかし、指示棒を用いた手法は一般的なビデオ

会議より対人距離を近くに感じる可能性がある．一般的にレーザポインタと指示棒は遠く
のものを指す時に使う道具であるが対人距離の感じ方に大きな違いがあることがわかった．

第6章 存在感の伝達をより強化する方法に関する調査

本章では、第4章、第5章で得られた知見を踏まえ、本研究ではリモート空間とローカル空間の境界面に焦点をあて、ソーシャルテレプレゼンスにどのような効果を与えるのかを調査する。

1つ目に考えられることは、2つの空間の境界面に干渉する量である。実験では、空間の境界面を変形させた空間重畳型ビデオ会議を用いて、リモート空間にいる対話相手が把持する物体を前に差し出す度合いを2つの空間の接続面に干渉する量として調査を行った。空間重畳型ビデオ会議は、2つの鉛直面の間を斜めの面でつないだディスプレイによってリモート空間にいるユーザの手元映像を表示し、映像上の相手の腕の動きに同期して、ロボットアームがその映像の下から出現するシステムである。第4章の実験では、手元の映像を映した水平映像システム、リモート空間にいる相手の腕が接続面に干渉するロボットアームシステムを比較したが、本章の実験6-1ではリモート空間にいる対話相手の差し出し動作によって、接続面に干渉する度合いをより詳しく調査した。

2つ目に考えられることは、ローカル空間にいるユーザの身体を2つの空間の接続面に干渉させることである。ローカル空間にいるユーザの身体がリモート空間に実体として提示し操作することができるレイグジスタンスという概念が提案されている [69]。しかし、2つの空間の境界の位置をローカル空間にいるユーザの身体に設定することによるソーシャルテレプレゼンスの強化は調査されていない。じっけんでは、2つの空間の境界の位置を移動させることにより、二つの空間の接続面に干渉しているのがリモート空間にいる対話相手の腕かローカル空間にいるユーザの腕かを比較し、境界面に干渉した人の存在感が遠隔地に伝達されるのかについて調査した。2つの空間の接続面をローカル空間にいる被験者側の腕に設定した場合を、ユーザの腕の代替となるロボットアームで遠隔空間にある物体や人と物理的なインタラクションを行うため、本論文では身体拡張型ビデオ会議と呼ぶ。2つの空間の接続面を実験者側の腕に設定した場合を、ローカル空間にリモート空間にいる対話相手の腕の動きと同期したロボットアームが設置されてあるため、本論文では実体提示型ビデオ会議と呼ぶ。実験6-2では、この2つのデバイスに加え、リモート空間にいるユーザとローカル空間にいるユーザの双方が接続面に干渉しない、つまり、接続面をユーザの中間に設定したビデオ会議条件を含めた3つの条件で被験者内実験によって比較することで、それぞれがソーシャルテレプレゼンスに与える影響を検証する。

被験者は実験 6-1 では 16 人，実験 6-2 では 18 人の合計 34 人に参加してもらった．各被験者はこれまでの実験に参加したことがない被験者を採用し，実験 6-1，実験 6-2 のいずれかに参加してもらった．

6.1 仮説

本章の研究課題は，境界面が変形・移動するとソーシャルテレプレゼンスにどのような影響を及ぼすのかの調査である．実験 6-1 では，リモート空間とローカル空間の一部を重畳させ，空間の接続面に干渉する物体及び身体を比較する．遠隔窓口システムより，ソーシャルテレプレゼンスを強化するには対話相手の身体動作と実体として出現する物体が同期することが影響することがわかっている [77]．本実験で設定する境界はこの要件を満たしており，二つの空間の接続面に干渉する度合いを調査する．これより以下の仮説が考えられる．
仮説 1: 対話相手の映像と同期して身体や把持する物体が二つの空間の接続面を干渉することで，ソーシャルテレプレゼンスが強化される．

実験 6-2 では，リモート空間とローカル空間の接続面の位置をリモート空間にいる対話相手の腕とローカル空間にいるユーザの腕に設定し比較する．身体拡張型ビデオ会議では，被験者の指示動作がリモート空間に反映される．これはラバーハンドイリュージョン [82] のように別の空間にある腕を自身の腕である錯覚を発生させることで，被験者がリモート空間にいる感覚を向上させソーシャルテレプレゼンスが強化されると期待できる．一方で，第 4 章の結果より，実体提示型ビデオ会議は実験者の指示動作がローカル空間に反映されることで，ソーシャルテレプレゼンスが強化されることがわかっている．これより以下の仮説が考えられる．

仮説 2: 身体動作が遠隔地で実体として再現されることで，二つの空間の接続面の位置に関わらずソーシャルテレプレゼンスが強化される．

これらの仮説を検証するために 2 つの被験者内実験を実施した．

6.2 実験 6-1

6.2.1 実験 6-1 条件

実験 6-1 では，仮説 6-1 を調査するため，以下の 3 条件を被験者内実験で比較を行った．

映像条件： 2つの空間の境界はぬいぐるみと対話相手の間である．実験者の手が映像から見切れない程度にできるだけ被験者側に差し出す（図 6-1）．



図 6-1 映像条件の一連の流れ

物実体条件： 2つの空間の境界はぬいぐるみである．対話相手の腕は映像で表示し，ぬいぐるみは実体として会話の途中で出現させる（図 6-2）．



図 6-2 物実体条件の一連の流れ

物＋人実体条件： 2つの空間の境界は対話相手の腕である．対話相手の腕とぬいぐるみを実体として会話の途中で出現させる（図 6-3）．

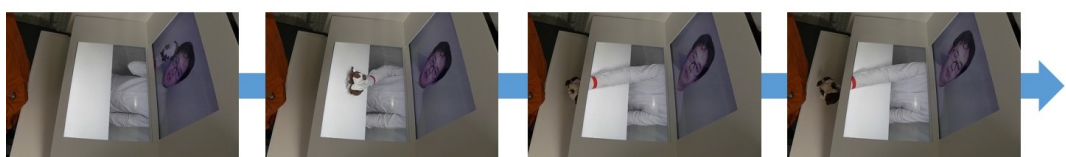


図 6-3 物+人実体条件の一連の流れ

6.2.2 実験 6-1 環境

実験環境を図 6-4 示す。実験参加者である被験者はローカル空間におり、実験者はリモート空間にがいる。ローカル空間とリモート空間はそれぞれ別の部屋である。リモート空間とローカル空間の両方に、マイクとスピーカがあり、音声通話ソフトを用いて遠隔地間で会話を行うことができる。被験者側のスピーカは画面の方向から音声が聞こえるように、デバイスの後ろに設置した。ローカル空間には 2 枚のディスプレイを組み合わせる設置しており、鉛直方向に設置したディスプレイはリモート空間にいるユーザの顔映像を、2 つの鉛直面の間を斜めつないでいるように設置したディスプレイは手元映像を等身大に映している。ディスプレイの枠は実験者側の背景の色と合わせて白くした。顔を表示するディスプレイと手元を表示するディスプレイは同じ性能のウェブカメラを用意し、ディスプレイ間で実験者の映像が繋がっているようにみせるためにウェブカメラの位置を調節した。ローカル側の空間のディスプレイの裏にロボットアームを設置する。実験開始前である被験者が実験室に入室する時、ディスプレイの裏にあるロボットアームやぬいぐるみを被験者から見えなくするために、装置全体を布で覆った。また、実験開始時に実体であるロボットアームやぬいぐるみが見えてはいけなないので被験者の立つ位置を固定した。

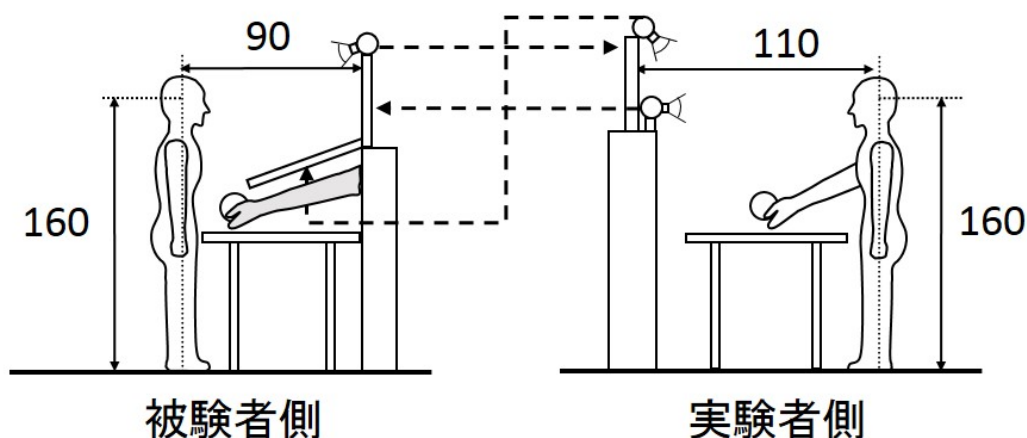


図 6-4 実験環境（単位：cm）

6.2.3 実験 6-1 内容

全ての条件において実験者が説明するぬいぐるみを差し出し、それを見ながらぬいぐるみに関してクイズを含む簡単な会話を行うタスクに設定した。デバイスの裏に人が隠れており、その人がぬいぐるみを差し出したという疑念を払拭するために、事前説明では、会

話中実験室には1人しかいないことを被験者に説明した。また、実験中に手元ディスプレイの下を覗き込み会話が中断されてしまうことを防ぐため、会話中は背筋を伸ばすように被験者に指示をした。以上をまとめると具体的な事前説明は次のようになる。

「(被験者を指定の位置に立たせ、装置を覆った布をはずす。) それでは今からこちらの別の部屋にいる方(実験者)と簡単な会話を行っていただきます。別の部屋にいる方と会話していただきますので、会話中この部屋にはあなた(被験者)しかいません。会話中は背筋を伸ばしていただき正面をご覧ください。それでは開始します。」

会話に途中で実験者が「こちらをご覧ください」と発言するタイミングで手元を表示するディスプレイにぬいぐるみを映し、被験者の手元までぬいぐるみを差し出す。事前説明は全ての条件で行い、被験者に3つの条件を体験してもらった。

すべての条件を体験した後にアンケートを実施し、それを実験の評価として用いた。アンケートで使用した各条件の写真を図6-5の上部に示す。これらの写真は実験者がぬいぐるみを被験者の前に提示した後の様子を抜き出した写真となる。アンケートでは、条件間での映像や音声、会話内容のクオリティの差が実験結果に影響を与えなかったことを確かめるため、下記の質問項目を設定した。

- 映像は十分にきれいだと感じた
- 音声は十分にきれいだと感じた
- 対話相手の説明は分かりやすかった

また仮説を検証するため、物・人・差し出した動作の存在感に関して尋ねる質問とソーシャルテレプレゼンスに関する質問として、以下の質問項目を設定した。

- あたかも同じ部屋の中で対話相手の差し出したぬいぐるみがあるように感じた
- あたかも同じ部屋の中で対話相手の身体があるように感じた
- あたかも同じ部屋の中で対話相手がぬいぐるみを差し出したように感じた
- あたかも同じ部屋の中で対話相手が目の前にいるように感じた

質問項目では7段階のリッカート尺度を用いた。1はまったくあてはまらない、4はどちらともいえない、7は非常にあてはまる、に対応させた。さらに、質問項目には自由解答欄を用意し、被験者にスコアを付けた理由を記入してもらった。また、アンケート終了後に点数を付けた理由についてインタビューで尋ねた。

6.2.4 実験 6-1 被験者

我々の大学キャンパスの近くに住む 18 歳から 24 歳の大学生 16 名（男性 8 名，女性 8 名）に実験に参加してもらった。また，これまで行ってきた全ての実験と異なる被験者に参加してもらった。実験では，条件の順序による影響が怒らないようにカウンタバランスをとった。

6.2.5 実験 6-1 結果

実験 6-1 のアンケート結果を図 6-5 に示す。棒グラフは各項目のスコアの平均値を表し，エラーバーは標準誤差を表す。また，棒グラフの凡例は，実験条件の写真の色と対応付けている。3 つの条件は，一要因分散分析を用いて比較した。主効果が有意であった質問項目については，ボンフェローニ補正法による多重比較を行った。

実験の映像，音声，会話内容のクオリティに関する質問では各条件で違いがなく，これらの内容が他の質問項目に影響がないことを確認した。

存在感に関する質問項目では，ぬいぐるみの存在感に関する項目 ($F(2, 15) = 34.2, p < .01$) で有意な差が見られた。多重比較の結果，映像条件が他条件よりも低いことがわかった（それぞれ， $p < .01, p < .01$ ）。また，身体の存在感に関する項目 ($F(2, 15) = 12.5, p < .01$) においても有意な差が見られた。多重比較の結果，物＋人実体条件が他条件よりも高いことがわかった（それぞれ， $p < .01, p < .01$ ）。また，動作時の存在感に関する項目 ($F(2, 15) = 31.9, p < .01$) においても有意な差が見られた。多重比較の結果，物＋人実体条件が他条件よりも高く（それぞれ， $p < .01, p < .01$ ）さらに物実体条件が映像条件よりも高いことがわかった ($p < .05$)。以上のことから，物や身体が映像と同期して実体として出現することでその物体の存在感が向上することがわかった。

ソーシャルテレプレゼンスの項目 ($F(2, 15) = 18.8, p < .01$) においても有意な差が見られ，多重比較の結果，物＋人実体条件が他条件より高いことがわかった（それぞれ， $p < .01, p < .05$ ）。さらに物実体条件が映像条件よりも高いことがわかった ($p < .05$)。物実体条件及び物＋人実体条件が映像条件よりもスコアが高くなっていることから仮説 1 を支持する結果となった。また，対話相手の身体が実体として出現する場合，物体のみが出現するよりもさらにソーシャルテレプレゼンスを強化することもわかった。

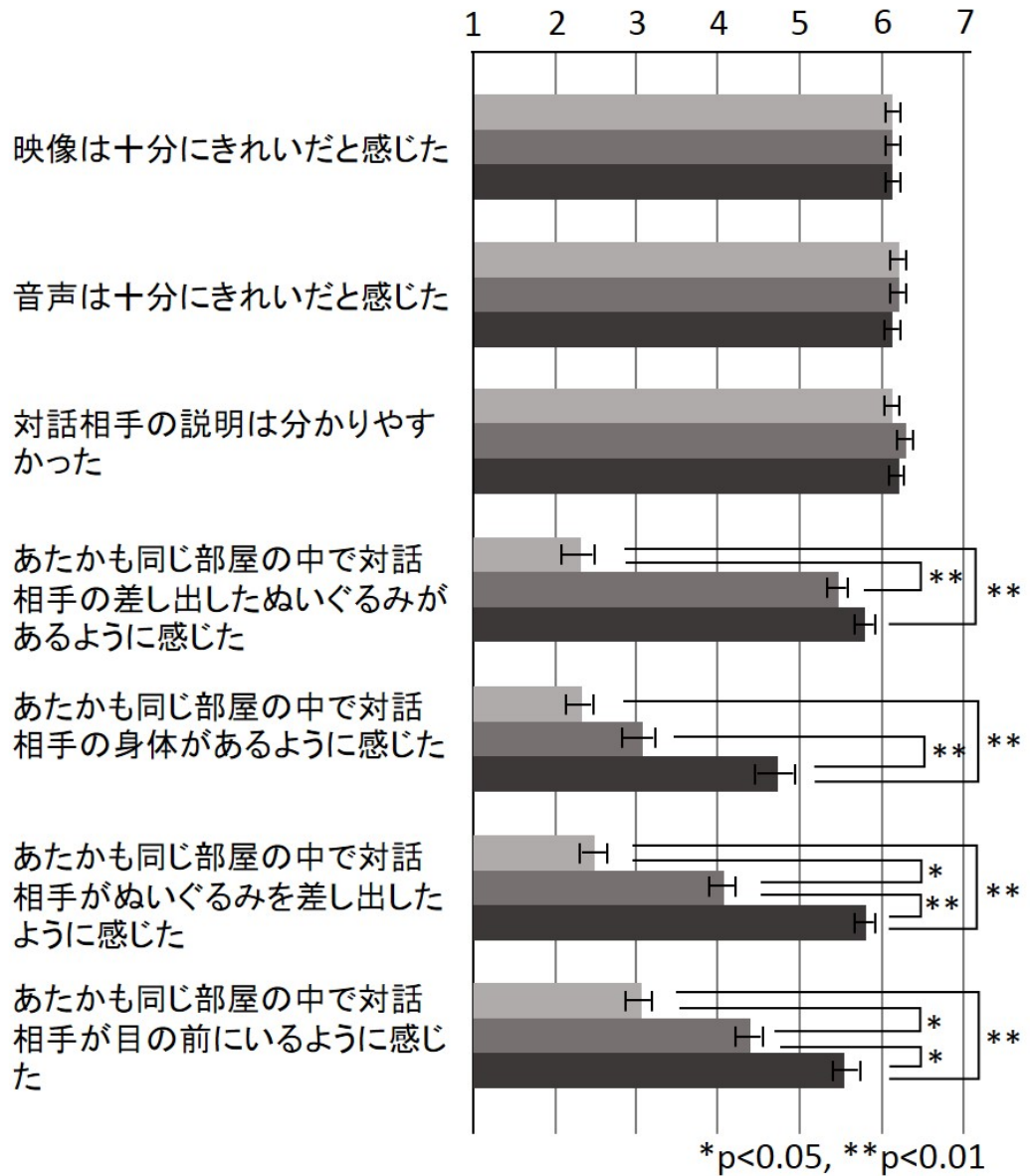


図 6-5 実験 6-1 アンケート結果

6.3 実験 6-2

6.3.1 実験 6-2 条件

実験 6-2 では，以下に示す 3 条件を被験者内実験で比較を行った（図 6-6）．

ビデオ会議条件： 2つの空間の境界は被験者と実験者の間である．ロボットアームは使用しない．

身体拡張条件： 2つの空間の境界は被験者の腕である．被験者がロボットアームにアクセスし，被験者の右腕の動きに同期してリモート空間にあるロボットアームが動く．

実体提示条件： 2つの空間の境界は実験者の腕である．実験者がロボットアームにアクセスし，実験者の右腕の動きに同期してローカル空間にあるロボットアームが同期して動く．

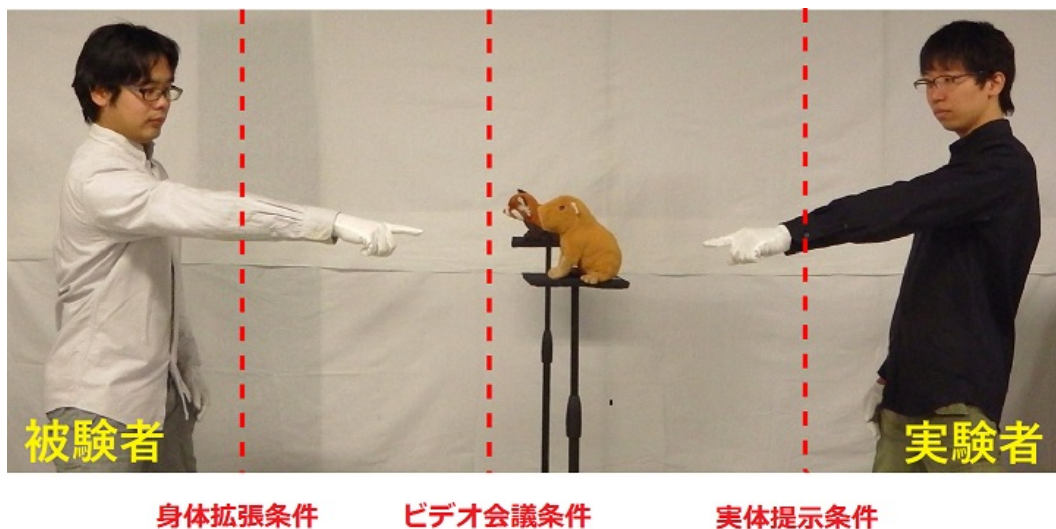


図 6-6 実験 6-2 実験条件

6.3.2 実験 6-2 環境

実験環境について説明する．本実験では，条件により実験環境が異なる．

まず，共通している点について説明する．実験参加者である被験者はローカル空間にお

り、実験者はリモート空間にがいる。ローカル空間とリモート空間はそれぞれ別の部屋である。リモート空間とローカル空間の両方に、マイクとスピーカがあり、音声通話ソフトを用いて遠隔地間で会話を行うことができる。被験者側のスピーカは画面の方向から音声聞こえるように、ディスプレイの後ろに設置した。ディスプレイは手元映像を等身大に映している。ディスプレイの枠は実験者側の背景の色と合わせて白くした。被験者の立つ位置に台座を設置し、台座はディスプレイから180cmの位置に固定した。また、視線の高さを170cm以上になるように台座の高さを調節した。

ビデオ会議条件の実験環境を図6-7に示す。リモート空間とローカル空間の両方にロボットアームを設置せず、ぬいぐるみはリモート空間に設置する。

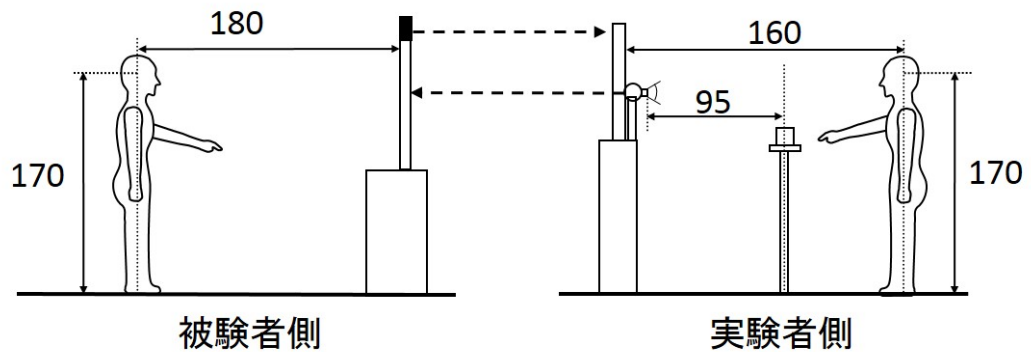


図 6-7 ビデオ会議条件の実験環境（単位：cm）

身体拡張条件の実験環境を図6-8に示す。リモート空間にロボットアームとぬいぐるみを設置する。

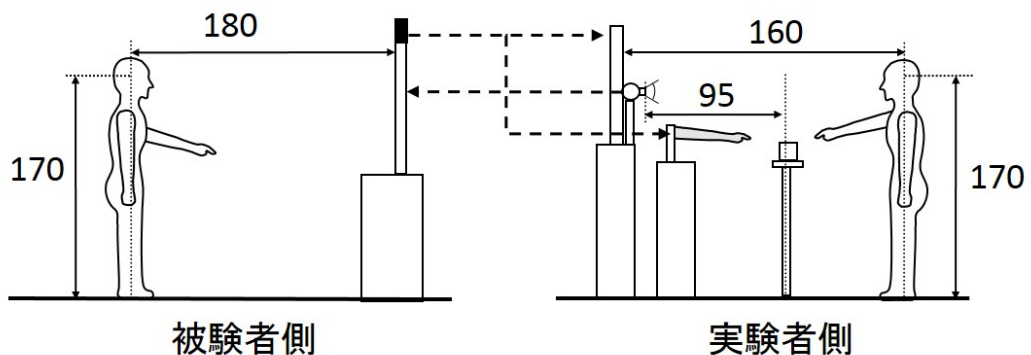


図 6-8 身体拡張条件の実験環境（単位：cm）

実体提示条件の実験環境を図6-9に示す。リモート空間にロボットアームとぬいぐるみを設置する。

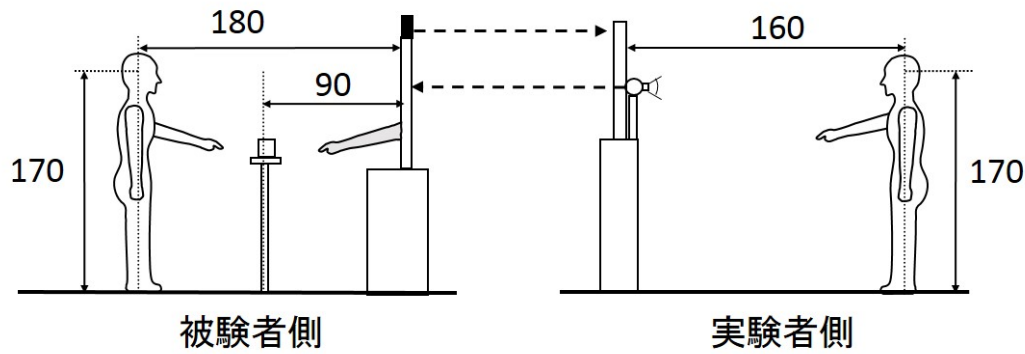


図 6-9 実体提示条件の実験環境（単位：cm）

6.3.3 実験 6-2 内容

実験では、ぬいぐるみに関してクイズを含む簡単な会話をし、その間実験者と被験者の双方が指差しを行うタスクに設定した。天井効果を防ぐため、会話の内容は短く、クイズの出題内容も短くした。また、被験者にぬいぐるみを指示してもらうため、全条件で被験者に腕を上げて指示をしてもらうように促した。

身体拡張条件において、被験者が右腕を上げないと映像内のロボットアームを見ることができない。そのため、映像内の表示されたロボットアームが自身の腕と同期して動くことを事前に被験者に確認させた。

すべての条件を体験した後にアンケートを実施し、それを実験の評価として用いた。アンケートでは、条件間での映像、音声や会話内容のクオリティ、ロボットアームの指差しの位置のずれなどがソーシャルテレプレゼンスに影響を与えなかったことを確かめるため、下記の質問項目を設定した。

- 映像は十分にきれいだと感じた
- 音声は十分にきれいだと感じた
- 対話相手の説明は分かりやすかった
- 相手がどこを指しているか分かりやすかった

また仮説 6-2 を検証するため、以下の質問項目を設定した。

- あたかも同じ部屋の中で対話相手が目の前にいるように感じた
- あたかも相手の部屋に自分がいるように感じた

- あたかも自分に部屋に相手がいるように感じた

質問項目では7段階のリッカート尺度を用いた。さらに、質問項目には自由解答欄を用意し、被験者にスコアを付けた理由を記入してもらった。また、アンケート終了後に点数を付けた理由についてインタビューで尋ねた。

6.3.4 実験 6-2 被験者

我々の大学キャンパスの近くに住む18歳から24歳の大学生18名（男性9名，女性9名）に実験に参加してもらった。また，これまで行ってきた全ての実験と異なる被験者に参加してもらった。実験では，条件の順序による影響が怒らないようにカウンタバランスをとった。

6.3.5 実験 6-2 結果

実験 6-2 のアンケート結果を図 6-10 に示す。棒グラフは各項目のスコアの平均値を表し，エラーバーは標準誤差を表す。また，棒グラフの凡例は，実験条件の写真の色と対応付けている。3つの条件は，一要因分散分析を用いて比較した。主効果が有意であった質問項目については，ボンフェローニ補正法による多重比較を行った。

実験の映像，音声，会話内容のクオリティに関する質問及び相手の指差しのわかりやすさに関する質問では各条件で違いがなく，これらの内容が他の質問項目に影響がないことを確認した。

被験者に各条件の違いを確認するために，アンケート後のインタビューの冒頭で，「3回システムを体験しましたがそれぞれどのような状況であったか違いを説明してください」と「n回目（身体拡張条件）の時，対話相手から見たらどのように見えていたと思いましたか」と質問をした。すべての被験者は身体拡張条件と実体提示条件は対の関係，つまり逆の状況であったと認識していたことを確認した。

ソーシャルテレプレゼンスに関する質問項目では， $(F(2, 17) = 16.24, p < .01)$ で有意な差が見られた。多重比較の結果，身体拡張条件がビデオ会議条件よりも高いことがわかった ($p < .01$)。さらに，実体提示条件がビデオ会議条件よりも高く ($p < .01$)，身体拡張条件よりも高いことがわかった ($p < .05$)。このことから仮説 2 は支持される結果となった。

また，相手の部屋に自分がいる感覚 ($F(2, 17) = 13.41, p < .01$) で有意な差が見られた。多重比較の結果，身体拡張条件が他の条件よりも高いことがわかった（それぞれ $p < .01$ ， $p < .05$ ）。さらに，自分の部屋に相手がいる感覚 ($F(2, 17) = 25.06, p < .01$) で有意な差が見られた。多重比較の結果，実体提示条件が他の条件よりも高いことがわかった（共に

$p < .01$).

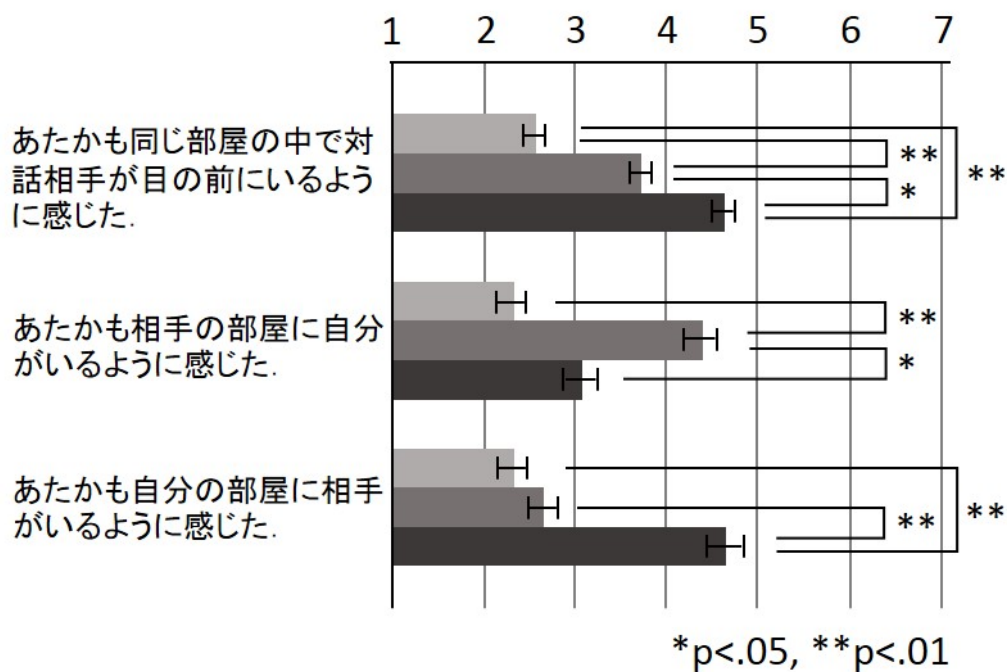


図 6-10 実験 6-2 アンケート結果

6.4 考察

6.4.1 ソーシャルテレプレゼンス

実験 6-1 ではリモート空間にいる対話相手の差し出し動作によって、二つの空間の接続面に干渉する度合いを調査した。ぬいぐるみの存在感では、相手の身体動作を映像のみで提示するだけでは物体の存在感は得られないが、何らかの物体が映像と同期して実体として出現することにより物体の存在感が創出されることが示された。また、身体の実在感に

においては、映像条件と物実体条件の間に有意な差が見られなかった。これは実験者の腕が映像でしか提示されていないためであると考えられる。すなわち、映像内の空間とこちらの空間がつながっていると感じていても、実体が表示されないと身体の実在感あまり向上しないということである。差し出した動作の実在感については、ぬいぐるみと身体の実在感の両方を理由に挙げた被験者が多かった。ソーシャルテレプレゼンスの質問項目では、差し出した動作の実在感のと同じ傾向を示していた。以上をまとめると、リモート空間にいる実験者の身体動作が二つの空間の接続面に干渉した量によって、相手の動作の実在感が向上すると考えられる。

実験6-2において、ソーシャルテレプレゼンスの質問項目では、身体拡張条件と実体提示条件はビデオ会議条件よりスコアが優位に高くなった。これは、ローカル空間にいる被験者もしくはリモート空間にいる実験者の指示行為が二つの空間の接続面に干渉していたためであると考えられる。さらに、実体提示条件は身体拡張条件よりスコアが優位に高くなった。これは二つの空間の接続面が移動したことで、身体拡張条件のローカル空間の領域が実体提示条件のローカル空間の領域より減ったからだと考えられる。また、相手の部屋にいるように感じたの質問項目では、身体拡張条件のスコアが他の条件より高くなったことから分かるように、被験者はリモート空間にいると感じていた。このことから、ソーシャルテレプレゼンスを強化するためには、リモート空間あるいはローカル空間にいるユーザの身体動作が二つの空間の接続面に干渉する時、ローカル空間の領域を増やす必要があることがわかった。また、実体提示条件のみぬいぐるみが被験者側の空間に置いてあった。そのため、条件の要因はユーザの身体動作が干渉する接続面の位置の違いと、ぬいぐるみが置いてある場所の違いになった。ぬいぐるみが置いてあった場所の違いによってソーシャルテレプレゼンスのスコアに影響しなかったことをインタビューで確認したが、ぬいぐるみの設置場所による影響は本実験では確かめていない。ぬいぐるみが置いてある位置による影響を調べることは今後の課題である。また、相手の部屋に自分がいる感覚では身体拡張条件が、自分の部屋に相手がいる感覚では実体提示条件が他のスコアよりも高くなった。これは、ロボットアームを用いて他の空間にアクセスするユーザがローカル空間にいるのかリモート空間にいるのかの違いによって発生したと考えられる。このことから、ローカル空間にいるユーザにどのような錯覚をさせたいかという目的によってロボットアームの表現方法を変えることが有効であると考えられる。

6.4.2 実験中に見られた被験者の行動

実験 6-1 において、初めて実体の出現を体験した物実体条件及び物＋人実体条件において、ぬいぐるみに触れようとする被験者が 8 人（物実体条件 5 名，物＋人実体条件 3 名）いた。実験者が「こちらをご覧ください」と発言していても，手元に実体のぬいぐるみがあると触って確かめたくなる被験者が多かった。ぬいぐるみに触れようとした被験者と触れなかった被験者のグループを分けアンケート結果を分析したところ，ぬいぐるみに触れた被験者と触れなかった被験者の各スコアに差がなかったことを確認した。また，ぬいぐるみを触ったことが各存在感やソーシャルテレプレゼンスのスコアに影響しなかったことをインタビューで確認した。実体が登場することにより存在感やソーシャルテレプレゼンスが強化される他に，映像のみでは発生しない心理が働く可能性がある。

また実験 6-2 の身体拡張条件において，被験者のジェスチャーが映像内のロボットアームに反映されることに驚き興味を示した被験者がいた。被験者がリモート空間のロボットアームを操作することを視覚的に提示することのみでも一定の効果が得られると考えられる。さらに，トレイグジスタンスの研究 [ex5] で提案されているデバイスのように触覚フィードバックを得ることでさらにソーシャルテレプレゼンスを強化することが期待できる。

第7章 考察

7.1 空間の連続性とソーシャルテレプレゼンス

本論文では、リモート空間の映像の一部をロボット化しローカル空間に提示する複数のデバイスを開発し、どういったデザインが存在感の伝達に効果的に働くのかを調査するため、3つの研究課題に取り組んできた。

1つ目の研究課題は提案するシステムが従来のビデオ会議よりソーシャルテレプレゼンスの強化に効果的に働くかどうかの調査である。実験により、ディスプレイ面から対話相手の腕を飛び出るようなデザインがより違和感のない対面インタラクションを提供することがわかった。この結果を基に、リモート空間にいる実験者の映像から境界面であるディスプレイを超えて身体の一部が実体化したかのように見えるデザインがソーシャルテレプレゼンスにどのような影響を与えるか検証する実験を行った。実験結果より、空間の連続性を示すデバイスである遠隔指差しロボットアームを使用することで通常のビデオ会議より遠隔地から指差されている感覚が向上し、さらに、同じ部屋の中でそばにいる感覚が向上することがわかった。

2つ目の研究課題は、境界面を貫通するものがどこまで複雑な形状をもっている必要があるのかの調査である。実験では、固有の形状をもたない物体を用いる手法であるレーザ条件、単純な形状をもった物体を用いる手法である指示棒条件、複雑な形状をもった物体を用いる方法であるアーム条件の比較を行った。実験6-1のレーザ条件及び実験6-2の指示棒条件は、対話相手が物を把持しユーザ側の空間に指示を行うという点、ディスプレイという境界面への意識をなくし2つの空間が一体であるように見せるという点、遠くのことを指す時に使う道具である点など共通する項目が多かった。しかし、ソーシャルテレプレゼンスが強化されたのは指示棒条件のみであり、レーザ条件では効果が確認されなかった。レーザ条件では、対話相手が把持したレーザポインタとローカル空間の机に投影された光の点との間の光跡を被験者が想像で補完する必要があった。もし、レーザ光の光跡が見えていたらソーシャルテレプレゼンスが強化された可能性が考えられる。指示棒条件では、アーム条件と同様にソーシャルテレプレゼンスを強化した。したがって、空間の連続性を提示することができれば、形状を単純化したミニマルデザインでもソーシャルテレプレゼンスが強化できると考えられる。以上のことから、レーザポインタの光は空間の連続性を暗示、

指示棒は空間の連続性を明示していたものであり、ソーシャルテレプレゼンスを強化するためには空間の連続性を明示することが必要であるということであることが明らかになった。また、対人距離において、指示棒条件でもある程度の効果を確認することができたが、アーム条件の方がより対話相手を近くに感じさせる効果があることがわかった。そのため、対話相手との適切なパーソナルスペースに応じてデバイスを使い分けることが望ましいと考えられる。

3つ目は境界面が変形・移動するとソーシャルテレプレゼンスにどのような影響を及ぼすのかの調査である。実験では、リモート空間とローカル空間の接続面を変形・移動することによって、接続面に干渉する物体や身体がソーシャルテレプレゼンスに与える影響を調査した。実験結果より、1) リモート空間あるいはローカル空間にいるユーザの身体動作が二つの空間の接続面に干渉する量を増やすこと、2) 身体動作が二つの空間の接続面に干渉する時にローカル空間の領域を増やすことの2つの要因がソーシャルテレプレゼンスを強化に効果があることが明らかになった。また、身体拡張型ビデオ会議では、ローカル空間にいるユーザが接続面に干渉する時にローカル空間の領域を減っているため、ユーザがリモート空間にいるように感じられることも明らかになった。ローカル空間にいるユーザがリモート空間に没入したいのか、リモート空間にいる対話相手をローカル空間に存在させたいのかという目的によって境界面を移動させることが有効であると考えられる。

以上のことから、リモート空間にいる参加者の一部をロボット化し、境界面を貫通させているようにローカル空間にロボットを提示することで空間の連続性を提示しソーシャルテレプレゼンスを強化することがわかった。本論文では空間の連続性のみに着目し議論を行ってきたが、先行研究 [73] のように身体接触を付与することや、先行研究 [73] のように共同作業を支援することによってソーシャルテレプレゼンスがさらに強化されることが期待できる。

本研究では、リモート空間の映像の一部、つまりリモート空間にいるユーザの身体の一部や把持した物体をロボット化しローカル空間に提示するデバイスを提案し、それぞれの研究課題に対して開発したデバイスを対応させ調査してきた。各研究課題で調査した実験結果より、遠隔地にいるユーザの存在感を伝達するには、リモート空間とローカル空間にある物体や身体が境界面で繋がって見えるようにすること、つまり、「空間の連続性」を提示することである。ビデオ会議は、ディスプレイが窓のような役割を果たしており、リモート空間とローカル空間を分離しているように感じさせてしまうため、存在感の伝達が十分ではなかった。しかし、本研究で提案した空間の連続性を示すデバイスを使用することに

より，存在感の伝達をより強化することを達成した．

7.2 空間の連続性を示すデバイスの応用例

本節では，本研究で得た知見より，実社会への応用方法について議論する．3章で述べたように，本研究で開発したデバイスは，ソーシャルテレプレゼンスに与える影響を調査することを目的に開発されている．そのため，遠隔共同作業などを行う場合，ロボットハンドを使うデバイスで物体を掴むことや，把持する物体の種類を増やすなどといった機能を拡張することにより様々な応用が可能となる．

2014年に遠隔指差しシステムを展示会への出展した（図7-1）．これは主に企業向けに行ったデモンストレーションであり，様々な応用方法について意見を頂いた．まず，遠隔指差しシステムを用いる例として，工場への応用が考えられる．これは，遠隔地にいる工場長が現場で働いている人に指示を出したり，本研究で提案したシステムで対面しているような環境をつくり製品の組み立てを指導したりする方法である．遠隔地にいる工場長の存在感が現場まで伝達されることで，現場の生産効率を落とさないようにすることが期待できる．ここでは，工場を例に挙げたが，オフィスなどへ使用するテレワークへ応用も可能である．



図 7-1 展示会の様子

次に、医療現場への応用である。ビデオ会議が一般的に使われるようになってから、医療への応用が期待されてきたが、実現することが未だに難しい。その原因はいくつか考えられ、ウェブカメラ越しだと患者の状態を正確に把握することが困難である点や、遠隔操作するロボットの精密さが求められているが、通信遅延の問題により、未だにその水準に到達していない点などが挙げられる。しかし、情報伝達技術の発達でまもなく第5世代移動通信システムを迎えようとしており、これらの問題点はいずれ突破されと考えられる。本研究で提案したデバイスは、医療現場に応用できる程の精密さを持ち合わせていない。しかし、その問題点を解決する技術が開発された場合、本研究で提案したデバイスを応用することで、医者への存在感を遠隔地にいる患者に伝達することができ、診察時や治療時に患者へ安心感を与えることが期待できる。

以上のように、応用例を2点挙げたが、職場の環境において空間の連続性を示すデバイスの応用方法は多岐に渡ると考えられる。職場への利用という点では先行研究で紹介したようなテレプレゼンスロボットでも応用が可能である。しかし、ロボットによる身体動作の提示は、操作者の姿を提示しないため、ソーシャルテレプレゼンスが低下することが知られている [1]。本研究で提案したような遠隔地へ存在感を伝達するシステムの利用が期待される。

また、第6章の実験6-1 で用いた空間重畳システムも様々な応用が期待できる。例えば、家庭教師などの遠隔教育におけるリアルタイムでの指導や採点、カードゲームやボードゲームなどの遠隔テーブルゲームが挙げられる。遠隔教育では、教師の腕が出現することによりどこを指導しているのか分かりやすくなる。さらに、用紙の読み込みと印刷技術により、生徒の答案用紙を教師がロボットハンドで受け取り、遠隔地で再現された答案用紙を教師が採点を行い、同様の方法で生徒に返すことでリアルタイムの教育が可能となる。遠隔テーブルゲームでは、使用する道具が常に机上もしくはプレイヤーの手元にある。プレイヤーの腕を代替するロボットアームによって、手札を卓上に出すことや相手にカードやコマなどを渡すことが可能となる。さらに、本実験により実体で差し出された物体に触れようとした被験者がいたことから、上記とは異なる応用が可能となる。例えば、乾杯や名刺交換である。映像内に映った相手が液体の入ったコップを実体として差し出し、コップをあてることによって乾杯を行うことができる(図7-2)。また、相手が差し出した名刺を受け取り、自分の名刺を渡すことで名刺交換も実現することができる。これらの方法は、ユーザは目の前に出現した物体に接触する・手に取るといった行動をとることが可能となる。また、これらの方法は遠隔地にいる相手とユーザの間である机上の空間だけで成立するだけでなく、

それぞれの行為を行った後、相手の行動を映像から確認をすることができ、更なる同室感の向上が期待できる。本研究では物体や身体が出現した瞬間の効果を検証したが、対面した状態が継続した時の効果について調査することは今後の課題である。

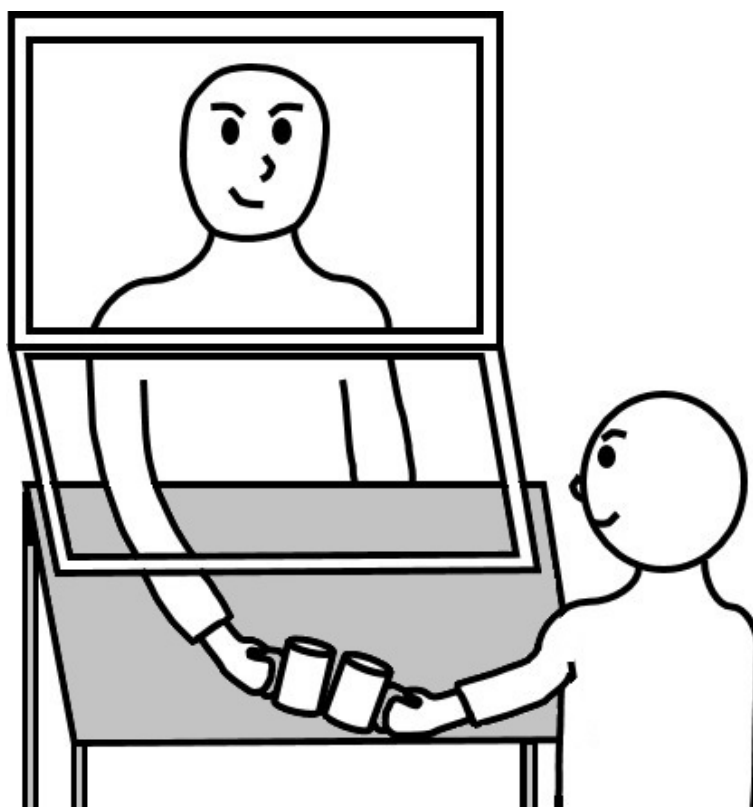


図 7-2 遠隔乾杯のイメージ図

第6章の実験6-2で用いた身体拡張型ビデオ会議システムと実体提示型ビデオ会議システムの応用例も紹介する。身体拡張型ビデオ会議システムと実体提示型ビデオ会議システムにはそれぞれ異なるメリットがあり、ユーザーにどのような感覚を抱かせたいかによって両者を使い分ける必要があるということである。例えば遠隔地から授業や講義を受けるという場面を想定すると、身体拡張条件の場合は自分が教室に行って授業を受けている感覚になる。これは病気等で学校に通うことのできない子供が、クラスメイトと親交を深めたい場合などに有効である。対して実体提示型ビデオ会議システムの場合は、あたかも家庭教師のように教師が自室まで勉強を教えに来てくれている感覚になる。目的に応じてシステムを使い分けることが有効であると考えられる、

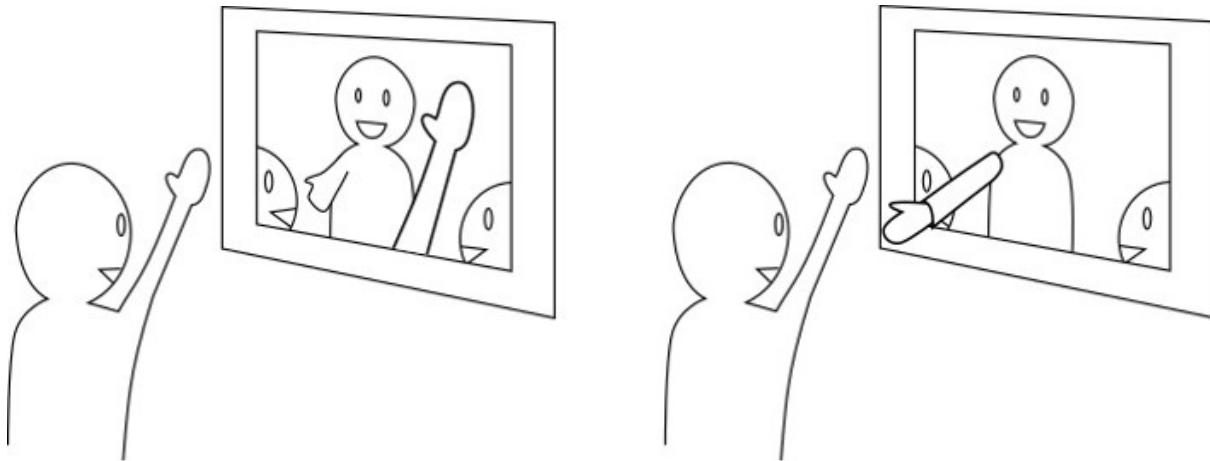


図 7-3 生徒の身体をリモート空間（教室）へ拡張（左図），教師の身体をローカル空間（自室）に提示（右図）

7.3 バーチャルエージェントの存在感強化

これまで議論してきた空間の連続性を示すデバイスは，リモート空間とローカル空間を繋ぐもの，すなわち現実空間同士を繋いでいた．本節では，空間の連続性を示すデバイスの新たな研究対象となる仮想空間と現実空間を繋ぐ方法についても議論する．

ビデオ会議の研究は主に，CSCW（Computer Supported Cooperative Work），HRI（Human Robot Interaction），HCI（Human Computer Interaction）の研究分野で盛んに議論されており，心理学や社会科学の知見や考察を経て発展してきた．これらは，コンピュータによる協働作業支援や人とコンピュータ，人とロボットのコミュニケーションを扱った分野である．近年では，エージェントとのコミュニケーションを扱った HAI(Human Agent Interaction) という新たな研究分野が確立された．エージェントとは，知能をもった主体と定義され，バーチャルキャラクタもその一つとして扱うことができる．AI の発達とともにバーチャルキャラクタとコミュニケーションをとることができるようになることが期待できる．現在すでに，バーチャルキャラクタを利用した商品が数多くある．しかし，バーチャルキャラクタは仮想空間に存在するものであり，映像のみではそれがあたかも現実空間にいるかのような存在感を感じることは難しい．図 7-4 に示すように，これまでビデオ会議で使われていた空間の連続性を示すデバイスを，バーチャルキャラクタとのコミュニケーションへ応用することで，仮想空間から現実空間へバーチャルキャラクタの存在感が伝達されることが期待できる．



図 7-4 仮想空間と現実空間の連続性を示すデバイスの例

ビデオ会議は実世界に実在する人の存在感を別の空間へ伝達するために研究が行われてきた。バーチャルキャラクターは実世界には存在しないため、同じデバイスを使用しても、ビデオ会議の研究とは異なる知見が得られるかもしれない。仮想空間にいるバーチャルキャラクターの存在感が現実空間に伝達される効果の調査は今後の課題である。

第8章 総括

本論文では，ディスプレイに映し出された空間を「リモート空間」，ユーザ側の空間を「ローカル空間」，ディスプレイを「境界面」と定義し，参加者の映像の一部をロボット化し参加者の映像とそのロボットが空間の境界面で繋がっているように見えるシステムを提案した．また，リモート空間にいる人の存在感をローカル空間に伝達する方法について，3つの研究課題に分けて論じてきた．以下にその内容をまとめる．

(1) 身体を部分的にロボット化に関する調査

- 身体を部分的にロボット化するデバイスを使用することで，一般的なビデオ会議より存在感の伝達を強化することを明らかにした．
- ディスプレイ面からリモート空間にいる人の腕を境界面であるディスプレイを貫通しローカル空間に飛び出しているようなデザインが効果的であることがわかった．

(2) 貫通するオブジェクトの形状に関する調査

- 固有の形状をもたない物体を用いる手法では，境界面を貫通していることを暗示しているため，存在感の伝達に効果がないことを明らかにした．
- 固有の形状をもつ物体を用いる手法では，単純な形状でも境界面を貫通していることを明示しているため，存在感の伝達を強化することを明らかにした．

(3) オブジェクトを貫通させる境界面調査

- 存在感の伝達を強化するには，リモート空間あるいはローカル空間にいるユーザの身体動作が二つの空間の接続面に干渉する量を増やすことを明らかにした．
- 存在感の伝達を強化するには，身体動作が二つの空間の接続面に干渉する時にローカル空間の領域を増やすことを明らかにした．
- 存在感の伝達を強化するには，境界面があることを感じさせないようにすることがわかった．

本研究では、リモート空間の映像の一部、つまりリモート空間にいるユーザの身体の一部や把持した物体をロボット化しローカル空間に提示するデバイスを提案し、それぞれの研究課題に対して開発したデバイスに対応させ調査してきた。各研究課題で調査した実験結果より、遠隔地にいるユーザの存在感を伝達するには、リモート空間とローカル空間にある物体や身体が境界面で繋がって見えるようにすること、つまり、「空間の連続性」を提示することである。ビデオ会議は、ディスプレイが窓のような役割を果たしており、リモート空間とローカル空間を分離しているように感じさせてしまうため、存在感の伝達が十分ではなかった。しかし、本研究で提案した空間の連続性を示すデバイスを使用することにより、リモート空間にいる人の存在感がローカル空間に伝達され、ソーシャルテレプレゼンスが強化されることが本研究によって明らかとなった。

存在感を伝達するために、世の中には多くのデバイスが使われてきている。ビデオ会議端末だけではなくヘッドマウントディスプレイやホログラムの提示なども挙げられる。私は、存在感の伝達が最も強化される時は、本研究で開発したデバイスも含めた存在感を伝達するデバイスを使用していることすら忘れる状態になる時であると考えている。その点でいうと、本研究で開発したデバイスは、存在感の伝達が最も強化されているとはいえない。また、本研究で開発したデバイスは、研究課題の調査を目的として使用していた。そのため、各デバイスの機能は限定的である。身体接触を付与や、共同作業を支援する機能などの付加によってソーシャルテレプレゼンスがさらに強化されることが期待できる。近年では、ビデオ会議システムが手軽に利用できるようになり、急速に用途が広がっている。空間の連続性を提示するという本研究の知見が、高いソーシャルテレプレゼンスを創出する遠隔会議システムの開発に応用されることを期待する。

これまでの議論してきた空間の連続性の研究は、リモート空間とローカル空間を繋ぐものの、すなわち現実空間同士を繋いでいた。バーチャルキャラクタなどの仮想空間にいるキャラクタと現実空間を繋いだ場合、本研究とは異なる知見が得られる可能性がある。仮想空間にいるバーチャルキャラクタの存在感が現実空間に伝達される効果の調査は今後の課題である。

参考文献

- [1] Tanaka, T., Nakanishi, H. and Ishiguro, H.: Comparing Video, Avatar, and Robot Mediated Communication: Pros and Cons of Embodiment, Proc. CollabTech2014, pp. 96-110, (2014)
- [2] De Greef, P. and Ijsselstein, W., Social Presence in a Home Tele-Application, *In Proceedings of Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking 2001*, pp. 307-315, 2001.
- [3] D.Engelbart. A research center for augmenting human intellect., December,1968. AFIPS '68 (Fall, part I) Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I Pages 395-410
- [4] WR Corliss and EG Johnson. Teleoperators and human augmentation. an aecnasa technology survey. 1967.
- [5] Marvin Minsky. Telepresence. OMNI magazine, 1980
- [6] Maija Tammelin. From telepresence to social presence: The role of presence in a network-based learning environment. Aspects of media education, 8:219?231,1998.
- [7] William Buxton. Telepresence: Integrating shared task and person spaces. In Proceedings of graphics interface, volume 92, pages 123?129. Canadian Information Processing Society Toronto, Canada, 1992.
- [8] Isaacs, E.A. and Tang, J.C. What Video Can and Can ' t Do for Collaboration: a Case Study. Multimedia Systems, 2(2), (1994), 63-73.
- [9] Prussog, A., Muhlbach, L. and Bocker, M.: Telepresence in Videocommunications: a study on stereoscopy and individual eye contact, Proc. Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society, pp.25-38 (1994).
- [10] Bondareva, Y. and Bouwhuis, D.: Determinants of Social Presence in Videoconferencing, Proc. AVI 2004, pp.1-9, (2004).

- [11] Nguyen, D.T. and Canny, J.: Multiview: Improving Trust in Group Video Conferencing through Spatial Faithfulness. *Proc. CHI 2007*, pp.1465-1474, (2007).
- [12] Irene Rae, Leila Takayama, and Bilge Mutlu. The influence of height in robotmediated communication. In *Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction, HRI '13*, pages 178, Piscataway, NJ, USA, 2013. IEEE Press
- [13] 松田暁、味八木崇、暦本純一、伸縮機構と全周囲映像を用いた身長可変型テレプレゼンスロボットの提案。ヒューマンインタフェース学会論文誌 Vol.20、No.3、2018
- [14] Nguyen, D.T. and Canny, J. More than Face-to-Face: Empathy Effects of Video Framing. *Proc. CHI 2009*, (2009), 423-432.
- [15] S.R. Ahuja, J.R. Ensor, and D.N. Horn, "The Rapport Multimedia Conferencing System," *Proc. COIS '88*, pp.1-8, 1988.
- [16] Ishii, H., "TeamWorkStation: Towards a Seamless Shared Workspace," *Proceedings of Conference on Computer-Supported Cooperative Work (CSCW '90)*, ACM SIGCHI and SIGOIS, Los Angeles, 7-10 October 1990, pp. 13-26.
- [17] Ishii, H. and Kobayashi, M., ClearBoard: a Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact,*Proc. CHI 1992*, pp.525-532, 1992.
- [18] Tang, J. and Minneman, S., VideoWhiteboard: Video Shadows to Support Remote Collaboration,*Proc. CHI 1991*,pp. 315-322, 1991.
- [19] Tang, J. and Minneman, S.: VideoDraw: a video interface for collaborative drawing, *Proc. CHI1990*, pp. 313-320, (1990).
- [20] Tang, A., Neustaedter, C. and Greenberg, S.: Videoarms: embodiments for mixed presence groupware, *Proc. HCI 2006*, pp. 85-102, (2006).
- [21] Izadi, S., Agarwal, A., Criminisi, A., Winn, J., Blake, A. and Fitzgibbon, A.: C-Slate: a multi-touch and object recognition system for remote collaboration using horizontal surfaces, *Proc. Tabletop 2007*, pp. 3-10, (2007).
- [22] Pauchet, A., Coldefy, F., Lefebvre, S., Louis, S., Perron, L., Bouguet, A., Collober,t M., Guerin, J. and Corvaisier, D.: TableTops: worthwhile experiences of collocated and remote collaboration, *Proc. TABLETOP 2007*, pp. 27-34, (2007).

- [23] Alem, L. and Li, J.: A Study of Gestures in a Video-Mediated Collaborative Assembly Task, *Advances in Human-Computer Interaction, Proc. HCI 2011*, (2011).
- [24] Kirk, D., Rodden, T., Fraser, S. D.: Turn it this way: grounding collaborative action with remote gestures, *Proc. CHI 2007*, pp. 1039-1047, (2007).
- [25] Yamashita, N., Kaji, K., Kuzuoka, H. and Hirata, K.: Improving visibility of remote gestures in distributed tabletop collaboration, *Proc. CSCW 2011*, pp. 95-104, (2011).
- [26] Wesugi, S., and Miwa, Y.: “LAZY SUSAN” Chair Communication System for Remote Whole-body Interaction and Connectedness, *Proc. Third IASTED*, pp.93-99 (2006).
- [27] Barden, P., Comber, R., Green, D., Jackton, D, Ladha, C., Bartindale, T., Bryan-Kinns, N., Stockman, T. and Olivler, P., Telematic dinner party: designing for togetherness through play and performance, *Proc. DIS 2012*, pp.38-47, 2012.
- [28] Fraser, M., McCarthy, M., Shaukat, M., and Smith, P.: Seconds Matter: Improving Distributed Coordination by Tracking and Visualizing Display Trajectories, *Proc. CHI 2007*, pp. 1303-1312, (2007).
- [29] Genest, A., and Gutwin, C.: Evaluating the effectiveness of height visualizations for improving gestural communication at distributed tabletops, *Proc. CSCW 2012*, pp. 519-528, (2012).
- [30] Gutwin, C. and Penner, R.: Improving interpretation of remote gestures with telepointer traces, *Proc. CSCW 2002*, pp. 49-57, (2002).
- [31] Luff, P., Heath, C., Kuzuoka H., Yamazaki K., Yamashita, J., Handling Documents and Discriminating Objects in Hybrid Spaces, *Proc. CHI 2006*, pp.561-570, 2006.
- [32] 渡辺 貴文, 上杉 繁, 三輪 敬之: 異なる空間への指示行為が可能な仮想の影による道具インタフェースの開発, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.12, pp.3919-3930 (2007).
- [33] R.S. Fish, et al., “The VideoWindow System in Informal Communications,” *Proc. CSCW* ’90, pp.1-11, 1990.
- [34] S.A. Bly, et al., “Media Spaces: Bringing People Together in a Video, Audio, and Computing Environment,” *CACM*, vol.36, no.1, pp.28-47, 1993.
- [35] R.W. Root, “Design of a Multi-Media Vehicle for Social Browsing,” *Proc. CSCW* ’88, pp.25-38, 1988.

- [36] R.S. Fish, R.E. Kraut, R.W. Root, and R.E. Rice, “Evaluating video as a technology for informal communication,” Proc. CHI ’92, pp.37-48, 1992.
- [37] J.C. Tang and M. Rua, “Montage: Providing teleproximity for distributed groups,” Proc. CHI ’94, pp.37-43, 1994
- [38] Jun Ohya, Yasuichi Kitamura, Fumio Kishino, Nobuyoshi Terashima, Haruo Takemura, and Hirofumi Ishii. Virtual space teleconferencing: Real-time reproduction of 3d human images. Journal of Visual Communication and Image Representation, 6(1):1 ? 25, 1995.
- [39] Yamashita, N., Kaji, K., Kuzuoka, H., and Hirata, K: Improving visibility of remote gestures in distributed tabletop collaboration. Proc.CSCW2011, pp. 95-104 (2011).
- [40] 石井 亮, 小澤 史朗, 川村 春美, 小島 明, 中野 有紀子, 窓越しインタフェース MoPaCo による指示作業への効果検証, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J96-D, No.12, pp.3044-3054, (2013)
- [41] Morikawa, O., and Maesako, T.: HyperMirror: Toward Pleasant-to-use Video Mediated Communication System, Proc. CSCW1998, pp.149- 158 (1998).
- [42] Cohen, M., Dillman, K., MacLeod, H., Hunter, S., and Tang, A.: OneSpace: Shared Visual Scenes for Active Free Play, Proc. CHI2014, pp.2177-2180 (2014).
- [43] Hunter, S., Maes, P., Tang, A., Inkpen, K., and Hessey, S.: WaaZam! Supporting Creative Play at a Distance in Customized Video Environments, Proc. CHI2014, pp.1197-1206 (2014).
- [44] Karahalios, K. and Donath, J.: Telemurals: linking remote spaces with social catalystsPages, Proc. CHI2004, 615-622
- [45] Hosoya, E., Kitabata, M., Sato, H., Harada, I., Nojima, H., Morisawa, F., and Onozawa, A.: A mirror metaphor interaction system: touching remote real objects in an augmented reality environment, Proc. Second IEEE, pp. 350-351 (2003).
- [46] Roussel, N.: Experiences in the Design of the Well, a Group Communication Device for Teleconviviality, Proc. Multimedia 2002, pp.146-152 (2002).
- [47] Miwa, Y., and Ishibiki, C.: Shadow communication: system for embodied interaction with remote partners, Proc. CSCW2004, pp. 467-476, (2004).

- [48] 高野祐輝, 酒田 信親, 西田 正吾: 指示者鏡像映像の利用によりオクルージョン問題を解消した遠隔協調作業システム”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.19, No.2, pp.285-293, (2014)
- [49] Hideyuki Nakanishi, Kazuaki Tanaka, Ryoji Kato, Xing Geng and Naomi Yamashita. Robotic Table and Bench Enhance Mirror Type Social Telepresence. International Conference on Designing Interactive Systems (DIS2017), pp. 779-790, 2017.
- [50] 田中 一晶, 西村 庄平, 耿 星, 中西 英之. 空間の移動感と物体の共有感による鏡型ビデオ会議のソーシャルテレプレゼンスの強化. 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 2, pp. 419-428, 2019.
- [51] Carolina Cruz-neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. Defanti. Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the cave. pages 135?142, 1993.
- [52] Keisuke Suzuki, Sohei Wakisaka, and Naotaka Fujii. Substitutional reality system: a novel experimental platform for experiencing alternative reality. Scientific reports, 2, 2012.
- [53] Henry Chen, Austin S. Lee, Mark Swift, and John C. Tang. 3d collaboration method over hololensTM and skypeTM end points. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Immersive Media Experiences, ImmersiveME ' 15, pages 27?30, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [54] Sergio Orts-Escolano, Christoph Rhemann, Sean Fanello, Wayne Chang, Adarsh Kowdle, Yury Degtyarev, David Kim, Philip L. Davidson, Sameh Khamis, Mingsong Dou, Vladimir Tankovich, Charles Loop, Qin Cai, Philip A. Chou, Sarah Mennicken, Julien Valentin, Vivek Pradeep, Shenlong Wang, Sing Bing Kang, Pushmeet Kohli, Yuliya Lutchyn, Cem Keskin, and Shahram Izadi. Holoportation: Virtual 3d teleportation in real-time. In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST ' 16, pages 741? 754, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [55] Orts-Escolano, S., Rhemann, C., Fanello, S., Chang, W., Kowdle, A., Degtyarev, Y., Kim, D., Davidson, P., Khamis, S., Dou, M., Tankovich, V., Loop, C., Cai, Q., Chou, P., Mennicken, S., Valentin, J., Pradeep, V., Wang, S., Kang, S., Kohli, P., Lutchyn, Y., Keskin, C. and Izadi, S., Holoportation: Virtual 3D Teleportation in Real-time, *Proc. UIST2016*, pp.741-754, 2016.
- [56] 吉野 孝, 藤田 真吾, 重畳表示型ビデオチャットにおける枠の3次元的な移動と存在の効果, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.249-255, 2013.

- [57] 大塚和弘, 熊野史郎, 松田昌史, 大和淳司: MM-Space:頭部運動の物理的補強表現に基づく会話場再構成, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No.4, pp.1450-1461, 2013
- [58] Hideyuki Nakanishi, Yuki Murakami, Daisuke Nogami and Hiroshi Ishiguro. Minimum Movement Matters: Impact of Robot-Mounted Cameras on Social Telepresence. International Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW2008), pp. 303-312, 2008.
- [59] Nakanishi, H., Murakami, Y., Nogami, D. and Ishiguro, H.: Minimum Movement Matters: Impact of Robot-Mounted Cameras on Social Telepresence. Proc. CSCW 2008, pp.303-312, (2008).
- [60] Nakanishi, H., Murakami, Y. and Kato, K.: Movable Cameras Enhance Social Telepresence in Media Spaces. Proc. CHI 2009, pp.433-442, (2009).
- [61] Eric Paulos and John Canny. Prop: Personal roving presence. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '98, 144 pages 296-303, New York, NY, USA, 1998. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [62] Norman P. Jouppi. First steps towards mutually-immersive mobile telepresence. In Proceedings of the 2002 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW '02, pages 354-363, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [63] 鈴木雄介, 福島寛之, 深澤伸一, 竹内晃一, 遠隔会議支援ロボットシステムの注意喚起能力評価, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.1, pp.25-35, 2010.
- [64] Adalgeirsson, S.O. and Breazeal, C., MeBot: a robotic platform for socially embodied telepresence, Proceedings of Human-Robot Interaction 2010 (HRI2010), pp.15-22, 2010.
- [65] 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):1059-1067, mar 2015.
- [66] Kuzuoka, H., Oyama, S., Yamazaki, K., Suzuki, K. and Mitsuishi, M.: GestureMan: a mobile robot that embodies a remote instructor's actions, Proc. ACM Press 2000, pp. 155-162, (2000).
- [67] S Mann. Telepointer: Hands-free completely self contained wearable visual augmented reality without headwear and without any infrastructural reliance. In Fourth International Symposium on Wearable Computers, 2000.

- [68] Sakata, N., Kurata, T., Kato, T., Kourogi, M. and Kuzuoka, H.: WACL: Supporting Telecommunications Using Wearable Active Camera with Laser Pointer. *Proc. Wearable Computers 2003*, (2003).
- [69] Tachi, S., Telexistence: Enabling Humans to be Virtually Ubiquitous, *Computer Graphics and Applications*, vol. 36, No.1, pp.8-14, 2016.
- [70] Ryohei Komiyama, Takashi Miyaki and Jun Rekimoto, JackIn Space: Designing a Seamless Transition Between First and Third Person View for Effective Telepresence Collaborations, *Augmented Human 2017*
- [71] Kana Misawa and Jun Rekimoto. Wearing another 's personality: A humansurrogate system with a telepresence face. In *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC ' 15*, pages 125?132, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [72] 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)
- [73] Nakanishi, H., Tanaka, K. and Wada, Y.: Remote Handshaking: Touch Enhances Video-Mediated Social Telepresence. *Proc. CHI 2014*, pp.2143-2152. (2014)
- [74] Leithinger, D., Follmer, S., Olwal, A. and Ishii, H.: Physical telepresence: shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration, *Proc UIST 2014*, pp. 461-470, (2014)
- [75] Kana Misawa, Yoshio Ishiguro, Jun Rekimoto, LiveMask: A Telepresence Surrogate System with a Face-Shaped Screen for Supporting Nonverbal Communication, *IPSJ Vol.54(4)* , 2013.
- [76] Kana Kushida and Hideyuki Nakanishi. PopObject: A Robotic Screen for Embodying Video-Mediated Object Presentations. *International Conference on Collaboration Technologies (CollabTech2018)*, LNCS11000, pp. 200-212, 2018.
- [77] 田中 一晶, 大城 健太郎, 山下 直美, 中西 英之. 遠隔窓口システム : 手書きの紙書類共有によるソーシャルテレプレゼンスの強化. *情報処理学会論文誌*, Vol. 60, No. 2, pp. 411-418, 2019.
- [78] Bob G. Witmer and Michael J. Singer.: Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Volume 7 , No. 3, 225-240,

(1998)

- [79] Hall, Et.: The Hidden Dimension, Doubleday and Company Inc.(1996)
- [80] Okada.K., Maeda, F., Ichikawa, Y. and Matsushita, Y.: Multiparty videoconferencing at virtual social distance: MAJIC design, Proc. of CSCW 1994, pp. 385-393 (1994)
- [81] 澤田 枝里香, 淡路 達人, 森下 圭介, 古川 正紘, 有賀 友恒, 木村 秀俊, 藤井 智子, 武市 隆太, 清水 紀芳, 井田 信也, 常磐 拓司, 杉本 麻樹, 稲見 昌彦: 風を利用した入出力インタフェース: ビュー・ビュー・View, 日本 VR 学会論文誌, Vol.13, No.3, pp.375-383, (2008)
- [82] Botvinick, M., and Cohen, J.,Rubber Hands ‘Feel’ Touch that Eyes See, Nature, 391, 756, 1998.

業績リスト

【学術論文誌】

1. ○大西 裕也, 小峯 俊彦, 田中 一晶, 中西 英之, リモート空間とローカル空間の接続面の変形・移動によるソーシャルテレプレゼンスの強化, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 103, No. 3, 2020. 投稿中.
2. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, ビデオ会議画面貫通オブジェクトによるソーシャルテレプレゼンスの強化, 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 2, 2020. 採録.
3. Masaya Iwasaki, Jian Zhou, Mizuki Ikeda, Yuki Koike, ○Yuya Onishi, Tatsuyuki Kawamura and Hideyuki Nakanishi. “That Robot Stared Back at Me! ”: Demonstrating Perceptual Ability is Key to Successful Human-Robot Interactions. Frontiers in Robotics and AI, doi:10.3389/frobt.2019.00085, 2019.
4. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, 身体映像の部分的実体化によるソーシャルテレプレゼンスの強化, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 228-235, 2016.

【査読付き国際会議】

1. Masaya Iwasaki, Jian Zhou, Mizuki Ikeda, ○Yuya Onishi, Tatsuyuki Kawamura and Hideyuki Nakanishi. Acting as if Being Aware of Visitors’ Attention Strengthens a Robotic Salesperson’s Social Presence. 7th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI2019), pp. 19-27, 2019.
2. ○Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka, and Hideyuki Nakanishi. Spatial Continuity and Robot-Embodied Pointing Behavior in Videoconferencing. 23rd International Conference on Collaboration and Technology (CRIWG 2017), pp. 1-14, 2017.
3. ○Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka, and Hideyuki Nakanishi. Embodiment of Video-mediated Communication Enhances Social Telepresence. 4th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI2016), pp. 171-178, 2016.
4. ○Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka, and Hideyuki Nakanishi. PopArm: A Robot Arm for Embodying Video-Mediated Pointing Behaviors. 2014 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS 2014), pp. 137-141, 2014.

【査読付き国内会議】

1. 岩崎 雅矢, 周 剣, 池田 瑞, 小池 祐輝, ○大西 裕也, 河村 竜幸, 中西 英之. 人の振る舞いへの気付きの表出によるロボットのソーシャルプレゼンスの強化. インタラクシオン 2019, pp. 38-47, 2019.
2. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, PopArm: 身体映像の部分的実体化によるソーシャルテレプレゼンスの強化, インタラクシオン 2015, pp. 38-46, 2015.

【査読なし国内会議】

1. 渡邊 裕太, ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之. 子犬かハエか：ドローンに対するアニメーション知覚を変容させる騃インタラクション. 第33回人工知能学会全国大会, 2D1-J-11-04, 2019.
2. 岩崎 雅矢, 小池 祐輝, ○大西 裕也, 中西 英之. 相互注視誘発型見返し行動によるロボットの社会的プレゼンスの向上. 情報処理学会研究報告 ヒューマンコンピュータインタラクション, 2018-HCI-179, No. 14, 2018.
3. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, 映像から身体が出現する実体重畳型ビデオ会議による同室感の強化, HAI シンポジウム 2017, G-10, 2017.
4. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, 遠隔指示において実体はどこまで必要なのか?, HAI シンポジウム 2016, G-10, 2016.
5. 猪股 誠至, ○大西 裕也, 中西 英之, 対面会話感覚創出のための回転物体遠隔操作システム, 第30回人工知能学会全国大会, 1E2-4in1, 2016.
6. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, PopArm: 映像上の指示動作を実体化するロボットアームの開発, 情報処理学会研究報告 ヒューマンコンピュータインタラクション, 2014-HCI-160, 2014.
7. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, PopArm: ビデオ会議を拡張する遠隔指差しロボットアームの開発, 第28回人工知能学会全国大会, 3E3-4in, 2014.

【ワークショップでの発表】

1. ○ Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka, and Hideyuki Nakanishi. Appearance of Physical Embodiment in Overlay-Type Videoconferencing. HAI2017 Workshop on Next Generation Human-Agent Interaction (NGHAI2017), 2017.

【ポスター及びデモ発表】

1. Yuta Watanabe, ○ Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka and Hideyuki Nakanishi. Trainability Leads to Animacy: A Case of a Toy Drone. Poster Session of the 7th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI2019), 2019.
2. Masaya Iwasaki, Jian Zhou, Yuki Koike, ○ Yuya Onishi, Tatsuyuki Kawamura and Hideyuki Nakanishi. Appropriate Timing of a Robot's Talk Enhances Its Social Presence. Poster Session of the 1st International Symposium on Systems Intelligence Division, 2019.
3. ○大西 裕也, 小峯 俊彦, 中西 英之, 腕を実体化する身体拡張型ビデオ会議による同室感の強化, インタラクション 2018, 3B45, 2018. プレミアム発表 (採択率 18.7 %)
4. ○ Yuya Onishi, Takahiro Yamaguchi, Kazuaki Tanaka, and Hideyuki Nakanishi, Robot Arms for Embodying Video-Mediated Nonverbal Communication, Poster Session of the 24th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2015), 2015.
5. 空間共有ロボティクス, 大阪大学イノベーションフェア 2014, 2014.
6. PopArm: ビデオ会議における指示動作を実体化するロボティックジェスチャシステム, イノベーション・ジャパン 2014, I-34, 2014.
7. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, PopArm: 遠隔指差しロボットアームによるソーシャルテレプレゼンスの強化, インタラクション 2014, B6-3, 2014.

【受賞歴】

1. 7th International Conference on Human-Agent Interaction(HAI2019), Best Paper Award
Masaya Iwasaki, Jian Zhou, Mizuki Ikeda, ○ Yuya Onishi, Tatsuyuki Kawamura and Hideyuki Nakanishi.
"Acting as if Being Aware of Visitors' Attention Strengthens a Robotic Salesperson's Social Presence"
2. HAI シンポジウム 2017, 学生奨励賞
○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, 「映像から身体が出現する実体重畳型ビデオ会議による同室感の強化」
3. 23rd International Conference on Collaboration and Technology (CRIWG2017), Best Student Paper Award
○ Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka, Hideyuki Nakanishi. "Spatial Continuity and Robot-Embodied Pointing Behavior in Videoconferencing"
4. 第 28 回人工知能学会全国大会, 全国大会優秀賞受賞
○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, 「PopArm: ビデオ会議を拡張する遠隔指差しロボットアームの開発」

【特許】

1. ○大西 裕也, 田中 一晶, 中西 英之, 山下 直美, 映像実体化システム, 国立大学法人大阪大学, 日本電信電話株式会社, 特願 2014-029071, 2014 年 2 月 19 日. 特許第 6044047 号, 2016 年 11 月 25 日.

【助成等】

1. 電気通信普及財団 海外渡航旅費援助 (平成 29 年度 6 月期), "23rd International Conference on Collaboration and Technology (CRIWG 2017)"
2. (研究代表者) 立石科学技術振興財団 研究助成 (C) 「ビデオ会議を拡張する遠隔指差しロボットアームの開発」. 2015~2017 年度

【所属学会】

- 情報処理学会
- 人工知能学会

【学会活動】

1. Next Generation Human-Agent Interaction Workshop (NGHAI2019) Program chair.
2. Next Generation Human-Agent Interaction Workshop (NGHAI2018) Publicity chair.
3. Next Generation Human-Agent Interaction Workshop (NGHAI2017) General chair.
4. Next Generation Human-Agent Interaction Workshop (NGHAI2016) Group activity chair.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、有益な御指導や様々な機会を与えてくださり、さらには本論文の主査を担当して頂きました大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻 中西英之准教授に深く御礼申し上げます。

本論文の副査を担当して頂き、異なる立場や大局的な観点から御指導を賜りました大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻 石黒浩教授，ならびに大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻 細田耕教授に心より感謝いたします。

本論文の研究遂行にあたり、活発な議論や技術的な御指導を継続的に行って下さった，京都工芸繊維大学情報工学・人間科学系 田中一晶助教に厚く感謝申し上げます。また，デバイスの開発や実験に協力して頂いた塩崎恭平君，山口隆浩君，小峯俊彦君に感謝申し上げます。

研究の立ち上げ段階で，終始丁寧な御指導をして下さいました，日本電信電話（株）コミュニケーション科学基礎研究所 山下直美様に深謝いたします。また，研究の議論を頻繁に行って下さった，現大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻 櫛田佳那さん，岩崎雅也君に感謝申し上げます。

最後に，日頃の議論から研究室の運営，研究活動全般においてお世話になりました中西研究室の先輩方，同輩，後輩方に，心より御礼申し上げます。本当にありがとうございました。