

博士論文

顔ディスプレイを用いた
テレプレゼンスシステムに関する研究

三澤 加奈

論文要旨

テレプレゼンスは Marvin Minsky によって提唱された概念である。ある現地に対して遠隔地にいる人物（以降、遠隔ユーザと呼ぶ）が、現地にある自身の手や眼の代わりになる機械を身体の一部として遠隔操作することで、現地にいるかのような感覚を得ることを目指している。ビデオコミュニケーションの普及により、遠距離間でのコミュニケーションの需要が増すと、現地で遠隔ユーザと会話する対話者も遠隔ユーザの存在感を感じるようになるようになった。つまりテレプレゼンスは、二つの意味がある。一つは、遠隔ユーザ自身がある現地にいるように感じる存在感である。もう一つは、現地にいる対話者が同じ空間に感じる遠隔ユーザの存在感である。本博士論文の研究は、後者の遠隔ユーザの存在感の伝達を目指している。

遠隔ユーザの存在感を伝達するために、遠隔ユーザを物理的に具現化させる研究がある。遠隔ユーザの分身としてシステムに顔を映すディスプレイや身体を模した機構を持たせ、外観や動作の擬人化を行う。しかし、システムにその人に特化した外観と動作を兼ね備えさせることは難しい。本博士論文は、開発コストや導入コストを上げずに、遠隔ユーザらしさを提示し、存在感を伝達するテレプレゼンスシステムについて論じる。遠隔ユーザの存在感を伝達するために、その人が誰であるか特定する顔と非言語情報に着目した。言語学の研究では、対人コミュニケーションは、言語以上に非言語情報によって成り立つと言われている。非言語情報は、身体動作（身振り、姿勢、表情、凝視など）、空間行動（対人距離、なわばり、個人空間など）、身体接触がある。人は、言語情報だけでなくこれらの非言語情報も使って意思疎通や対人関係の構築を行っている。人が対面コミュニケーション上で行っているこれらの情報のやり取りを、テレプレゼンスシステムでも伝達することができれば、遠隔ユーザの存在感は伝達されると考えた。

同じ空間で行われるコミュニケーションを人の状態に応じて大別すると、人々が向かい合って静的に話す状態と、動的に移動しながら話す状態の二つがある。これらをテレプレゼンスシステムで再現すると、三種類の形式が考えられる。一つは、対面形式で会話する固定型である。そして、移動しながらの会話形式として、装着型、自律移動型の二つの形式がある。装着型システムは、現地にいる人の身体にシステムを装着してもらい、コミュニケーションをとる。自律移動型システムは、遠隔ユーザが可動性のあるシステムを遠隔操作し、コミュニケーションをとる。本博士論文では、特に固定型と自律移動型システムについて論じる。

まず、固定型システムの問題を述べる。既存システムは、遠隔ユーザの顔を映し出すために平面ディスプレイが用いられることが多い。しかし、平面ディスプレイは表情や外見的特徴、色彩といった非言語情報を伝えることができるが、空間的な位置把握が必要な頭部動作や視線方向の伝達が困難である。頭部動作は注視方向を向き、会話における同意や否定の意志を表現する非言語情報の一つであり、視線は、会話のターンテイキ

ングやアイコンタクトをとるために重要な役割を持った非言語情報である。そこで、本研究はこれらの非言語情報を伝達するために、遠隔ユーザの顔形状のスクリーンを持ち、遠隔ユーザの頭部動作に応じて駆動するテレプレゼンスシステム (LiveMask) を提案する。既存研究に、顔形状のスクリーンを持つテレプレゼンスシステムが存在するが、スクリーンの形状による効果は明らかではない。LiveMask は、カメラにより遠隔ユーザの顔をトラッキングして頭部運動と顔領域を抽出する。そして、頭部運動に応じて三軸で動く機構により、頷きや首振り動作が可能である。その人の顔型から作製した顔スクリーンに切り替え、顔映像を投影するだけで、本人のような外観を再現し、平面形状ではできない正確な視線伝達を目指す。スクリーン形状による効果を調べるため、LiveMask に顔スクリーンと平面スクリーンを交互に取り付け、比較実験を行った。実験の結果、顔スクリーンは遠隔ユーザの向いている方向を適確に伝え、意思疎通や話者交代を円滑化する視線の伝達を可能にすることが分かった。さらに、顔の実寸サイズから 1/14 に小型化した顔スクリーンを作製し、実験で顔スクリーンのサイズが変わっても視線伝達できることを示した。これにより、顔スクリーンはサイズに規定されない様々なテレプレゼンスシステムに応用できることが分かった。特に、小型軽量が求められる装着型テレプレゼンスシステムへの搭載が可能になる。装着型システムは、親密なコミュニケーションで用いられることが多いため表情や視線が伝えやすい顔スクリーンは有効である。

次に、自律移動型システムの問題について述べる。テレプレゼンスロボットを遠隔操作することで、空間内を移動しながらコミュニケーションを取ることが可能になった。テレプレゼンスロボットは、市販化されたシステムであり、遠隔ユーザの顔を映すタブレットが高さ調節できるポールなどに設置され、足下に車輪を搭載した簡易な機構を持つ。しかし、背丈の調節と移動以外の動作ができず、人の完全な代わりになるには機能に制約が多い。また、人らしい外観のロボットは対話者の親近感が増すと言われているが、人と外観が大きく異なるため、人ではなく“モノ”として認識される。一方、人間そっくりの外見を持つロボットにアンドロイドロボットがある。遠隔操作することでテレプレゼンスシステムとして用いることがある。しかし、“外観”として人の身体を持つが、人間の多様な“動作”ができるわけではない。また、一体当たりの開発コストが高く、すべての人が自身のアンドロイドロボットを持つことは現実的ではない。

人間の身体に近い外見と動作の追求は、トレードオフであり、一部動作が機械的に再現できても、汎用性を担保したまま人間の外観を兼ね備えさせることは難しい。そこで、本論はテレプレゼンスロボットを操作する代わりに、“人”を遠隔操作することでコストをかけず、遠隔ユーザが望む外観や動作を実現する。人であれば元から身体の外観と全身動作ができる身体能力を持ち合わせる。遠隔ユーザの代理となる人 (以降、surrogate と呼ぶ) に遠隔ユーザの顔を表示する仮面型テレプレゼンスシステム、ChameleonMask を被ってもらうことで、人間の身体としての存在感と遠隔ユーザの顔による社会的な存在感を提示することができる考えた。近年、テレプレゼンスシステムの使用用途は多

様化しており、従来のように危険地域での作業や、単調な機械的作業以外にも用いられている。これらの作業は、テレプレゼンスロボットを使用すべきであるが ChameleonMask は、人がすべき仕事、例えば楽しみを伴う仕事などをロボットではなく、人に開放することで雇用を生むと同時に、人に頼ることで高い品質の作業を目指すものである。

本博士論文では、遠隔ユーザが現地の人 (surrogate) を操作する形式である Human-Human 型テレプレゼンスシステムの基礎検討を行った。ChameleonMask は、タブレットディスプレイに一眼 HMD(ヘッドマウントディスプレイ) を搭載したシステムであり、surrogate はこれを頭部に装着する。Surrogate は、HMD にセットしたスマートフォンの外側のカメラから視界を確保しており、見ている映像は遠隔ユーザにリアルタイムで送信される。遠隔ユーザはこの映像を元に、surrogate、現地にいる人々とコミュニケーションを図る。

次に、ChameleonMask の実現可能性を調べた。これまで遠隔ユーザの顔がストリーミングされたディスプレイを人が被る、仮面型テレプレゼンスシステムに関する研究は行われていない。そこで、フィジビリティテストを行った。まず、遠隔ユーザを認知していない人が ChameleonMask を被った surrogate を遠隔ユーザ本人と見なすか調べるタスクを行った。次に、遠隔ユーザのことを認知している人が surrogate を遠隔ユーザ本人だと思わずに調べるタスクを行った。行動観察を行った結果、人は ChameleonMask を被った surrogate を本人だと思ふ傾向が出た。そこで、非言語情報の一つである接触が ChameleonMask で実現可能か調べた。接触が許容される身体の領域は、人間関係によって異なる研究報告があるため、被験者にとって遠隔ユーザが知人/他人、surrogate が知人/他人で接触に対する印象が変わると仮説を立て、4 条件に分けて握手の比較実験を行った。実験の結果、遠隔ユーザ、surrogate とも知人の時に握手をした効果が高く出た。

最後に、人にとって ChameleonMask がどのような体験を生むものなのか議論した。特に、Human-Human 型テレプレゼンスシステムは surrogate 役がいないと成立しない。そこで、それぞれの役割を被験者に体験してもらう実験を行った。遠隔ユーザ役は、surrogate とテレプレゼンスロボットの操作を比較した。テレプレゼンスロボット使用時は、衝突を避けようと操作に集中する傾向があり、時間がかかっていたが、surrogate 操作時は、初めての人でも上手く指示を伝えることができていた。また、surrogate 役の被験者は遠隔ユーザの指示を多く欲しがる傾向があり、誰かの surrogate になることに對し肯定的に捉え、アルバイトとして成立すると答えた。これらの結果を踏まえ、ChameleonMask の課題と今後の可能性について論じた。

謝辞

本論文を書き上げるにあたり、様々な方々のご協力とご指導を頂きました。心より御礼申し上げます。東京大学大学院 情報学環 暦本純一教授には、本論文の執筆指導はもとより、修士課程、博士課程の長期間にわたり、研究活動全般へ格別なるご指導と御高配を賜りました。ここに深く感謝し、重ねて御礼申し上げます。

博士論文審査委員の同大学大学院 情報学環 越塚登教授と中尾彰宏教授には、修士課程からご指導を賜り、本研究の節目では必ず客観的で的確なご助言を頂きました。温かなご指導は、大変研究の励みになりました。深く感謝申し上げます。博士論文審査委員として論文構成についてご指導頂きました情報理工学系研究科 相澤清晴教授、筑波大学大学院システム情報工学研究科 葛岡英明教授には、有益なご指導とご助言を賜りました。より多角的な視点、専門的な知見から本研究を捉えることへ繋がりました。深く感謝いたします。

また、社会人博士として博士課程進学を支援してくださった株式会社刻キタル 岸勇希代表取締役には、氏が株式会社 電通在籍時から大変お世話になりました。研究生生活を続けて来られたのも、寛大なご理解とご配慮、そして叱咤激励によるものです。また、同社の飯島章夫氏、間宮洋介氏にも温かいご指導を頂きました。深く感謝いたします。

研究活動を行うにあたり、様々な方にご助言とご助力をいただきました。以下に列挙し、お礼といたします。同大学大学院 情報学環 暦本研究室の味八木崇特任准教授、名古屋大学の石黒祥生准教授には、研究活動と論文執筆に関して細かなご指導をいただきました。そして、暦本研究室のOBやOG、現役学生、秘書の方々には研究内容から生活一般まで大変お世話になりました。素晴らしいメンバーと研究生生活を送れたことに深く感謝しております。また、ハードウェア設計において多大なる指導をして下さったソニーコンピュータ研究所の田島茂氏、IPA 未踏ユースでプロジェクトマネージャを務めて頂いた産業技術総合研究所 後藤真孝主席研究員に深く御礼申し上げます。本研究では、多数の被験者にご協力して頂き、実験を行いました。この場を借りて御礼申し上げます。

そして最後に、研究活動を行うにあたり、気長に支えてくれた友人や同期、そして家族に万謝いたします。

目次

第 1 章 序論	12
1.1 研究背景	12
1.2 研究課題とアプローチ方法	14
1.2.1 対人コミュニケーション	15
1.2.2 対人コミュニケーションと遠隔コミュニケーションの形態	16
1.2.3 固定型テレプレゼンスシステムの課題	16
1.2.4 移動型テレプレゼンスシステムの課題	17
1.2.5 本研究が提案する自律移動型テレプレゼンス	18
1.3 本論文のコントリビューション	20
1.4 論文構成	22
1.5 主要論文について	22
第 2 章 関連研究	23
2.1 テレプレゼンスと存在感	23
2.2 対人コミュニケーション	24
2.3 人間における顔と身体	25
2.4 可搬性で分けるテレプレゼンスシステム	26
2.4.1 固定型テレプレゼンスシステム	26
2.4.2 装着型テレプレゼンスシステム	30
2.4.3 自律移動型テレプレゼンスシステム	31
2.5 人物とアバターの外見的類似性	32
2.5.1 アバターの形態	32
2.5.2 アバターが及ぼすコミュニケーションへの影響	34
2.6 非言語情報を伝達するテレプレゼンスシステム	35
2.6.1 人物の顔や表情伝達に関する研究	35
2.6.2 人の動作・指示伝達に関する研究	36
2.6.3 視線に関する研究	37

2.7	仮面とテレプレゼンスシステム	38
2.8	本論に関するシステムの位置づけ	40
第 3 章	立体顔形状のスクリーンを用いたテレプレゼンスシステム	44
3.1	LiveMask：デスクトップ型テレプレゼンスシステム	44
3.1.1	背景	44
3.1.2	目的	44
3.1.3	システム構成	46
3.1.4	顔スクリーン作成方法	48
3.1.5	顔スクリーンの形状について	53
3.1.6	立体顔ディスプレイファブリケーション手法	53
3.2	LiveMask の死角に関する予備実験	56
3.2.1	実験目的	57
3.2.2	評価手法	57
3.2.3	実験手順	57
3.2.4	実験結果	58
3.2.5	考察	58
3.3	実験 1.1：表情の判別をする実験	60
3.3.1	実験目的	60
3.3.2	実験方法	60
3.3.3	実験手順	60
3.3.4	実験結果	61
3.3.5	考察	61
3.4	実験 1.2：表情別による判断の推移	62
3.4.1	実験目的	62
3.4.2	実験方法	62
3.4.3	実験手順	62
3.4.4	実験結果	62
3.4.5	考察	63
3.5	実験 2：首の動作による方向指示伝達の評価実験	64
3.5.1	LiveMask と平面ディスプレイによる方向指示評価の目的	65
3.5.2	評価手法	65
3.5.3	実験手順	65
3.5.4	実験結果	66
3.5.5	考察	66
3.6	実験 3：視線に関する評価実験	67

3.6.1	2D と 3D による視線方向の比較評価の目的	67
3.6.2	評価手法	67
3.6.3	実験手順	68
3.6.4	実験結果	68
3.6.5	考察	70
3.6.6	考察	71
3.6.7	結論	74
3.7	PetiteMask: 肩乗せ型テレプレゼンスシステム	74
3.7.1	背景	74
3.7.2	関連研究	76
3.7.3	実装	77
3.7.4	実験	78
3.7.5	目的	78
3.7.6	実験環境	78
3.7.7	実験手順	78
3.7.8	実験結果	79
3.7.9	まとめ	79
第 4 章	ChameleonMask	84
4.1	背景: 自律移動型テレプレゼンスシステム	84
4.2	関連研究	86
4.2.1	Human-Human 型システム	87
4.2.2	分身を持つ/他人になるシステム	87
4.2.3	ディスプレイの装着位置で変化するコミュニケーション	88
4.3	仮面型テレプレゼンスシステム: ChameleonMask	89
4.3.1	ChameleonMask における三つの立場	89
4.3.2	コミュニケーション構造	90
4.3.3	設計方針	90
4.3.4	プロトタイプ	92
4.4	フィジビリティの検証	93
4.4.1	フィールドテストの実施	93
4.4.2	指示の出し方	95
4.4.3	サービスカウンターでのタスク	95
4.4.4	老婦の家でのタスク	97
4.5	考察	99
4.6	結論と今後の計画	100

第 5 章 ChameleonMask を用いたコミュニケーション	101
5.1 使用場面	101
5.2 接触動作	102
5.2.1 ChameleonMask による接触	102
5.2.2 遠隔接触による存在感の強化	102
5.3 関連研究	104
5.3.1 遠隔接触の方法	104
5.3.2 遠隔接触の効果	105
5.4 実験	106
5.4.1 目的	107
5.4.2 実験設計方針	107
5.4.3 握手の方法	109
5.4.4 実験条件	109
5.4.5 実験タスク	110
5.4.6 結果	112
5.4.7 考察	112
5.5 追加実験	114
5.5.1 目的	114
5.5.2 実験タスク	114
5.5.3 実験環境	115
5.5.4 アンケート	115
5.5.5 被験者	116
5.5.6 結果	116
5.5.7 考察	117
5.6 考察	117
5.6.1 Surrogate を通した遠隔接触は可能か?	118
5.6.2 誰が surrogate をすべきか?	118
5.6.3 ChameleonMask を被った人は遠隔ユーザか surrogate か?	118
5.7 結論	119
5.8 その他の実施タスク	119
5.8.1 仮想試着タスク	119
5.8.2 生徒教師のタスク	120
第 6 章 ChameleonMask における役割理解	123
6.1 改善した ChameleonMask	124
6.1.1 システムの軽量化	124

6.1.2	Director からの指示出し方法の追加	125
6.2	実験 1 : Director の体験理解	125
6.2.1	背景	125
6.2.2	実験タスク	126
6.2.3	結果と考察	126
6.3	実験 2 : Surrogate の体験理解	128
6.3.1	背景	128
6.3.2	実験タスク	130
6.3.3	実験シナリオ	131
6.3.4	結果と考察	131
6.4	考察	132
6.4.1	身体的存在感と社会的存在感	132
6.4.2	意思疎通の取り方	133
6.4.3	テレプレゼンスロボット vs Surrogate	133
6.4.4	人が人を遠隔操作したら何が起こるのか?	133
6.4.5	どんな時に ChameleonMask を使うべきか?	134
6.5	結論	134
第 7 章	結論	135
7.1	本論文のコントリビューション	135
7.2	課題と解決策	137
7.2.1	LiveMask における課題	137
7.2.2	ChameleonMask システムにおける課題	137
7.3	今後の展望	140
7.3.1	個の複製と多人格化した個	140
7.3.2	テレプレゼンス以外での用途	140
	参考文献	142

図一覧

1.1	状態で分けた人のコミュニケーション：左：ある環境に留まり会話する 静的なコミュニケーション。右：移動しながら会話する動的なコミュニ ケーション。	14
1.2	遠隔コミュニケーションの形態：上：固定型 中：自律移動型 下：装着型	15
2.1	(a)：物理的に部屋へ訪問 (b)：電子的に部屋へ訪問	27
2.2	左：Cisco Telepresence [32] 右：HP Halo [58]	28
2.3	The mona lisa effect：どの角度から見ても視線が合う現象 [60]	28
2.4	ATR Virtual Space Teleconferencing System [61]	29
2.5	CAVE [21]	30
2.6	左：Teroos [68] 右：Polly [67]	31
2.7	左：Telepointer [65] 中央：GestureCam [66] 右：WACL [64]	31
2.8	Hydra [26]:(a) 3人の遠隔ユーザが video “surrogate”として参加 (b) 円 卓会議の席配置を (a) で再現	32
2.9	テレプレゼンスロボット 左：Texai [11] 右：QB [12] 下：Double [14]	33
2.10	アンドロイドロボット 左：Geminoid [39] 右：Albert HUBO [75]	34
2.11	不気味の谷 [76]	35
2.12	Talking Heads [33]	36
2.13	Mask-bot [78]	36
2.14	TELESAR II [77]	37
2.15	Light Head [80]	37
2.16	Mebot [28]	38
2.17	平面とマネキンに顔画像をプロジェクションした違い [86]	39
2.18	スクリーンによる視線方向の違い [87]	40
2.19	固定型システム関連研究の位置づけ	42
2.20	移動型システム関連研究の位置づけ	43
3.1	LiveMask を通したコミュニケーション	45

3.2	LiveMask システム構成	46
3.3	LiveMask ソフトウェア構成	47
3.4	LiveMask 初期モデル：パン、チルトの二軸の首振り対応	48
3.5	左：正面、中央：横、右：頭部動作を表現するリンク機構	48
3.6	全体を小型化させるため、表面鏡を用いて映像を反射させたモデル。カメラ雲台とサーボモータで三軸の頭部動作を表現。	49
3.7	頭部の三軸の動作：パン-左右に首を振る動作、チルト-上下に頷く動作、ロール-左右に首を傾げる動作。	50
3.8	ロボット基盤を用いたモデル：魚眼レンズをプロジェクタに装着し、全体をさらに小型化。	50
3.9	ロボット基盤を用いた頭部動作：3つのサーボモータによって駆動。	51
3.10	顔画像の処理：顔認識が行われている時のスクリーンショットである。左図のように首を傾げた状態から画像補正後、右図に示す顔テクスチャが生成される。画像は投影用に反転される。	51
3.15	Connex500 という 3D プリンタで出力した顔スクリーン	51
3.11	雄型の石膏作成手順	52
3.12	顔の 3 次元データをスキャンしている様子	52
3.16	眼鏡を 3 D プリンタで出力し接着させた顔スクリーン	52
3.13	顔の 3 次元データを 3D プリンタに入力し、顔モデルを作成している様子	53
3.14	スクリーン作成のバキューム処理	53
3.17	WD-2:56 の自由度で表情をつくる [95]。	54
3.18	MegaFeces：参加者の 3D 写真から模型を変形。	55
3.19	kagami：約 5000 本のロッドがモーターにより押し出され、リアルタイムに立体的な顔が作り出される。	55
3.20	ゲルで作製した顔ディスプレイ	56
3.21	実験 1 の様子：左図は上から見た様子。右図のように被験者は離れた位置からスクリーンを眺め解答した。	57
3.22	スクリーンの比較：2 種類のスクリーンに同じ画像を投影している。左図が平面スクリーン、右図が顔スクリーン。	58
3.23	実験 1 に使用した人物の写真：性別、眼鏡の着用の有無といった外見的特徴が異なるものを使用した。	59
3.24	2 つのスクリーンの死角：(A) 正面から 85 °以上横を向くと死角となる平面スクリーン (B) 凹凸があるため視認される角度が広く 105 °以上で死角となる顔スクリーン	59

3.25	実験に使用した 5 種類の表情の例：ある人物の喜び、悲しみ、怒り、驚き、恐れ の表情を示す。実験ではそれぞれの表情に 4 枚ずつバリエーションがあり、計 20 枚の 画像を見せた。	60
3.26	実験に使用した 6 種類の表情の例：5 種類の表情に「嫌悪」を追加	63
3.27	表情別の識別率	63
3.28	実験 2 の条件：(I) は 2D ディスプレイを用いた条件、(II) は LiveMask に平面スクリーン 用いた条件、(III) は LiveMask に顔スクリーン用いた条件	64
3.29	実験環境と実験条件 (I) の詳細図	64
3.30	平面ディスプレイに表示された 9 つの画像：9 つの模様を視線や首の動きで伝える遠隔話者 を被験者の座った位置から撮影した。それぞれ画像をランダムにディスプレイに表示し、 被験者は画像中の人物がどの記号を指し示しているのか解答した。	65
3.31	実験 2 の様子：LiveMask システムが指し示す方向を見ている被験者	66
3.32	実験 2：方向の判別のしやすさ	67
3.33	視線方向：-30° から 30° まで 10° 刻みに被験者は移動し、スクリーンに投影された 画像と視線が合うか解答する。	68
3.34	実験 3 視線の認識：横軸に画像中の視線角度、縦軸に被験者が視線が合ったと答えた 画像中の視線角度をとっている。顔スクリーンでは結果が対角線上に分布しているの に対し、平面スクリーンは 0° 周辺に帯状に分布している。	69
3.35	条件 (a) カメラ視点 0° - (I) と (II) は画像中の人物の視線角度が 0° の同じ写真を 投影したものである。(III) と (X) は、視線角度が -30° の写真を投影したものである。 視線方向は、平面スクリーンと顔スクリーンで同じであり、(I) と (II) で視線が合う ように感じる。	70
3.36	条件 (b) カメラ視点 -30° - (1) と (2), (3) と (4) はそれぞれ 0°, -30° の視線 角度の写真を投影したものである。視線方向は、平面スクリーンと顔スクリーンで異 なっている。“INCORRECT”は遠隔ユーザの視線方向が被験者に正しく認識されなかつ たことを示す。(the Mona Lisa effect) (1) と (4) では視線が合うように感じるが、 (1) の人物は実際は (2) のように 0° の方向を見ている。もし (3) の人物が -30° の 方向を見たら、(4) のように (3) と視線が合うはずである。しかし、(3) の人物は異 なる方向を見ているように見える。	71

3.37	参考：上の2列は LiveMask システムに対し 30° の位置から写真を撮ったものである。1列目が顔スクリーンに投影した時の写真であり、2列目が平面スクリーンに投影した時の写真である。3から4列目は正面(0°)、5から6列目は右側(-30°)から撮影した様子を示す。	72
3.38	実験：顔の角度は固定し、眼球を動かして視線のみを変えるようにした。左から、視線の角度を 30°,20°... と 10° 刻みにした。	73
3.39	遠隔の話者と装着者、そして第三者とのコミュニケーション	75
3.40	PetiteMask：実寸の 1/14 サイズの顔スクリーンを持つ肩乗せシステム	80
3.41	システム概要	81
3.42	左：実寸大の顔スクリーンを搭載した LiveMask 右：1/14 に小型化させたサイズの比較	81
3.43	サイズの比較：左は、1/14 スケールの顔型スクリーンである。右は実寸大の顔スクリーンである。	82
3.44	実験環境：肩の上に設置したシステムは、図 3.38 をランダムに投影する。被験者は7つの角度のうち、どこを見ているのか答える。	82
3.45	ある被験者の回答：丸は、回答が正解を表す。三角は、正解に隣接した回答を表す。この場合は、正答率が 52.3%、近似正答率は 100%になる。	83
4.1	様々なテレプレゼンスロボット (a)Double [14] (b)Luna [106] (c)VGo [16] (d)Beam [15] (e)Kubi [107] (f)Ava [108]	85
4.2	ChameleonMask を被った surrogate と遠隔ユーザ本人	85
4.3	ディスプレイの装着位置：(a)仮面型、(b)肩乗せ型、(c)首掛け型	89
4.4	2つのコミュニケーションチャンネルを表すシステム概要：1) Public line は director と現地にいる人たちの通信経路である。音声と認識された顔画像が surrogate の iPad に送られる。2) Private line は、surrogate と director 間の通信経路である。Surrogate の周辺環境は、視野映像と音声によって Director に送られ、それを見て director は指示を出す。	89
4.5	Public line：Director は surrogate が見ている視界をモニターで見て、現地にいる人とコミュニケーションをとる。	91
4.6	Private line：Director が、surrogate にだけ指示を出すときに用いる。両者は音声でコミュニケーションがとれる。	92
4.7	初期の ChameleonMask：フルフェイスのヘルメットに段ボールの Hacosco がセットされている。	93
4.8	タスク 1：Surrogate は、director の代わりにサービスカウンターを訪問	94
4.9	タスク 2：母親 surrogate が、娘の代理で老女と会話する様子	94

5.1	身体動作の分類	103
5.2	接触動作のある関連テレプレゼンスシステム	104
5.3	人間関係別による身体の接触が許容される範囲を表したグラフ [139]	106
5.4	実験条件：被験者にとって、遠隔ユーザと surrogate が他人/知人の4条件を用意した。	107
5.5	握手の合図を確認する方法：遠隔地から director は、握手の合図を送る。そのメッセージがマスク内のディスプレイに表示され、それを見て surrogate は手を差し出す。	108
5.6	実験シーン：右は director 役であり、左は surrogate と被験者である。	111
5.7	Q4 の実験結果	112
5.8	Q5 の実験結果	113
5.9	Q6 の実験結果	113
5.10	実験環境の様子：条件 A、B は別々の人物が surrogate を行っている。両者の手に外見的大きな違いはない。	115
5.11	被験者が director の話を聞き、surrogate を通して握手をしている様子。	116
5.12	追加実験の結果	117
5.13	遠隔から店内を買い物する様子	121
5.14	遠隔にいる教師と話す女子生徒	122
6.1	Surrogate は HMD(Hacosco) にセットされたフレネルレンズを通して iPhone の外カメラからの映像とコーナーに表示された director を見る。この映像は director に送られている。	124
6.2	Script mode: 左-遠隔地からメッセージをタイピング 右-送信された文字が Surrogate の視界にオーバーレイされる。	126
6.3	Hand gesture mode: LCD ディスプレイの光学現象を利用。偏光フィルターをカメラにとりつけ、黒背景から手を検出して抜き出し、surrogate が見る映像にオーバーレイしている。	127
6.4	左: 遠隔ユーザが店員と話している様子。右: Surrogate が果物屋に入っていく様子。	129
6.5	被験者は、屋外でテレプレゼンスロボットと surrogate を遠隔操作し、使用感を比較した。	129
6.6	実験1の結果	130
6.7	左: Director が近くで見たい洋服を指差している。右: Director の顔がディスプレイに表示されている。Surrogate は洋服を取って director に見せている。	131
6.8	アンケートの結果	132

表一覧

2.1	Marjorie による非言語情報の分類 [29]	25
2.2	固定型テレプレゼンスシステム関連研究の比較	42
2.3	自律移動型テレプレゼンスシステム関連研究の比較	42
3.1	5 種類の表情認識の精度	61
3.2	実験 3 : 視線の認識	73
3.3	結果	79
5.1	被験者からみた Surrogate / Director (遠隔ユーザ) の人間関係による条件	109
5.2	実験の順序	110
6.1	実験 1 のアンケート	128

第 1 章

序論

1.1 研究背景

遠隔会議システムと“Telepresence (テレプレゼンス)”は、別々の起源と過程を経て発展してきた。遠隔会議システムの始まりは、1968年にEngelbartが開発したNLS (oN Line system) に遡る。Augmented research centerにて行われた公開デモは、世界で初めてマウスやハイパーテキスト、グループウェアの技術が紹介されたほか、異なる拠点間からスクリーンを共有し、音声や映像を用いて対話する会議システムが提案された [1]。グループウェアとは、「共通の仕事や目的を持って働くユーザグループを支援し、共同作業環境へのインタフェースを提供するコンピュータベースのシステム」のことである [2]。一方、テレプレゼンスは危険地域で人間の代わりに作業する遠隔操作ロボットの研究が発端である。1967年に発表されたNASAのTeleoperators and human augmentationのレポートによると、“teleoperators” (遠隔操作技術) は原子力発電や宇宙開発によって促進された研究分野であった [3]。人間が立ち入れない場所で、身体の一部として動作する技術や身体能力を拡張する技術が求められていた。しかし、当時の遠隔操作ロボットの操作性が悪かったため、Marvin Minskyはそれを揶揄し、telefactor、teleoperatorという表現より身体の延長として遠隔操作できる技術や、その結果もたらされる現地にいるかのような感覚を“telepresence”と提唱した [4]。近年使われるテレプレゼンスの意味は、より概念が拡大し高度な操作を指すようになった。テレプレゼンスが別の意味を持つようになった契機は、技術的な焦点に人間の視点を加えたことにある [5]。Ontario telepresence project は、テレプレゼンスの意味解釈の拡大に貢献した3年がかりのプロジェクトである [6]。距離で隔てられたグループがディスプレイやオーディオを使ったメディアスペースの設計によってどう支援されるか調べている。プロジェクトリーダーであるBuxtonは、テレプレゼンスを離れた場所のメンバーと共有する感覚、または空間と述べている [7]。そして、Masonは、テレプレゼンスは現実の人々と相互作用する感覚であると述べた [8]。このように、対人コミュニケーションの研究が進むと、現地

の対話者にとっても遠隔ユーザが同じ空間にいるように感じる、つまり相手の存在感を感じる事が求められるようになった。テレプレゼンスの定義は、2章の関連研究でもう少し詳細に論じるが、まとめるとテレプレゼンスは、二つの意味に分類できる。一つは、遠隔ユーザが別の場所にいるように感じる存在感である。もう一つは、対話者が同じ空間に遠隔ユーザがいるように感じる存在感である。本博士論文の研究は、後者の遠隔ユーザの存在感の伝達を目指している。

遠距離にいる人々とコミュニケーションをとる需要は高く、古くは手紙、電報、電話、メールなどとメディアを変遷させてきた。そして、ネットワーク速度の向上により、映像と音声のビデオストリーミングが可能になると遠距離間のリアルタイムコミュニケーションが盛んに行われるようになった。Skype [9] や Google Hangout [10] は、PC やスマートフォンで一般的に用いられているビデオアプリケーションである。テレプレゼンスシステムは、ビデオアプリケーションのように音声と映像を伝送するだけでなくあたかもその場にいるように感じさせるための設計思想や技術を持つシステムである。テレプレゼンスシステムの用途は、多岐に渡る。遠方にいる家族や友人とコミュニケーションを図るプライベート用途から、オフィスや教育現場、医療現場で用いるシステムが開発されている。例えば、地方における医師不足が問題化しているが、テレプレゼンスシステムが導入されることで、医師は移動の手間が省け、複数拠点の診療が可能になり、遠方に住む患者の診察が可能になる。このようにテレプレゼンスシステムは移動時間や場所の制約を解消させ、当事者間や専門家によるコミュニケーションを円滑化させる。

テレプレゼンスの歴史は、制御ロボットが発端であったが、CSCW (computer supported cooperative work)、HRI (human robot interaction)、HCI (human computer interaction)の研究分野に波及し、心理学や社会科学の知見や考察を経て発展した。CSCW は、協調作業をコンピュータによって支援する研究分野であり、グループウェアを開発するだけでなくグループウェアが社会に及ぼす影響を調査、分析することも含む。1991年の Ontario telepresence project [6] が初期の研究であり、遠隔コミュニケーションシステムの礎を築いた。HRI は文字通り、人とロボットの対話やインタラクションを研究する分野であり、ロボットを人のアバターとして遠隔操作する研究がある。アバターは、コンピューターグラフィックス上に存在する自身のキャラクターを意味することが多いが、ここでは物理的に存在する分身を指す。近年では、遠隔操作が可能なロボット [11, 12, 13, 14, 15, 16]、空中飛行型 [17, 18] など様々な自律移動型システムが開発されている。HCI は、コンピュータと人のインタラクションを研究する広範囲な分野であるため、CSCW、HRI が主とする研究アプローチの他に、新しいインタフェースを用いたテレプレゼンス研究がある。三次元形状を再現するもの [19, 20]、VR [21, 22]、ホログラフィックス [23, 24] などである。テレプレゼンスシステムは、テレビ会議型システムやテレプレゼンスロボットなど市販化されているものもあり、研究として十分に成熟し、複雑になりすぎて何が問題か分かりにくくなっているという見解がある [25]。テレプレ

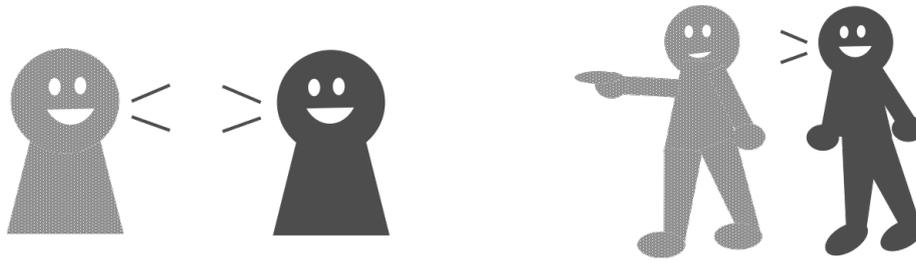


図 1.1: 状態で分けた人のコミュニケーション：左：ある環境に留まり会話する静的なコミュニケーション。右：移動しながら会話する動的なコミュニケーション。

ゼンスシステムの基本構造は初期から変わりがなく、近年は、システムの一部機能の向上を人間の視点に立って検証する研究が多い。研究分野全体に見える傾向であるが、新しいUIやハードウェアシステムの提案より、新しいデザインの知見を得る目的でシステムを使用したユーザの行動観察をする研究が増えている。これらの経緯を踏まえ、本博士論文では人のコミュニケーションで用いるテレプレゼンスシステムについて問題点を明らかにし、それに対するアプローチを論じる。

1.2 研究課題とアプローチ方法

会議のように予め時間や場所が決まって行われるコミュニケーションもあれば、特定の場所に関わらず、人が集まって自然に生まれるコミュニケーションがある。特に、後者のコミュニケーションは、遠隔ユーザを物理的に具現化させることで対人関係で行われているやり取りや関係性を再現し、存在感の提示を試みてきた [26]。これらのテレプレゼンスシステムは、遠隔ユーザの分身としてシステムに顔を映すディスプレイや身体を模した機構を持たせ、外観や動作の擬人化が行われている。人とシステムの外観上の違いが、コミュニケーションに影響を及ぼすことや [11, 27]、システムのジェスチャー動作が話し相手に親近感を与える [28] など、それぞれの重要性が研究によって示されている。テレプレゼンスシステムの使用用途は広がっており、今後より遠隔ユーザの要求に応えるシステムが必要になるだろう。しかし、既存システムは未だ機械的であり、開発コストを上げずにその人らしい外観と動作を両方兼ね備えさせることは難しい。“具現化する”は、英語の動詞で *embody* または *personalize* である。テレプレゼンスシステムは、人間のように動作できるよう開発されてきたが、人間らしさの先にあるその人らしさ (Personality) まで表現することで遠隔ユーザの存在感は高まると考えられる。そこで、本博士論文ではコミュニケーションの形式別に、その人らしさを具現化した (personalized) テレプレゼンスシステムについて論じる。

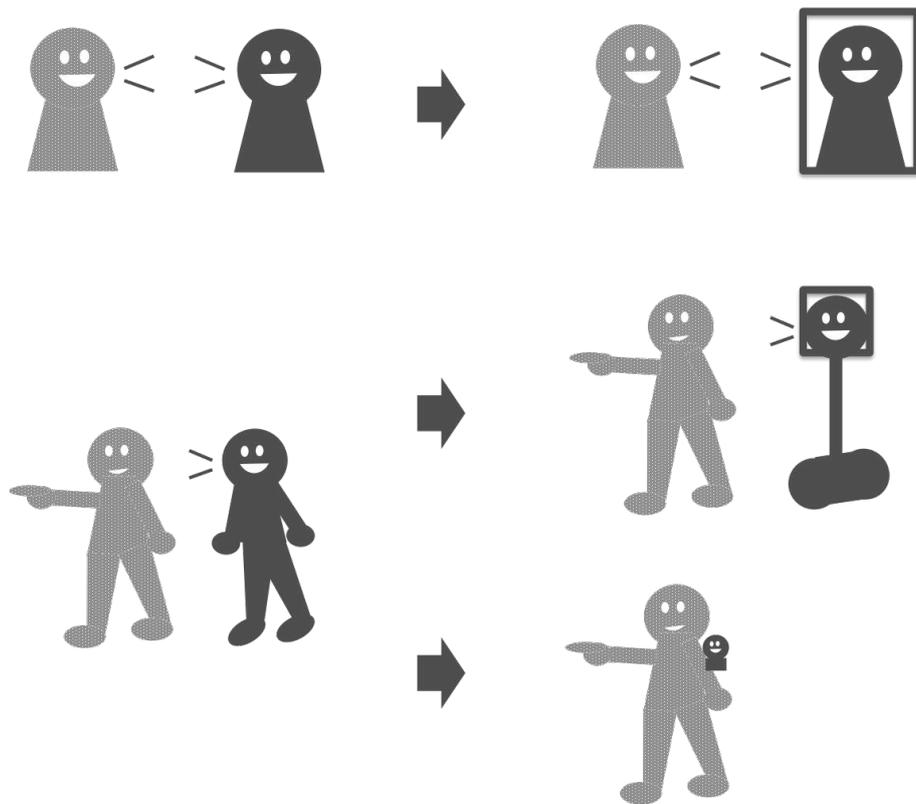


図 1.2: 遠隔コミュニケーションの形態：上：固定型 中：自律移動型 下：装着型

1.2.1 対人コミュニケーション

人のコミュニケーションは、言葉以上に非言語で表される情報によって成り立つと言われている。言語学者 Ray.L.Birdwhistell によると、二者間の対話では言葉によって伝えられるメッセージは 35%にすぎず、残りの 65%は話しぶり、動作、ジェスチャー、相手の間の取り方など言葉以外の情報によって伝えられる [29]。言語情報と非言語情報では、伝える情報の種類が違い、事実情報を伝えるには、言語情報が最適であり、感情表現は非言語情報の方が優れてると言われている [30]。会話の中身が大事なことは言うまでもないが、感情が強く関わっている場合には相手の感情に注意を向けることが重要である。社会心理学では、コミュニケーションは対人行動のひとつであり相互作用によって行われるものと位置づけている [31]。そして、そのコミュニケーションによって、人は対話者と情報共有をしているだけでなく、本当の自分の姿を知ってもらう自己開示や特定の印象を植え付ける自己提示、説得などを行っている。このように対人コミュニケーションは、多様の目的があり、その目的を果たすために言語情報や非言語情報を使って複雑なインタラクションを行っている。テレプレゼンスシステムで対人コミュニケーション

ン支援するには、これらに配慮する必要があるだろう。

1.2.2 対人コミュニケーションと遠隔コミュニケーションの形態

対人コミュニケーションは、対人関係と対人心理の二つの要素が作用する [31]。つまり、相手との関係性や相手に対して持っている印象が、コミュニケーションに影響を与える。人が対話相手に応じてコミュニケーション方法を変えているように、テレプレゼンスシステムも使用場面に応じて適した形式があると考えている。同じ空間で行われるコミュニケーションを人の状態に応じて大別すると、人々が向かい合って静的に話す状態と、動的に移動しながら話す状態の二つがある (図 1.1)。これらの会話を遠隔コミュニケーションで再現するには図 1.2 の三種類の形式が考えられる。静的なコミュニケーションは、ディスプレイを通して遠隔ユーザの姿を伝えるが、ただ映すだけではなく実際の人物と同程度の大きさで映し出したり [32]、話者の席配置を再現することが行われている [26]。一方、動的なコミュニケーションは二種類の再現方法があると考えられる。一つは、遠隔ユーザが自律移動型システムを遠隔操作する方法である。自律移動型システムは遠隔ユーザのアバター、つまりある空間における分身であり、自由に移動する独立した存在である。もう一つは、小型化したアバターを話者の身体に装着し、持ち運んでもらう方法である。装着型システムは、実際のコミュニケーションで実現できない人の小型化や位置関係を持つ点で遠隔コミュニケーションならではの形態と言える。装着型コミュニケーションは、遠隔から知識者が装着者にアドバイスを与える場面で用いられることが多い。そして、視線の高さが近いことや物理的な距離の近さから、堅苦しくないコミュニケーションで利用される。装着型システムは、常に一緒にいるのでガイドや通訳などのサポート業務に適し、人が現地に赴き一緒に帯同するより効率的なシステムである。このように移動しながらとるコミュニケーションは、両者どちらの形式でも対応できるというより、使い手と用途によって適する形態を選ぶものである。本博士論文は、コミュニケーション形態別に、汎用性も考慮した遠隔ユーザの存在感を伝達するテレプレゼンスシステムについて論じる。

1.2.3 固定型テレプレゼンスシステムの課題

まず、固定環境で用いるテレプレゼンスシステムにおける問題点を述べる。固定環境のテレプレゼンスシステムは遠隔にいるユーザの顔や上半身をディスプレイで映し、コミュニケーションをとる。注目したのは、ディスプレイの形状である。既存のテレプレゼンスシステムは、遠隔ユーザの顔を映し出すために平面ディスプレイが用いられることが多い。しかし、顔はその人が誰であるかを特定でき、多くの非言語情報をつくる重要な身体部位である。平面ディスプレイに、顔を映し出すと外見的特徴、色彩といった非言語情報を伝えることができるが、頭部動作の空間的な位置把握や視線方向の伝達が

困難である。頭部動作は注視方向を向いたり、会話における同意や否定の意志を表現する非言語情報の一つであり、視線は、会話のターンテイキングやアイコンタクトをとるために重要な役割を持った非言語情報である。既存研究に Talking heads [33] と呼ばれる顔形状のスクリーンを持つシステムが存在するが、顔スクリーンによる具体的効果は明らかにされていない。そこで、顔形状のスクリーンを持つテレプレゼンスシステムによって、これらの非言語情報の伝達ができるか調べることにした。

1.2.4 移動型テレプレゼンスシステムの課題

次に、移動環境で用いるテレプレゼンスシステムにおける問題点を述べる。移動時の遠隔コミュニケーションは、装着型か移動型のシステム形態をとる。装着型テレプレゼンスシステムは、実際の人々が他人の肩や身体に乗ってコミュニケーションすることがないように、ありのままの人を具現化すればよいものではない。現地で、通訳者や上司がサポートとして同行し、コミュニケーションするやり取りを変換した形式に近く、遠隔から指示が出たり、サポートするだけの目的であれば遠隔ユーザの“顔”は必須ではない。顔があることによってもたらされる効果は、表情から相手の考えや気持ちが読み取りやすいことでコミュニケーションが円滑化することである。コミュニケーション相手の表情を読み取るのであれば、ヒューマンロボットの機械的な表情より、ディスプレイに人の表情を映すことが有効である [34]。そこで、固定型システムで用いた顔スクリーンが装着型システムに応用できるか調べることにした。装着型で用いるために顔スクリーンを小型化させ、肩に乗せた位置から遠隔ユーザの視線方向が伝達できるか実験で調べている。

自律移動型システムは、固定型や装着型より具現化させることが困難である。主な理由は、二つあり、一つは現地に遠隔ユーザの外見と機能を備えるアバターの具現化が難しいこと。二つ目は、人間の外見や機能を具現化するために開発コストがかかり、汎用性が低いことである。人間の身体は、外見的特徴に加え、ボディジェスチャーや対人空間の間の取り方などの非言語情報を表現する。人は、コミュニケーションを通して意思表示を示すだけでなく、自己表現を行ったり、相手への説得を試みる。話し相手から理解や共感を得るため、服装に気を遣い、表情やボディジェスチャーを使ってコミュニケーションを行っている。遠隔コミュニケーションシステムが、Face to face のコミュニケーションに及ばないのは、言語情報以外で発せられる非言語情報が伝達できない理由があるだろう。

自律移動型システムの代表的なものに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は、物理空間を遠隔操作によって移動できる機動性を持ったビデオ会議端末である。市販化され多様な種類があるが、機構は共通しており、遠隔ユーザの顔を映すタブレットが高さ調節できるポールなどに設置され、足下に車輪を搭載した簡易な機構

を持つ。初期に開発されたテレプレゼンスロボットの P_{RoP} は、その外観をあえて必要以上に擬人化させない設計方針をとっていた。その理由は、複雑な機構はコストがかかり、操作が難しいため汎用性に欠けるということであった [35]。Jouppi は、遠隔ユーザと対話者の両者にとって没入感の高いシステムを開発する [36]。中西らは、テレプレゼンスロボットの移動が、存在感の提示に有効であることを示したが、テレプレゼンスロボットを使わず、最小限度のデバイスによって効果を再現しようとした。その理由も同様に、制作や利用に関するコストを下げ、多様なビデオ端末に拡張することを示唆している [37]。P_{RoP} が提案されてから約 20 年間、テレプレゼンスロボットの基本構成に変わりはなく、移動性によってもたらされるコミュニケーションの印象効果を調べる研究が多い。その結果、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 [38]。

人間に近い外見を備えたものが、アンドロイドロボットである。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。遠隔操作することでテレプレゼンスシステムとして用いることがあるが [39]、遠隔操作型であって、自律移動型ではないと言っているように、外観として人の手足を持つが、人間が行う多様な動作すべてができるわけではない。また、一体当たりの開発コストが高く、すべての人が自身のアンドロイドロボットを持つことは現実的ではない。遠隔ユーザをホログラフィックや VR 空間上に具現化させる研究もあるが、遠隔ユーザの意志で現実空間でものを動かしたり、接触することはできない。このように既存のテレプレゼンスシステムは、人間の“動作性”を一部手に入れたシステムであり、身体性を伴うコミュニケーションができない。

1.2.5 本研究が提案する自律移動型テレプレゼンス

人間の身体に近い外見と動作の追求は、トレードオフであり、一部動作が機械的に再現できても、コストを抑え、人間ができる多様な動作を人間の外観で兼ね備えさせることは難しい。そこで、本論はテレプレゼンスロボットを操作する代わりに、“人”を遠隔操作することで遠隔ユーザの存在感の提示を目指す。人であれば元から身体の外観と全身動作ができる身体能力を持ち合わせる。遠隔ユーザの代理となる人(以降、surrogate と呼ぶ)に遠隔ユーザの顔を表示する仮面型テレプレゼンスシステム、ChameleonMask を被ってもらうことで、人間の身体としての存在感と遠隔ユーザの顔による社会的な存在感を提示することができると考えた。仮面型テレプレゼンスシステムは、遠隔ユーザの顔を映し出すタブレットを備えたものであり、surrogate に仮面システムを被ってもらうだけなので、汎用性が高くコミュニケーションを実現できる。

本提案システムの使用場面について述べる。本システムは、基本的には遠隔ユーザと現地の人々が話す、1 対 N のシステムである。遠隔ユーザ自身が、現地で周囲の人とコ

コミュニケーションをとりたい時に使用する。遠隔ユーザの顔が映ったディスプレイを持ち運んだり、肩に乗せると装着型システムになり、コミュニケーションは、遠隔ユーザ、装着者の2対Nになる。1対Nのコミュニケーションにするためには、surrogate 役の顔を隠すためにディスプレイを仮面として装着してもらう必要がある。詳細は、2章で仮面について述べた。

人を自分のために働かせるという枠組みは、奴隷制度を回想する人もいるだろう。改めて、ロボットについて言及したい。「ロボット」という言葉は、1920年にチェコスロバキアの作家「カレム・チャムペク」が機械文明の発達と乱用に対する批判をテーマにした戯曲「R.U.R (ロッサム万能ロボット)」の中で使われた造語であるが、元々は、チェコ語で強制労働や退屈で卑しく不快で奴隷的な仕事を意味する「ロボータ」が語源である。館によると「人類の太古からの夢の一つに、自分の命令にしたがって仕事をかわってやってくれる忠実な能力ある奴隷を持つこと」があり、その気持ちの現れがロボットを生んだと言っている [40]。そして、奴隷はある意味、優秀なロボットであったが、人が人をロボットとして使うという非人道的な方法ではなく、ロボットを使うことによって昔からの夢を実現させようとした。ウィーナーは、ロボットに、人にとって嫌な仕事、危険な仕事、退屈な仕事を任せ、人は非人間的な仕事から解放されて、もっと人間的な生き方を志向することを提唱した [41]。テレプレゼンスの成り立ちも、危険地域で人の代わりに作業するロボットの需要が発端であった。嫌な仕事を代わりにする存在が、テレプレゼンスシステムの役目である。しかし、昨今は、ネットワークの進化やロボットの低コスト化により、普段使いされるようになった。つまり、嫌な仕事だけでなく、やりたい仕事まで場所の制約からテレプレゼンスシステムを使うようになっている。日常利用が進むほど、テレプレゼンスシステムに求める要求が上がることが予想される。人がやりたい仕事とは、何かしら楽しさが感じられ、賞賛が得られたり、成長を感じられるものであろう。地理的制約によって直接現地に行けなくとも、その場の臨場感を感じ取り、自分の身体として自由に動き回って、自己表現したいと考えるのは自然な欲求である。その時に、量産型の画一的な姿ではなく、個性や仕草が表現できる肢体や機能が必要になるだろう。近年のテレプレゼンス研究が、ある一定水準のコミュニケーションを可能にしてもなお、一部機能を付け足して開発されるのはこのような経緯によるものと考えられる。これまでのテレプレゼンスシステムは“humanlike”(人間らしさ)を追求するものが多かったが、これからは個別の要求に応えられ、個人に最適化された“Personalized”されたテレプレゼンスシステムが台頭すると考えている。ChameleonMaskはsurrogateの存在によって、遠隔ユーザの要望を聞き、見た目や仕草をチューニングさせることが、機械より容易だろう。

そして、ChameleonMaskで行われる仕事だが、ある人にとってやりたい仕事は、他の人にとってもやりたい仕事であることが多い。ChameleonMaskでは、その仕事をロボットではなく、人に解放する。インターネット上で、仕事を発注するワークスタイル

は、uber¹ や taskrabbit² のように一般化しつつある。人にとっても、ロボットではなく人に頼れることは有用であろう。奴隷のような仕事は、従来のようにロボットに任せべきであり、ChameleonMask は人がやりたいけどできない仕事、アルバイトとして成立する仕事で行われるものである。

これまで遠隔ユーザの顔がストリーミングされたディスプレイを人が被る、仮面型テレプレゼンスシステムに関する研究は行われていない。そこで、ChameleonMask の実現可能性を調べるためフィジビリティテストを行う。また、基本的なシステムの設計方針やコミュニケーションフレームを整理する。そして、ChameleonMask の適する利用場面や使用方法を検討し、遠隔ユーザの代理を“人”がすることができるのか論じる。

1.3 本論文のコントリビューション

1. ディスプレイと可搬性に注目したテレプレゼンスシステムの整理と提案

- (a) 既存のテレプレゼンスシステムを可搬性で分類し、固定型システム、装着型システム、自律移動型システムの問題点を整理した。
- (b) 実際のコミュニケーションに近い感覚を得るテレプレゼンスシステムとして非言語情報に注目した。
- (c) 非言語情報である頷きや首振りなどの頭部動作や視線伝達ができる、固定型テレプレゼンスシステム (LiveMask) を考案した。
- (d) 非言語情報である外見的特徴や動作、対人空間の取り方が再現できる、自律移動型テレプレゼンスシステム (ChameleonMask) を考案した。

2. 立体顔形状のスクリーンを用いたテレプレゼンスシステムの開発と検証

- (a) スクリーンのみを顔スクリーンに変更する汎用性の高い方法によって、遠隔ユーザの分身をつくり、非言語情報の伝達を目指した。
- (b) 遠隔ユーザの顔と頭部動作を抽出して、顔映像を投影し三軸で動作するテレプレゼンスシステム、LiveMask を開発した。
- (c) 顔スクリーンと平面のスクリーンに投影された人物の死角や表情の認識に違いが生じるか実験を行った。その結果、顔スクリーンは死角が少なく広範囲な角度で見えるため、複数人でテーブルを囲んで会話をするような場面でも視認されやすいことが分かった。その一方、平面スクリーンと顔スクリーンの表情の認識のしやすさに関しては、差異が見られなかった。

¹<https://www.uber.com/>

²<https://www.taskrabbit.com/>

- (d) 遠隔ユーザの頭部動作に追従する LiveMask の動きが、方向指示の伝達に有効であることを示した。平面スクリーンでは、遠隔ユーザが首を傾けている方向や視線の先を読み取ることが難しいが、LiveMask では一位の方向を示すことが確認できた。
- (e) 顔スクリーンが、意思疎通や会話を促進させる視線伝達を可能にすることを示した。平面スクリーン使用時に遠隔ユーザが正面を見る場合、モノリザエフェクト(どの角度から見ても、視線が合うように感じる現象)が起こるが、LiveMask では起こらなかった。LiveMask の特徴である、立体形状の顔スクリーンが視線方向を伝達するのに有効であることが明らかになった。
- (f) 顔スクリーンを小型化しても視線伝達の効果が担保されることを示した。実寸大の 1/14 サイズの顔スクリーンを作成し、視線伝達ができるか実験を行った。これにより、小型化が求められるウェアラブルシステムや自律移動型システムでも顔スクリーンが使用できることが分かった。

3. 人を用いたテレプレゼンスシステムの開発と検証

- (a) 自律移動型システムとして人に遠隔ユーザの仮面を被ってもらい、human surrogate になる仕組みを提案した。
- (b) 仮面型テレプレゼンスシステム、ChameleonMask のハードウェアプロトタイプを開発した。
- (c) “人”を遠隔操作するにあたってのコミュニケーションフレームを整理した。
- (d) ChameleonMask のフィジビリティを検証し、surrogate が遠隔ユーザ本人だと思われる傾向があることを示した。
- (e) 遠隔ユーザから surrogate へ指示出しできる機能を実装した。音声による指示に加え、スクリプトによる指示とハンドジェスチャーによる指示出しが可能になった。
- (f) 被験者に surrogate になってもらい、surrogate の体験に関する知見を得た。被験者は、surrogate になることに対してポジティブに考える人が多かった。
- (g) 被験者に遠隔ユーザ役(以降、指示する人という意味で director と呼ぶ)になってもらい、ChameleonMask とテレプレゼンスロボットの使用感を比較した。テレプレゼンスロボット使用時は、操作に集中してしまう傾向が出た。
- (h) ChameleonMask で実現できる動作を整理した。接触コミュニケーションの可能性を調べるため、遠隔握手の実験を行った。Director、surrogate が知人同士の時に接触効果が高かった。
- (i) ChameleonMask を使った新しい応用について考察した。

1.4 論文構成

2章以降の論文構成を述べる。2章では、テレプレゼンスに関する関連研究の紹介と本研究の立ち位置や新規性を述べる。3章では、人の顔を具現化するにあたり、従来のシステムでは実現できていなかった遠隔ユーザの頭部動作や視線伝達が、LiveMaskシステムによって解決できるか述べている。システム構成や顔スクリーンの作成方法について紹介し、顔スクリーンと平面スクリーンの比較実験について論じる。また、小型化した顔スクリーンによる視線伝達の効果について検証した結果を述べる。4章では、人の身体を具現化する方法として、人を遠隔操作するテレプレゼンスシステム、ChameleonMaskについて論じる。人を介したテレプレゼンスシステムのコミュニケーションフレームを整理し、システム構成について述べる。そして、フィジビリティテストについて論じる。5章では、ChameleonMaskを用いたコミュニケーションについて論じる。ChameleonMaskをどんな場面で使用するのが論じる。そして、非言語情報の一つである、接触を伴うコミュニケーションが成り立つのか調べた実験について述べる。6章では、ChameleonMaskを使用した時の遠隔ユーザや surrogate の体験について考察する。被験者に、遠隔ユーザ役と surrogate 役になってもらい、印象評価を行った結果について述べる。7章は、本博士課程研究の結論をまとめる。上述の研究結果を踏まえた、現状の課題や今後の展望について述べる。

1.5 主要論文について

本論で紹介するシステムやその知見は、ACM プロシーディングスに掲載された論文が基になっている。LiveMask [42, 43] に関する研究では、システムの紹介や実験について述べている。そして、顔スクリーンを小型化させても視線伝達が可能か調べた結果を論文にまとめている [44]。この論文では、肩に乗せるウェアラブルデバイスを想定し、PetiteMaskを作成して実験を行った。ChameleonMaskに関する研究では、コンセプトの提案とフィジビリティを検証した論文 [45]、ハードウェアやソフトウェアを開発し、遠隔ユーザや surrogate の体験について論じた論文 [38]、ChameleonMaskの用途として遠隔接触が可能か調べた論文 [46] がある。これらの研究は、筆者が第一著者として研究を推進し、執筆した論文である。

第 2 章

関連研究

2.1 テレプレゼンスと存在感

The biggest challenge to developing telepresence is achieving that sense of “being there.” Can telepresence be a true substitute for the real thing? -Marvin Minsky

1980年にMarvin Minskyは、雑誌Omniで“Telepresence”の概念を提唱した[4]。原子力施設や鉱山など危険地域に人間が赴くことなく、遠隔ユーザの眼や手の代わりになるテレプレゼンスシステムを身体の一部として遠隔操作できることで、その場にいるかのような感覚を得ることを目指していた。Minskyの“テレプレゼンス”の提唱と同時期に、日本では、館がロボットとオペレータが一体化したような感覚をオペレータに与え、ロボットの制御を可能とする技術概念をテレグジスタンス（遠隔臨場制御）と提唱した[47, 48]。テレグジスタンスは、通産省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」の中心的な考えとして採用され、人が立ち入れない原子力や海洋、石油コンビナートで人の代わりに作業するロボットの技術推進に貢献した経緯があり、日米似通った過程を経て発展している。テレグジスタンスとテレプレゼンスは同じ意味を指すが、館は「テレグジスタンスとバーチャルリアリティはある意味では全く同一」と述べているように[49]、バーチャルリアリティの一分野として視覚、聴覚、触覚に関するテレグジスタンスの研究を行っている。

このように、テレプレゼンスやテレグジスタンスは、遠隔操作する技術やそれによって得られる感覚を表す言葉として用いられていた。ビデオコミュニケーションの普及により、遠距離にいる人々との作業スペースの設計が求められるようになると、遠隔ユーザがその場にいるように感じるだけでなく、対話者にとっても遠隔ユーザが同じ空間にいると感じさせることが必要になった。テレプレゼンスは、このように遠隔ユーザが感じる存在感と対話者が感じる存在感の二つの意味があり、本博士論文の研究は、後者の遠隔ユーザの存在感の伝達を目指している。

存在感は主観的な尺度であり、その意味は一義に定まっていない。Bioccaは、存在

感を空間的な存在感、自己反映的存在感、ソーシャルプレゼンスの3つに分類している [5]。空間的存在感とは、テレプレゼンスシステムを通して訪れる空間や仮想空間にいる感覚である。自己反映的存在感とは、実際の環境に呼応するモノがある環境下に存在すると認識する感覚を言う。例えば、PCのデスクトップ上のゴミ箱や時計を認識する感覚である。そして、ソーシャルプレゼンスとは電話などメディアを通して話す相手が、ここにいるように感じる感覚である。遠隔コミュニケーションでは、このソーシャルテレプレゼンスを伝えることを目指しており、本研究でもこの定義に従って議論を行う。

2.2 対人コミュニケーション

テレプレゼンスシステムによって遠隔コミュニケーションを実現させるには、対人コミュニケーションを理解する必要がある。社会心理学的な考察によると、対人コミュニケーションは、対人行動の一つであり、その主な目的は情報や知識をお互いに伝えること、楽しむこと、相手へ影響を与えること、対人関係を形成・維持すること、課題を解決することがある [31]。そして、対人コミュニケーションは相手に抱いている対人心理と対人関係の二つに影響を受けて行われる。親子や友だち同士、上司と部下のような立場関係と相手に対して持っている感情の相互作用によって印象が決まる。

メッセージを構成する符号によって言語を使用する言語コミュニケーションと言語を使用しない非言語コミュニケーションに分けられる。言語コミュニケーションであっても、音声の大きさ、高さ、抑揚、間の取り方といった非言語的側面が必ず付随しており、非言語的側面を持たない純粋な言語的コミュニケーションは存在しない。Marjorie による非言語情報の区分を表 2.1 にまとめた [50]。非言語情報には、身体動作（身振り、姿勢、表情、凝視など）、空間行動（対人距離、なわばり、個人空間など）、身体接触がある。その他、身体的特徴（体型、体臭、皮膚の色）や人工品（化粧品、装飾品など）も非言語情報であり、一定の役割を果たすといわれている。非言語情報は、意識下、無意識下で発せられ、コミュニケーションの 65% の情報を構成するとも言われる [29]。テレプレゼンスシステムが、Face-to-face コミュニケーションに及ばないと言われる所以は、対人コミュニケーションでやりとりされる多くの情報が伝達できていないからであろう。コミュニケーションで情報や知識を伝達するだけであれば、簡易な機構のテレプレゼンスシステムでよい。しかし、対人行動には自己表現も含まれており、人は本当の自分の姿を知ってもらう自己開示やある特定の印象をつくる自己提示を行っていること、またコミュニケーション自体を楽しみ、人間関係を構築する手段として使っている [31]。以上のことから、既存のテレプレゼンスロボットより非言語情報が伝達できるテレプレゼンスシステムが必要であると考え、研究を行っている。

表 2.1: Marjorie による非言語情報の分類 [29]

(1) 人体	コミュニケーション当事者の遺伝因子に関わるもろもろの身体的特徴の中で、なんらかのメッセージを表すもの。たとえば、性別、体格、皮膚の色など
(2) 動作	人体の姿勢や動きで表現されるもの
(3) 目	視線の交差（アイコンタクト）と目つき
(4) 周辺言語	話し言葉に付随する音声上の性状と特徴
(5) 沈黙	
(6) 身体接触	相手の身体に接触すること、またはその代替行為による表現
(7) 対人的空間	コミュニケーションのために人間が利用する空間
(8) 時間	文化形態と生理学の二つの次元での時間
(9) 色彩	

2.3 人間における顔と身体

遠隔コミュニケーションでは、遠隔ユーザが同じ空間にいるように感じさせることが重要である。Hydra は、1992 年に開発された 4 人でビデオ会議をするテレプレゼンスシステムであり、3 人の遠隔ユーザの存在感を提示するために “video surrogate” としてそれぞれを具現化したシステムをテーブルに配置させた [26]。本研究においても、遠隔ユーザの顔と身体を具現化させることを行っている。

顔は、その人が誰であるかを特定し、多くの非言語情報をつくる重要な身体部位である。遠隔コミュニケーションでは、すべての周辺情報を双方向に共有することは困難であり、直接会って話したかのような感覚を得るには、声が聞こえ、顔が見えることが最低限必要である。ある人の名前を聞いて、顔を思い浮かべるように、顔は社会の中で、個人を特定する身体部位である。人間の脳には、顔認識を専門とする領域があることが明らかになっており [51]、早ければ生後 4 ヶ月から顔の識別ができるようになると言われている [52]。そして、人は顔色、視線考査、瞳孔拡大を見て、その人の健康状態や感情を読み取る。顔は重要な身体部位であることから注目したのは、ディスプレイの形状である。人の顔は立体であるが、従来、遠隔ユーザの顔を映し出すディスプレイは平面形状であった。そこで、人の顔型から作成した顔スクリーンを用いたテレプレゼンスシステムを開発し、平面的なディスプレイでは実現できない非言語情報の伝達が可能か実験を行った。

次に、身体の具現化である。人間の身体は、外見的特徴に加え、ボディジェスチャーや対人空間の間の取り方などの非言語情報をつくる。従来、自律移動が可能なテレプレゼンスシステムは、車輪の上にボールがあり、顔を映すディスプレイが搭載された簡易な

機構であった。この機構は、必要最低限の機能しか持たない。メッセージは、様々な非言語情報で遠隔ユーザの個性を表出させるためにディスプレイを装飾したり [53]、ボールに洋服を着せるなどの試みが行われている。これらの目的は、機械の見た目をより人に近づけることでその人らしさを表現し、親近感をつくるものである。しかし、どこまでシステムの見た目を人間に近づければよいのか、明らかではない。また、人間に近い外見を備えたものが、アンドロイドロボットである。外観として人の手足を持ち、ある特定の目的を達成する動作は実現できても、人間が行う多様な動作すべてができるわけではない。そこで本研究では、機械ではなく人の身体を用いたテレプレゼンスシステムを提案した。人であれば元から身体の外観と全身動作ができる身体能力を持ち合わせる。遠隔ユーザの代理となる人に遠隔ユーザの顔を表示する仮面型テレプレゼンスシステムを被ってもらうことで、“身体的存在感”と遠隔ユーザの“社会的存在感”を提示することができる考えた。

2.4 可搬性で分けるテレプレゼンスシステム

テレプレゼンスシステムの研究を、システムの可搬性に応じて三つに分類する。第一の方式は、ある場所に固定して使うことを目的にしたシステムである。テレビ会議型システムはその代表例であり、コミュニケーションスペースに遠隔地の情景を映すディスプレイを配置して、存在感や臨場感を伝達する。第二の方式は、装着型のシステムである。持ち運びができるテレプレゼンスシステムを対話者が身につけることで、行動を共にしたコミュニケーションが可能になる。第三の方式は、自律移動型システムである。遠隔ユーザはプロジェクタやマイクを搭載した自身のアバターシステムを操作することで、現地を移動する。

2.4.1 固定型テレプレゼンスシステム

Engelbart が 1968 年に NLS (on Line System) という電子会議システムの機能として遠隔会議システムを開発して以来、多くのアプリケーションが開発されている。Ontario telepresence system は、遠隔作業や遠隔コミュニケーション支援の研究プロジェクトである [6]。着目すべき点は、人の社会的立場や部屋の空間の關係に配慮した設計を行ったところにある。デザイン法則が定義されているので紹介する。デザイン法則 1 は、機能や場所の關係性を遠隔地と現地で保つこと。デザイン法則 2 は、電子的な存在と物理的な存在、または、訪問者を同様に扱うこと。デザイン法則 3 は、電子的なやりとりと物理的なやりとりに同じ様式を用いることである。この法則でつくられたシステムに door-cam がある (図 2.1)。これは、人が部屋へ話に来ることを電子的に再現したもので、人の距離感や訪問の仕方が配慮されている。このプロジェクトに石井が加わった当初、まだ親しくない上司のデスクを突然訪問するのは無礼と感じ、door-cam によって

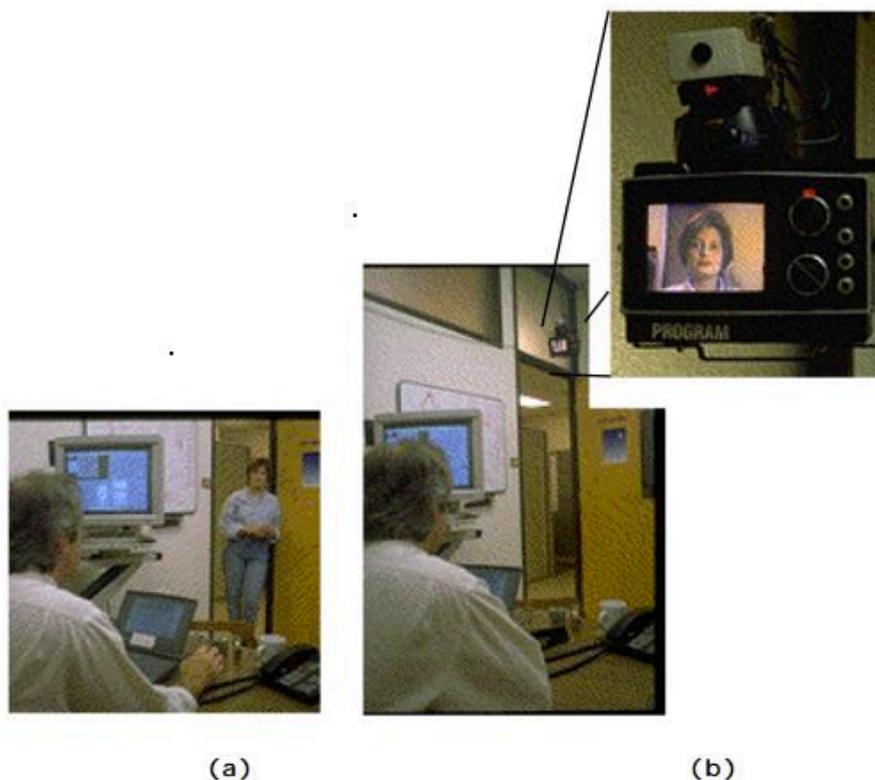


図 2.1: (a) : 物理的に部屋へ訪問 (b) : 電子的に部屋へ訪問

アフォーダンスされた距離感や訪問する方法を考慮した結果、図のような形式になった [6]。遠隔ユーザの訪問の仕方や適切な席の配置など、人の社会的な側面を配慮した結果、生まれたシステムに Doormouse / Doorstates [54] や Hydra [26] がある。またコミュニケーションだけでなく、描画の共同作業を支援するシステムとして、VideoWhiteboard [55, 56] や Clearboard [57] が開発された。

市販化されたテレビ会議システムの例に、Cisco Systems 社の Cisco Telepresence [32] や、Hewlett-Packard Development Company 社の HP Halo [58](図 2.2) がある。また、NTT Communication Science Laboratories では 1997 年頃から T-room というパネルで囲んだ空間内で遠隔参加しているユーザと同じ時刻に同じテーブルを囲んでいるかのような“同室感”を伝えるシステムを開発している [59]。こうしたシステムは高い臨場感を提供するが、大掛かりなシステムのため導入コストがかかる。また、画面上に映る遠隔の人物と視線を合わせることは、Mona lisa Effect [60](図 2.3) が生じることから困難である。

大型のディスプレイだけでなく、VR (ヴァーチャルリアリティ) 空間や AR でテレブ



図 2.2: 左 : Cisco Telepresence [32] 右 : HP Halo [58]



図 2.3: The mona lisa effect : どの角度から見ても視線が合う現象 [60]

レゼンスを再現する研究も行われている。HMD (Head mounted Display) はゴーグル型の映像表示装置である。物理空間を必要とせず、視覚効果により大画面の立体映像を見ることができる。HMD 搭載型のシステムは、視界に遠隔地の風景を重畳させ、空間を越え遠隔地に実際にいるかのような没入感を実現させることを目的にしている。ATR 通信システム研究所では、三地点の遠隔地にいる人々が、一堂に会した面談の感覚で会議を行う臨場感通信会議 (ATR Virtual Space Teleconferencing System) を提案して



図 2.4: ATR Virtual Space Teleconferencing System [61]

いる [61](図 2.4)。三次元の人物モデルに人物のテクスチャを貼ることにより、見る人の視点に応じて画像を表示することが可能である。また、CAVE [21](図 2.5) は、1991 年にイリノイ大学が提案した VR システムであり、利用者は HMD を装着し、全視野を覆うように張り巡らされた大型のスクリーンと足元の床に立体映像が表示されることで、物体の大きさや距離感を感じることができる。多人数で利用することができるので、高臨場感を追求するのであれば、このようなシステム内でコミュニケーションする手法も考えられる。横矢らは、遠隔地の情景を全方位ビデオ映像を用いることで利用者に臨場感を提示する手法をとっている [62]。受信側では、表示ディスプレイに適した視点追従画像を実時間生成しユーザに提示している。また、JackinSpace [20] は遠隔共同作業時に、固定された環境下で一人称視点と三人称視点を切り替えられるシステムである。作業者の頭部に取り付けた広角一人称カメラと遠隔環境に取り付けた複数のデプスセンサを利用することで、三人称視点の映像が滑らかに見えるようになる。Microsoft の HoloLens は、ワイヤレスの装着型ホログラフィックシステムである。現実環境を認識し、Skype をしながら遠隔ユーザが書いたグラフィックがホログラムで描画される [23]。また、Holoportation [24] は VR と AR が合わさったテレプレゼンスシステムである。HoloLens を通して、三次元の物体が現実環境に AR として表示され、同じ空間上で作業しているように感じられる。VR や AR 上のテレプレゼンスシステムは、遠隔ユーザの全身が見えるが、実体がないため現地のものを動かすことや握手などの接触動作ができない。



図 2.5: CAVE [21]

2.4.2 装着型テレプレゼンスシステム

人がコミュニケーションを取る場面は、上述のような固定された環境下だけでなく移動中にも起こりうる。例えば、一緒に買い物に行く場面では、遠隔ユーザと移動しながらコミュニケーションを取ることになる。装着型テレプレゼンスシステムは、親しい関係の人と用いるか、遠隔協調作業で使用されることが多い。人の基本的欲求の一つに、自分にとって重要な人や愛する人の近くにいるというものがある [63]。場所の制約や身体上の都合で、いつでもそばにいれるわけではないので、そんな時に役に立つシステムである。遠隔協調作業とは、お互いが声や姿を見ることができない空間的に離れた2地点間に作業者と指示者が存在し、指示者が作業者に何らかの作業を行わせること、と定義される [64]。遠隔ユーザは、現地を自分で移動する必要がないためコミュニケーションに集中できるメリットがある。遠隔協調作業の主な研究を図 2.7 にまとめた。初期の研究に、Telepointer [65] がある。Telepointer は、アバターの物理的存在はなくレーザープロジェクタを搭載したシステムであり、首に掛けて使用する。遠隔ユーザが注目しているものをレーザーで指し示すことができる。GestureCam [66] は、教師の代理となるカメラロボットシステムであり、カメラとレーザーポインタを搭載し自由な視線移動と生徒への遠隔指示を目指している。また WACL (Wearable Active Camera with Laser Pointer) は、パンチルト雲台にレーザープロジェクタを搭載したシステムであり、肩に装着して用いる [64]。これらの研究の目的は、遠隔ユーザと作業を行うことであるが、コミュニケーションが目的の研究もある (図 2.6)。スマートフォンの普及により、遠隔ユーザの顔を見ながら会話をするのが容易になった。Polly は、遠隔ユーザをスマートフォンに映し、肩に装着するシステムである [67]。研究結果より、Polly がテレプレゼンスロボットや電話機、固定カメラの代替機能を果たすことが示されている。一方、口



図 2.6: 左 : Teroos [68] 右 : Polly [67]



図 2.7: 左 : Telepointer [65] 中央 : GestureCam [66] 右 : WACL [64]

ボットの実装コストが下がったことにより、HRIの研究分野ではロボットのアバターを用いてどのような人対人のコミュニケーションが実現できるのか盛んに研究が行われている。Teroos [68] は、その一例であり、ロボットを介してコミュニケーションを図る。しかし、対話相手が遠隔ユーザを知る者であれば、顔が直接見えた方が良いだろう。

2.4.3 自律移動型テレプレゼンスシステム

自律移動型テレプレゼンスシステムは、遠隔地で独立した存在として動き回る機動性を備えたテレプレゼンスシステムである。Paulos らが開発した ProP は、遠隔ユーザの顔を表示するディスプレイやスピーカー、マイクに加え、足元に車輪をつけ、空間内の自由移動を可能にしたシステムである [13]。Paulo らは、初期のモデルに空中を移動するテレプレゼンスシステムも考えていたが、操作性の難しさやバッテリーの持ちを考慮し、地上を移動する機構にしている。空中のテレプレゼンスシステムは、FloatingAvatar [17] や、人間の頭部動作に追従して動く FlyingHead [18] といったシステムが開発されている。

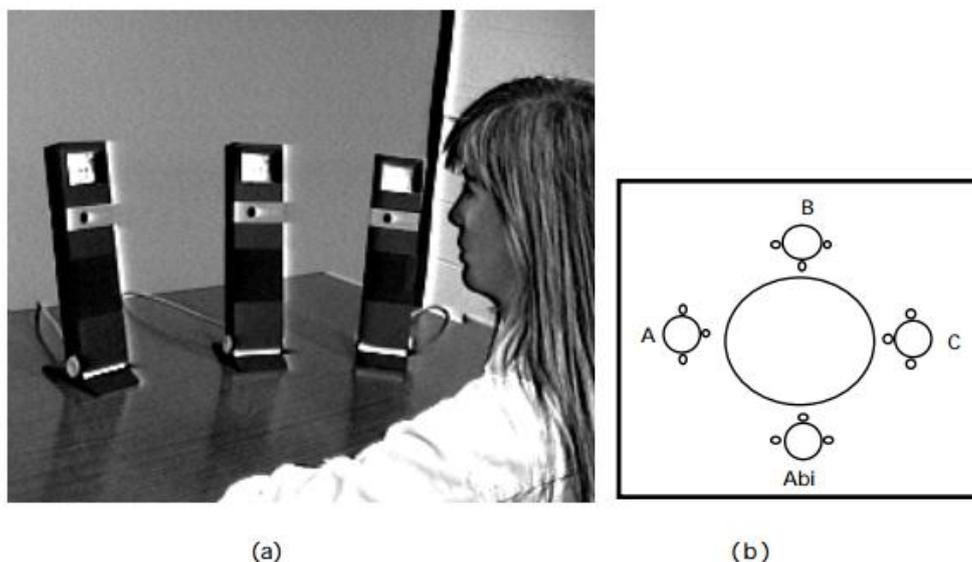


図 2.8: Hydra [26]:(a) 3人の遠隔ユーザが video “surrogate”として参加 (b) 円卓会議の席配置を (a) で再現

地上を移動する自律移動型テレプレゼンスシステムは、Willow Garage 社の Texai [11] や Anybots 社の QB [12]、Double robotics 社の Double [14] など様々な種類が市販化されており、オフィス、医療現場、教育現場などでの活用が期待されている (図 2.9)。しかし、簡易な機構のため移動はできるようになったものの、障害物を避けて通る、階段を上る、ドアを開ける、エレベータに乗るなど、人間の基本動作が難しい。

2.5 人物とアバターの外見的類似性

2.5.1 アバターの形態

テレプレゼンスでは、“同じ空間にいない遠隔話者の存在感をどのように表現するか”は重大な課題の一つである。近年では、臨場感や存在感だけではなく、対話をしている時に実際に感じられる親近感や信頼感、人を惹き付ける魅力といった心理的要素に着目した研究が行われている。テレプレゼンスシステムを開発するにあたり、アバターの外観が人に与える影響を調べた研究をまとめた。

遠隔ユーザをアバターとして具現化した最初のシステムが Hydra である [26, 69](図 2.8)。卓上に各遠隔話者ごとに小型ユニットを用意し、“video surrogate”のアバターとしてその場に参加するように設計された。小型ユニットには、対話者の代理 (surrogate) になる顔を映し出すモニター、眼となるカメラ、口としてのスピーカーが搭載され、卓上



図 2.9: テレプレゼンスロボット 左 : Texai [11] 右 : QB [12] 下 : Double [14]

でコミュニケーションを行う。Irene らは、遠隔ユーザの役職とアバターの身長差に関する影響を調べた [70]。人間のコミュニケーションで、身長は、相手への説得力や表現豊かに魅了する力、支配力を持つと言われる [71, 72]。実験の結果、遠隔ユーザがリーダー職で具現化したアバターの身長が、話し相手より低い時に説得力が低下した。松田らは、遠隔ユーザの身長や話し相手の姿勢に合わせ、高さ調整ができるテレプレゼンスシステムを開発した [73]。

アバターを表現するのにコンピュータグラフィクス、もしくはロボットのどちらが優れているか評価した研究がある。Kidd と Breazeal らによるとロボットのアバターはコンピュータグラフィクスでつくられたアバターに比較して、より魅力的であり、人に信用されやすいことが明らかになった [74]。

人間型ロボットをアンドロイドという (図 2.10)。Geminoid [39] は本人そっくりの見た目を持つ遠隔操作型のロボットである。本人に近いロボットをつくることで、人間とは何かを研究している。Geminoid は、座った状態のアンドロイドロボットだが、Albert



図 2.10: アンドロイドロボット 左：Geminoid [39] 右：Albert HUBO [75]

HUBO [75] はアルバート・アインシュタインの再現された顔を持つ、二足歩行人型ロボットである。これらは、一体あたりの開発コストが高いため、全ての人が持てるシステムではない。

2.5.2 アバターが及ぼすコミュニケーションへの影響

ここで人物とアバターの類似性について議論したい。コミュニケーションでは、第一印象が重要だと言われるようにテレプレゼンスシステムにおいて、身体の具現化は重要な課題である。石黒らは「人らしい外見を持ったメディアのほうが強い存在感をしめす」可能性がある」と述べている [39]。一方で、Geminoid は非常に人間らしい外見を持っているため不気味と評価された。ロボットの擬人化には「不気味の谷」[76] と呼ばれる現象が議論される。不気味の谷は、外見と動作が人間にきわめて近いロボットと人間と全く同じロボットによって引き起こされると予想される嫌悪感の差を言う。不気味の谷の現象は、森政弘が 1970 年に提唱した、「ロボットの外観や動作がより人間らしくなるにつれ、人の感情は好感的、共感的になっていくが、ある時点を境に突然強い嫌悪感を感じるようになる」というものである。そしてロボットが、人間の外観や動作と見分けがつかなくなると再びより強い好感を持つようになると言われている (図 2.11)。

このように、アバターを擬人化するには、不気味の谷の現象を起こさないよう、ある程度の段階まで人物に類似させる必要がある。LiveMask はその人本人の顔型から作成するスクリーンを使用するため、本人に即したアバターシステムを目指している。また、ChameleonMask はアバターを実際の人が行うため人として扱われると考えられる。

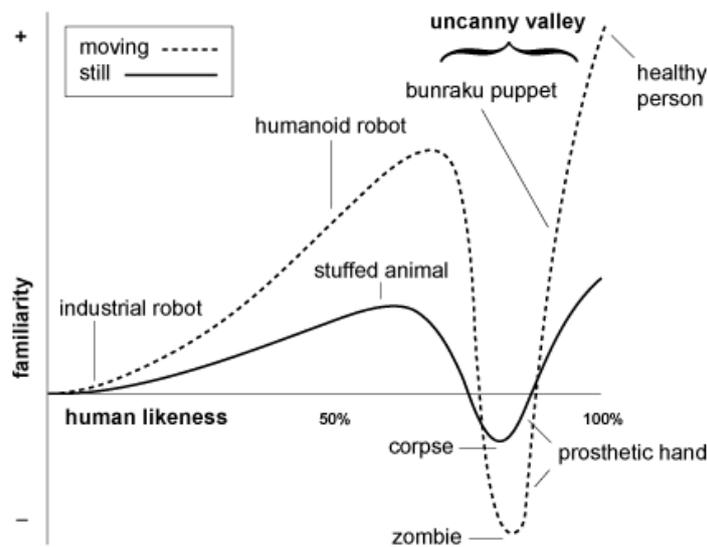


図 2.11: 不気味の谷 [76]

2.6 非言語情報を伝達するテレプレゼンスシステム

人のコミュニケーションは、言語以上に非言語情報が重要だと言われている。ここでは、非言語情報を伝達する関連研究をまとめた。

2.6.1 人物の顔や表情伝達に関する研究

遠隔話者の顔を投影するテレプレゼンスシステムの代表的なものに、1970年に発表された Talking Heads がある [33](図 2.12)。しかし、顔スクリーンが持つ効果は明らかにされていない。またテレイクジスタンスを伝達する目的で開発された TELESAR II(図 2.14) は再帰性反射材を塗布し、人物の顔をシステムに投影することでロボットに対する感情移入を狙っている [77]。また、Mask-bot [78](図 2.13) はヒューマノイドロボットの研究の枠組みで開発されたシステムであり、顔型の 3D スクリーンに映像が一致するように画像エンジンを搭載している。ヒューマノイドとは、人間に似た姿をしているが人間ではないロボットである。Delaunay らは、幼児顔型の iCub [79] のスクリーンにコンピュータグラフィックスで作成した画像を投影する、テレロボットシステム、LightHead を開発している [34, 80](図 2.15)。iCub [79] とは、EU のプロジェクトで推進されているオープンリソースのヒューマノイドロボットである。従来のロボットの顔の表現は機械的であり、アンドロイドロボットに至っては不気味であるという解釈のもと、人の表情をリアルタイムにトラッキングし、幼児の顔型スクリーンに CG の表情を投影させることで自然な表情の伝達を目指している。

このように人の顔型のスクリーンを用いたテレプレゼンスシステムはいくつか開発さ



図 2.12: Talking Heads [33]



図 2.13: Mask-bot [78]

れているものの、詳細な効果は明らかにされていない。

2.6.2 人の動作・指示伝達に関する研究

また遠隔話者の動作を模倣する研究も行われている。中西らは人物が表示されたディスプレイを前後に移動することにより、人の社会的存在感が強化されることを証明した [27]。身振りが伝達出来るロボットの MeBot [28](図 2.16) は人を惹き付け、好意的に受け取られることが示されている。MeBot は、遠隔話者がロボットの腕の機構をコントローラを操作して駆動させる必要があり、意識的な動作しかできない。そこで、無意識的な動作も伝達できるように話者の身振りを検出できるセンサーである Microsoft 社の Kinect[81] を用いて操作者の身振りを伝達しようとする研究も存在する [82]。ディズニー



図 2.14: TELESAR II [77]

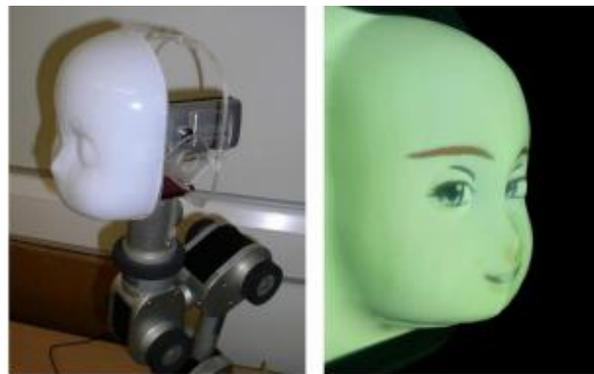


図 2.15: Light Head [80]

は、流体動力伝動装置を採用したテレプレゼンスロボットを開発した [83]。滑らかな動作を実現し、針に糸を通すこともできる。Rethink Robotics が開発した Baxter、Sawyer はロボットの顔が表示された産業用ロボットである¹。製造作業工程の 90% は自動化できないと言われており、共同作業ロボットを人が手取り足取り学習させることで、理解し、作業することができる。このように、産業ロボットの分野では手先が器用なロボットが実用化され始めているが、すべての人の動作の自由度があるわけではない。

2.6.3 視線に関する研究

現在多くのテレプレゼンスシステムでは平面のスクリーンに人物の顔を表示し使用している。しかし、平面のスクリーンでは“ The mona lisa effect” [60, 84] と呼ばれる、ど

¹How Rethink Robotics Built Its New Baxter Robot Worker, <http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/rethink-robotics-baxter-robot-factory-worker>



図 2.16: Mebot [28]

の方向から見ても視線が合う現象が発生する。Divorra らは TV 会議におけるディスプレイを見る角度によって対話者の注視方向が異なって知覚される課題を解決するため、見る角度に応じて異なる映像を表示する 3D ディスプレイの開発を行っている [85]。また、Jonas らは、二次元のディスプレイと三次元のマネキンに顔画像を投影すると、視線の方向が異なることを示唆した [86](図 2.17)。またヒューマノイドの研究分野では、ロボットに表情をつける研究が行われており、Delaunay らは、ディスプレイの形状によって提示される視線方向の認識に違いが生じるか検証した。人物、平面ディスプレイ、半球上型、顔型のスクリーンで比較実験を行った結果、半球状のスクリーンにアバターの顔を表示したときの結果が悪く、顔型のスクリーンと平面のスクリーンの表示には大きな差がないことを示した [87](図 2.18)。しかし、この実験では CG 映像が用いられており、実際の人物で試した例はなかった。そこで、本研究では実際の人の顔形状から作製したスクリーンに映像を投影し視線方向の違いを調べることを行った。

2.7 仮面とテレプレゼンスシステム

本博士論文では、システム名を LiveMask や ChameleonMask と名付けたように、“仮面”にまつわる研究ともいえる。仮面は人体の顔の一部または全体を覆うものを指す。仮面は、紀元前から存在したと言われ、顔を隠し正体を分からなくする覆面として用途や、ある儀式や祭礼などで役になりきるなど、ペルソナに関わる用具として使われてき



図 2.17: 平面とマネキンに顔画像をプロジェクションした違い [86]

た。例として、人は自然と対峙する時に神や精霊、動物をかたどった仮面を被ることで、仮面に憑依する存在へと変貌を遂げ、異界と交わろうとしてきた。これまで、仮面が何かを隠すのと同時に別の何かを表すといった両義性の問題や、多様な間柄の中で、ある役柄に応じた仮面（ペルソナ）をかぶり続けるうちに、いつの間にかその仮面、役柄が演じ手のパーソナリティ、つまり人格になっていくといった、仮面がもつ特異な機能をめぐる論考がなされている [88]。哲学者の坂部は、「<人>を<人>たらしめるものはその総体が<世間>、<世の中>などと呼ばれている人の<間>ないし<間柄>に他ならない」とし、顔面はその関係の<束>においてかなめとなるインデックスとしての機能を持つという [89]。そして、「仮面は、身体において具体化された間柄ないし役柄のいわば弁説的特徴を、顔面に換喩的に集中させ、他者との間柄においてはじめて意味を受け取る隠喩的な側面を取り出して誇張したもの」とした。身近な例として、ディズニーランドのキャラクターを挙げたい。ディズニーランド²は、アニメのキャラクターたちが着ぐるみで現れる。キャラクターは、子供や若い女性から大変人気があり、握手やハグ、サインを求められ、一緒に写真撮影を行う対象である。実際、中に誰が入っているのかは分からないが、あまり重要ではない。来場者は顔や衣装を見て、ミッキーマウスがそこにいると思い、駆け寄って握手をし、写真を撮る。中に入った人物の顔を隠し、パーソナリティをなくす。そして、ミッキーらしい振る舞いをするので、中の人物は完全にミッキーになる。映画「Her」(2013)³についても言及したい。「Her」は、人工知能のOSに恋した男性を描いた物語である。劇中、OSのサマンサは男性が喜ぶと思い、ある女性に協力を求め、身体を持った存在として現れる。しかし男性は、姿をもったサマンサ(女性)を受け入れられなかった。この理由は、女性の顔を見て、男性はサマンサだ

²<http://www.tokyodisneyresort.jp/>

³<http://www.herthemovie.com/>

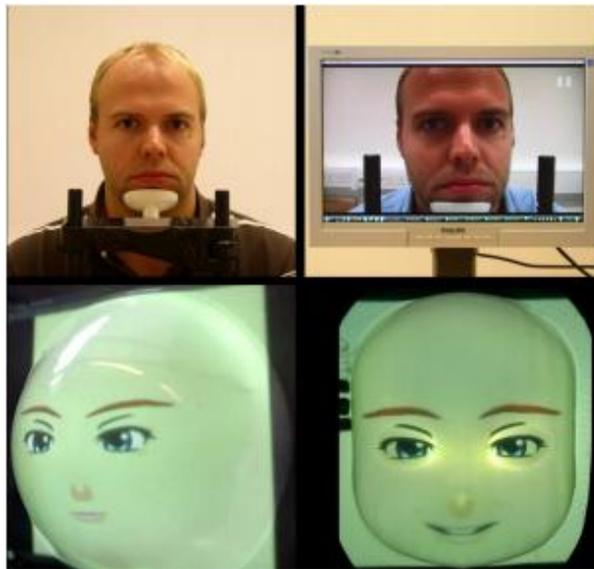


図 2.18: スクリーンによる視線方向の違い [87]

と思えなかったことにありと推察する。顔は個人を特定するものである。男性の想像上のサマンサがどんな顔をしているのか描写がなかったが、女性が覆面で現れたり、サマンサの顔が事前に設定されており、それ通りの女性が現れたら男性は受け入れられたのではないだろうか。

これらの観点から提案システムを考察する。LiveMask は、半透明素材に遠隔ユーザの顔をプロジェクションするインタラクティブな仮面である。人が装着することはないが、変化する表情と頭部動作が伴うことで“生きた”存在へと昇華し、仮面の界面を介して遠隔ユーザと対話する様式は、仮面の持つ機能に通じている。そして、ChameleonMask は surrogate の「顔」を隠して<私>を消失させることで、仮面に憑依する人格になり、仮面（遠隔ユーザ）が肉体と意志をもつ人間の主体になっていくというプロセスを正にたどるものである。よって、仮面（ペルソナ）は surrogate の顔に装着して、<世の中>で遠隔ユーザだと認識され、身体を持つのであって、他の身体部位へ、装着が代替できるものではない。他の身体部位にマスク（遠隔ユーザを映すタブレット）を装着する、または携帯することは、“ある身体部位”への憑依であって、surrogate の人格へ憑依するものにはならないだろう。

2.8 本論に関するシステムの位置づけ

代表的な関連研究と本システムの位置づけをまとめる。図 2.19、表 2.2 は、固定型テレプレゼンスシステムに関するものである。図の横軸にとった Telepresence cost とは、

テレプレゼンスシステムの開発コストや導入コストとする。縦軸の Personalized は、その人らしさを尺度においた。その人らしさとは、遠隔ユーザの外観や動作を含む。テレビ会議型システムは、使用する部屋を決め、その環境下でセットアップすれば高い存在感が得られるシステムである。会議のように複数人での利用は効率が良いが、遠隔ユーザ、一人を具現化するものではない。よって、日常的な場面での理由に向かない。アンドロイドロボットは、その人本人に似せてつくったロボットなので、外見が個人に最適化されている。しかし、開発コストが高い。アバター型システムは、遠隔ユーザの分身を具現化した形を持つ。簡易な機構により開発コスト、導入コストが低い。LiveMask は、人の顔から型取りした顔スクリーンを用いることで顔のみであるが本人の外見に近い身体的存在感を提示する。Mask-bot は人型を模したスクリーンを用いており、それが LiveMask と異なる。LiveMask はスクリーンをユーザごとに切り替えるだけで複雑な制御を必要としないため、汎用性が高い。そして、遠隔ユーザの頭部動作に合わせて駆動することでジェスチャーを伝え、視線伝達ができるシステムである。

自律移動型テレプレゼンスシステムは、図 2.20、表 2.3 にまとめた。Holoportation は、モーションキャプチャを設置したある空間内のみ移動することができ、実体がないため、現地のを動かすことや、握手などの接触動作はできない。Geminoid は、その人本人に近い顔立ちや身体を持ち、社会的存在感、身体的存在感ともに高い。しかし、各遠隔ユーザ毎、アンドロイドロボットを開発することは非常に手間がかかる。また、立ち上がったたり、空間内を自由に動き回る動作の自由度がない。Telesa は、触覚を伴うレイグジスタンスロボットであり、対人コミュニケーションでの可動性や外見の再現に重きをおいていない。一部動作に特化しており、全身が使えるものはなかった。移動ができる点で、テレプレゼンスロボットは他のシステムに比較し大きなメリットがある。そして、簡易な機構であるため導入コストが低く、多くの人で使用しやすい。しかし、人間の完全な代わりをさせるには動作に制限が多い。ChameleonMask は、コストを抑えたうえで人間の外見や可動性を備えたテレプレゼンスシステムである。テレプレゼンスロボットは、“人らしく”するために衣服を着せたり、フレームを飾ることが行われているが、ChameleonMask は、人らしさではなく、その先にある“その人らしさ”を目指している。

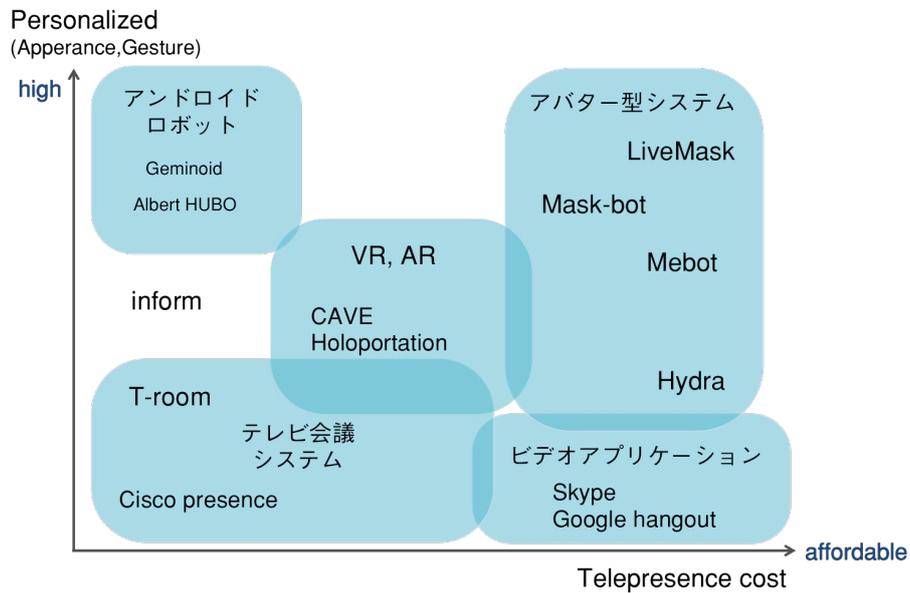


図 2.19: 固定型システム関連研究の位置づけ

表 2.2: 固定型テレプレゼンスシステム関連研究の比較

	視線	頭部動作	上半身の動作	個人への最適化	コスト
LiveMask			×		
Mebot					
inform					×
Cisco Telepresence/HPHalo				×	×
Skype/Hangout			×	×	

表 2.3: 自律移動型テレプレゼンスシステム関連研究の比較

	可動性	見た目	動作の自由度	接触動作	コスト
ChameleonMask					
Holoportation	(ある空間内)			×	×
Geminoid	×		×		×
TELESARII	×	×			×
Double/QB/Texai		×	×	×	

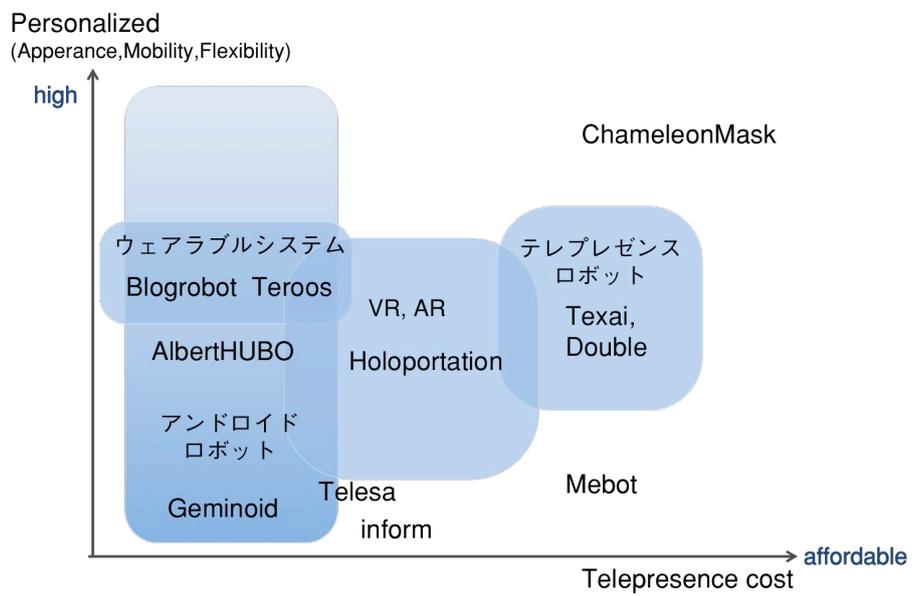


図 2.20: 移動型システム関連研究の位置づけ

第 3 章

立体顔形状のスクリーンを用いたテレプレゼンスシステム

3.1 LiveMask : デスクトップ型テレプレゼンスシステム

3.1.1 背景

遠隔地にいる人がその場にいるかのように感じられるよう様々な研究が行われているが、直接会って会話をするに勝る方法は確立されていない。それは臨場感や存在感は、高画質な映像や高音質な音声のみをただ伝送すれば提示できるものではないからだと考えられる。では何を伝送すれば良いか。その一つに非言語情報があるだろう。

非言語情報とは、言語以外で表される情報であり、コミュニケーションにおいて言語情報に加え、重要な役割を果たすと言われている [90]。従来のテレビ会議システムでは人体の外見的特徴、周辺言語、沈黙などが伝達できた。しかし、空間的な位置把握を必要とする頭部の動作や視線方向の読み取りは困難であった。そこで、遠隔話者本人と完全に同じ形状の顔型立体スクリーン (以降、顔スクリーン) を持つテレプレゼンスシステム、LiveMask (図 3.1) を開発した。LiveMask は、遠隔話者の顔をリアルタイムでトラッキングし、頭部運動と顔領域を抽出する。そして、仕草を表現するために頭部運動に応じて 3DOF(Degree of Freedom) で動く機構を搭載し、本人の顔映像を投影することで、正確な視線方向の伝達を目指す。

3.1.2 目的

本研究では、顔スクリーンを用いたテレプレゼンスシステムが伝達できる非言語情報に注目した。顔スクリーンによって遠隔ユーザの表情がより豊かに伝えることができるのか、空間的な位置把握を必要とする、頭部の動作と視線方向が正確に伝達できるのか調べることにした。



図 3.1: LiveMask を通したコミュニケーション

頭部の動作

頭部が動作する方向や方法により相手の申し出に対する意思表示：賛成、反対、難色、などが表現される。代表的な頭部の動作に、頷きがある。頷きとは鉛直方向に首を振る動作とする。Maynard は頷きを聞き手が行う相槌としての機能だけでなく、話し手が行う会話制御機能と示した [91]。話し手が行う頷きには、肯定、強調、リズム取りといった機能やさらに間発話中に発話意図を示す機能があるとした。

システムの動きによって、人の首の動作が表現できれば、話し手、聞き手のどちらの立場でも、意思表示を言葉、声色、顔の表情だけでなく、首の動作によって伝達できると考えられる。

視線方向

従来のテレビ会議システムでは、Mona lisa effect [60] が発生することから平面のディスプレイに映し出された遠隔の人物と視線を合わせることは困難であった。Mona lisa effect とは、どの角度から見ても正面を見ている人物と視線が合うように感じる現象である。視線は、会話において重要な非言語情報であり、人と人の会話において重要な役割を果たしていることが知られている。視線には、会話の順序や流れを円滑にする機能 [60] や、相手が自分に対して感じる印象を操作し、適切な親密さのレベルを維持する機能 [92] などがある。

顔スクリーンに話者の顔映像を投影するプロジェクトに Talking Heads がある [33]。

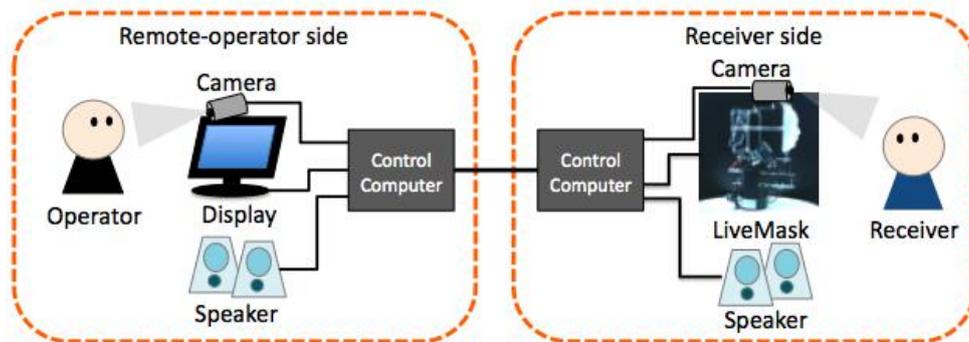


図 3.2: LiveMask システム構成

しかし、テレプレゼンスシステムとしてディスプレイが平面ではなく立体である時に顔の印象が及ぼす効果や優位性は明らかにされていない。また、本研究では顔や頭部のトラッキングにカメラを用いているため、何も機材を装着する必要がなく、自然な状態で会話ができる。開発した LiveMask システム構成と従来の平面ディスプレイと比較したときの、表情の見え方、首の動作による指示、そして視線方向の伝わりやすさについて論じる。

3.1.3 システム構成

システムの構成図と、ソフトウェアの構成図を図 3.2 と図 3.3 に示した。遠隔にいる自身の代理人 (surrogate) を再現するため、LiveMask の基本構造は、実寸大サイズの顔スクリーン、顔の映像を投影するための小型プロジェクタ、頭部の運動を伝える駆動部、小型の USB カメラである。LiveMask は、三回試作機をつくっている。初期モデルは、図 3.4、図 3.5 である。顔スクリーンへのプロジェクション投影距離を確保するために、33cm の奥行きがある。頭部動作が、二軸しかなかったため三軸駆動を可能にしたのが、図 3.6 である。図 3.7 のように、カメラ用のパンチルト雲台を用いて、パン角：左右に首を振る動作、チルト角：上下に頷く動作を再現し、ロール角：首を傾げる動作は、サーボモータを用いて駆動させた。このモデルは、反射鏡を入れて投影距離を短くしようとしたものの、寸法が高さ 54cm × 奥行き 34cm × 幅 18cm とかさばり、人の首動作に比べて大振りな動きであった。そこで、ヒューマノイドロボットで用いられる首動作の駆動基盤¹を用いて作り直したものが、図 3.8, 3.9 である。また、プロジェクタからマスクへの投影距離を短くするため、魚眼レンズをプロジェクタに設置した。プロジェクタの画角や魚眼レンズの歪みが発生しない距離を計算し、設置している。

¹<http://animatronicrobotics.com/product/industrial-animatronic-neck-mechanism/>

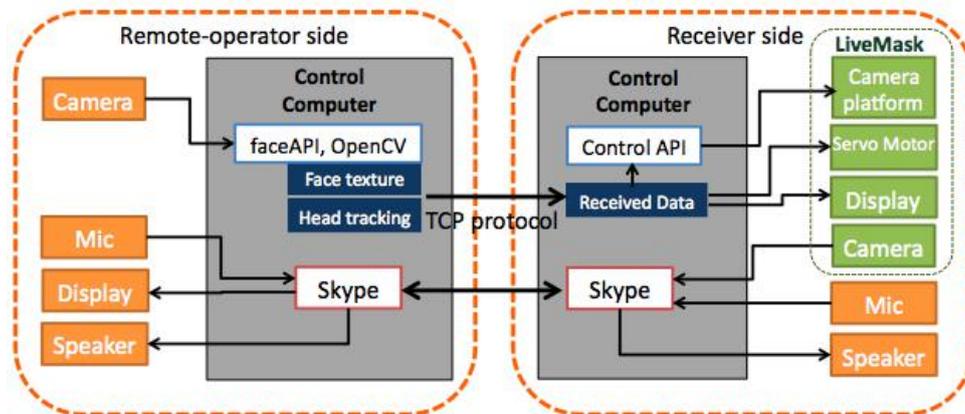


図 3.3: LiveMask ソフトウェア構成

駆動構造

人間の首の動作を実現するために、本システムはパン、チルト、ロール角の3DOFを搭載した。パン角の動作は、左右に首を振る動作、チルト角の動作は、上下に頷く動作、ロール角は左右に首を傾げる動作に対応している。頭部の3次元位置座標は、faceAPI [93] で取得できるヘッドトラッキングデータを元としている。faceAPI が測定出来る顔の傾きの範囲は、人が正面を向いた状態を 0° とした時、パン、チルト、ロール、それぞれ $\pm 45^\circ$ 以内である。それ以上の大きな値ではカメラから顔を背けた状態になっており、顔認識がされない。以上を踏まえ、駆動の自由度は $\pm 45^\circ$ に設定した。

プロジェクタ

システムに搭載したのは Microvision 社の Pico Projector [94] (重さ 45g、寸法 6cm × 11.5cm × 1cm) である。レーザータイプのプロジェクタのため、ピント調節の必要がなく、不定形のディスプレイに投影するのに優れている。提案システムのように顔スクリーンをリアプロジェクションする機構で回転させるには、プロジェクタの重さが問題になるが Pico Projector は軽量であり、小型であったため優れていた。

顔映像の画像処理

本システムでは、遠隔ユーザの話している様子をカメラで撮影し、顔画像の抽出や補正といった画像処理を行い投影する映像作成する。立体的なスクリーンにリアルタイムで顔画像を投影をするため、カメラ画像より、投影する顔領域を正確に検出する必要がある。SeeingMachine 社の faceAPI [93] は精度が高いフェイストラッキングができるライブラリである。眼鏡を着用している人物でも、眼や鼻といった部位の追跡が可能であ

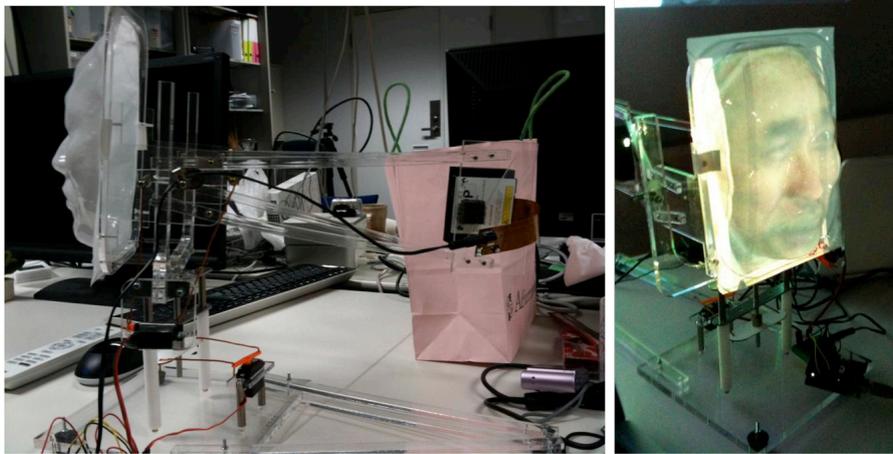


図 3.4: LiveMask 初期モデル：パン、チルトの二軸の首振り対応

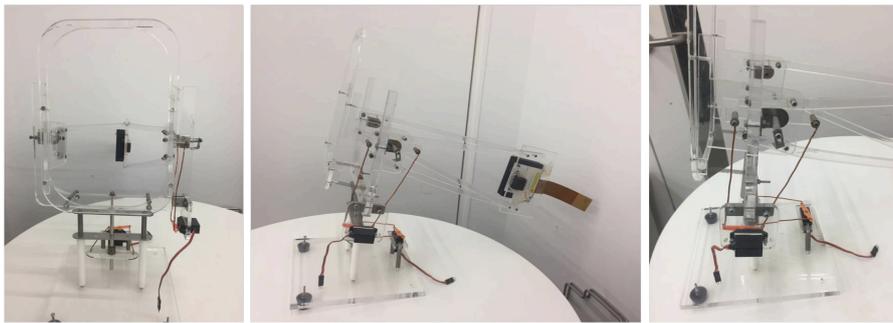


図 3.5: 左：正面、中央：横、右：頭部動作を表現するリンク機構

り、また人物の素早い動作でも安定してトラッキングができる点で使用に適していた。投影する映像は、カメラに向かって正面を向いている画像が必要である。faceAPI が自動処理で正面を向いた顔になるよう画像補正を行っており、これをもとにスクリーンに合うよう画像処理を行って投影させている (図 3.10)。

3.1.4 顔スクリーン作成方法

本研究で使用した顔スクリーンの作製方法は、主に二つある。一つは、顔の石膏を作製し、熱可塑性のシートでプレス成形する方法、もう一つは、顔の 3D スキャンデータから 0.3mm 程の厚みを持たせたデータを 3D プリンティングする方法である。

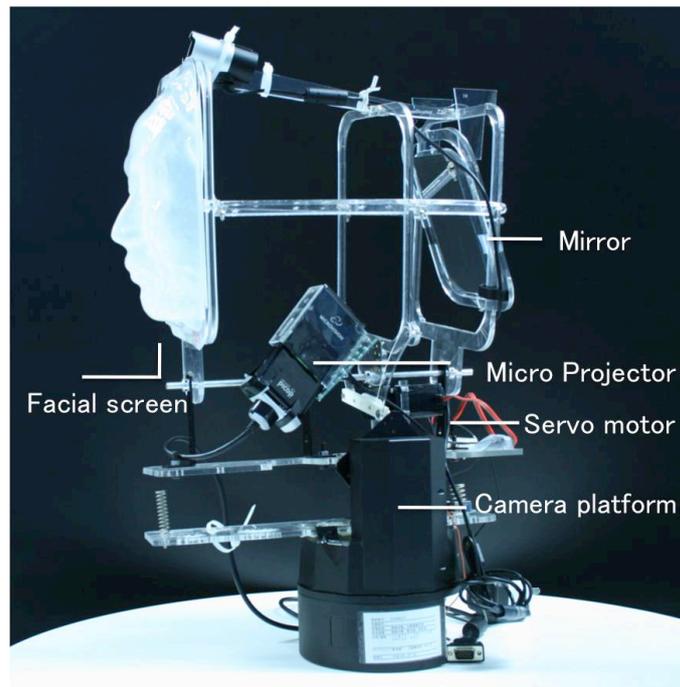


図 3.6: 全体を小型化させるため、表面鏡を用いて映像を反射させたモデル。カメラ雲台とサーボモータで三軸の頭部動作を表現。

石膏を用いたプレス成形

顔スクリーンは実際の人間の顔から型取りを行って成形している。必要な材料は、型とり材、石膏、熱可塑性のスクリーンシートであり、いずれも市販されているものである。顔の雄型作成の手順を以下に示す。

(1) ヘアバンドをし、顔周りに前髪等が入らないようにする。また鼻呼吸ができるようにストローを加工する。

(2) 水分を加えて攪拌し液体状になった型取り材を顔が入る大きさの容器(3リットルの容器を使用)に流し込み、手早く顔を挿入する。

(3) 手で硬さを確かめながら、およそ20分待つ。固形化されたら慎重に型から顔を外し、雌型をつくる。

(4) 雌型に水と石膏を2:1の割合で攪拌させたものを流し込み、6時間程度放置すると水分が抜け、型を外すと雄型ができる。

この方法は上記手順の他(図3.11)、次の手順で雌型の作成を自動化することができる。



図 3.7: 頭部の三軸の動作 : パン-左右に首を振る動作、チルト-上下に頷く動作、ロール-左右に首を傾げる動作。

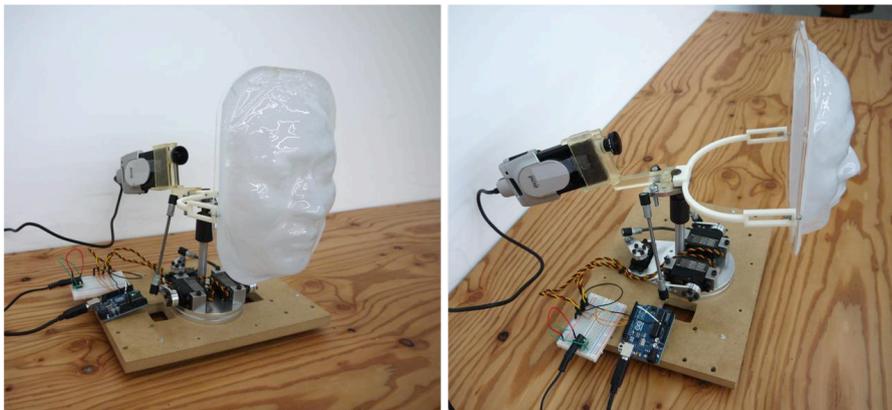


図 3.8: ロボット基盤を用いたモデル : 魚眼レンズをプロジェクタに装着し、全体をさらに小型化。

3D スキャナー、3D プリンタを用いた成形

3D スキャナーを用いると、顔に照射した光の反射を調べることで、顔の三次元データを取得できる (図 3.12)。このデータのノイズや欠損データを補正し、雄型のデータを 3D プリンタへ出力すると (図 3.13)、同様の顔型をつくるのが可能である。雄型から、雌型のスクリーンは熱可塑性の素材を使用しバキューム装置を使用することにより (図 3.14)、実際の人型の顔スクリーンを作成することができる。または、3D スキャンした顔のデータを加工し、0.3mm 程の厚みを持たせたデータを作製することで 3D プリンタから顔スクリーンを直接出力することもできる (図 3.15)。3D プリンタ出力後は、磨きの作業を行っている。図 3.16 のように眼鏡のみ 3D プリンタで出力し、顔スクリーンに添えることも可能である。



図 3.9: ロボット基盤を用いた頭部動作：3つのサーボモータによって駆動。



図 3.10: 顔画像の処理：顔認識が行われている時のスクリーンショットである。左図のように首を傾げた状態から画像補正後、右図に示す顔テクスチャが生成される。画像は投影用に反転される。

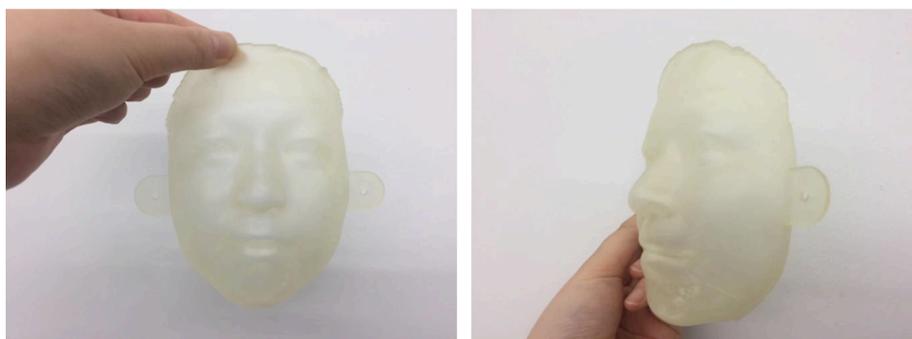


図 3.15: Connex500 という 3D プリンタで出力した顔スクリーン



図 3.11: 雄型の石膏作成手順



図 3.12: 顔の 3 次元データをスキャンしている様子



図 3.16: 眼鏡を 3 D プリンタで出力し接着させた顔スクリーン

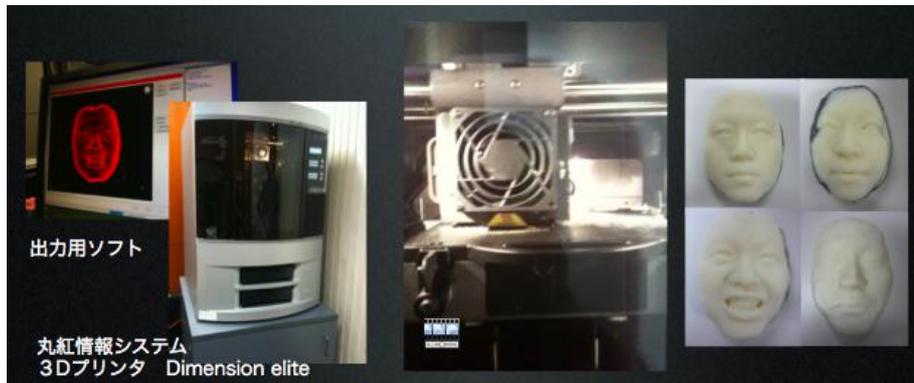


図 3.13: 顔の 3 次元データを 3D プリンタに入力し、顔モデルを作成している様子



図 3.14: スクリーン作成のバキューム処理

3.1.5 顔スクリーンの形状について

開発初期の段階で、顔映像を投影する立体スクリーンの形状にいくつか候補があり、楕円型、本人ではない顔型、曖昧な輪郭の型などへの投影を試みた。その結果、楕円の形状や曖昧な輪郭の形状でも人の判別はできるが、横顔の印象が人の形状でなかったり、本人と異なることで違和感が生じ、立体であることの利点が損なわれたため、本人の顔型から作製している。

3.1.6 立体顔ディスプレイファブリケーション手法

本研究では、本人の顔形状から作製した顔スクリーンを用いている。実際の人の顔の形状に基づいているため、プロジェクションした時に非常にリアルであるが、顔の表情筋や骨格が変化するとき、画像と型の形状にずれが生じる欠点がある。正面から顔形状

オブジェクションにプロジェクションする手法もあるが、LiveMask システムと同様に投影するプロジェクターを固定する必要がある。また、今回は首振りができる機構を設計しなかったため、リアプロジェクションすることを行った。その他、考えられる立体顔ディスプレイのファブリケーションについて述べる。

アクチュエータによる再現

リアルタイムに変化する人の表情をつくるために、高西らは WD-2 を開発した [95]。これは、セプトンと呼ばれる熱可塑性のゴムで作られた平均顔のマスクを 56 段階の自由度で変形させ表情をつくる (図 3.17)。遠隔ユーザと物理的なテレプレゼンスを実現させようと MIT 石井らのグループは、アクチュエーターを用いたダイナミックな形状変化ができるシステムの開発を行っている [19]。顔に応用させた例が、ソチオリンピックのパビリオン装飾で制作された MegaFaces である [96](図 3.18)。建築家の Asif は、11000 本のアクチュエータを動かし、参加者のポートレイトをつくった。2016 年メディアアーティストの浅井は、kagami と呼ばれる顔と同等のサイズのインスタレーションを作製した [97](図 3.19)。これらはアクチュエーターを動かすために、機構が複雑化し、後方に幅を取る制約が出てしまうが、目が細くなれば、より人の肌の質感や表情が再現できるであろう。場所をとるため固定された環境下での使用には向くが、デスクトップなどで気軽に使うには不向きである。

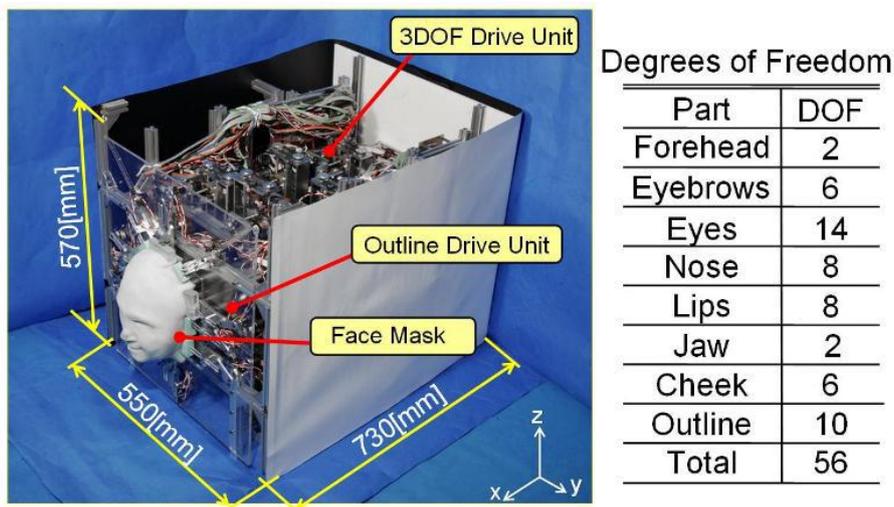


図 3.17: WD-2:56 の自由度で表情をつくる [95]。

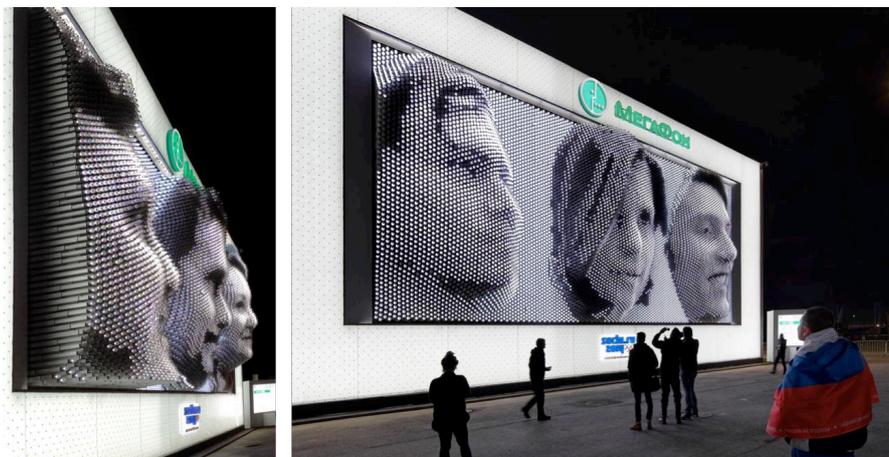


図 3.18: MegaFeces : 参加者の 3D 写真から模型を変形。

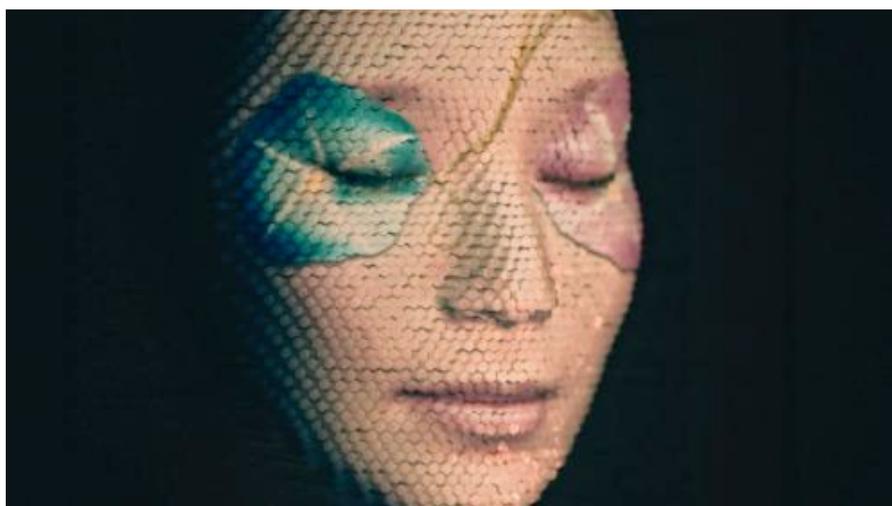


図 3.19: kagami : 約 5000 本のロッドがモーターにより押し出され、リアルタイムに立体的な顔が作り出される。

光ファイバー

光ファイバーを束にして面をつくり、ディスプレイにすることも可能である。メリットは、光ファイバーの中を光が通るので、面に対して直角に光を当てる必要がなく、光ファイバーを曲げるなど、光源を当てる位置の調整が可能である [98, 99]。デメリットは、顔サイズのディスプレイを作製するのに、大量の光ファイバーが必要なこと、また画素とファイバー上の画素を一致させるなど、機構上の制約もある。テレビ石は、光ファ



図 3.20: ゲルで作製した顔ディスプレイ

イバーと似た材質の透過性の高い鉱物である。光ファイバーの束と似たような構造を持ち、ディスプレイになるが、市販されているものは 3cm 大程のものが多い。

ゲル

顔形状のディスプレイは、頬などの膨らみから触る動作をアフォーダンスしやすい。小池らは光弾性体のゲルをディスプレイに置き、光の屈折からタッチを検出するディスプレイを開発した [100]。ディスプレイに映った顔にゲルを通して接触すると、表情が変わるアニメーションなどが実現できる。

本研究でも、試作でゲル型のマスクを作製した。作製方法は、3D プリンターで出力した雄型の顔型に型とり材で雌型をつくり、ゲルを流し込んだものである。図 3.20 が、顔写真に本人の顔ディスプレイを合わせたものである。ゲルディスプレイをつくる過程で入った気泡や雌型の型にある筋が、直接肌の質感に影響することが分かったため、それらの要素を排除する必要がある。また、本人の顔と型が合っているため、非常にリアルな見た目であったが、ディスプレイの光源が直光しているため、正面から見る分には問題ないが、斜めから見ると画像が見えず、立体である利点が失われた。

3.2 LiveMask の死角に関する予備実験

遠隔ユーザの表情の伝達は、平面的なディスプレイでもできるかもしれない。しかし、実際の会議では、何人かでテーブルを囲んで会話をするため、常にテレプレゼンスシステムの正面に相手がいるわけではない。遠隔から参加するユーザ毎に人数分のディスプレイをテーブルに配置する会議環境を想定する。もしスクリーンが平面であった時、横隣に座った人物は遠隔話者を覗き込むようにして見る必要があり、表情を読み取るのが困難である。一方、LiveMask は凹凸感があるため覗かなくても、横顔が見れる。ディスプレイに凹凸感があると、実際の人のように横隣や上から見下した角度からも遠隔話

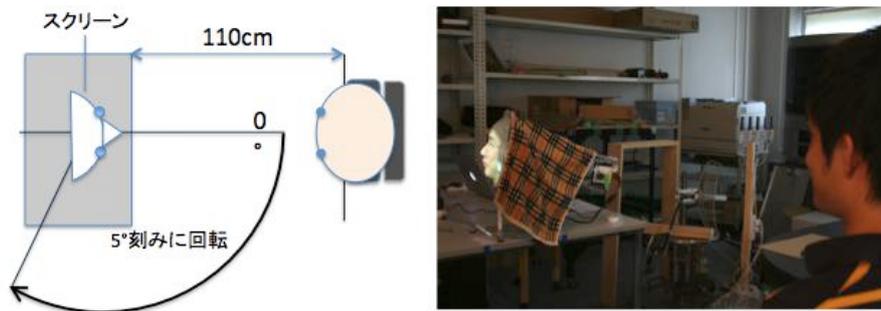


図 3.21: 実験 1 の様子：左図は上から見た様子。右図のように被験者は離れた位置からスクリーンを眺め解答した。

者の表情を読み取ることができると予想される。そこで、表情の読み取りに関する実験をする前の予備実験として死角を調べることにした。死角とは、投影された人物が誰であるか判断できない角度のことを指す。

3.2.1 実験目的

LiveMask が傾いた場合など、正体していない状態において平面スクリーンと顔スクリーンの表情の読み取りやすさを比較するために、どれぐらいの角度から死角になるかを調べる。死角の判断基準は、スクリーンにランダムに人物を表示し、それが誰であるか認識できるかを調べる。

3.2.2 評価手法

システムは机の上に固定して配置されており、被験者の座席は図 3.21 のようにシステムと向き合うように固定されている。実験用に使用する平面スクリーンは、型取りに使用するシートをディスプレイの枠の大きさに合わせて切断したものを使用する。LiveMask のスクリーンを顔形状と、平面形状で交互に切り替えて実験を行う (図 3.22)。被験者を椅子に座らせ、システムが見えるように座席の高さを調節させる。システムに装着した平面のスクリーンと正面に向かい合った角度を 0° とし実験を開始する。被験者の数は、8 人で行っている。

3.2.3 実験手順

- (1) 3 人の顔写真をランダムに表示 (図 3.23)、それが誰であるか記号で解答させる。
- (2) スクリーンの角度は 5 度刻みで時計回りに回転させ、解答ができるまで続ける。
- (3) 顔スクリーンに替え、同様の手順で実験を行う。



図 3.22: スクリーンの比較：2種類のスクリーンに同じ画像を投影している。左図が平面スクリーン、右図が顔スクリーン。

3.2.4 実験結果

平面スクリーンと顔スクリーンによる人の判別できる角度を調べた結果を図 3.24 に示す。実験では時計周りに片側のみスクリーンを回転させたが、半時計回りに回転させた時に左右反転した結果が得られるとすると図 3.24 で色付けした範囲が認識できる角度となる。

平面スクリーン：被験者に対し、正面を向かい合った状態から 90° 時計回りに回転させると、誰も人物を判断することができなかった。 85° では 87.5% の被験者が人物の識別をすることができた。

顔スクリーン：一方、平面スクリーンでは人物が識別できなかった 90° でも全員の被験者が投影された人物を判別することができた。被験者の解答から、識別できる角度は $105^\circ \sim 110^\circ$ の間であることが分かった。実験終了後、表情を判断する時に何を基準にしたか尋ねたところ、肌の色、眼鏡、髪の毛の情報を元にしたという声が多く、女性は分かりやすかったという声があった。

3.2.5 考察

実験より顔スクリーンと平面スクリーンの死角が求められた。顔スクリーンは広範囲な角度から人物の認識が可能のため、テーブルを囲んで会議をする時だけでなく、部屋にランダムに人物がいる状況下でも顔を認識することができ、遠隔ユーザの存在感を効果的に提示できる可能性がある。

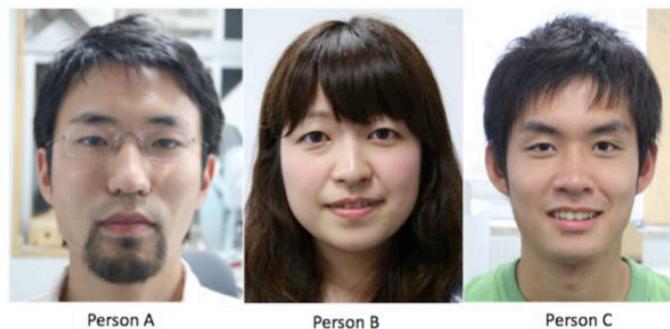


図 3.23: 実験 1 に使用した人物の写真：性別、眼鏡の着用の有無といった外見の特徴が異なるものを使用した。

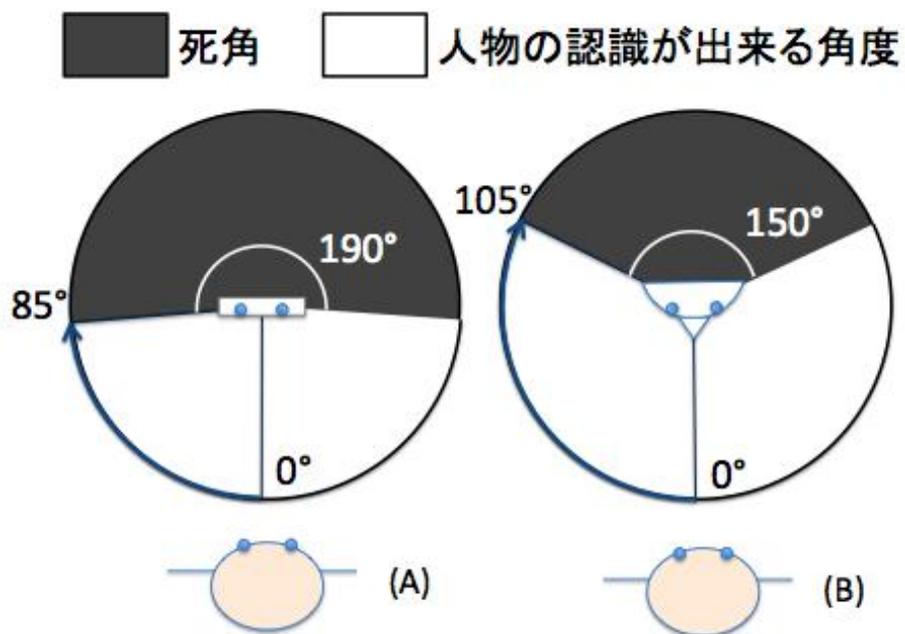


図 3.24: 2つのスクリーンの死角：(A) 正面から 85° 以上横を向くと死角となる平面スクリーン (B) 凹凸があるため視認される角度が広く 105° 以上で死角となる顔スクリーン

3.3 実験 1.1：表情の判別をする実験

3.3.1 実験目的

非言語情報の一つである、表情伝達の差が顔スクリーンと平面スクリーンにあるのか比較実験を行う。

3.3.2 実験方法

事前に1人の人物の5種類の表情（喜び、悲しみ、怒り、驚き、恐れ）（図 3.25）の写真を計 20 枚用意した。予備実験と同様の実験環境で平面スクリーンと顔スクリーンに投影し、どんな表情をしているのか解答させる。手元の配布資料として5種類の表情それぞれの写真と表情名を明記したものを用意した。実験より平面スクリーンで認識できる角度が明らかにされているので、その角度で比較を行う。被験者の数は、8人で行った。



図 3.25: 実験に使用した5種類の表情の例：ある人物の喜び、悲しみ、怒り、驚き、恐れ
の表情を示す。実験ではそれぞれの表情に4枚ずつバリエーションがあり、計20枚
の画像を見せた。

3.3.3 実験手順

- (1) 実験開始前に、投影される人物のどのような表情がどの感情に相当するか被験者間で認識に差が出ないよう、顔画像をそれぞれのスクリーンに投影し、確認を行う。
- (2) 予備実験で得られた平面スクリーンで人物が認識できる限界の角度(85°)に設定し、20枚の顔写真をランダムに見せ解答用紙に記入させる。
- (3) 顔スクリーンに取り替え、上記と同様の内容を繰り返し行う。
- (4) 最後に被験者毎に得られた顔スクリーンの人物が認識できる限界の角度で、どのくらい表情の判別ができるか調査する。

3.3.4 実験結果

2つのスクリーンによる表情の読み取りやすさを比較した結果を表3.1にまとめた。表面スクリーンの方が顔スクリーンより正答率は若干高いものの、ほぼ同等の結果を得られた。また、顔スクリーンの人物が特定できる角度の105°では85°に比べ、表情の読み取り正答率は格段に下がり、人物の特定はできるが表情の読み取りは難しいことが分かった。実験終了後、ヒアリングを行い表情を判断する時に何を基準にしたか、顔スクリーンと平面スクリーンではどちらかが判断しやすかったかを尋ねた。

表情判断の基準： 喜びや、驚きの表情が分かりやすい一方で、怒りや不安な表情の判別が難しいというコメントを得た。これら2つの表情は、スクリーンが立体か平面のどちらでも正答率が低かった。表情の判断には、目や口元で判断する人が多く、例えば口角が上向きか下向きかを手がかりにすると表情の判断がしやすいとコメントを得た。

スクリーンによる比較： 平面と立体による表情の判別は、正答率がそれぞれ71.9%、70.0%とほぼ同等の結果を得た。被験者にどちらが判断しやすいか尋ねたところ、6人は立体、2人は平面スクリーンが分かりやすいと答えた。顔スクリーンは「立体形状により顔の表面積が広いいため、判断基準が多くて見やすい。表情と骨格が合っているため目元や口元の印象が分かりやすい」一方、「顔の凹凸があるため顔面の半面しか見えず、判断しにくい」という声も得た。

3.3.5 考察

顔の表情の読み取りやすさにスクリーンによる違いは見られなかったが、判断のしやすさに対する被験者の主観的意見は分かれた。平面スクリーンの方が分かりやすいと答えた2人は、顔の凹凸、つまり鼻の高さや頬の膨らみによって片側の顔が見えないことによる分かりにくさを感じていた。これら2人は、表情の判断を顔全面を見て判断しようとしていた。今回は、顔が動かない環境で実験を行っていたが、実際の利用場面では頭部の動作を使用しユーザ側に向くことができるためこのような問題は解決できる。初めてLiveMaskを目にした被験者からは「存在感があり、話してみたい」という声を得た。

表 3.1: 5種類の表情認識の精度

	平均	標準偏差
i) Flat screen 85°	71.9 %	0.113
i) Facial screen 85°	70 %	0.963
ii) Facial screen 105°-110°	25 %	0.134

(i): 平面スクリーンの死角で比較

(ii): 顔スクリーンの死角で比較

3.4 実験 1.2：表情別による判断の推移

予備実験の結果、2つのスクリーン形状で顔が認識できる角度に差異があった。そこで、より詳細な表情別による認識を調べることにした。

予備実験では異なる3人の人物をスクリーンに表示し、誰がスクリーンに表示されているか被験者に答えさせた。しかしながら、3人の人物は性別が違うこと、眼鏡の着用の有無、髭の有無などといった外見的特徴があまりにも異なる3人であった。そこで、実験 1.1 の一人の人物の表情を使用した実験方法を改良し、死角の実験を行った。実験 1.1 では予備実験より求めた死角の境界角度（85°）のみで表情の判別を行っており、被験者の視線角度による表情認識に差が生じるかは調べていない。よって実験 1.2 では、被験者と LiveMask システムが正面を向き合った角度から時計回りに回転させ、20°刻みで表情の認識ができるか調べることにした。

3.4.1 実験目的

LiveMask システムの死角を調べる。

3.4.2 実験方法

Eckman は表情や感情を研究した心理学者であり、「喜び」「嫌悪」「驚き」「悲しみ」「怒り」「恐れ」の6つの情動を基本情動と定義している [101]。そこで実験 1.1 では5種類の表情の写真を用意したが、再実験では6種類を増やして実験を行う（図 3.26）。正面を向き合った角度を0°とし、1カ所で18枚の写真を実験 1.1 と同様の環境でスクリーンに表示することを行う。被験者には、表情名と対応する画像を載せた用紙を手渡し、それを参照しながら解答させる。被験者の人数は10人で行った。

3.4.3 実験手順

- (1) 被験者を椅子に座らせ、顔スクリーンにそれぞれの表情を表示した時、どのように見えるか確認させる。
- (2) 顔スクリーンを0°の角度に設置し、表情の画像を表示し、被験者に答えさせる。
- (3) 時計周りに LiveMask システムを回転させ、100°までテストする。

3.4.4 実験結果

実験結果を図 3.27 にまとめた。表情により識別率に差があることが分かる。驚きの表情では、60°から、それ以外の表情では80°から識別率が大きく下がっていることが分かる。悲しみを除く表情は、90°付近で正答率が8割を切っており、90°付近が死角に

なると結論づけられる。予備実験の方法では、85° が死角になると結論づけたので、近い結果になった。



図 3.26: 実験に使用した 6 種類の表情の例：5 種類の表情に「嫌悪」を追加

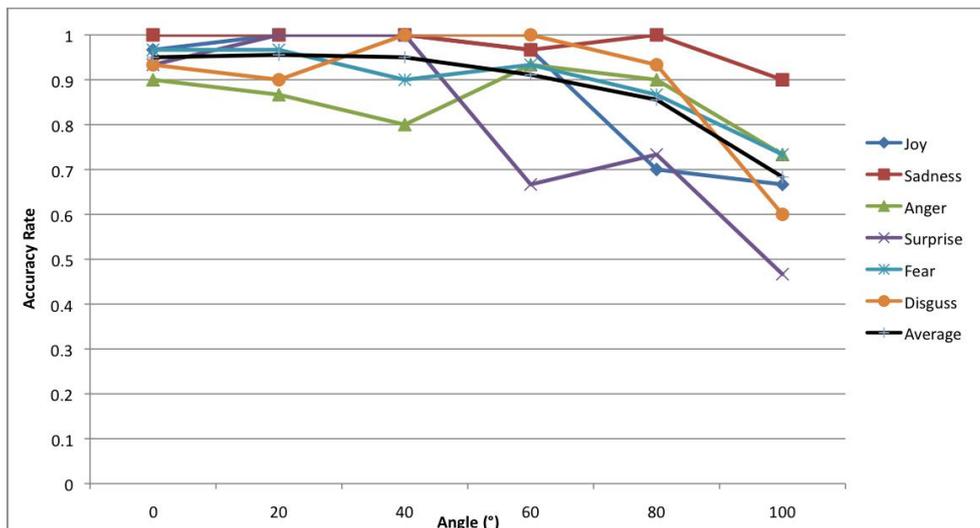


図 3.27: 表情別の識別率

3.4.5 考察

本研究では LiveMask が非言語情報である表情の伝達に優位さがあるか調べるため、表情認識の実験を行った。しかしながら、表情の判別は様々な要因が絡み難しいことが分かった。例えば、顔の表情に関して 6 種類という基本分類方法がある一方で、それに 9 つの表情を足した分類方法も存在する [102]。また、スクリーンに表示された人物が、どんな表情をしているのか見極めるには被験者の主観的な見方も影響する。先研究には、人種ごとに表情の判断方法が異なることや、表情表出に特徴があることが述べられている [103]。

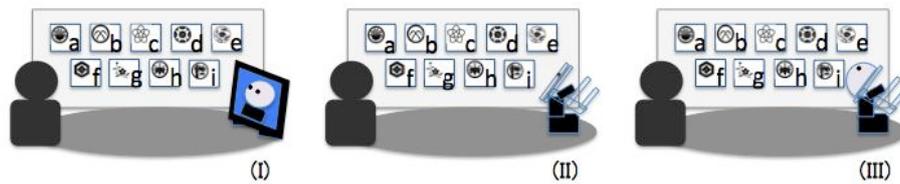


図 3.28: 実験 2 の条件: (I) は 2D ディスプレイを用いた条件、(II) は LiveMask に平面スクリーン用いた条件、(III) は LiveMask に顔スクリーン用いた条件

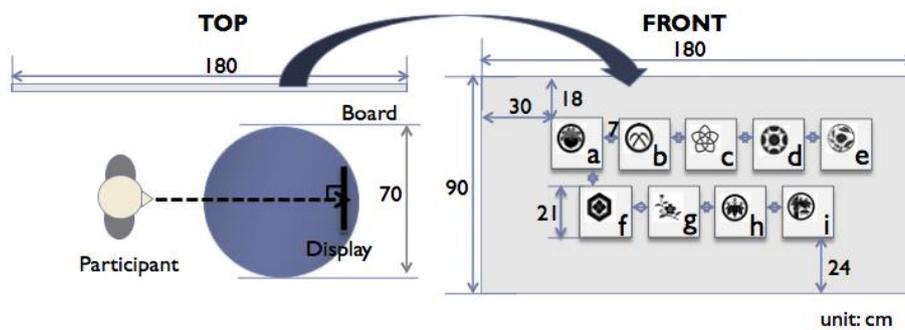


図 3.29: 実験環境と実験条件 (I) の詳細図

本実験では、条件を単純化するため表情の写真を被験者の手元に用意し、解答時に参照させることで被験者の主観をなるべく排除させた。しかしながら表情を判断する際、目元や口元の開閉を手がかりにしていることを踏まえると、判断条件をより単純化させ、顔のパーツをコラージュさせた写真を使用することも考えられる。具体的には、目元の開閉が異なるパーツ、口角の上下が異なるパーツなどを合成させ、目元は同様だが、口元だけ異なるといった表情を人工的につくり実験する。ある角度で顔スクリーンを見た時に、人物の目元の印象が判断出来ればその角度は死角でないと言える。

3.5 実験 2：首の動作による方向指示伝達の評価実験

次に LiveMask に実装している仕組みである、頭部の方向指示に関する実験を行った。実際の会議では、話している人の方向を向いて議論をしたり、壁面やホワイトボード上に記述された内容の方向を向いて説明をする時がある。遠隔地にいる話者がどこを指し示しているのか、平面ディスプレイを使用した時と頭部の動作を持つテレプレゼンスを使用した時のどちらがわかりやすいかを調べることにした（図 3.28、図 3.29）。



図 3.30: 平面ディスプレイに表示された 9 つの画像：9 つの模様を視線や首の動きで伝える遠隔話者を被験者の座った位置から撮影した。それぞれ画像をランダムにディスプレイに表示し、被験者は画像中の人物がどの記号を指し示しているのか解答した。

3.5.1 LiveMask と平面ディスプレイによる方向指示評価の目的

平面ディスプレイに表示された画像による方向指示と LiveMask の首の動作による方向指示を比較する。LiveMask の方向指示の比較には、平面スクリーンと顔スクリーンを装着した 2 パターンで行った。

3.5.2 評価手法

壁に (a) から (i) までアルファベットが振られた 9 種類の記号が貼られている。遠隔話者がこの 9 種類のいずれかを指し示す。それぞれの指示の出し方は以下のような事前設定を行う。

平面ディスプレイ (条件 I): あらかじめ指示を伝える遠隔話者が実験環境の椅子に座り、それぞれの記号を首の向きや視線を変えて指示している様子を投影用に撮影する (図 3.30)。

首のジェスチャー (条件 II、条件 III): LiveMask に 9 つの記号それぞれを指している首のポジションを事前登録した。この時、顔の表情、視線の位置による影響を受けないよう、表情は同じものを使用した。

3.5.3 実験手順

- (1) LiveMask が壁に貼ってる 9 種類の記号のいずれかを指し示すので被験者はその記号を答える。被験者は図 3.31 のように左側に着席し、オペレータが、LiveMask を 9 種類の方向のいずれかにセットする間、目隠しの仕切りを持ち待機する。
- (2) 開始の合図で被験者は目隠しを外し、オペレータは開始の合図から被験者が解答す



図 3.31: 実験 2 の様子 : LiveMask システムが指し示す方向を見ている被験者

るまでの時間を計測する。

(3) 9 種類の方向全てをランダムにテストした後、実験条件を変え同様に実験を行う。それぞれ 1 セット 9 回、3 種類ずつ計 27 回を行う。

被験者内実験計画によって行い、被験者の人数は 8 人で行った。実験条件は、学習効果がないよう順番を変えて行った。

3.5.4 実験結果

LiveMask に顔スクリーンを搭載した条件 (III) は、多くの被験者が方向指示を正しく理解し、正答率は 87.5 % であった。また、平面スクリーンを搭載した条件 (II) は 77.8 % であり、条件 (III) より低い正答率であるが、条件 (I) より高い結果となった。一方、条件 (I) の平面ディスプレイに画像を表示した場合は、正解率が 19.4 % であり (図 3.32)、解答時間は、判断するまでに約 2 倍長く時間がかかっている。しかし、正解に隣接する記号も正解とカウントすると正答率 (近似正答率と定義する) は 83.3 % にまで上がった。これは、被験者が答えた記号が、正解の両隣のいずれか、もしくは上下で間違えたことを示している。

3.5.5 考察

実験では結果に大きな差が出た。条件 I で判断した時の正解率は特に低かった。しかし、近似正答率で評価するとそれぞれの被験者が 8 割近い正解率を記録している。2D

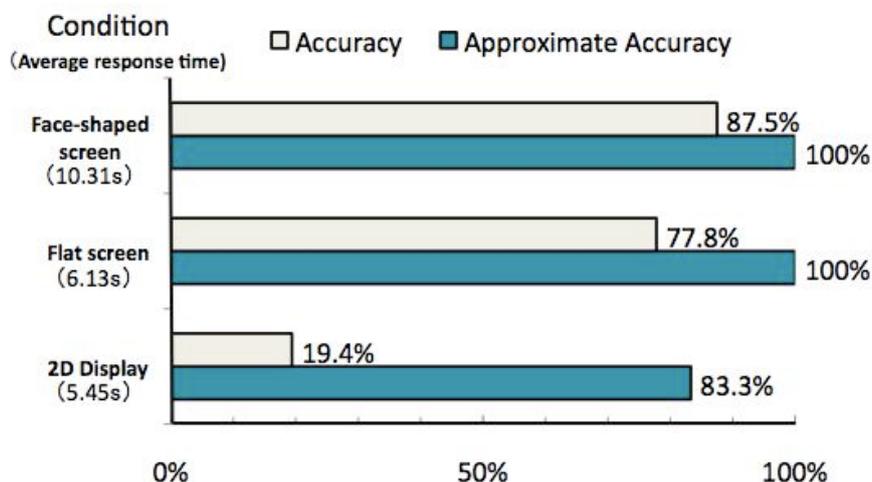


図 3.32: 実験 2 : 方向の判別のしやすさ

ディスプレイの画像で判断した時の正答率が低い理由はいくつか考えられる。「人の視界は広いのでディスプレイに表示された人物が 3、4 つの記号を見ているように感じる」とのコメントを得た。二次元の画像は、見ている大体の方向を伝えることができるが、正確な位置や方向を伝えることが、現状は難しい。それは人の視野は広いので、画像中の人物がどこを見ているのが局所的に判断することができないからだ。従来の平面ディスプレイでは、見ている方向を伝えることが難しいが、LiveMask の頭部動作機能を用いれば、遠隔ユーザの注意方向を正しく伝えることができるであろう。

3.6 実験 3 : 視線に関する評価実験

実験 2 で使用した画像は、首の方向と視線を変えているが、実際には首を動かして特定の方向を向かなくても、人は視線だけでその方向を指し示すことができる。顔スクリーンで遠隔ユーザの視線方向が伝達できるか調べることにした。

3.6.1 2D と 3D による視線方向の比較評価の目的

平面スクリーンと顔スクリーンで視線方向に違いが生じるか調べる。

3.6.2 評価手法

予め、 -30° ~ 30° まで 10° 刻みに視線を移動させた 7 枚の写真を用意し (図 3.38)、実験 1 と同様の環境で LiveMask のスクリーンに写真を投影する。1 カ所あたり 7 枚の

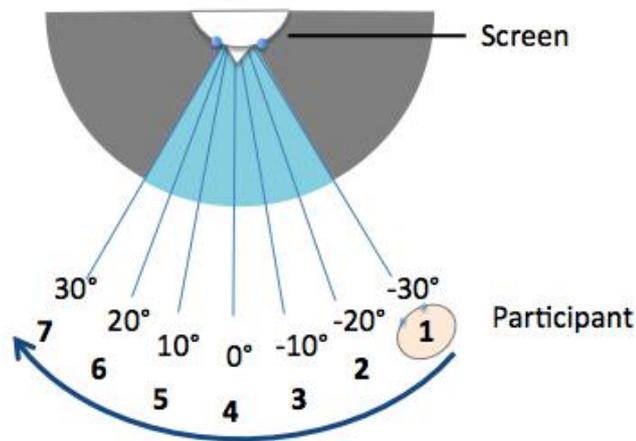


図 3.33: 視線方向: -30° から 30° まで 10° 刻みに被験者は移動し、スクリーンに投影された画像と視線が合うか解答する。

写真投影を計 7 カ所で実施することを 1 セットとし、各スクリーンで 2 セットずつ実施する。被験者内計画で実験を行い、被験者の人数は 8 人で行った。

3.6.3 実験手順

- (1) 被験者は図 3.33 のように LiveMask から -30° の位置で目線の高さが合うように椅子を調節する。
- (2) 被験者は 7 枚の写真を順次見て視線が合うか答え、終了後時計回りに 10° ずれた位置で解答する。
- (3) 上記手順を 30° まで繰り返し、もう 1 セット行った後、オペレータは平面スクリーンに替え、同様にテストを行う。

3.6.4 実験結果

結果を表 3.2 に示した。顔スクリーンを使用したときの正答率は 75.9 % に対し、平面スクリーンは 36.6 % と低かった。また、各視線画像のうち、図 3.34 に示すように顔スクリーンでは解答結果が対角線上に分布しているのに対し、平面スクリーンは 0° 付近に帯状に分布している。これは、顔スクリーンでは視線方向が被験者に伝わっていることに対し、平面スクリーンは正面を向いた画像 (0°) がどの角度から見ても視線が合いやすいことを示している。

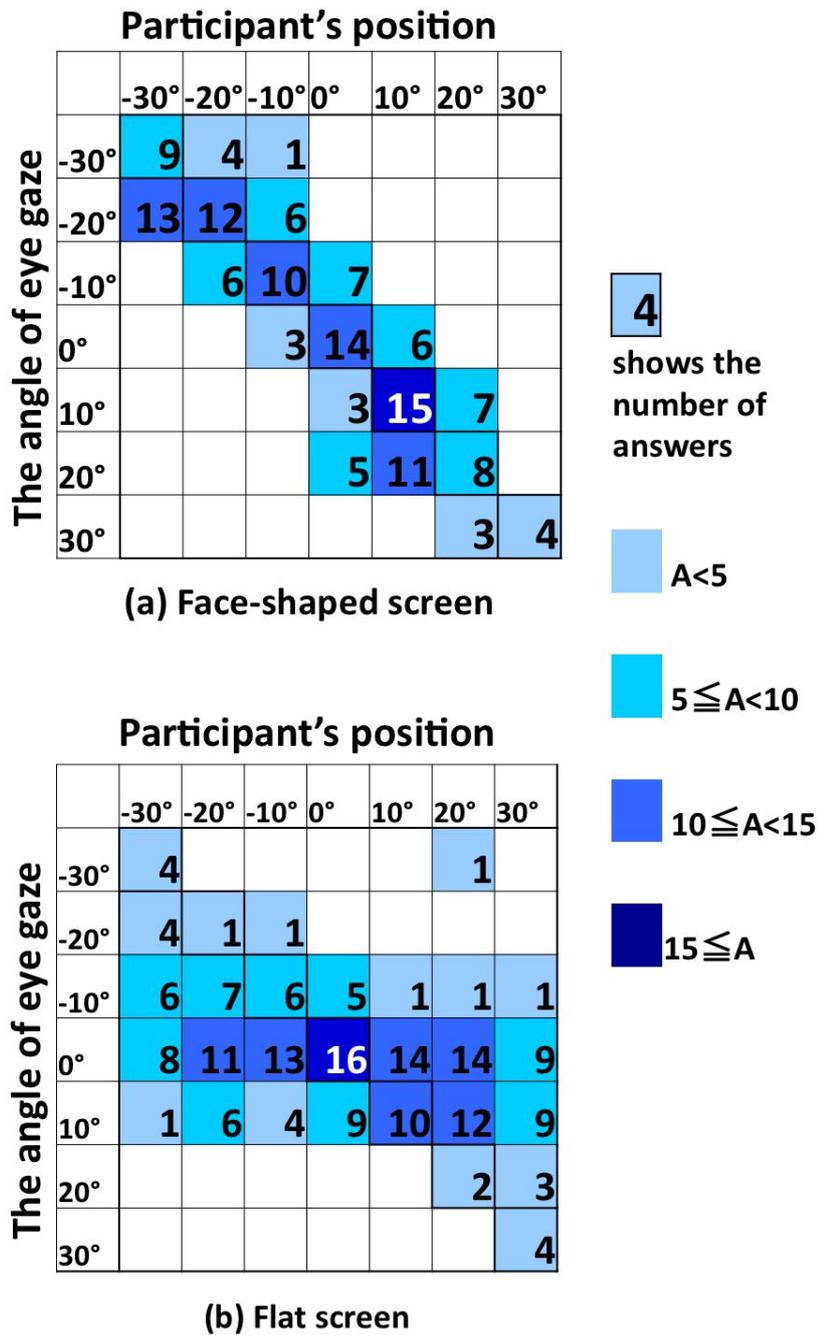


図 3.34: 実験 3 視線の認識: 横軸に画像中の視線角度、縦軸に被験者が視線が合ったと答えた画像中の視線角度をとっている。顔スクリーンでは結果が対角線上に分布しているのに対し、平面スクリーンは 0° 周辺に帯状に分布している。

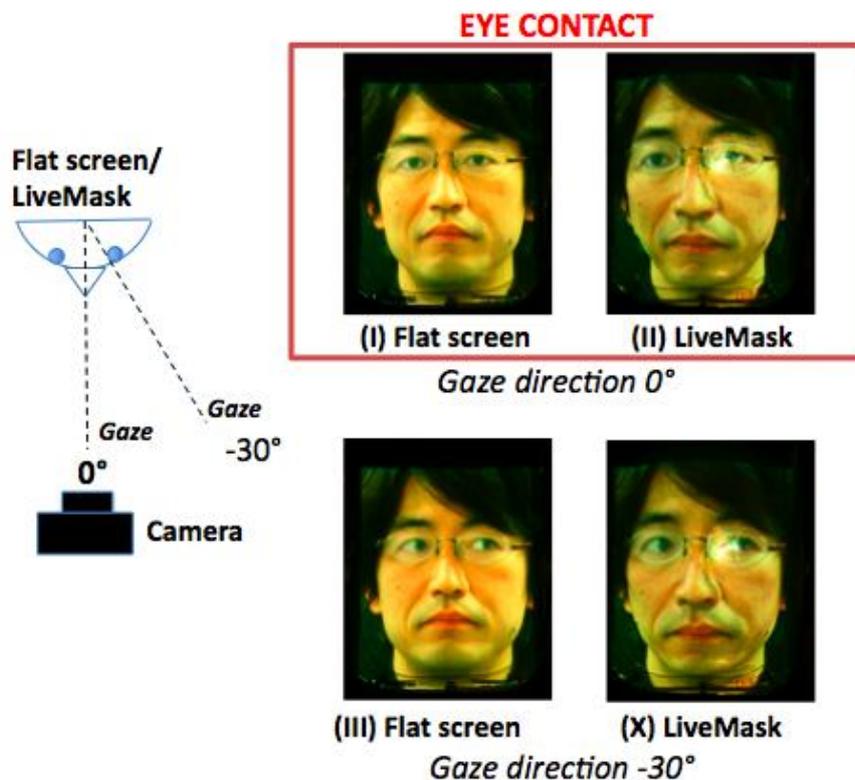


図 3.35: 条件 (a) カメラ視点 0° - (I) と (II) は画像中の人物の視線角度が 0° の同じ写真を投影したものである。(III) と (X) は、視線角度が -30° の写真を投影したものである。視線方向は、平面スクリーンと顔スクリーンで同じであり、(I) と (II) で視線が合うように感じる。

3.6.5 考察

実験 3 ではスクリーンの違いにより、視線方向の伝わり方が変わるか調べた。その結果、顔スクリーンではそれぞれの視線方向が伝わりやすかったが、平面スクリーンでは正面を向いている顔がどの角度から見ても視線が合うことが起こった(図 3.35, 図 3.36)。図 3.37 に、平面スクリーンと顔スクリーンの見え方の違いを一覧にまとめた。従来の平面的なディスプレイでは、厳密な視線による方向指示やアイコンタクトをとることが困難であり、それを解決する方法として顔スクリーンが使用できることが分かった。

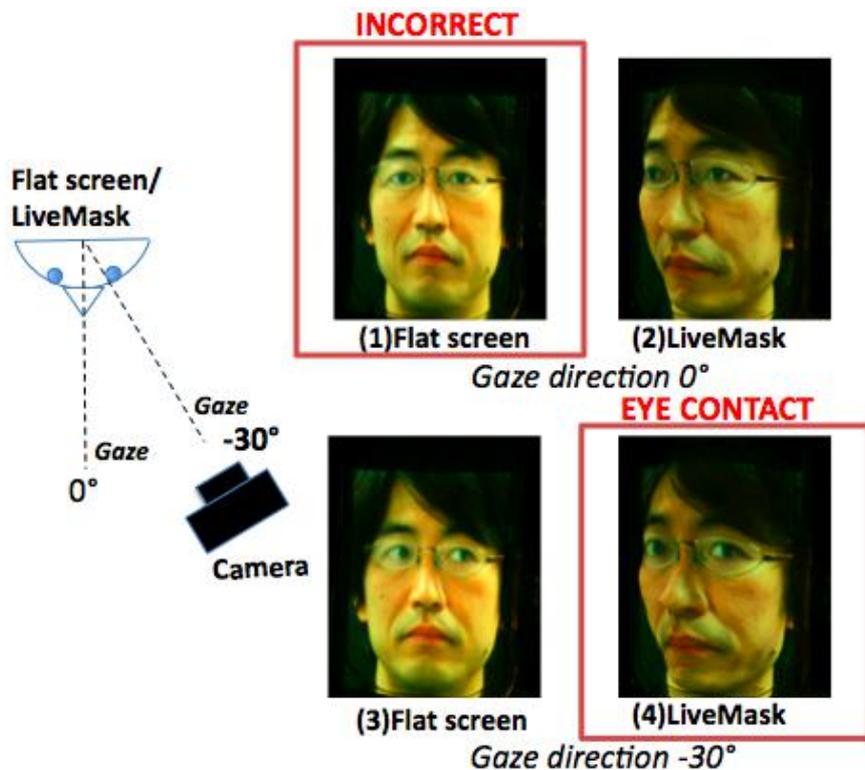


図 3.36: 条件 (b) カメラ視点 -30° - (1) と (2), (3) と (4) はそれぞれ 0° , -30° の視線角度の写真を投影したものである。視線方向は、平面スクリーンと顔スクリーンで異なっている。“INCORRECT”は遠隔ユーザの視線方向が被験者に正しく認識されなかったことを示す。(the Mona Lisa effect) (1) と (4) では視線が合うように感じるが、(1) の人物は実際は (2) のように 0° の方向を見ている。もし (3) の人物が -30° の方向を見ているなら、(4) のように (3) とともに視線が合うはずである。しかし、(3) の人物は異なる方向を見ているように見える。

3.6.6 考察

予備実験より、顔スクリーンは平面スクリーンと比較すると広範囲な角度から人物が認識可能であることが分かった。死角が少ないことからテーブルを囲んで会議をする時だけでなく、部屋にランダムに人物がいる状況下でも顔を認識することができ、存在感を効果的に提示できる可能性がある。実験 1.1 1.2 では、顔の表情の読み取りやすさにスクリーンによる違いは見られなかったが、判断のしやすさに対する被験者の主観的意見は分かれた。平面スクリーンの方が分かりやすいと答えた 2 人は、顔の凹凸、つまり鼻の高さや頬の膨らみによって片側の顔が見えないことによる分かりにくさを感じて

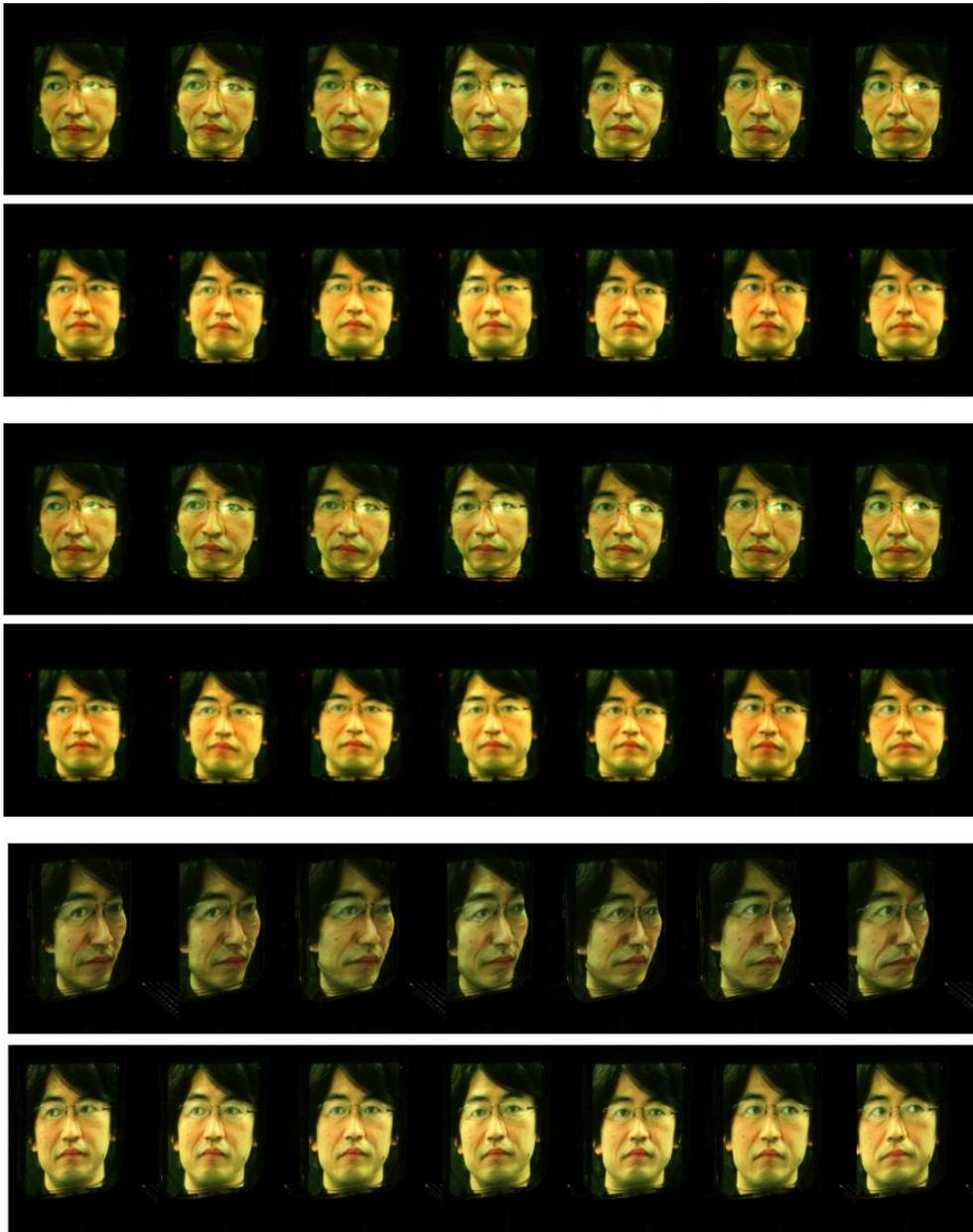


図 3.37: 参考: 上の 2 列は LiveMask システムに対し 30° の位置から写真を撮ったものである。1 列目が顔スクリーンに投影した時の写真であり、2 列目が平面スクリーンに投影した時の写真である。3 から 4 列目は正面 (0°)、5 から 6 列目は右側 (-30°) から撮影した様子を示す。

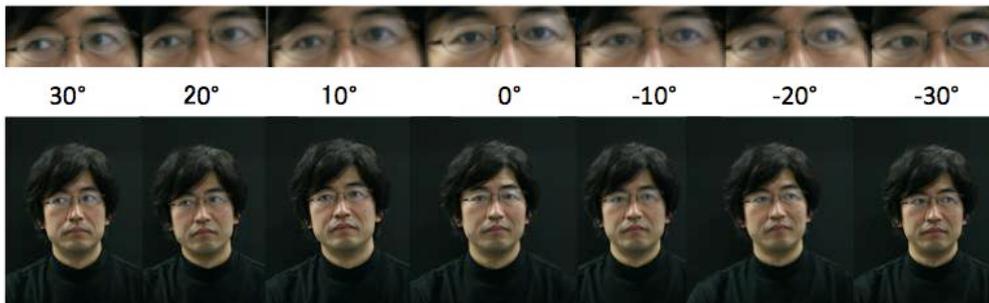


図 3.38: 実験：顔の角度は固定し、眼球を動かして視線のみを変えるようにした。左から、視線の角度を 30°, 20°... と 10° 刻みにした。

いた。これら 2 人は表情の判断を顔全面を見て判断しようとしていた。今回は、顔が動かない環境で実験を行っていたが実際の利用場面では頭部の動作を使用しユーザ側に向くことができるためこのような問題は解決できる。初めて LiveMask を目にした被験者からは「存在感があり、話してみたい」という声を得た。実験 2 の方向指示を読み取る実験では結果に大きな差が出た。画像で判断した時の正解率は特に低かった。しかし、近似正答率で評価するとそれぞれの被験者が 8 割近い正解率を記録している。画像で判断した時の正答率が低い理由はいくつか考えられる。「人の視界は広いのでディスプレイに表示された人物が 3~4 つの記号を見ているように感じる」とのコメントを得た。2D 画像は見ている大体の方向を伝えることができるが、正確な位置や方向を伝えることが現状は難しい。それは人の視野は広いので画像中の人物がどこを見ているのか局所的に判断することができないからだ。実験に使用した画像では、首の方向と視線を変えているが、実際には首を動かして特定の方向を向かなくても人は視線だけでその方向を指し示すことができる。そこで実験 3 ではスクリーンの違いにより、視線方向の伝わり方が変わるか調べた。その結果、顔スクリーンではそれぞれの視線方向が伝わりやすかったが、平面スクリーンでは正面を向いている顔がどの角度から見ても視線が合う現象 (Mona lisa effect) が起こった。従来の平面的なディスプレイでは厳密な視線による方向指示やアイコンタクトをとることが困難であり、それを解決する方法として顔スク

表 3.2: 実験 3：視線の認識

	正答率	標準偏差
Facial screen	75.9 %	0.17
Flat screen	36.6 %	0.30

正答率：全問題 (14) 中の正解数の割合

リーンが使用できることが分かった。

3.6.7 結論

実際の人の顔から型取りした顔形状のスクリーンを持ち、遠隔話者の動きに合わせて駆動する、自身の“代理人”としてのテレプレゼンスシステムを開発した。立体的なディスプレイの効果を調べるため、平面スクリーンと顔スクリーンを比較し、人物の判別ができる角度や表情の読み取りやすさを調べた。その結果、立体的な顔スクリーンは広範囲な角度で見えるため、正面を向かい合ったコミュニケーションだけではなく、さまざまなインタラクションで応用できる可能性があることが分かった。その一方で、平面スクリーンと顔スクリーンの表情の認識のしやすさに関しては差異が見られなかった。しかしながら、多くの被験者は「顔スクリーンの形状は、顔の表情が分かりやすく、通常の平面的なディスプレイと比較すると人らしい形状を持っているため親しみやすい」と述べており、表情以外の非言語情報を受け取った被験者もいた。また遠隔話者による方向指示は、平面ディスプレイに表示された画像より LiveMask による首の動作の方が判断しやすいことが分かった。そして、平面ディスプレイでは Mona lisa effect の発生により遠隔ユーザとアイコンタクトを取ることは困難であったが、LiveMask の立体形状は視線の方向を正確に伝達できることが分かった。本研究では、LiveMask の基本的な特徴を評価した。

3.7 PetiteMask: 肩乗せ型テレプレゼンスシステム

3.7.1 背景

テレプレゼンスシステムは、遠隔コミュニケーションの用途に合わせ様々なシステムが開発されている。可搬性でテレプレゼンスシステムを分類したときに、会話相手が遠隔ユーザのアバターを身体に装着し、持ち運びながらコミュニケーションをとる装着型テレプレゼンスシステムもある。特に親しい間柄で相談しながら物事を決めるコミュニケーションにおいて有用である。自律移動型テレプレゼンスシステムの場合、遠隔ユーザは自由に動き回る自由がある一方、システムの操作に集中してしまい、現地にいる人とのコミュニケーションに専念できない。その点で、ウェアラブルシステムは純粹に相手とのコミュニケーションに集中できる利点がある。

例えば、夫が妻に頼まれお店へ買い物に行く状況を想定する。夫は、めったにお店に行かないため、頼まれたものがどこにあるのか探すのに時間がかかり、たくさんの中からどれを買えばいいのか迷ってしまう。このような時に、夫は妻に電話をし、どこに行って、何を買ったら良いか聞く。彼の置かれた前後関係が共有できないと、状況や商品の特徴を端的に説明することが難しい。しかし、もし彼の妻が彼の視点を共有できれば、

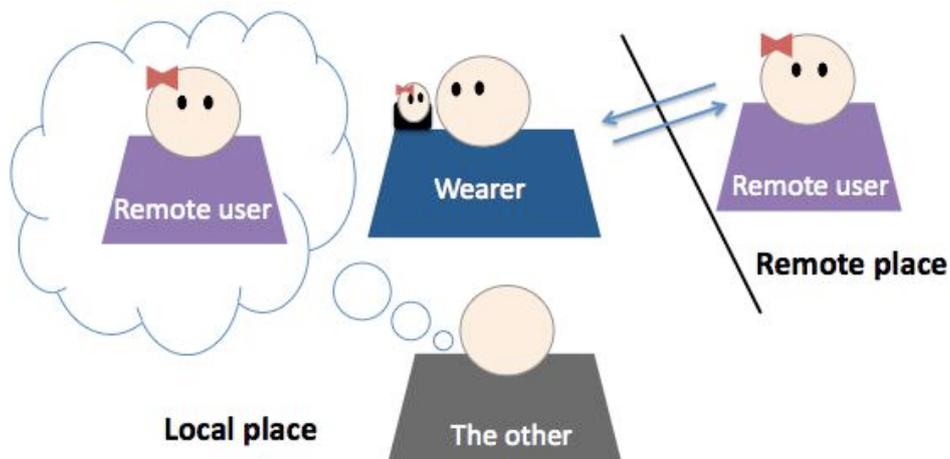


図 3.39: 遠隔の話者と装着者、そして第三者とのコミュニケーション

すぐに状況を理解し、相互にコミュニケーションがとれる。このように、装着型テレプレゼンスシステムは親しいパートナーとのコミュニケーションを円滑にし、耳元でささやいているかのような密な会話が可能になる。

装着型テレプレゼンスシステムは、ロボット分野から派生している研究もある。ロボットの実装コストが下がるにつれ、ロボットを用いて人と人がどのようなコミュニケーションを実現できるかに課題がシフトしてきている [28, 68]。そのため、ロボットの見た目を持つテレプレゼンスシステムが多い。

装着型テレプレゼンスシステムは、3つの課題がある。1つは、機構の複雑性と実用性のトレードオフである。装着感に配慮するため、小型で軽量につくられることが望ましい。基本構成は、卓上型のテレプレゼンスシステムと同様に顔を映すディスプレイやコミュニケーションがとれるマイクやスピーカーが搭載される。妻木らが開発した肩乗せ型のコミュニケーションロボット [104] は、ディスプレイを搭載し、形状は人間の形を模倣している。遠隔ユーザは自分の意志をロボットを操作することで表現する。しかし、複雑な機構を持つため、機械的で大きくかさばる。また、身体動作の表現は、非言語情報を伝える上で有用であるが、システムの複雑性を増し、体積が増す。2つ目は、複雑な構造を避けるため、単純化、擬人化させたロボットの表情が機械的なところである。Geminoidのようなアンドロイドロボットはリアルな表情を伴うが、小型化させることは難しい。そこで、機械で人の表情を表現するが不自然さが伴う。また、外見だけ見ると、誰が操作しているのかわからない。ウェアラブルシステムは、日常のシーンで装着者と遠隔ユーザだけで使われるものではなく、装着者と遠隔ユーザとコミュニケーションする他人もいる。例えば、買い物で装着者が夫、妻が遠隔ユーザだとしたときに、

第三者は妻が夫に手伝いを頼んだ従業員である。装着者と遠隔ユーザ間のコミュニケーションでは、お互いが誰であることを認識した上で自由にコミュニケーションをする。しかしながら、装着者、遠隔ユーザ、第三者との会話では、第三者はロボットを見るだけでは遠隔ユーザの外見がわからず、機械的な表情からは遠隔ユーザ本来の自然な表情は伝わらない(図 3.39)。3つ目の問題は、視線の一致である。装着者は、肩に乗ったデバイスを見て、話しをしたり一緒に作業を行う。その際、遠隔ユーザの顔が2Dのディスプレイに表示されると視線が正しく合わない mona lisa effect が発生する。遠隔ユーザがカメラをまっすぐに見ると、装着者はどの角度から見ても視線が合ってしまう [84, 60]。スマートフォンの普及により、ウェアラブルシステムを用いず、アプリケーション上でビデオコミュニケーションを蜜に取ることも可能であるが、同様に mona lisa effect の問題は解消しない。ウェアラブルシステムではディスプレイを正面ではなく斜めから見ることも多い。システム全体を小型化させるために、ディスプレイ自体も小さくする必要がある。顔スクリーンが小型化しても遠隔ユーザの視線が正しく伝わるのか、実験を行って調べることにした(図 3.40)。

3.7.2 関連研究

CSCW (computer-supported collaborative work) は、情報科学の研究分野の一つであり、遠隔共同作業をコンピュータを活用して円滑化させるものである。例えば、遠隔地から専門家の指導を受けながら、労働者が高度な作業をするときに用いられる。WACL は、遠隔ユーザが注目する場所をレーザーポインタを用いて指す。レーザーポインタは、カメラとサーボモータ上に設置されており、ベテランからの指示が伝えやすいようになっている [64]。これらのシステムは、高度な作業場所で用いられ、日常で使用されることがなかった。そこで、Mann はカメラとレーザーポインタを持つ Telepointer [65] を提案した。Telepointer は、日常で使用する目的に開発された首から下げるウェアラブルシステムである。

遠隔共同作業を支援するために、持ち運びが可能なロボットが開発されている。BlogRobot は、訪問者に実世界の情報をブログの検索によって提供する。視線やポインティングを通して、現実世界の情報を言及するために適切な情報を提示する [105]。Telecommunicator は、駆動する頭部を持ち、カメラとアームを持つミニチュアロボットである。このロボットは、遠隔ユーザから操作される [104]。しかし、これらロボットの機械的な表情は人間的ではなく、自身のアバターとして用いたときに人間の自然な表情を伝えられない。Polly [67] は、スマートフォンに遠隔ユーザを表示する装着型テレプレゼンスシステムである。しかし、平面ディスプレイを用いているため mona lisa effect が発生する問題がある。ヒューマノイドロボットの研究では、機械で人間の表情をつくるのではなく人の顔形状を模したスクリーンを通して表情を伝える研究も行われている [80]。これらの

システムは実際の顔サイズより同等かわずかに小さくつくられているため、ウェアラブルにするには小型化させる必要がある。

しかしながら、小型化させた顔スクリーンがどのように非言語コミュニケーションに影響を与えるのか明らかになっていない。非言語情報は、コミュニケーションにおいて重要な役割があると言われている [90]。とりわけ、視線は会話の流れをつくり [60]、親密度を保つ役割があると言われている [92]。そこで、顔スクリーンのサイズが変わっても、視線の伝達が可能か実験を行うことにした。

3.7.3 実装

実験を行うにあたり、小型の顔スクリーンを用いたシステム、PetiteMask を作成した。PetiteMask の特徴を下記にまとめる。

- ウェアラブルデバイスとして身につけたり、持ち運ぶことができる大きさであること。さらに、場所をとらずに机の上に置くこともできる。
- 親友や恋人との親密なコミュニケーションがとるために、その人が誰か分かる大きさであり、実態を持つ。
- ロボットの表情は人間味がなく、アンドロイドロボットは、小型化するのが難しい。人々が簡単に持ち運べるサイズで表情が伝わり、視線伝達ができる。

システム概要: PetiteMask システムは小型顔形状スクリーン、小型プロジェクター、ウェブカメラ、カメラ機構から構成される (図 3.41)。LiveMask システムの顔スクリーンから 1/14 にスケールダウンしたスクリーンを持つ (図 3.42)。顔スクリーンは、顔の 3D モデルをモデリングソフトで、小型化させ、型を 3D プリンターを用いて出力した上で、スクリーンをつくっている (図 3.43)。顔スクリーンは、頭部の動作に合わせて 2 軸で動く。頭部動作は、faceAPI [93] という 3DOF のヘッドトラッキング API を用いている。

顔スクリーンのサイズを小型化させるメリットはいくつかある。まず、システム全体の機構も小型化できることである。プロジェクターの投影距離が短くなるため、魚眼レンズも不要である。次に、十分なプロジェクターの輝度を活用できること。これらの利点を最大限活用する為に、1/14 サイズにした。また、このサイズは肩に乗せられるほど十分小さい。

ソフトウェアの概要: 投影する映像をつくるために、遠隔話者の話している様子をカメラで撮影し、顔画像の抽出や補正といった画像処理を行っている。立体的なスクリーンにリアルタイムで顔画像を投影をするため、サイズの不整合や画像のずれを改善させる必要がある。SeeingMachine 社の faceAPI は精度が高いフェイストラッキングがで

きるライブラリである。眼鏡を着用している人物でも、眼や鼻といった部位の追跡ができたり、人物の素早い動作でも安定してトラッキングができる点で使用に適していた。投影する映像は、カメラに向かって正面を向いている画像が必要である。faceAPIが自動処理で正面を向いた顔になるよう画像補正を行っており、これをもとにスクリーンに合うよう画像調節を行って投影させている。

3.7.4 実験

装着者との親しいコミュニケーションがとれるかどうかを判断するために、視線の伝達可否を調べた。視線は、意思の伝達や会話の親密度を保つことに寄与すると言われていいる。装着者が、肩に乗ったシステムを見る時、小型の顔を正面から覗くのではなく斜めから見ることになる。正面を向いた顔を平面の顔スクリーンに投影するとどこでも視線が合うように感じる Mona lisa effect が発生してしまう。そこで、肩乗せシステムでも顔スクリーンであれば、この問題を解消するのではないかと考えた(図 2.3)。LiveMaskで行った実験では、被験者がシステムに向き合うように座ったが、本実験では肩乗せしたと想定して、視線の読み取りができるか実験を行った。

3.7.5 目的

実験目的は、装着者の視点から小型の顔スクリーンに投影される人の視線がどの方向を見ているのか判断することである。

3.7.6 実験環境

人物の視線が、 -30° から 30° まで、 10° ずつずらした写真を用意する(図 3.38)。7点が記されたホワイトボードを用意する。これらの7つの点は遠隔ユーザの視点と呼んでいる。被験者は、肩に設置したとして実験を行う(図 3.44)。被験者の人数は5人である。

3.7.7 実験手順

- 1) 被験者はシステムと同じ高さになるよう椅子の高さを調整した。
- 2) 実験員は、被験者にこれから投影する人物が7つのいずれかの方向を見ているので、どの方向を見ているのか答えるよう伝えた。
- 3) 実験員は回答を記録し、被験者は7つの画像をランダムに見ることを3セット繰り返した。

表 3.3: 結果

	平均	標準偏差
The accuracy	44.5 %	0.181
The approximate accuracy	88.6 %	0.160

近似正答率: 正解に隣接する
記号も正解だとみなした正答率

3.7.8 実験結果

44.5 % の正答率が得られた。正解に隣接する記号も正解だとみなすと（近似正答率を呼ぶことにする）近似正答率は約 88.6 % にあがる。図 3.45 は、ある被験者の記録である。被験者は遠隔ユーザの視線角度を認識できており、顔のスクリーンサイズが小型化しても、視線角度が正しく伝わることが分かった。

3.7.9 まとめ

実験結果より、顔スクリーンのサイズが小型化しても視線が伝達できることがわかった。実験では、肩にシステムを設置したとして、被験者は肩を見ながら回答してもらった。何人かの被験者は、システムと目が合うように感じたと驚いていた。このように、もし装着者と遠隔ユーザのアイコンタクトが可能であれば、お互いを見つめ合いながら会話をするような親密なコミュニケーションが可能である。小型のシステムは、場所をとらないのでデスクトップに置くことも可能である。



図 3.40: PetiteMask : 実寸の 1/14 サイズの顔スクリーンを持つ肩乗せシステム

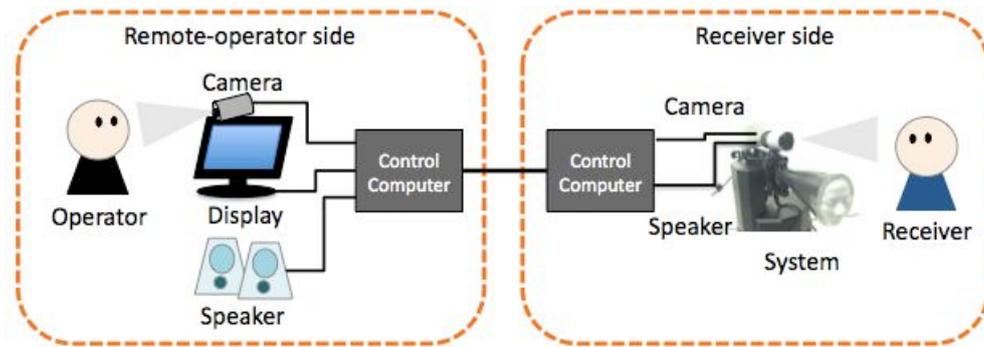


図 3.41: システム概要

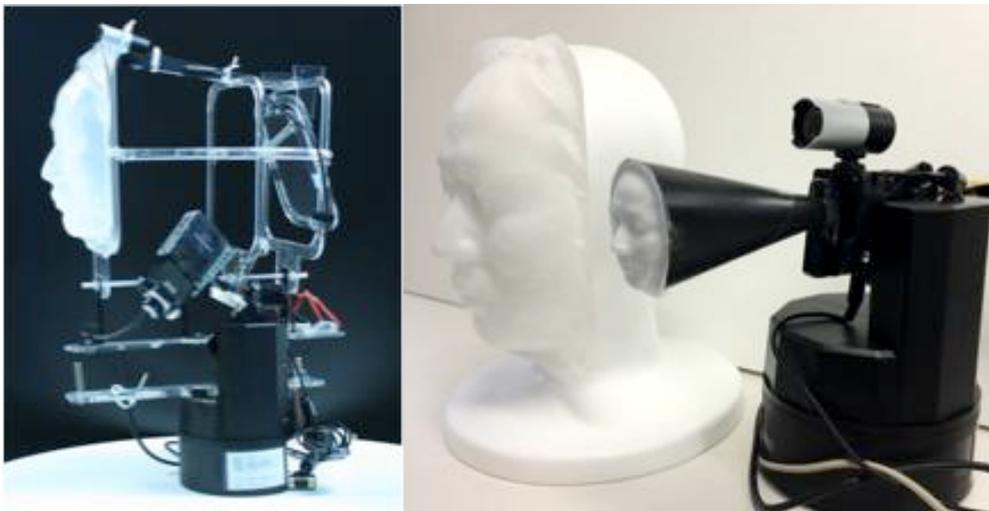


図 3.42: 左: 実寸大の顔スクリーンを搭載した LiveMask 右: 1/14 に小型化させたサイズの比較



図 3.43: サイズの比較: 左は、1/14 スケールの顔型スクリーンである。右は実寸大の顔スクリーンである。

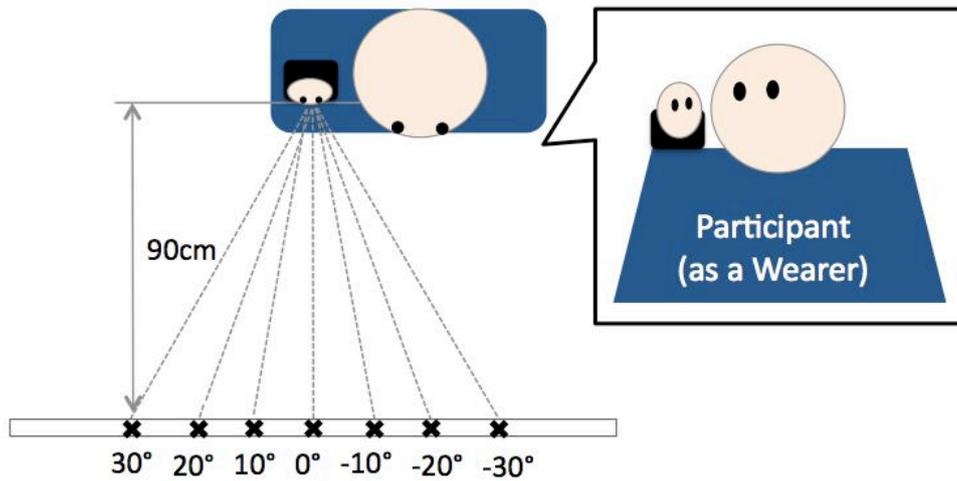


図 3.44: 実験環境: 肩の上に設置したシステムは、図 3.38 をランダムに投影する。被験者は7つの角度のうち、どこを見ているのか答える。

Position	1	2	3	4	5	6	7
Answer 1set	△ 2	△ 3	△ 4	○ 4	△ 6	△ 7	○ 7
Answer 2set	○ 1	○ 2	○ 3	○ 4	△ 6	△ 7	○ 7
Answer 3set	○ 1	△ 3	○ 3	○ 4	○ 5	△ 7	△ 6

図 3.45: ある被験者の回答: 丸は、回答が正解を表す。三角は、正解に隣接した回答を表す。この場合は、正答率が 52.3%, 近似正答率は 100%になる。

第 4 章

ChameleonMask

4.1 背景：自律移動型テレプレゼンスシステム

テレプレゼンスシステムを可搬性の観点から分類した時に、前述の固定型、装着型に加え、自律移動型テレプレゼンスシステムがある。自律移動型テレプレゼンスシステムは、遠隔操作によって空間内の移動が可能になるため、現地の様子を見ながら動き回り、周囲の人と話すことができる。特に、車輪を持つテレプレゼンスロボットは市販化され、様々な場面での利用が期待されている (図 4.1)¹。それぞれのシステムが共通して持つ機構は、遠隔ユーザの顔を表示するタブレットのディスプレイ、背丈程の躯体、そして移動用の車輪である。オフィスへ実験的に導入する企業もあれば²、試験的に学会へこれらのシステムを使って参加する研究者もいる³。また、テレプレゼンスロボットは現地にいる人、遠隔ユーザとも使用感の満足度が高いと言われている [109]。

しかし、これらのシステムはまだ完全とは言えず、実世界で人間の代わりを務めるには多くの課題が残る。一つは、システムと人の見た目の違いである。見た目の違いはコミュニケーションに影響を与える。例えば、背の高い人が背丈の低いシステムを使うことで、元の印象が変化することが実験によって示されている [70]。システムの高さを調節することにより、実在の人物と同じ背丈へ調整することもできるが、安定性を維持するため、しばしば実物の人物より背丈が低くなることが多い。二つ目は、環境に応じて声の音量調整ができないことである [110]。その結果、聞こえにくい遠隔ユーザの質問を誰かが復唱する必要が生じたり、逆に音量調整ができないため話し声が大きくなりすぎることが起こる。三つ目は、“自律移動できる”システムでありながら、問題が起こるたびに人の手助けを必要とする点である。Raeらは、テレプレゼンスロボットを用いた遠

¹様々なテレプレゼンスロボット, <http://www.medgadget.com/2016/09/global-telepresence-robots-market-at-825-million-in-2016-are-anticipated-to-reach-7-billion-by-2022.html>

²Double robot, <http://www.doublerobotics.com/business/>

³Should I Attend a Conference Via a Telepresence Robot?, <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/attending-conference-via-telepresence-robot>



図 4.1: 様々なテレプレゼンスロボット (a)Double [14] (b)Luna [106] (c)VGo [16] (d)Beam [15] (e)Kubi [107] (f)Ava [108]



図 4.2: ChameleonMask を被った surrogate と遠隔ユーザ本人

隔共同作業で、高さを伴うタスクは作業効率が落ちることを報告した [70]。また、テレプレゼンスロボットは床の障害物や階段で立ち往生しやすく、手がついていないため、ドアを開けることができない。テレプレゼンスロボットは、汎用性を持たせるため簡易な機構であり、移動ができるものの、基本的なコミュニケーションしか取れない。人間のコミュニケーションは、言語情報に加え、顔や身体を使って非言語情報を表現して行われる。人間の代理をさせるには見た目や動作の機能を足す必要がある。Geminoid [39] のようなアンドロイドロボットは、見た目はその人に非常に酷似しているが、移動ができず俊敏な動きができない。また一体つくるのに数千万がかかることから、すべての人が利用するには適さない。もし、複数の人々が遠隔からこのようなシステムを用いて参加したら、広いスペースであっても混雑することも考えられる。

これらを解決するために、仮面型テレプレゼンスシステム、ChameleonMask (図 4.2) を提案する。ChameleonMask は、人間の代理人を用いることで遠隔ユーザの社会的存在感と身体的存在感を提示することを目指すシステムである。多くの研究では、人のように振る舞うロボットの開発を目指しているが、人物の社会的立場、使用する環境、必要な動作はコミュニケーション場面に依りて異なり、要求されるレベルも多種多様で複雑である。個々の動作に特化した機械や機能で代替させることも可能であるが、どこまで人に近づけたらゴールなのか分からない。また、個人が使用できるよう汎用性高くつくることも課題である。そこで、機械をつくっていくのではなく、人間の代用を人間が行い、それをコンピュータがサポートするコミュニケーションツールを開発することにした。人間は、生得的に高い危機管理能力と優れた五感の感覚器を備えている。もし、遠隔ユーザが自身そっくりの代理人を見つけることができれば、遠隔ユーザ自身の印象は保たれるかもしれない。また、人間は耳を使って、周囲の環境に合わせて話す音量も変えることができるし、周囲の邪魔にならないよう行動することができる。機械によって人の器官や能力の代用をつくるのではなく、他人から借りることはできないのか。その実現可能性や、限界を探るため研究を行うことにした。

4.2 関連研究

コミュニケーション用のテレプレゼンスシステムは、可動性やジェスチャー動作を再現するために現地に遠隔ユーザの分身をつくり、遠隔操作することで周囲の人々とコミュニケーションを図ってきた。本研究では、分身を“モノ”ではなく“人間”に担ってもらい、周囲とコミュニケーションをとる。メディアアートには、タブレットを被るパフォーマンスの作品⁴⁵⁶がいくつかあるが、それぞれ表現したいメッセージ性は異なり、遠隔コミュニケーション用につくられたシステムや研究として学術的にコミュニケーション

⁴Tablet man, <http://www.damndigital.com/archives/74517>

⁵Yamada Taro project., <https://vimeo.com/82250584>

⁶iPad Head Girl, <https://youtu.be/ELPMLJgGsiA>

ン効果を調べたものはない。そこで、本研究ではコミュニケーションの形式を従来の Human-system 型から Human-Human 型へ変えたときに、どんなコミュニケーションシステムが必要で、それがどのような印象を生むのか、明らかにすることにした。

4.2.1 Human-Human 型システム

ChameleonMask は、ネットワークを介して遠隔ユーザのオーダーに応えるシステムでもある。自身の代わりをする代理人の存在が重要であり、どのように探すのか検討する必要がある。近年、ウェブサービス上で、ユーザが小規模な仕事をアウトソーシングしたり、自身の得意分野や能力を売買するサービスが増加している [111, 112]。Uber⁷ は、代表的な CtoC ビジネスであり、オンライン上で近くにいるタクシーを確認し、送迎を頼むことができる。ChameleonMask でも、ある場所で仕事が発生したときに、その場所で稼働可能な surrogate を WEB 上で集い、自身の代わりを依頼する使い方がありと考えている。このようにネットワークを介して人の能力を活用する研究やサービスはいくつか存在する。Tele-Actor [113] は、複数人によってロボットや Tele-actor(人) を操作する遠隔コミュニケーションシステムである。Tele-Actor が被るヘルメットのカメラから複数の遠隔ユーザに映像が送られ、彼らの意思決定を 1 人のユーザが返す投票システムを開発した。Jackin [20] は、現地にいるユーザがカメラを搭載したヘッドセットを被ることで、遠隔ユーザに 360 度の映像をシームレスに共有することができる。Omnipresenz [114] は、遠隔地にいるユーザがカメラが搭載されたヘルメットを被ったユーザの視点を楽しむことができるサービスであり、観光地を歩いてもらうことによって旅行にいった気分が味わえるものである。ChameleonMask は、現地環境の共有だけでなく、仮面を被ることで遠隔ユーザが現地に身体を持って現れる点が他と異なる。Amazon Mechanical Turk [115] が、オンラインの 頭脳マーケットプレイスだとすると、ChameleonMask は人の顔という社会性と身体を貸す 2 つのマーケットプレイスになるであろう。

4.2.2 分身を持つ/他人になるシステム

遠隔から自身の分身を操作するテレプレゼンスシステムに関する研究は、Hydra [26]、Geminoid [39]、PRoP [35] などがある。また、映画「Surrogate」(2009 年) は、分身ロボットの surrogate を持つようになった社会を描いた作品である。人間は、自分より見た目が若く、容姿のよい surrogate を分身としてカプセルから操作し生活する。話の途中、都合が悪くなると surrogate から離脱する場面や surrogate として過ごしたい妻と生身で接することを望む夫の心の葛藤が描かれている。ChameleonMask が、これらの研究と異なるのは、分身に人を用いる点である。遠隔ユーザと同じ印象を持たせるには、似た surrogate を、背が高く見せたければ、背の高い surrogate を選ぶことができるだ

⁷Uber., <https://www.uber.com/>

ろう。

他人に成り代わる体験を描いた作品やアート、システムが開発されている。八谷が開発した視聴覚交換マシンは、お互いが見ているものを交換し、他人の視点に立たされることでアイデンティティを曖昧にさせるメディアアート作品である [116]。CHILDHOOD は、筑波大の学生グループが開発した子供でしか感じ取れない世界や体験を本質的に再現する身体性変換デバイスである [117]。男女の視点を入れ替えたメディアアートが、「The Machine to Be Another」である。相手の立場に立つことで、自分自身を理解することをコンセプトにしている [118]。1999 年に公開された映画「マルコピッチの穴」は、壁に空いた穴に入ると俳優マルコピッチの脳内に入り、マルコピッチの視野や身体感覚を得て、操作ができるようになる世界を描いたものである。他人になることで、新しい自分を見つけたり、事業で成功をするなど、楽しい体験として描かれ、一人の身体に複数の人間が交互に入り込むシーンがある。その他、他人になることで心に変化が生じた例に、白人女性が黒人女性のアバターになって VR 空間で過ごしたところ、黒人女性に対して無意識に感じていた偏見が軽減する結果を示した研究がある [119]。こうしたアプローチは、他人の立場に立つことで、自分とは何かを見つめ直す。作家の平野啓一郎は、人間には複数の顔があり、コミュニティに応じて見せる表情や話し方を変えると説明する。「本当の自分」は存在するのか、個人 (individual) という概念は、より小さな単位である「分人 (dividual)」に分けられると語っている [120]。本論では、ChameleonMask を使用した時の周囲の人の反応を中心に調べているが、surrogate が遠隔ユーザの体験を長期間することで心の変化が起こる可能性がある。

4.2.3 ディスプレイの装着位置で変化するコミュニケーション

図 4.3 は、装着するディスプレイの位置を 3 種類に分けたものである。ChameleonMask は、(a) であり、遠隔ユーザを映すディスプレイを“仮面”として扱い、surrogate の顔に装着する点が他の既存研究と異なる。Surrogate は、仮面によって「顔」を隠して個を消失させることで、仮面に憑依する人格になり、仮面が肉体と意志を持つ人間の主体になっていく。ディスプレイを顔以外に装着した場合のコミュニケーションの変化について述べる。(b) は、肩に装着することでコミュニケーションをとる。Polly は、(b) のような肩乗せ型のテレプレゼンスシステムであり、遠隔ユーザをスマートフォンに映す [67]。同伴して移動することが可能であり、周囲の人は遠隔ユーザと装着者の二人に対してコミュニケーションをとる。(c) は、肩乗せ型が首下げになったものなので、(b) とほぼ同じ構造である。Sheridan らが開発したゲリラパフォーマンスシステムが、(c) の形態を持つ [121]。遠隔ユーザをパラサイト、装着者をパフォーマーと呼び、それに対峙する観客の反応を観察している。遠隔ユーザと観客がメッセージでしかやりとりできない制約もあるが、三者の関係があることを述べている。このように、(a) の主体は遠隔

ユーザであるが、(b) や (c) は装着者に付随しているため、遠隔ユーザと装着者の二人が存在する。

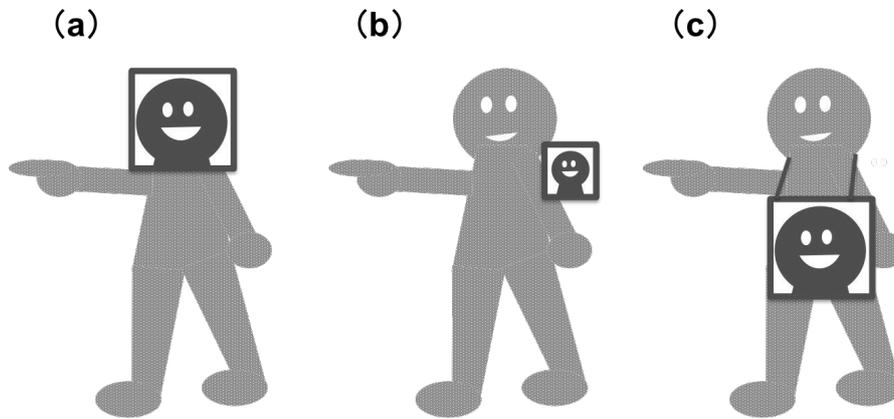


図 4.3: ディスプレイの装着位置：(a) 仮面型、(b) 肩乗せ型、(c) 首掛け型

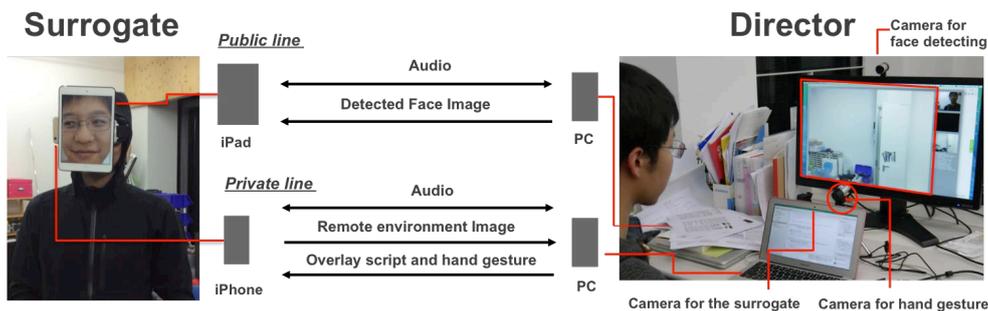


図 4.4: 2つのコミュニケーションチャンネルを表すシステム概要: 1) Public line は director と現地にいる人たちの通信経路である。音声と認識された顔画像が surrogate の iPad に送られる。2) Private line は、surrogate と director 間の通信経路である。Surrogate の周辺環境は、視野映像 と音声によって Director に送られ、それを見て director は指示を出す。

4.3 仮面型テレプレゼンスシステム：ChameleonMask

4.3.1 ChameleonMask における三つの立場

ChameleonMask のコミュニケーションでは、三つの主要な立場が存在する。遠隔ユーザ (director)、代理人 (surrogate)、および現地にいる人々である。Director は遠隔地か

ら参加したい意向のある人であり、surrogate にどこへ行きたいか、どう振る舞ってほしいかを指示する。Surrogate は、director からの指示を受けて、director に代わって振る舞うユーザである。Surrogate は、映像と音声によって自身の周辺状況を director と共有する。現地にいる人々は、surrogate を通して director と話をする対象であり、director の同僚や会議の参加者にあたる。ChameleonMask の目的は、彼らに director と実際にコミュニケーションをしているかのような感覚にさせることである。

4.3.2 コミュニケーション構造

ChameleonMask には 2 つのコミュニケーションチャンネルを用意する必要がある (図 4.4)。一つは、遠隔ユーザが現地にいる人と顔映像と音声を用いてコミュニケーションする Public line (図 4.5) である。そこで、director の顔を切り取って PC から iPad に送るソフトウェアを開発した。顔画像は、USB カメラで取得した画像に Haar-like 検出器を用いて顔認識をかけており、取得した画像をリアルタイムで送っている。二つ目は、遠隔ユーザと代理人だけが会話するコミュニケーションチャンネルである (Private line)。Private line を用いて、遠隔ユーザは代理人にしてほしいことを依頼し、代理人からは遠隔の映像と音声を送られる (図 4.6)。Surrogate は、director と話すためにマイク付きイヤホンを身に着けている。音声の通信は、それぞれ Skype を用いている。声の音量が小さすぎる場合、surrogate が、iPad の音量を調整したり、Private line を用いて director にもっと大きく話すよう指示を出すことができる。

4.3.3 設計方針

テレプレゼンスにおけるの存在感とは、その人が誰であるかを規定する社会的存在感と実体としての身体的存在感があると考えられる。本システムでは、この二つの存在感を提示するために、人間の代理人を起用した。それぞれの存在感について設計方針を述べる。

社会的存在感：

身体の中で、それが誰であるかを規定できる主要な部位に顔がある。そこで director の表情をディスプレイに表示し、音声を伝えるシステムが必要だった。顔マスクの作成方法はいくつかあり、一つは、顔映像をディスプレイにプロジェクションする方法が考えられる [42, 122, 123]。プロジェクションは、顔の細部や動きを高精度に再現できるが [124]、プロジェクタを配置する場所がないためウェアラブルシステムには不向きである。その他、3D プリンタで湾曲した 3D 光学ディスプレイをつくる方法 [98, 125] や、フレキシブルディスプレイを用いて顔マスクをつくる方法が考えられる。顔形状に沿ったリアルタイムで変化する顔マスクの開発が望ましいが、ChameleonMask は新しいコ

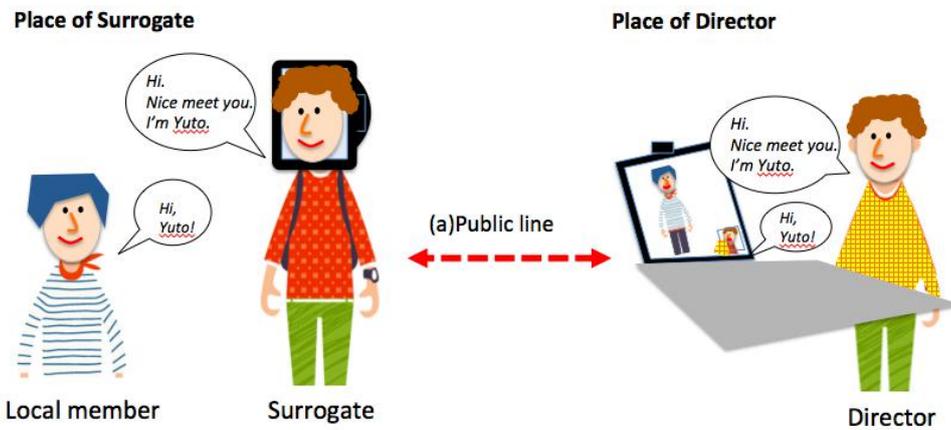


図 4.5: Public line : Director は surrogate が見ている視界をモニターで見て、現地にいる人とコミュニケーションをとる。

コミュニケーションフレームなので、マスクは簡易的にタブレットを用いて、人がどのように感じるのかを優先的に調べることにした。

身体的存在感：

ウェアラブルシステムは、コミュニケーションを阻害しないデザインにすべきである [126]。そこで、ChameleonMask を被った surrogate に人や社会がどのように反応するか調べることにした。ChameleonMask は、顔面のみシステムの着用があり、当然ながらそれ以外は人の体をしているため、人らしさや人の身体的存在感を備えている。さらに本人とそっくりの印象をつくるには、surrogate は同じような背丈、体格、性別が望ましい。そしてジェスチャーの意味が異なることがあるため、同じ文化慣習を持つ人が意思疎通しやすいと考えられる。普段、着用する服装が固定化している人であれば、surrogate に衣服を貸すことによって、見た目の印象が保たれるであろう。ChameleonMask では、音声や映像で伝達できる非言語情報に加え、手足を使ったボディジェスチャーや移動によって対人的空間の間をつくることもできる。そして、surrogate は director に身体を貸してるので周囲の人々と会話をせず、surrogate 自身のキャラクターや存在は隠す必要があると考えている。

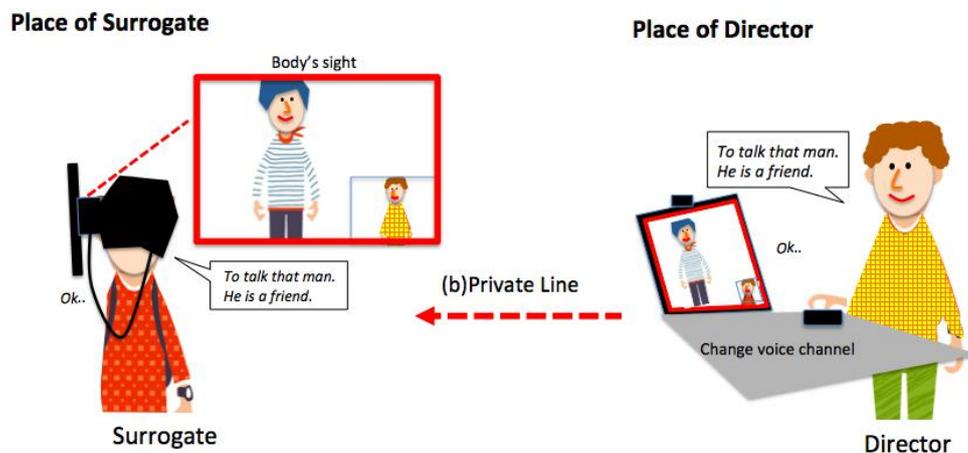


図 4.6: Private line : Director が、surrogate にだけ指示を出すときに用いる。両者は音声でコミュニケーションがとれる。

4.3.4 プロトタイプ

初期のモデル

ChameleonMask は、director の顔が表示されたマスクであるため、surrogate の顔面に装着でき、かつ surrogate の視界を確保する必要があった。また、surrogate が遠隔ユーザの動作を模倣できるように surrogate の視界上に director の姿が見えることが望ましい。Director は、現地にいる周囲の人たちとコミュニケーションをとるため、現地の映像をリアルタイムで送る必要があった。

最初のプロトタイプ(図 4.7)は、director の顔表示を iPad で行い、段ボール製のハコスコ単眼ヘッドマウントディスプレイ⁸ をフルフェイスのヘルメットに搭載して surrogate の視界を確保した。ハコスコはフレネルレンズの入った箱にスマートフォンをセットするだけで、簡易に没入感のある映像が体験できる。Surrogate は、スマートフォンの外側カメラから得られた映像を見て、外の世界を見、同じ映像が director にも送れるようにした。Surrogate の視野には、director の顔もモニター表示されるようにし、表情や手元のジェスチャーを見れるようにした。使用するスマートフォンは、視野範囲、重量、内蔵カメラなどの性能を考慮し、iPhone 6 を選んだ。iPhone のアプリケーションを開発し、surrogate が見ている外側の映像を director の PC へも送るようにした。音声通信は、Skype を介して行われる。

またクリップ式のワイドレンズをつけることで、視野が二倍に広がることが分かった。ハコスコから得られる視界は、人間の視界より狭いため、ワイドレンズを入れた方が周

⁸Hacosco, <http://hacosco.com/en/>.



図 4.7: 初期の ChameleonMask : フルフェイスのヘルメットに段ボールの Hacosco がセットされている。

辺情報を得やすい。一方、物体との距離感が変わる問題もあるため、手元を見る動作が遠くを見る動作に応じて使い分ける必要がある。Surrogate が ChameleonMask を被って歩行できるかに関しては懸念もあったが、スマートフォンから得られる映像の解像度が高いため、映像に慣れることでまっすぐ歩けるようになった。その他、フルフェイスのヘルメットのため、スムーズな呼吸ができるようハコスコをカットしたり、帽子を被るなどして頭部の大きさを調節し、ヘルメットがずれないようにした。

4.4 フィジビリティの検証

4.4.1 フィールドテストの実施

ChameleonMask の実現可能性を調べるため、二つのフィールドテストを行った [45]。人々がプロトタイプのマスクを着用した surrogate を見てどんな反応をするのか観察を行う。設定したタスクは下記の二つである。

1. 遠隔ユーザが ChameleonMask を使ってサービスカウンターで証明書をもらうタスク
2. 遠隔にいる孫が ChameleonMask を使って、祖母とコミュニケーションをとるタスク

ChameleonMask は、新しいコミュニケーションフレームであり、遠隔ユーザの顔を映

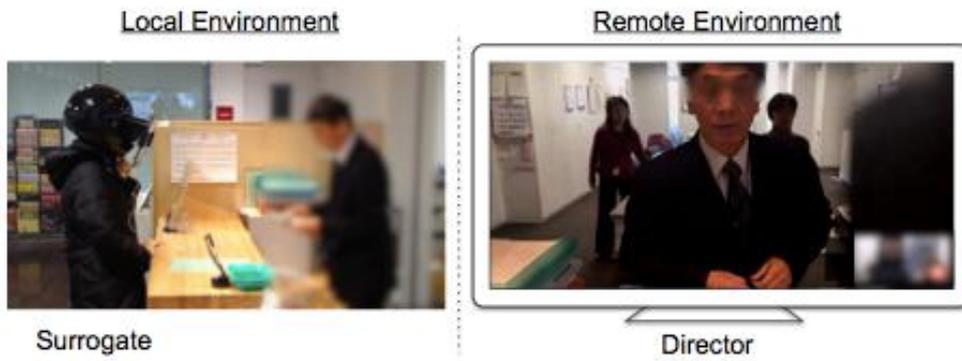


図 4.8: タスク 1 : Surrogate は、director の代わりにサービスカウンターを訪問

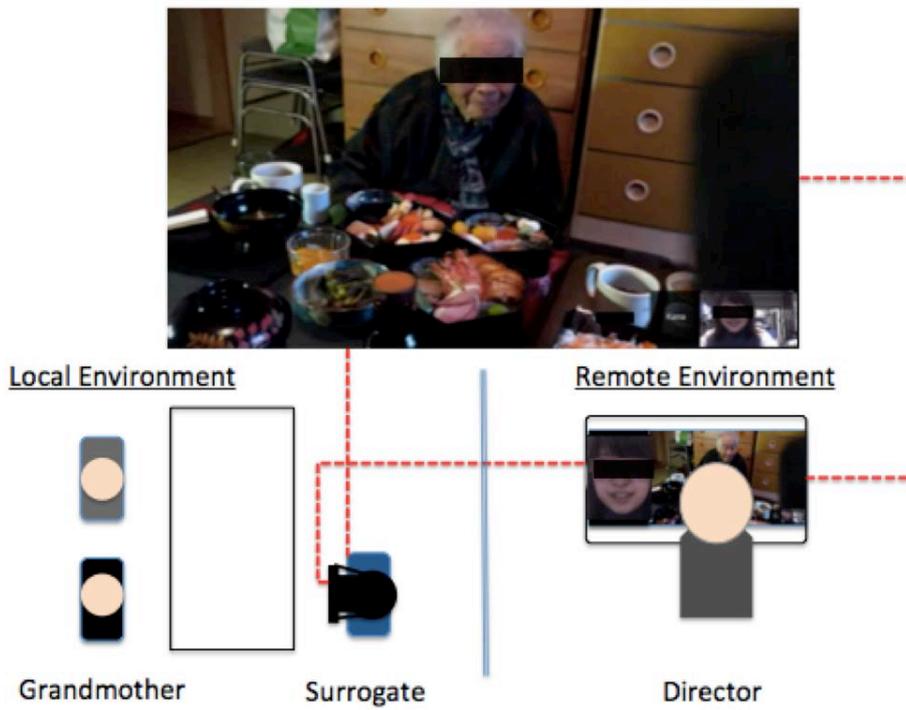


図 4.9: タスク 2 : 母親 surrogate が、娘の代理で老女と会話する様子

すマスクを開発する必要がある一方、人々がマスクを着用した surrogate を見て、どんな反応をするのか、コミュニケーションとして成立するのか調べる必要がある。そこで、フィールドテストを行い、人々の反応を調べることにした。タスク 1 は、他人同士のコミュニケーションにおいて、ChameleonMask が有効か調べるためのものである（図 4.8）。タスク 2 は、知り合い同士のコミュニケーションにおいて、ChameleonMask が有効か調べている（図 4.9）。遠隔ユーザを知っている人/知らない人で印象に違いがあるか調べることにした。

4.4.2 指示の出し方

ロボットを制御するには、命令に対する事前の設定と細かな機能が必要である。しかし、人は状況の判断や遠隔ユーザの気持ちを音声から理解できる。よって、director からの指示の出し方は単純化でき、もし director の指示が surrogate に正しく伝わっていないことに気づいたら、もう一度伝えればよいと考えている。また、タスクの内容に指示の出し方は依存する。これらを考慮し、指示の出し方は音声で伝えることにした。

4.4.3 サービスカウンターでのタスク

シナリオ

ある 28 歳の女性は証明書を必要としていた。彼女は、証明書を取りにサービスカウンターに行く用事があったが、事情により行くことができなかつたため、代わりの誰かに行ってもらった必要があった。今回のフィールドテストでは、彼女の代わりに務める surrogate がマスクを被り、サービスカウンターへ行って証明書の発行を依頼する。事務手続き上、サービスカウンターで証明書を取得するには自身の ID カードを持参して手続きする必要がある。もし、代理人に依頼するときは、代理人が委任状を持参する必要がある。このテストの目的はサービスカウンターの事務員がマスクを被った人に対して証明書を発行するか否か、またなぜそうしたのかを観察するためである。従って、surrogate は director の ID カードを持参してサービスカウンターを訪れ、証明書を要求する。

フィールドテスト実施方法

フィールドテストを実施するために、director は同じ性別の surrogate を見つけるようにした。Director は共通の知り合いから紹介された 23 歳の留学生を見つけた。Director と surrogate はテストで初めて会った。テスト員は、director に証明書の発行依頼書を取り、場所を覚えてもらうためにサービスカウンターへ行くことを依頼した。Director がサービスカウンターで依頼書を取りに行った時、事務員が話しかけて来た。Director は後ほど用紙を記入してから来ると彼女に告げた。テスト員は、director と surrogate に ChameleonMask の使い方を説明した。テストを始める前に、surrogate は ChameleonMask の装着や操

作感に慣れるよう練習した。何度か試しに使った後、surrogate は実験中のサポート係とともに、室外を出て実験を始めた。Surrogate はサービスカウンターに一度も行ったことがなかったので、director が ChameleonMask の private line を用いて道案内をしながら向かった。

フィールドテスト中の会話

下記に続く会話の () は director と surrogate だけの会話である。またアルファベットの D は、Director、S は Surrogate、O は事務員を表している。この会話は、サービスカウンターに到着した時からの会話を抜粋している。

D: (このホールの右奥にオフィスカウンターがあります。まっすぐ進み、右側を見てください。)

S: (わかりました。建物に入りますね...オフィスカウンターに着きました。)

マスクを被った女性がサービスカウンターのカウンターを訪れた時、すべての事務員が立ち上がった。そして、事務員の責任者がカウンターの方へ向かった。

D: すみません、証明書が欲しいのですが。これが、私の ID カードと証明書の依頼書です。

Surrogate は持っていた ID カードと依頼書を事務員に手渡した。

O: えーっと...

事務員は、手渡された ID カードの顔と ChameleonMask に映る director の顔を見比べ、確認した。

D: はい、私です。

O: えー、はい、ご本人であることはわかりました。あの、マスクをとってもらうことはできませんか。

D: すみません、それはできません。この身体は私のものではありません。私はここに来れないので、代わりの人にサービスカウンターに来てもらいました。

O: どういうことですか？あなたはこの ID の人ではないのですか。

事務員は、マスクの下の surrogate を director 本人であると思っていたようである。

O: そうなんですね。あなたが彼女の代理人ならば、委任状が必要になります。なぜなら...

事務員は、身体が代理人であることが分かると規則を丁寧に説明し始めた。

D: (それでは、証明書をもらうのを諦めましょう。)

D: ご説明有難うございました。

考察と気づき

サービスカウンターの人は、IDカードとiPadに映るdirectorの顔を見て本人確認をした。しかし、サービスカウンターの人はsurrogateにマスクを外すようお願いをした。Directorが、身体は自分のものではないと説明をすると、事務員はマスクを被った人が“代理人”であることを理解したようだった。フィールドテストの後に、directorはサービスカウンターを訪れ実験の説明をした。証明書の用紙を取りに行ったときに話した事務員から、「私はあなたが来たことがわかりました。」と言われた。その上で、なぜ委任状がないと証明書が発行できないのか説明をしてくれた。個人情報には丁重に取り扱う必要がある、もし“本人”でなければ書類は手渡せない、とのことであった。しかしながら、“身体が代理人である”と伝える前は、事務員はマスクを被ったsurrogateを本人だと認識しているようだった。最後に、事務員から現在の法律では書類をすぐに渡すことができないけれど、将来的には変わるかもしれない、との意見をもらった。

Surrogateからのコメント

別人になる体験はとても面白かった。自分の顔をさらすことなく、サービスカウンターの人の困った顔を見ることができた。Surrogateになる体験はあまり難しくなく、指示があった通りに歩き、立っていた。今後、アルバイトとして誰かのsurrogateになる体験があれば検討したい。言いなりになって動かされているよりは、役に立っているような気がした。

4.4.4 老婦の家でのタスク

シナリオ

28歳の孫(director)は、新年に家族とお年取りをするため実家に帰省した。彼女の祖母にあたる87歳になる老婦と久しぶりに会う。老婦は、孫のことが好きであり、機械のことに詳しくなく軽度の認知症が始まっている。孫は老婦の前に現れるが、それは彼女の母親がsurrogate役となりChameleonMaskを被った姿で現れる。実験の目的は、老人がChameleonMaskを被った人、特に家族を見た時にどのような反応をするかである。特に、老婦は孫が帰ってきたと思うのか、怒って反応するかどうかなどを観察した。

フィールドテスト方法

地方で暮らす老婦、父親、母親、そして一人暮らしをする孫の家庭でテストを行った。孫はめったに実家へ帰省せず、老婦は孫に会いたがっていた。本テストでは、孫はdirectorであり、母親がsurrogate役を行った。彼女らは体型が似ている。老婦は普段母親と接する機会が多いので、母親は子供の洋服を借りて実験に臨んだ。実験は、老婦宅

で行った。老婦以外のメンバーはまずシステムに慣れることから行い、指示の出し方やコミュニケーションの取り方を練習した。実験の日、父親が事前に老婦と部屋に入り、家族が集まるのを待っていた。別室にいる母親と孫は、準備が整い次第、母親 surrogate のみ部屋へ向かい、老婦の前に現れた。

下記に続く会話は、テスト中になされた会話をまとめたものである。() は、director とサロゲート間の会話である。D は director を表し、S は surrogate、G は祖母を表す。また XX は、子供の名前である。この会話は、surrogate が扉を開け、老婦たちのいる部屋に入ってからなされたものである。

D: おばあちゃん、久しぶり！元気だった？

G: まあ、XX じゃないか！...あれ、ほんとに XX か？ちょっとおかしいな...おばあちゃんは年取りすぎて健康じゃないよ。

老婦が surrogate を最初に見た時、彼女は驚いていた。しかし、director と老婦の会話は続けられた。

D: 私、今日東京から帰って来たんだよ。ここは寒いね。

G: そうでしょう、寒いんだよ。雪が降ったからね。ところで、隣の家のおばあさんを知っているかな？亡くなったんだけど...

みんなが老婦の話をししばらく聞いていた。ある一瞬、director が彼女の指で顎を掻き、iPad の画面に映った。

G: 手が二つあるのに、なんで他の手が (iPad 画面上に) あるんだ？

老婦は混乱していた。そして孫の外見について指摘し始めた。

G: XX, あなた綺麗になったわね。肌が綺麗なこと、歯も綺麗だわ。

D: 本当？有り難う。

G: ちょっと、XX。なんでそれを被ってるんだ？顔をおばあちゃんに直接見せてちょうだいよ。

D: (お母さん、聞こえた？マスクを今脱ぎましょう。)

Surrogate は、マスクを脱いだ。

S: おばあちゃん、ごめんなさい。わたしは XX じゃないのよ。

G: なんだって？なんでお母さんなんだ？

老婦はひどく驚いていた。

D: おばあちゃん、ごめんなさい。私は家に帰ってないの。

Director が、老婦にそう言うと、老婦はとても落胆しているようだった。

G: そうかい...XX がここにいるわじゃないのか...

その後すぐに、Director は老婦のいる部屋に向かった。

D: おばあちゃん、ごめんなさい。嘘をついて。帰って来たよ。

老婦は、この瞬間最も驚いていた。

考察と気づき

当初、老婦は見慣れないディスプレイに不信感を抱いているようだったが、孫が家に帰って来たと思っているようだった。老婦は、孫が顎をかけたタイミングで孫自身が、マスクを被った人ではないと気づききっかけがあった。しかしながら、iPad上で何を見ているのかわからないようであった。老婦が、surrogateが母親であると気づいた時、彼女は落胆しテーブルに視線を落とした。そして、彼女は孫が帰ってきていなかったと思っていた。テスト後、老婦にシステムについてどのように感じたか聞いてみたところ、「私には難しすぎてわからない」とのことだった。老婦は、何度もこの言葉を発していた。老婦は、システムの機構を理解していないが、彼女の孫が“ここに来た”と思っていた。surrogate役の母親からは次のようなコメントをもらった。「老婦が本当に孫が帰って来たかと思っているように見えた。私に対して、彼女の孫に話すかのような態度だった。老婦の笑顔が見れてよかった。このシステムは、老人ホームで使うことができるのではないかと考えている。家族と話したがっているお年寄りはいくらもいる。家族が来れないときに、このシステムはお年寄りとの家族の関係をなくものになると思う。」

4.5 考察

社会的存在感と身体的存在感

本システムでは、遠隔ユーザはロボットではなく人間を遠隔操作する。人々はマスクを奇妙に思い、不信に思って、すぐに外すよう要求すると予想していた。しかしながら、サービスカウンターの人も老婦からもそのような反応は見られなかった。surrogateに對峙した人は、会話相手をdirector本人のように接していた。また、見た目には不信感を抱いても、次第に画面上のdirectorとの会話に集中する傾向にあった。このような反応は、surrogateの身体の上に顔が表示されていたからだと予想している。

信頼性

実験からChameleonMaskの可能性を感じた一方、信頼性に関する疑問が生じた。例えば、現地にいる人はsurrogateがdirectorだと思って信頼するのか？Surrogateを通して、directorは現地の人と秘密の会話をするることができるのか？何か問題が発生したとき、surrogateはdirectorの言うことを聞く必要があるのか？責任の所在は、どちらが持つことになるのかなどである。

4.6 結論と今後の計画

本研究は、テレプレゼンスロボットが完全に人間の代わりになりえるのか疑問に据え、人を用いたテレプレゼンスシステムを提案した。フィールドテストから surrogate は遠隔ユーザ本人と見なされる傾向があった。本システムは、surrogate の協力を要するシステムである。今回のフィールドテストでは、surrogate 役を務めた被験者たちは他人を助けることで満足感を得ていた。今後はさらに誰かの surrogate になることはどんな体験なのか、どんな指示だと分かりやすいのかなど調べていく。また、テレプレゼンスシステムは用途や使用する対象者に応じて、適するシステムが異なると考えているので、ChameleonMask がもたらすコミュニケーションの理解を深めていく。

第 5 章

ChameleonMask を用いたコミュニケーション

5.1 使用場面

コミュニケーションには、会議のように場所や始まりと終わりの時間が決まった形式的なものもあれば、コーヒーを飲みながら雑談をしたり、人が集まり自然に始まる会話がある。場所が決まっていればその部屋に固定して、大画面のテレビ会議システムを設置することが可能だが、決まっていない場合は使用できない。Buxton が Ontario Telepresence Project で行ったのは、後者の形式ばらないコミュニケーションで遠隔ユーザの分身を実際のコミュニケーションに近い形で再現したことである [6]。ChameleonMask は、surrogate の身体を通して現地にいる人とコミュニケーションや共同作業をすることができる。人の身体を持つため機械の分身より遠隔ユーザの役割や居場所が保たれやすく、人とのやりとりが実際の形式に近い形で行いやすい。足を使って移動ができるだけでなく、手を使い来客を迎えるために扉を開けたり、名刺を交換する、お茶を入れることも可能である。人間の“見た目”を生かすだけでなく、身体を使った動作ができる点で他のシステムより優れており、自分の代わりとして使用できる場面が多い。

ChameleonMask が、どんな場面で使用できるか考察するにあたり、人の身体動作を四象限に分けた (図 5.1)。これらの個々の動作は、単独で行われるものではなく、人とのやりとりの流れで動作を組み合わせて行われるものである。そのため、この動作の中には ChameleonMask でなくてもできる動作も含まれている。横軸はその動作が人物固有の動作であるか、普遍的な動作であるかを基準に、縦軸は身体が物や人に接触する動作か否かを基準に置いた。この表より、その人物固有の動作ほど模倣することが難しいことが分かる。非接触の動作であれば同等レベルの身体能力を持つ surrogate を探したり、練習を積むことで代替することができるだろう。しかし、赤破線で囲んだ固有の接触動作は本人の信頼を伴う動作のため、ChameleonMask で代替できない動作である。

ChameleonMask は、どのように surrogate を集めるかも課題である。ウェブ上で ChameleonMask サービスを始めると仮定する。タスクを依頼したい director がログ

インすると、オンライン上に実働可能な surrogate がいる。次に問題となるのはタスクのマッチングである。どんな surrogate にタスクを依頼すればよいのか。Surrogate は、場所、時間、労働単価に加え、二つの要素で特徴づけられると考えている。それは、外見とスキルである。人の印象は、見た目で変化するという研究があり、director 自身と同じ体型の surrogate に依頼できれば同等の印象を与えることができるであろう。しかし、いつもと違う印象を演出することもできる。例えば、力強い印象を残したければ背丈の高い筋肉質の surrogate に依頼することも可能である。そういった外見的要素から選ぶ選択肢と surrogate が得意とするスキルから選ぶことができる。Surrogate のスキルは、身体スキルが中心になるだろう。Director は、タスクをどのようにこなしたいのか具体的なイメージを持って surrogate を選んでいくことが望ましい。しかし、どんな条件の時にその具体的なイメージが効果的に実施できるのかは明らかではない。

5.2 接触動作

5.2.1 ChameleonMask による接触

ChameleonMask を用いた、人に対する接触動作はどうだろうか。接触は、非言語情報の一つである。Surrogate は、身振り手振りで意思表示をするだけでなく子供と遊んだり、お年寄りの介護で身体接触を伴うことが想定される。ここで生じる懸念は、ChameleonMask においてマスク上の人物と、身体的人物が異なる点である。例えば、director は自身の代わりに老人ホームで家族の相手をしてくれる人を求めたとする。最適な surrogate は、同性の印象が大きく変わらない体型でお年寄りの扱いに慣れている人がよいとする。その時に、surrogate 役をお年寄りと面識があるヘルパーが務めた場合、お年寄りは director と話した、接触したと思うのだろうか。

特に、接触動作は相手にとって director と surrogate のどちらと接触したと思うのか、どのような印象を生むのか明らかではない。ウェブ上で surrogate を募る場合は、対象者にとって面識のない人に依頼することの方が多いただろう。しかし、面識のある人の方が結果が良い場合は、面識のない人物が同等の効果を上げるために事前に挨拶をしてから surrogate になる等、手順を踏む必要がある。そこで、ChameleonMask の今後の応用を考えるにあたり、特に接触動作に関する知見を深めることにした。

5.2.2 遠隔接触による存在感の強化

テレプレゼンスの研究では、アイコンタクトや身体ジェスチャーが遠隔ユーザの存在感を強化すると言われている。アイコンタクトは、会話の流れをつくり、話す順番を決める効果や人の存在感を強化するのに有効だと言われている [60]。いくつかの研究では、システムの動き [27] や、可動性 [109]、ジェスチャー [28] が存在感を高め、人の関心を

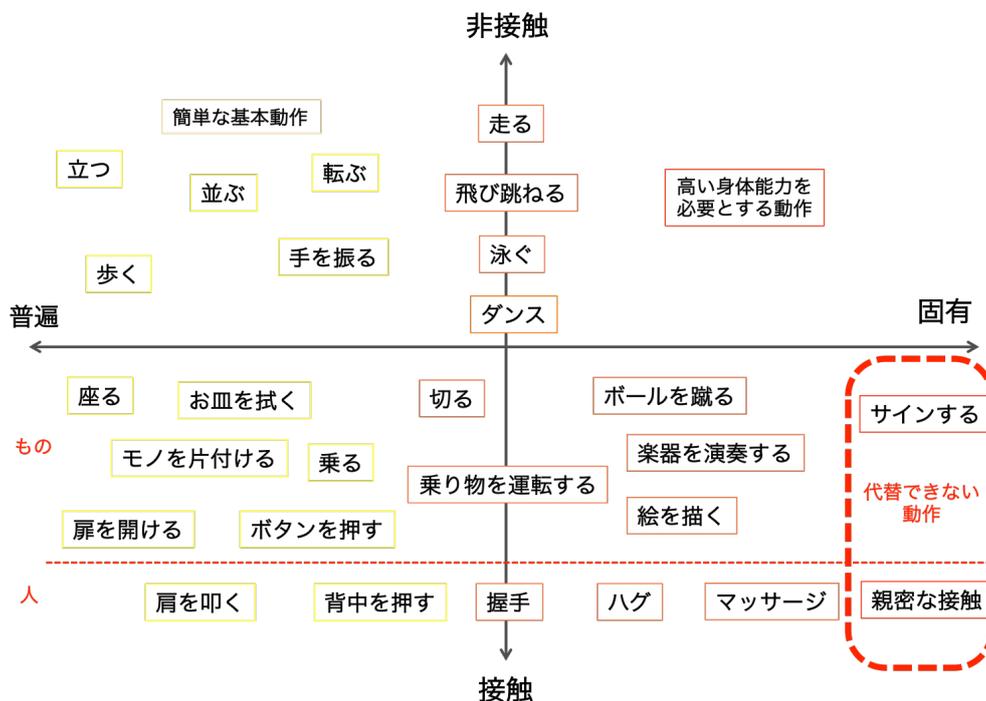


図 5.1: 身体動作の分類

惹くと述べている。そして、それらに加え遠隔握手 [127] が遠隔ユーザの存在感を強化し、親近感を与えるという研究報告がある [128]。

接触は、個人間のコミュニケーションにおいて意味を持つ身体動作である。背中を押す、ハグをするなどの相手との接触は、自分の意志や感情を伝える手段である。特に、握手は一般化された個人間の接触行動であり、協力に対する意志表示や信頼関係を築く象徴的なジェスチャーである。そして、握手は非言語で交わされる社会的儀式であり、東洋、西洋文化とも広く使われる動作である。

遠隔にいる人とどのようにしたら握手ができるだろうか。握手は手から力覚を伝える物理的な動作である。視覚情報や音声情報だけの遠隔コミュニケーションと違い、遠隔の人と物理的に接触することはできない。多くの研究では触覚を検知する入力デバイスを開発し、検出した値を変換して出力用の触覚デバイスで感覚を伝えている。こういった触覚デバイスは、身体すべての触覚を伝えるものではなく、ある身体の部位に特化した触覚提示が多い。接触はコミュニケーションにおいて重要な役割を持つが、人同士の接触がもたらす効果についての研究は浅く [129]、ましてや遠隔接触がコミュニケーションに与える影響はいまだに明らかになっていないことが多い。

多くの研究者が、触覚提示できるデバイスを開発する一方、物理的な接触なしで触感を与える研究も行われている。HyperMirror [130] は遠隔ユーザと現地の人が、2D スク

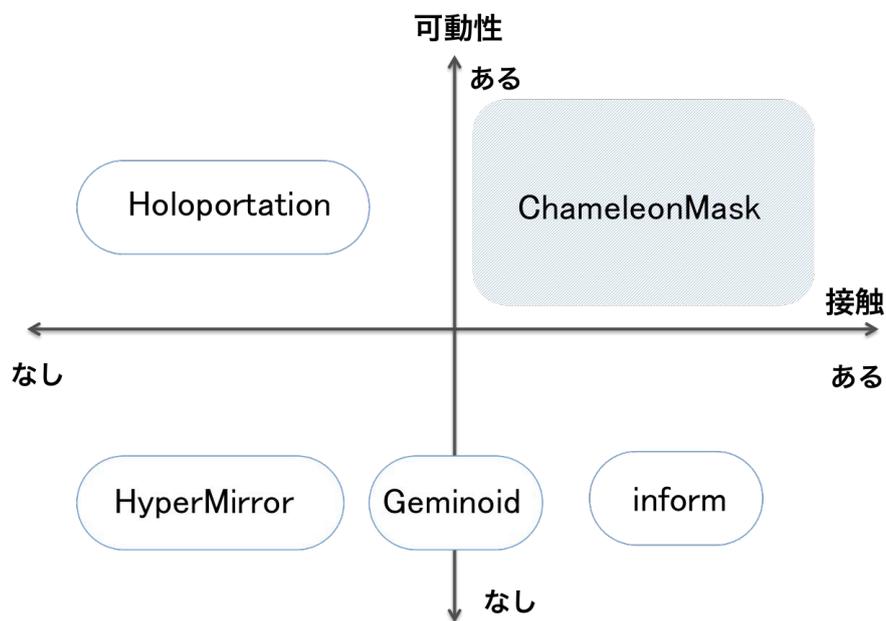


図 5.2: 接触動作のある関連テレプレゼンスシステム

リーンを介してハグし合う。彼らは、物理的にハグしていない。ハグの感覚を増すためにバイブレーションを足しているが、“物理的”にハグしているのではなく言葉や映像によって、“感情的”にハグしていることによりセラピー効果があるという [131]。この研究によると、接触しているように感じるには、必ずしも物理的なハグが必要ではない。遠隔から触覚を感じたと決めるのは、そのシステムを使った人である。つまり、もし人が遠隔からの触覚を感じたのであれば、デバイスなしでも遠隔ユーザに触れられることになるだろう。

本研究では、ChameleonMask を用いた遠隔接触についてユーザスタディを行った。遠隔ユーザの映像と本人ではない身体の手による握手が、人にどう受け取られるかを調べた。

5.3 関連研究

5.3.1 遠隔接触の方法

接触は、言葉よりも感情的な状態を伝える非言語コミュニケーションである。遠隔地にいる人に触れる（遠隔接触）研究は、いくつかされている。遠隔接触の一つは、触覚デバイスを用いた研究である。多くの触覚デバイスは、遠距離同士のための親しいコミュ

ニケーションを支援するものが多い。inTouch [132] は、触覚を送り合えるプロトタイプシステムである。HandJive は、グローブ型の触覚デバイスで他人に動きを送ることができる [133]。これらの触覚デバイスは特定の触覚を伝えることに特化しているため、あらゆる身体の部位で使えるわけではない。その他、双方向にくすぐる感覚を伝えるもの [134]、空気を注入して抱きしめる感覚を伝えるもの [135]、そしてロボットハンドを用いた握手などのデバイスが開発されている [136]。

二つ目の遠隔接触方法として、ビデオ映像による感覚の伝達がある。HyperMirror [130] は、ビデオストリーミングを通じて、人々と遠隔ユーザがハグしているような感覚を与える。彼らは物理的にハグしていないが、仮想的なハグによって癒しの効果を与えている。さらに、代替現実感システム (SR) [22] を用いると、体験者が現実世界から実録された映像に差し替えても気づかず、映像とずれたタイミングで接触されると被験者が困惑する様子が観察されている。

三つ目は、触覚とビデオコミュニケーションを統合させたものである [128, 137]。本研究でもビデオストリーミングを用いるが、ロボットハンドを用いるのではなく、実際の人間の手を使っている点が異なる。接触動作が可能なテレプレゼンスシステムを図 5.2 にまとめた。Holoportation は、ある空間上における VR 環境で移動を伴うコミュニケーションがとれるが、触感は伝わらない。inform [19] は、手元動作を共有することができ、アクチュエータで形成された遠隔の手と接触することは可能であるが、移動性を伴う作業ができない。ChameleonMask は、移動性と触感を伴うコミュニケーションが可能なテレプレゼンスシステムである。

5.3.2 遠隔接触の効果

テレプレゼンスの研究では、遠隔ユーザをよりリアルに感じられるよう多くの研究がされているが、触覚とビデオコミュニケーションの双方を統合させたシステムの効果は明らかではなかった。そこで、中西らは遠隔ユーザの身体を映したビデオとロボットハンドを組み合わせたシステムを開発し、遠隔接触が存在感を強化することを明らかにした [27]。また Bevan らは、交渉時にロボットを用いた握手が提携に寄与したと述べている [138]。このように接触動作は遠隔コミュニケーションを豊かにする要素であるが、ロボットハンドで実現できる手の動作には限りがあり、場所を固定して使うため移動を伴うタスクで使用できない。Double¹ は空間内を自律移動できるテレプレゼンスロボットであるが、手がないため、ボディジェスチャーを使って意志表示したり、手を使った動作、例えばドアを開けるなどといった基本動作はできない。ChameleonMask は、人間の代理人を遠隔操作するシステム [45] のため、器用に手を動かし、自由に動き回ることができる。人々は、マスクを被った surrogate を遠隔ユーザだとみなす傾向があった

¹Double, <http://www.doublerobotics.com/business/>

が、顔と身体が違う人物による接触行動の影響は明らかではない。そこで、本研究では surrogate による遠隔接触を人々は遠隔ユーザに触れたと思うか調べることにした。

5.4 実験

遠隔ユーザが surrogate を通して握手をすることができるのか調べるため、実験を行った。Suvilehto ら [139] の研究によると、他人が人に接触してよい身体の領域は、両者の人間関係によって変わる (図 5.3)。そこで、誰と握手をしたと思うかは人間関係に依存すると仮説を立てた。被験者にとって、surrogate が知り合い、もしくは他人、または遠隔ユーザが知り合い、もしくは他人なのかによって印象が変わるとし、4 条件に分けて実験を行った (表 5.1、図 5.4)。

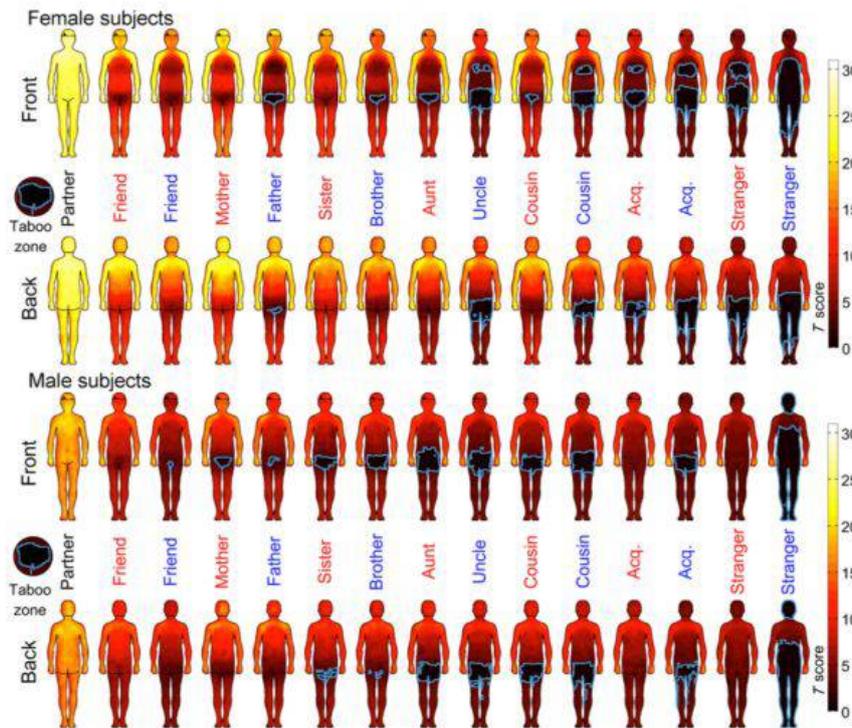


図 5.3: 人間関係別による身体の接触が許容される範囲を表したグラフ [139]

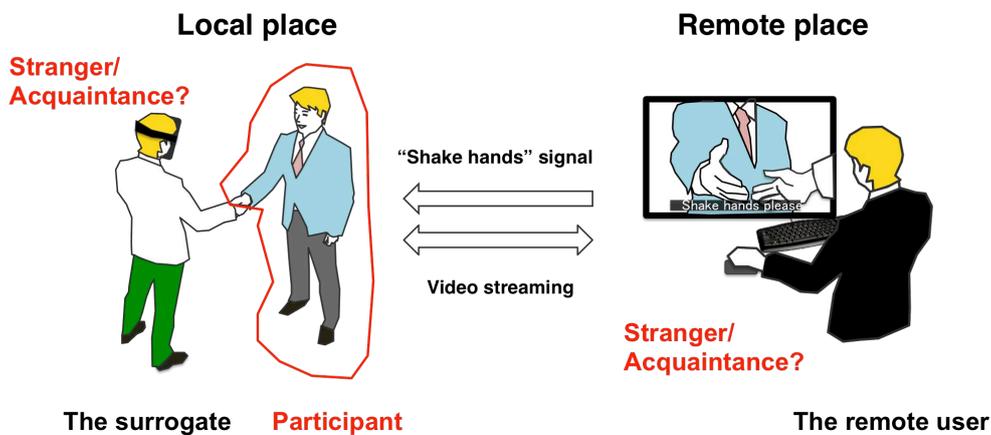


図 5.4: 実験条件：被験者にとって、遠隔ユーザと surrogate が他人/知人の4条件を用意した。

5.4.1 目的

ChameleonMask の接触を伴う動作に関して、適した surrogate の条件や接触行動の可否を調べるため、被験者による主観調査を行った。

5.4.2 実験設計方針

遠隔接触には、握手の他、触る、なぞる、ハグ、キスなどがある。握手タスクを実験に選んだ理由を3点挙げる。

1. 手は、男性、女性とも接触することが許容される領域である。
2. 握手は一般的な接触動作である。
3. 握手は、文化背景の差異が少ない動作である。

第一に、手は身体の中で他人から接触されてもよい領域と言われていることだ [139]。Suvilehtoらは、人から接触されてもよい身体領域をグラフで表現した。そして、接触可能領域は人との社会的な結びつきに依存しており、性別によって分けられることを示した。第二に、手を使った接触行動はいくつかあるが、握手は形式化された社会的動作であり、知らない人同士が挨拶後に行うものでもある。握手は、人々にとって一般的で受け入れやすいものであるため、実験にも選んだ。第三に、いくつかのボディジェスチャーは文化背景ごと、異なる意味を持つ。しかし、握手は一般的に異文化同士でも同じ意味合いを持つ動作である。

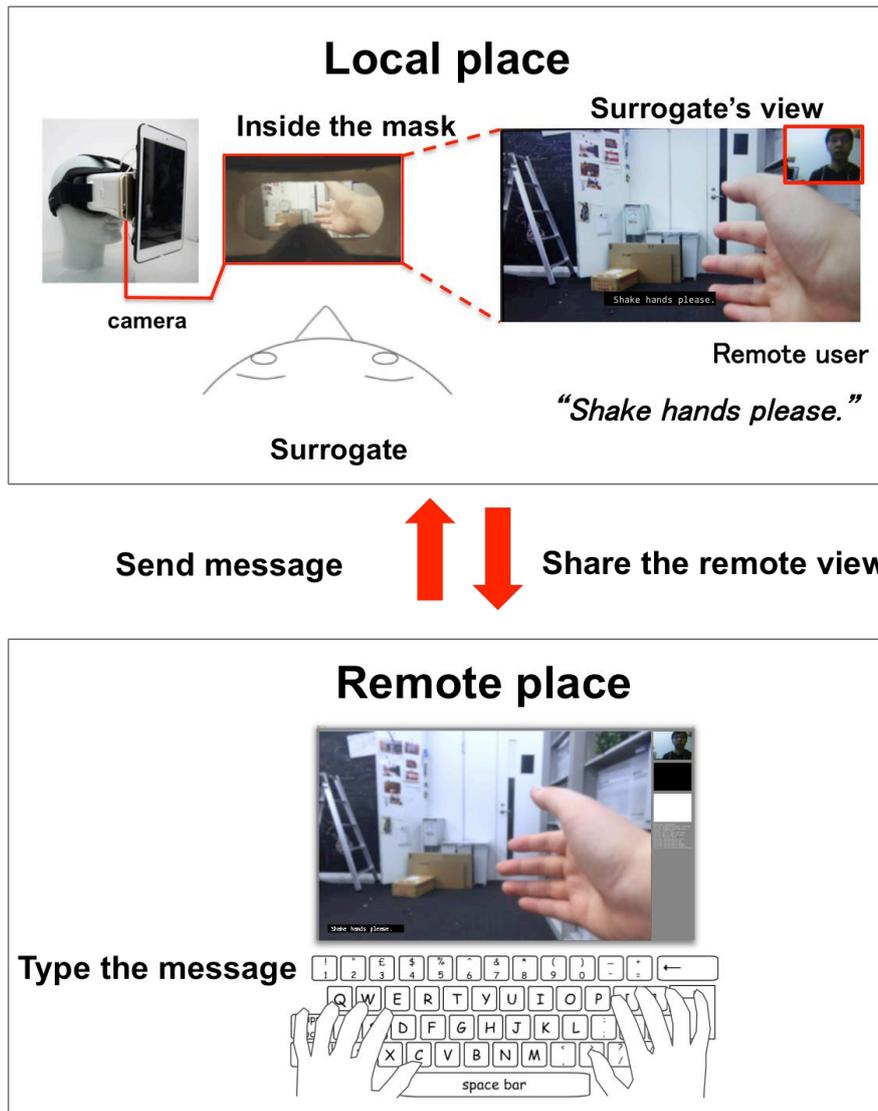


図 5.5: 握手の合図を確認する方法: 遠隔地から director は、握手の合図を送る。そのメッセージがマスク内のディスプレイに表示され、それを見て surrogate は手を差し出す。

表 5.1: 被験者からみた Surrogate / Director (遠隔ユーザ) の人間関係による条件

条件	Surrogate	Director
A	他人	他人
B	知人	他人
C	他人	知人
D	知人	知人

5.4.3 握手の方法

握手は、二つの手が接触し、力覚を伝え合う行為である。手は、形状や質感、温度に個体差がある。ロボットハンドで人間の手をつくる際は、形状はもちろん、手の柔らかな感触が再現される。ChameleonMask では、他人ではあるが人の手で握手されるため、手の人間らしさは焦点にならない。手の個体差に関しては、極端な差異はない方がよいが、その人の手の感触を認識しているわけではないため、手の温度と握手の強さを統一すれば、問題ではないと考えた。また、握手は特別なスキルがいない動作である。代理人を介して握手する時、被験者が遠隔の人と握手をしているように感じるかを調べた。

遠隔握手は2つの側面がある。双方向に触覚を送る側と触覚を受け取る側である。本実験では、受け取る側の反応に注目した。従って、遠隔ユーザが握手を感じることはない。遠隔ユーザは surrogate の視野が共有されるので、握手をし終わったかどうか分かる。遠隔ユーザが話し相手と握手したい時、彼または彼女は surrogate に握手をするよう合図を出すことができる。Surrogate はスクリーン上の合図を見て、話し相手に手を差し出す (図 5.5)。

それ以外は、ChameleonMask の基本機能を使ってコミュニケーションをとった。遠隔ユーザの表情はストリーミングされ、マスクはディスプレイとして用いた。Director は surrogate の視野映像から現地の様子を見て、相手と会話したり、握手を行った。

5.4.4 実験条件

今回の実験では、被験者にとって surrogate が知人 / 他人、director が他人 / 知人による印象の違いを調べる。被験者にとって、知人か他人かの定義は、面識の有無とした。もし被験者が、director と事前の面識がなければ相手に対してイメージがない。しかし director の知人が surrogate だった場合は、知人と握手している感覚が強いと予想した。男女で身体のジェスチャーの読み取りが異なるという報告があるので、実験は男女別に分けて行った。

被験者 1 人ずつ、知人役と他人役の director と surrogate を手配するのは困難なので、条件 A ~ C までは、男女別にラボ実験要員 2 名と面識のない被験者 2 名をペアで集め、

組み合わせて実験を行った。条件 D は、すべて知人間によるコミュニケーションなので、2名の被験者に対する知人の補助被験者を集めて実験を行った。

5.4.5 実験タスク

被験者がビデオコミュニケーションを通して director と会話し、surrogate と握手をした時に、どちらと握手していると思ったか聞くことにした。被験者が、surrogate に接触した時、director と握手したと思ったかをアンケートで尋ねる。

タスクは、director が被験者に対して自身の話をシナリオに沿って行う。挨拶の後、自分の名前を言い、握手の指示を出して surrogate が握手をする。その後、職業や出身、最近取り組んでいることなどを2分で語ってもらい、最後に握手の指示を出し「よろしくお願ひします」と言った後に握手をする。会話はこれで終了する。

自己紹介を行ってしまうと知り合いになってしまうので、実験の順序を配慮する必要があった。そこで、表 5.2 の順番で実験を実施した。

表 5.2: 実験の順序

実験の順番	Surrogate	Director
条件 A	他人	他人
1. 被験者 1	Lab 1	Lab 2
2. 被験者 2	Lab 2	Lab 1
条件 B	他人	知人
3. 被験者 2	Lab 1	被験者 1
4. 被験者 1	Lab 2	被験者 2
条件 C	知人	他人
5. 被験者 2	被験者 1	Lab 2
6. 被験者 1	被験者 2	Lab 1
条件 D	知人	知人
7. 被験者 2	被験者 1	補助被験者
8. 被験者 1	被験者 2	補助被験者

実験設定

実験開始前に、被験者へ次に示す内容を説明した。

話し相手役: ある人と一緒にプロジェクトをすることになりました。その人から簡単な挨拶があるので聞いてください。挨拶をかねて握手を求められることがあります。



図 5.6: 実験シーン：右は director 役であり、左は surrogate と被験者である。

Surrogate 役: あなたは遠隔ユーザ (director) の身体になります。Director は、彼の代わりにしてくれることを望んでいます。Director は握手をしたい時に、合図を送ります。

Director は、被験者実験が行われる場所と違う場所で話すようにした。被験者が、director 役をやるときは、握手を送るコマンドの練習を行ってから実施した。Surrogate と、被験者は立った状態で話すようにした (図 5.6)。また、surrogate 役を行う際は、画面上でどのように握手の指示が出るのかを確認し、何度も練習を行った上で実験を行った。実験が終わった後、アンケートに記入してもらった。

アンケート

ビデオコミュニケーションと遠隔接触に関する効果を実験したかったので、中西らの研究 [27] を参照した。アンケートには、存在感に関する設問文を含む。設問は、7段階のリッカートスケールを用いて行われ、1 が全く同意できない、4 がどちらでもない、7 が非常に同意する、である。ビデオコミュニケーションの音質の悪さや遠隔ユーザの説明があまりにも分かりづらい場合、実験に影響を与えるので、Q 1 - Q 3 は実験の質を担保する質問として入れている。

1. 映像は十分にきれいだった。
2. 音声は十分にきれいだった。
3. プレゼンテーションは分かりやすかった。
4. 遠隔ユーザに親しみを感じた。
5. 遠隔ユーザが、同じ空間にいるように感じた。
6. 実際に、遠隔ユーザと握手をしているように感じた。

Q4. 遠隔ユーザに親しみを感じた。

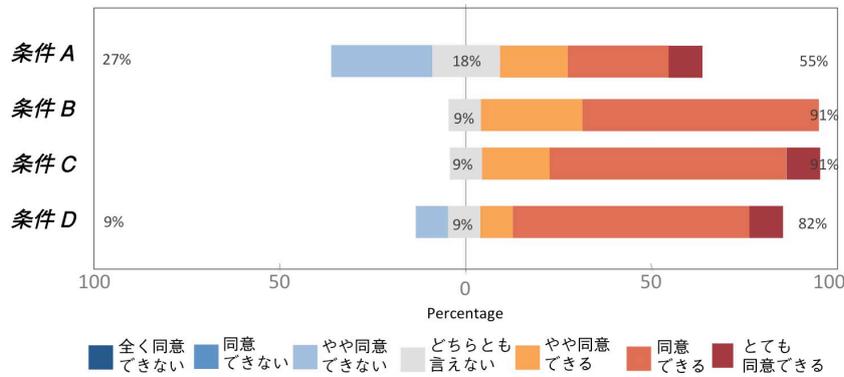


図 5.7: Q4 の実験結果

被験者

条件 A ~ D の実験のため、12 人の被験者（6 人の男性、6 人の女性：20 ~ 29 歳）を大学や近隣の企業から募った。条件 D は、6 人の補助被験者（3 人の男性、3 人の女性：20 ~ 25 歳）を募った。被験者は、本プロジェクトは関わりのない人たちである。

5.4.6 結果

一人の被験者は、実験の質を担保する質問項目の Q3 にネガティブなフィードバックをしていたため、この被験者の記録は使わなかった。それぞれの条件に対して、11 レコード、合計 44 レコードの実験結果を集めた。それぞれの条件で得られた Q4、Q5、Q6 の結果に差があるか一元配置分散分析を行ったところ、Q6 は ($F(3,40)=2.0, p < .1$) で有意傾向があった。図 5.7 は、Q4 の結果を示す。条件 B ~ D はポジティブな回答をした被験者が 80 % 以上であったが、条件 A はネガティブな回答をする人が 27%いた。図 5.8 は、Q5 の存在感に関する質問の結果をまとめたものである。条件 A は 36%が、条件 D は 82%が director の存在感を感じると答えた。Q6 の director と握手をしている感覚では、条件 A ~ C で五分五分に意見が分かれた（図 5.9）。一方、条件 D は 80%以上が遠隔握手をしたと感じる人がいた。

5.4.7 考察

条件 A は、surrogate、director 共に知人がいない組み合わせであり、他条件に比較しネガティブな回答が多かった。Q4 の実験中、条件 A は知らない者同士のためか被験

Q5. 遠隔ユーザが同じ部屋にいるように感じた。

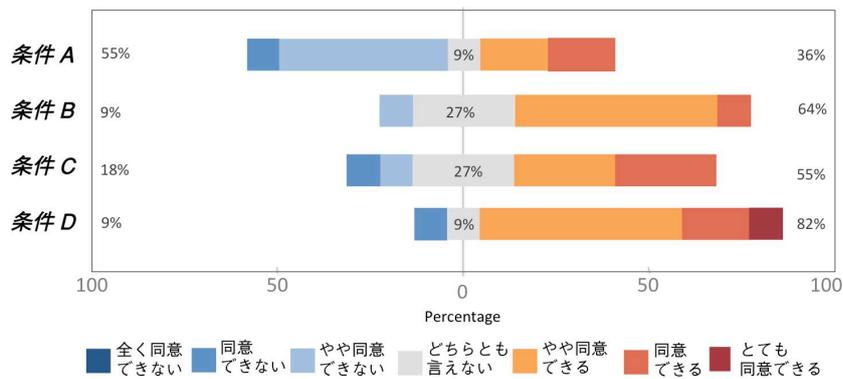


図 5.8: Q5 の実験結果

Q6. 遠隔ユーザと握手しているように感じた。

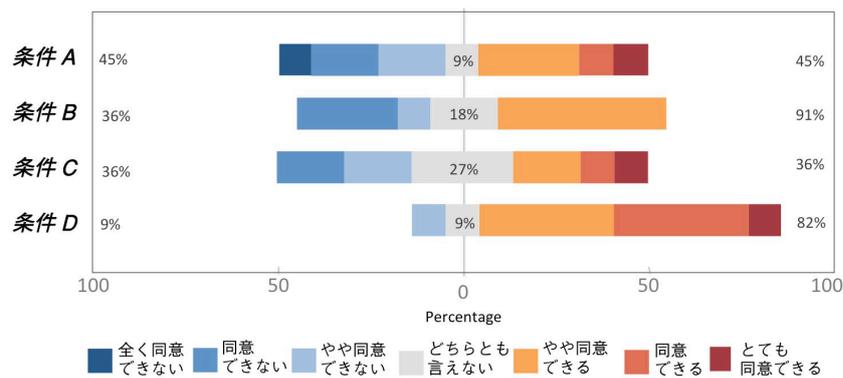


図 5.9: Q6 の実験結果

者が緊張しながら行っている様子が見られた。Q5 に関して、director が誰であっても、surrogate が知人の時に存在感が強く感じられるようだった。この一因として被験者は surrogate へ警戒心がない時に director の存在を感じられるのではないかと考えている。Q6 に関して、条件 B と条件 D を比較すると director が知人の時は surrogate が他人よりも知人が行った方がよい結果となった。条件 A ~ C に関して、意見が割れた理由はいくつか考えられる。被験者の中には、「知り合いの surrogate の印象が director より強く感じられた」と述べた人がいた。また、「director と surrogate がシンクロすると、director と握手しているように感じた」と答える人もいた。本実験では、surrogate を誰が行うことが効果的なのか分からなかったため追加実験を行うことにした。

5.5 追加実験

実験より、遠隔接触が有効なのは被験者にとって surrogate、director とともに知人の条件 D であった。なぜ条件 D は他の条件よりも良いのか。条件 B は、director が知らない人であっても Q5 の director の存在感という点では良かった。一方で、握手の観点では条件 B と D は違いがあった。つまり、surrogate が知人であっても director が知人の時は遠隔接触が効果的に共有される。このことから、知らない人と手を触れることに障害があるのではないかと考えた。従って、我々は surrogate を誰が務めるのか事前に分かっていることが重要だと仮定して、追加実験を行うことにした。

5.5.1 目的

Surrogate が誰であるか事前に分かっていることが、どのような印象変化を生むのか調べる。それを調べるために、素性を明かしていない遠隔ユーザ (director) 本人が行う surrogate と素性が分かる surrogate を比較することにした。後者の印象が良ければ、surrogate は事前に誰が行うのか相手に知らせておくことが重要だと言える。そこで、条件 A : 被験者にとって director と surrogate が知人の場合と、条件 B : Director は知人で、surrogate は誰か明かさない人で比較実験を行った。条件 B の surrogate は、director 自身が行い、リアルタイムで行うことができないため、director が事前に会話を録音を再生し、被験者に見せることにした。

5.5.2 実験タスク

Director の知り合いから被験者を集め、下記の条件で実験を行った。

条件 A: Surrogate は、ある被験者の知り合い。

条件 B: Surrogate は、条件 A の surrogate 以外の誰か。

被験者は、実験条件の説明を受けた後、director の話を聞いた。会話の流れで、話の始

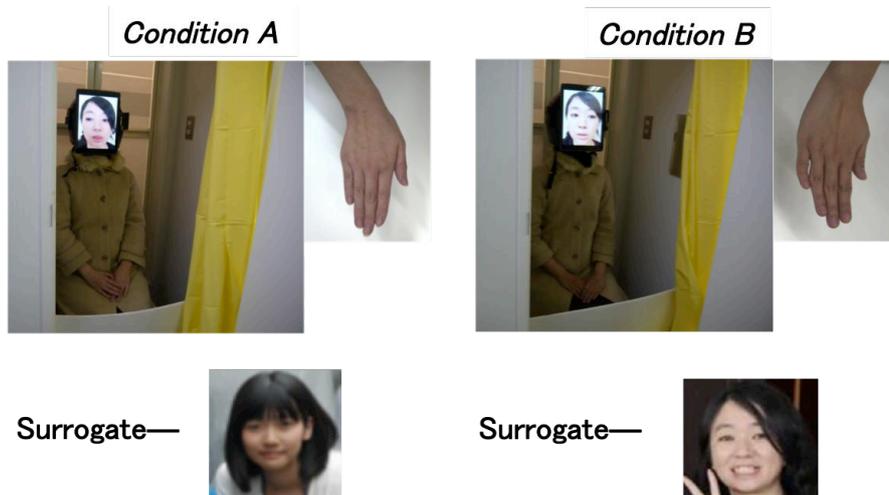


図 5.10: 実験環境の様子：条件 A、B は別々の人物が surrogate を行っている。両者の手に外見的大きな違いはない。

めと終わりに両者は握手をした。被験者ごと、条件 A、B の実験順序は変えて行っている。実験は、被験者内計画で行った。

5.5.3 実験環境

扉の向こうに、2 人の surrogate 役が控えており、順番に出て来て被験者に話を聞いてもらった（図 5.10）。実験中、椅子に座って向かい合った状態で会話をするため、2 人の surrogate の座高の高さが合うよう、椅子の高さを調節している。Director が話す内容は、異なるイベントに関する紹介であり、事前に録画したものを実験員が再生して行った。握手は、会話の流れに合わせ決まったタイミングで surrogate から手を差し伸べてもらうようにした（図 5.11）。2 人の surrogate の握手が、極端に差が出ないように握手の仕方を練習し、力や温度が極端に異ならないようにした。また、director から洋服を借りた前提で両 surrogate とも、全身が隠れるコートを着用して実験を行った。

5.5.4 アンケート

前述の実験アンケートに加え、Q7：目の前の対象が遠隔ユーザに見えるかという質問を足した。



図 5.11: 被験者が director の話を聞き、surrogate を通して握手をしている様子。

5.5.5 被験者

12人の被験者（7人の男性、5人の女性：24～31歳）を大学や近隣の企業から募った。被験者は、本プロジェクトは関わりのない人たちである。

5.5.6 結果

実験結果を図 5.12 にまとめた。被験者は、条件 *B* の surrogate が遠隔ユーザ本人であることに気づいていなかった。被験者の中には、条件 *A*、*B* とも surrogate が同じ人が行っており、実験員が嘘をついていると思う人もいた。Q4 の遠隔ユーザに親近感を感じるかという問いに関して、条件 *A* と条件 *B* で両側 5% の *t* 検定を行ったところ、($t(11)=2.69, p < .05$) で有意差があった。条件 *B* は、遠隔ユーザが自ら surrogate を行っていたが、被験者は誰か知らされていない本人の surrogate よりも知り合いの surrogate に親近感を感じる結果となった。他の質問に関しては、全体的にスコアが低く大きな差異が出なかった。Q7 の ChameleonMask を被った対象が、遠隔ユーザのように見えたかについては、58% が肯定的に捉えていた。

5.6.1 Surrogate を通した遠隔接触は可能か？

遠隔接触は、ある条件下であればできるであろう。Surrogate を媒介にした物理的な遠隔接触は可能であり、心理的にも接触した印象を持てるか調べたものが今回の実験である。限られた条件により、明確な結論に至っていないが、実験結果やインタビューを通し、対人関係の印象に左右されることが分かった。Surrogate が知人であれば、副産物的に遠隔ユーザの存在感を強く感じたり、逆に握手をするときに、知人だからこそ surrogate の印象が強く感じる人がいた。また、他人同士で使用すると事前の印象がないため被験者の意見が分散する結果が出た。アンケートや事後のインタビューを通して、被験者はしばしば混乱していることが分かった。被験者が握手をしている対象が director なのかそれとも surrogate なのか分からないとのことだった。「視線が合い、話のよいタイミングで握手を求められると本人らしさを感じた」というコメントもあり、より仕草の一致や視線の伝達ができることで、“遠隔ユーザによる”遠隔接触が実現されていくと考えられる。

5.6.2 誰が surrogate をすべきか？

ChameleonMask は、“人間 uber²”になりえる。遠隔から自分の仕事をしてくれる人を雇い、働いてもらうものである。誰に頼めばよいかという問題があるが、今回の実験より接触を伴う動作においては、親近者が適していると思われる。例えば、老人ホームにいる家族や遠隔の子供に向けて使うときにまったく知らない人が surrogate になるのではなく、家族や看護師さんなど気の知れた人が警戒心を抱かせず適していると考えられる。しかし、常に知人が surrogate 役をしてくれるわけではない。知らない人が surrogate 役を行う場合は、事前に自己紹介などを済ませ心理的障害を減らすことがよいコミュニケーションにつながると考えている。

5.6.3 ChameleonMask を被った人は遠隔ユーザか surrogate か？

今回の実験で、被験者が「どちらと握手しているのか分からない」というコメントが象徴的であった。ChameleonMask によって、ある人物の顔と別人の体は組み合わせられ、二つの思考を持ち行動する。対峙する人は、別の人であることを理解しながら、遠隔ユーザらしさを感じている。当初の研究目的は、遠隔ユーザを具現化させることであったが、マスクを被った人は surrogate か遠隔ユーザなのかという二択だけではなく、“二つの人格が組合わさった人”としての可能性があると感じた。ChameleonMask は、遠隔にいる人物の存在感を提示するために一人の人間の存在感を消すことになる。使用者が増えれば、増えるほど人間のリソースを減らすことになる。ChameleonMask で行われるタス

²Uber, <https://www.uber.com/>

クを機械的な作業ではなく、人にとってやる価値のあるタスクにすることで、surrogate にとって他人の体験を学ぶ場や学習の機会にすることができるであろう。

5.7 結論

Surrogate を用いた遠隔接触の印象を調べるため、ユーザスタディを行った。Surrogate は遠隔ユーザの顔が表示された仮面型テレプレゼンスシステムを着用して、代わりに握手を行う。この方法が実現できれば、ロボットハンドや複雑なシステムを使用せず、遠隔ユーザと握手をした感覚が得られる。そこで、被験者が director、surrogate どちらと握手したと思ったか調べる実験を行った。その感覚は、被験者と遠隔ユーザ・surrogate の人間関係に影響すると仮説を立て、遠隔ユーザが知人 / 他人、surrogate が知人 / 他人の 4 条件を用意した。実験の結果、遠隔ユーザと surrogate が両方知人であった場合、被験者は握手をしている感覚が一番強かった。また、知人が surrogate を務めた時に存在感や握手の感覚が強かったことから、見ず知らずの人が surrogate を行う場合は、事前に挨拶を済ませるなど心理的障壁を下げるのが重要ではないかと予想している。ChameleonMask は、見た目だけで遠隔ユーザらしさを引き出すことができるが、さらに遠隔接触を実現させるには視線一致や自然なコミュニケーションなどを実現させていくことが必要だと考えている。

5.8 その他の実施タスク

上記以外にも、実際の環境下で ChamelenMask を使った事例があるので報告する。

5.8.1 仮想試着タスク

個人事業主の衣料品店にて事前許可を得て、50 代の女性被験者 2 名が surrogate と director 役を交互に務め、買い物をする体験を行った (図 5.13)。Director 役は店のバックオフィスから surrogate に指示を出し、surrogate は店内を見て回り、商品を手に取ったり店員と会話をした。それぞれの体験実施後、感想を聞いた。

女性 1 のコメント

Director になったときは、surrogate 役に洋服を代わりに着てもらうことができ、丈の感じや顔と合うかが確認できてよかった。また、お店の人と話すことができて面白かった。Surrogate 役をやってみて、服の素材感が伝えられないので、言葉で説明するようにした。

女性2のコメント

自分で買い物に行けない人もいるので、ChameleonMask を用いた買い物代行サービスはとてもよいと思った。マスクは重いけれど、画面が鮮明だったので狭いお店の中でも歩けた。装着感が上がると、もっと使えるものになると思った。

気づき

ChameleonMask の視界の狭さとマスクの重さから、買い物がしづらい場面があった。具体的には、商品が隅々まで陳列されていたため、surrogate が商品と接触することがあり、支払い時に財布の小銭がよく見えていないことがあった。被験者は、surrogate 役、director 役を楽しんで行っていた。インターネットショッピングと違い、衣服を自分の代わりに着用してもらうことができるので、丈を見たり、顔の下に衣服を当ててもらったことで似合うかどうか試している様子が見られた。衣服の素材までは伝えられないので、口頭で説明をしていた。今後、代理で衣料品店にて買い物をする場合は素材感の伝達が一つの課題になるであろう。

5.8.2 生徒教師のタスク

遠隔から教師が ChameleonMask を用いて研究室の生徒とコミュニケーションをとるタスクを実施した(図 5.14)。生徒は 26 歳の女性であり、女性教師とアポイントがあり教授室を訪れる予定があった。surrogate 役は、男性の教諭が務め、生徒にとっては初見の人であった。約束の時間に、女子生徒が部屋を訪れるとマスクに女性教諭が映る surrogate が部屋におり、会話を始めた。

女子生徒のコメント

先生の顔が男性の身体の上に表示されていたので、何が起きているのか分からず本当に驚いた。

遠隔から参加した女性教師のコメント

使ってみてとても面白いシステムだった。生徒が驚いている様子が印象的だった。直接話す指導はできそうだが、surrogate の手元にある資料を説明するには、文字が鮮明に読み取れず苦労した。

Surrogate 役を務めた男性教師のコメント

普段の生活では女子生徒をこんなに直視したことがなかったので、新鮮な体験だった。マスク越しに相手を見るので、普段教師と話すときの生徒の自然な表情を見ることがで

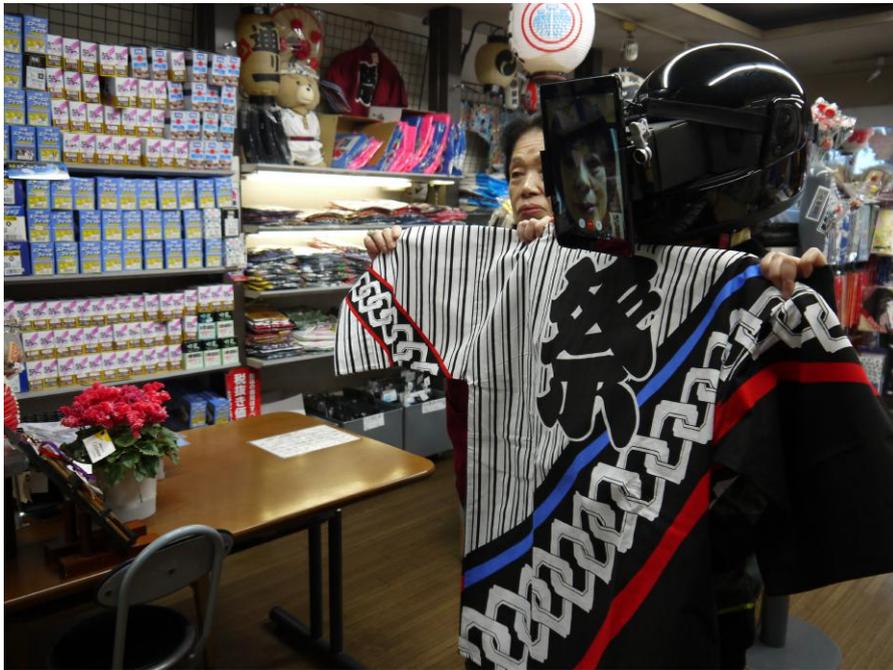


図 5.13: 遠隔から店内を買い物する様子

きた。Surrogate 役は、今回のように教師の指導に対して生徒がどのような反応をするかなど、追体験できる仕組みでもあった。

気づき

会話時間は、1時間に及んだ。当初、女子生徒は何が起きているのか分からず、非常に興奮した様子で遠隔の女性教師と話している様子が見られた。女子生徒と女性教師は、長い付き合いから仲が良く信頼関係が築かれているため、Surrogate 役の男性に怪訝な態度になることや恐怖心を抱く様子が見られなかった。また、女性教員の明るい性格から三者が楽しそうにしている様子が伺えた。Director の女性教師は、ある資料を使って女子生徒に指導をしたがっていたが、伝送される映像では 10.5pt の文字がはっきり見えなかった。現状の iPhone の外カメラの映像では、ピント合わせができない。視線を抽出して人間の眼のように、ピント合わせができるようにするか、事前に資料を展開するなどの対応が必要である。



図 5.14: 遠隔にいる教師と話す女子生徒

第 6 章

ChameleonMask における役割理解

フィールドテストの会話や行動から、人々は surrogate を director 本人だとみなす傾向があった。そして、なぜ director がマスクを被り、iPad を介して会話しているのか疑問に思っていた。また買い物の実験では、店員は director と話しているような感覚がしたと言っていた。ChameleonMask を実用的な場面で使うことを想定し、フィールドテストから見えた今後の課題を三点まとめる。

1. システムの軽量化
2. Director の指示出し方法の検討
3. Director と surrogate の役割理解

一点目は、システムの軽量化である。ChameleonMask の基本構造は、iPad の後ろに単眼のヘッドマウントディスプレイ (HMD) としてハコスコ¹ と iPhone を設置するため、前方に比重がかかる。プロトタイプでつくったシステムは、フルフェイスのヘルメットに設置しており、頭にフィットするものの、長時間着用するには重く、窮屈であるため軽量化することが必要である。

二点目は、surrogate への指示の出し方である。プロトタイプシステムでは、音声による指示出しのみだった。Director の口頭の指示によって、surrogate は何をしてほしいのか理解できていたが、surrogate が騒がしい場所にいる時、指示がはっきりと伝達されないことが分かった。そこで、文字による指示出し機能を足すことにした。また、ジェスチャーの指示の出し方を工夫する必要があった。Surrogate は、director を視野内の小枠で見ることができ、“いることがわかると安心する”という声があるものの、小枠に映る director の手のジェスチャーを読み取るには小さかった。そこで、手のジェスチャーが分かりやすい機能を実装することにした。

¹Hacosco, <http://hacosco.com/en/>.



図 6.1: Surrogate は HMD(Hacosco) にセットされたフレネルレンズを通して iPhone の外カメラからの映像とコーナーに表示された director を見る。この映像は director に送られている。

三点目は、director と surrogate の役割理解である。ChameleonMask は、新しいコミュニケーションフレームである。Director が、機械ではなく人に指示を出す時に、操作がしやすいと思うのか明らかではない。どんな方法で伝えたらよいのか、どんな時に surrogate に仕事を依頼したいのか、理解を深めるため実験を行った。また、誰かの surrogate になることがどんな体験なのか明らかではない。フィールドテストでは、surrogate になることを好意的に捉える人が多かったが、より多くの被験者に体験してもらうことで surrogate という役割の理解を深めることにした [38]。

6.1 改善した ChameleonMask

6.1.1 システムの軽量化

ChameleonMask は、iPad を設置するため前方に比重がかかる。フルフェイスヘルメットでバランスを取っていたが、重量があり長時間の着用に適さなかった。そこで快適な着用ができるよう、軽量化させることにした (図 6.1)。顔表示用のディスプレイを 7.9 インチの iPad mini にし、システムの強度と着用時の安定感を保つためプラスチック製のハコスコデラックスモデル HMD を使用した。ハコスコデラックスは、複眼の HMD であるが単眼の HMD として使用したいため、両眼のレンズを外し、レンズ間の仕切りを切断して、カードボードタイプの付属品のフレネルレンズを入れて使用している。焦点距離の調整と装着感をあげるため、クッション性のあるスキーのゴーグルフレームを取り付けている。

6.1.2 Director からの指示出し方法の追加

ロボットを制御するには、命令に対する事前の設定と細かな機能が必要である。しかし、人は状況の判断や director の気持ちを音声から理解できる。よって、director からの指示の出し方は単純化でき、もし director の指示が surrogate に正しく伝わっていないことに気づいたらそれを伝えればよい。また、タスクの内容に応じて指示の出し方は変わる。これらを考慮し、指示を出す基本的なアプリケーションを追加した。

Script mode は、遠隔ユーザのタイピング文字を画面上に表示する機能である（図 6.2）。周囲が騒がしく指示が聞きにくい時や、surrogate の周囲に人がおり、surrogate だけに話したい時に役に立つ。Private line の使用時、音声は surrogate のみにしか聞こえないがディスプレイに映った director の口が動いているため、読唇されたり不信に思われる可能性がある。その際、文字による指示ができると他の人に気づかれることなく思いを伝えることができる。

Hand gesture mode は、モニタに向けた director の手のジェスチャーを視覚的に伝える（図 6.3）。Director は、surrogate が見ている映像をモニターで見えており、ポインティングした手や指が surrogate の視界にオーバーレイするようにした。このモードは、director がどんな行動をしてほしいのか十分に説明できない場合に有効である。例えば「直進」や「右に曲がって」という指示は単純で理解しやすいが、「これ取って」といった指示代名詞を含む要求や「馬を撫でて」というような説明が難しい動作は見せた方が早い。

手のジェスチャーを検出するために、偏光フィルタを使用した。LCD ディスプレイは、光が水平方向に偏光する特徴がある。偏光フィルタは、LCD の光に対して垂直にカメラへ装着されると LCD ディスプレイから取得される画像はフィルタによってブロックされる [140]。この光学現象を利用し、黒い背景から director の手のジェスチャーを検出させ、surrogate の見ている映像にオーバーレイさせた。

6.2 実験 1 : Director の体験理解

6.2.1 背景

Director は、ChameleonMask システムにおける遠隔ユーザである。遠隔地にいるために現地に赴くことができないとき、自身の代わりに surrogate に依頼する。将来的には、surrogate は会議参加だけにとどまらず、director の手足となって臨機応変に周囲の人とコミュニケーションがとれることを目指す。そのために、まず director にとって surrogate とテレプレゼンスロボットの操作性の違いや、surrogate を通した体験の共有、surrogate とのコミュニケーションについて調べることにした。

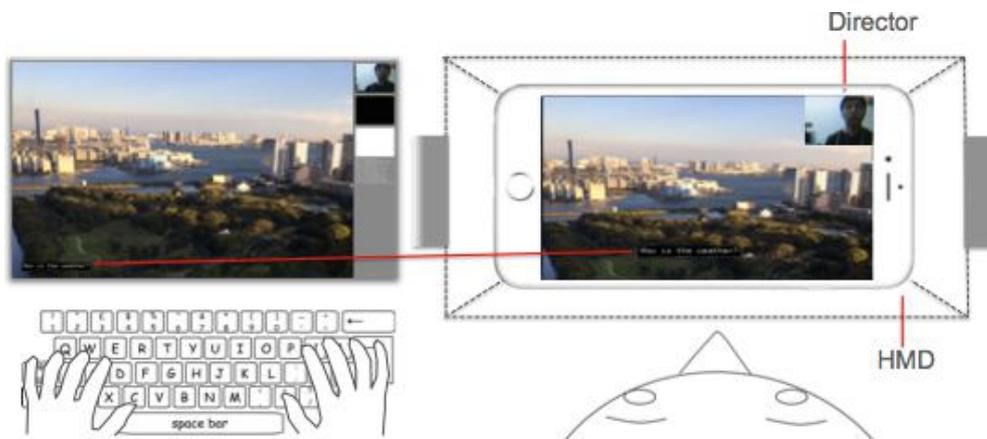


図 6.2: Script mode: 左-遠隔地からメッセージをタイピング 右-送信された文字が Surrogate の視界にオーバーレイされる。

6.2.2 実験タスク

設定したタスクは、事前に用意したルートに被験者が surrogate を遠隔から案内して果物屋に連れて行き、商品を購入するものである。実験で訪れる果物屋には、事前に説明をし、director の代わりに surrogate が買い物に来ることを伝えた(図 6.4)。実験中は、公道を歩くため通行人からの干渉をさけるため、「実験中」と記載したボードを surrogate 役の首から下げた。

Surrogate の性格や対応の違いによって実験結果に差が出ないように、実験中は同じ surrogate が担当した。Director 役を務める被験者は、4人の男性と5人の女性で年齢が22~28歳の大学生であり、本プロジェクトと関わりのない人たちである。また、surrogate と面識がないため両者の関係性による影響はない。実験は、1) システムの説明、2) システム評価、3) テスト後のアンケート、および4) インタビューの順番で行った。

また、テレプレゼンスロボットとのユーザビリティと比較するため、実験室から決められたルートで建物を出て大学構内を走り、門まで行く操作を比較体験してもらった(図 6.5)。使用したシステムは、Double robotics² であり、被験者には最初に基本操作を練習する時間を設けた。アンケートは、7点を最高点にしたリッカート法で行った(表 6.1)。

6.2.3 結果と考察

結果を図 6.6 に示した。テレプレゼンスロボットは、surrogate に比較して回答に開きがあった。それぞれの項目に対して、テレプレゼンスロボット操作と surrogate 操作に統計的有意差があるか調べるために、有意水準 5%で両側検定の t 検定を行ったところ、

²Double, <http://www.doublerobotics.com/business/>

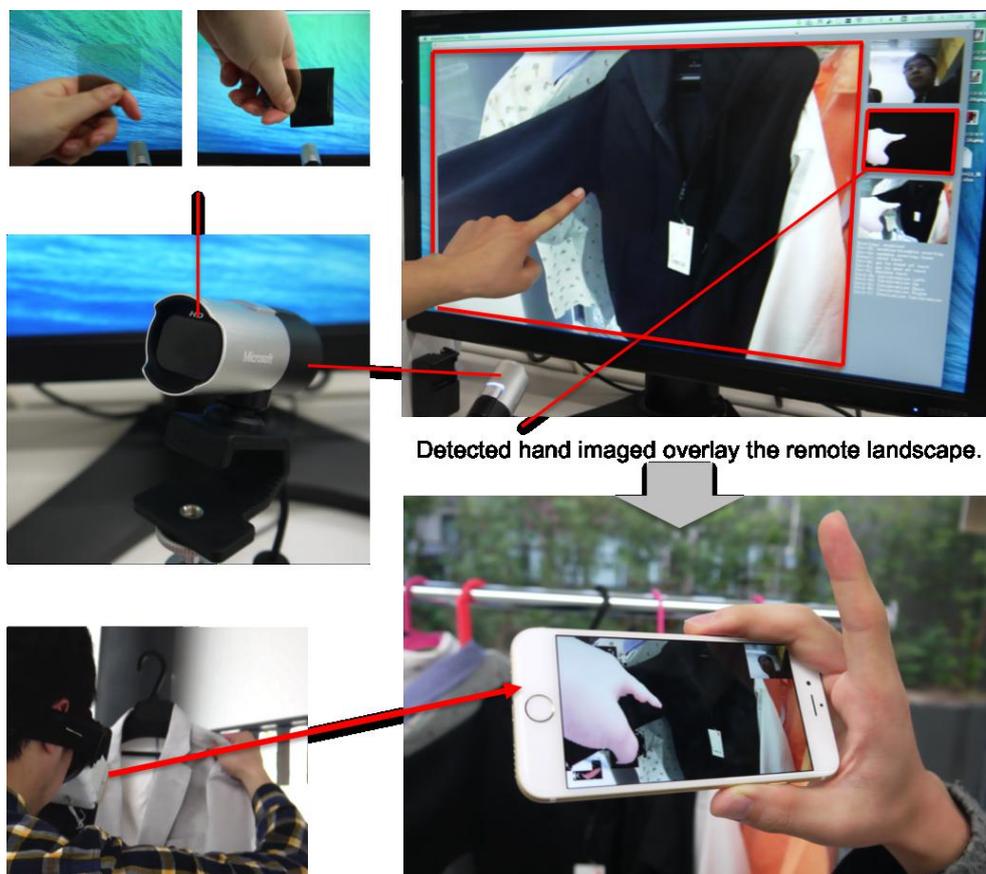


図 6.3: Hand gesture mode: LCD ディスプレイの光学現象を利用。偏光フィルターをカメラにとりつけ、黒背景から手を検出して抜き出し、surrogate が見る映像にオーバーレイしている。

Q2 は ($t(7)=3.64, p < .01$)、Q5 は ($t(7)=2.93, p < .05$)、Q6 は ($t(7)=3.06, p < .05$) で有為差があった。Q1 は操作性に関する質問であり、被験者はテレプレゼンスロボットの操作を楽しんでいる一方で、彼らの表情は非常に真剣だった。彼らはシステムが壁に衝突したり、倒れないように注意して操作をしていた。実験で、被験者がテレプレゼンスロボットを操作する平均時間が 315 秒であるのに対し、surrogate の平均操作時間は 115 秒だった。女性の被験者は、男性よりも慎重に操作を行う傾向があった。ある被験者は、「Surrogate は、私が詳細な説明や操作をしなくても通りを歩いてくれるので、安心できた」というコメントがあった。Q2 は、応答性について聞いた。被験者はテレプレゼンスロボットで、足元を確認しながら前進するのに苦労しているようだった。被験者が Double の足元を確認したい場合は、Double のカメラを前方の視界から足元に切り替える必要がある。テレプレゼンスロボット、そして surrogate とも director が足元は

表 6.1: 実験 1 のアンケート

No.	質問
Q1	自律移動システム/Surrogate は、操作しやすかったか？
Q2	思った通りに、自律移動システム/Surrogate を動かすことができたか？
Q3	その場にいるような臨場感を感じたか？
Q4	遠隔地の環境を確認することができたか？
Q5	自律移動システム/Surrogate を使用して外出したいか？
Q6	遠隔地に自分の代わりとして自律移動システム/Surrogate を送り込みたいか？

すぐ見れるものではないが、surrogate は director の指示がなくても、障害物を避けていた。Q3 は没入感が得られるか聞いた問いであったが、両者に大きな違いはなかった。ある被験者は、「あたかも操縦室からテレプレゼンスロボットと surrogate を操縦しているかのように感じた」というコメントがあった。深い没入感は得ていなかった。Q4 の回答は、surrogate がテレプレゼンスロボットよりも、遠隔の環境を共有し、コミュニケーションがしやすいことを示している。実験中、surrogate がサイレンの方向に頭を向けた時に初めて、director は救急車が接近していることに気付く例があった。Director が、surrogate に頼んだことではないが、surrogate は人であるために周辺の情報から緊急度が高い情報を共有するのに適していると考えられる。Q5 と Q6 の回答には、大きな違いが出た。Q5 は、このシステムを使って外に出たいかを問い、Q6 は、被験者の代わりになり得るかを聞いている。被験者の典型的な回答として、「テレプレゼンスロボットには車輪があるが、他の人にぶつからないかが心配で、外に出れない」というものだった。

6.3 実験 2 : Surrogate の体験理解

6.3.1 背景

ChameleonMask のコンセプトは、テレプレゼンスロボットの代わりに人の surrogate が務めることである。単純労働や危険な作業はこれまでのようにロボットがやるべきであり、ロボットでは代替できない人間の外観や動作によって director の要求を実現していくものである。Surrogate を活用したテレプレゼンスの使用用途は、会議参加、プレゼンテーション、教育、介護、デートなど様々なシーンが考えられる。これらの場面で使用することを想定した時に、surrogate になる体験はどのようなものなのか知見を得



図 6.4: 左: 遠隔ユーザが店員と話している様子。右: Surrogate が果物屋に入っていく様子。



図 6.5: 被験者は、屋外でテレプレゼンスロボットと surrogate を遠隔操作し、使用感を比較した。

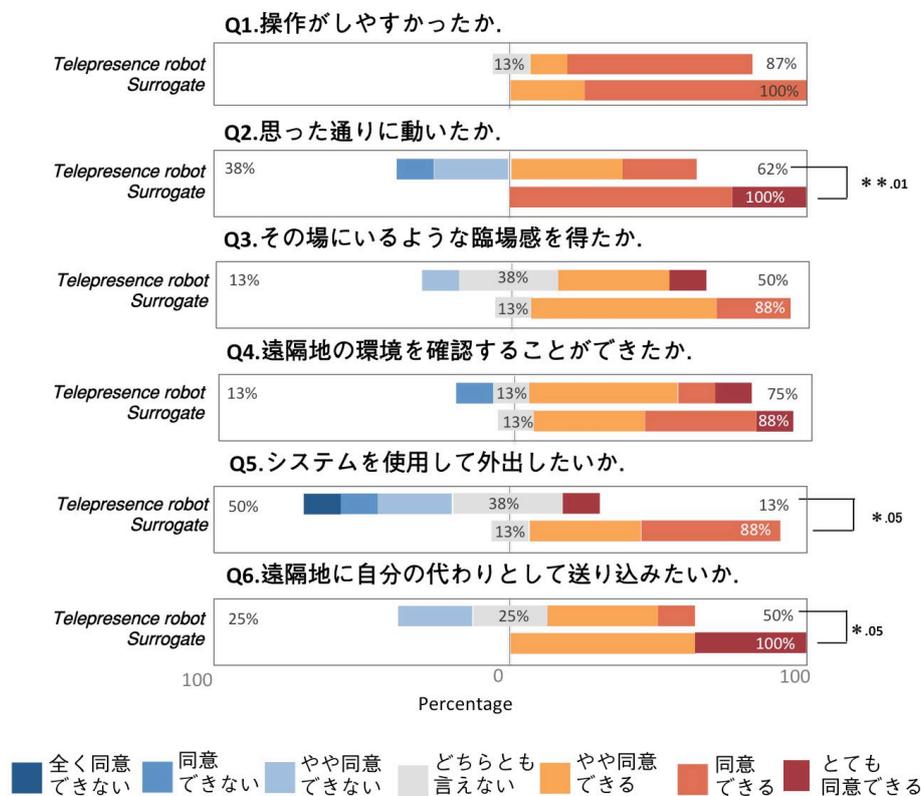


図 6.6: 実験 1 の結果

必要がある。人々は、surrogate になりたいと思ひ、他人（すなはち director）を助けたいと思うのか。Surrogate は、director に自分の身体を貸す時にどう思うのか、などである。そこで、surrogate になる体験を理解するために、ユーザスタディを行った。

6.3.2 実験タスク

タスクは、実験環境の衣料品店にて director のショッピングを surrogate が手伝うものにした。衣装ラックに男女別の洋服を 5 点ずつ用意し、その中からどれを購入するか決めてもらう。衣装ラックの隣には、全身鏡を用意し、director および surrogate が衣装が似合うか確認できるようにした。買い物の補助は、装着型テレプレゼンスシステムでも可能であるが、ChameleonMask では、より実際の買い物に近い体験ができるようになる。Surrogate に自身の身体になってもらうことで、試着をしたり、洋服を身体に近づけることで director の顔に似合うか確認ができる。

Surrogate 役を務める被験者は、4 人の男性と 4 人の女性、年齢は 22~28 歳の大学生、社会人からなる本プロジェクトと関わりがない人たちを集めて行った。それぞれの

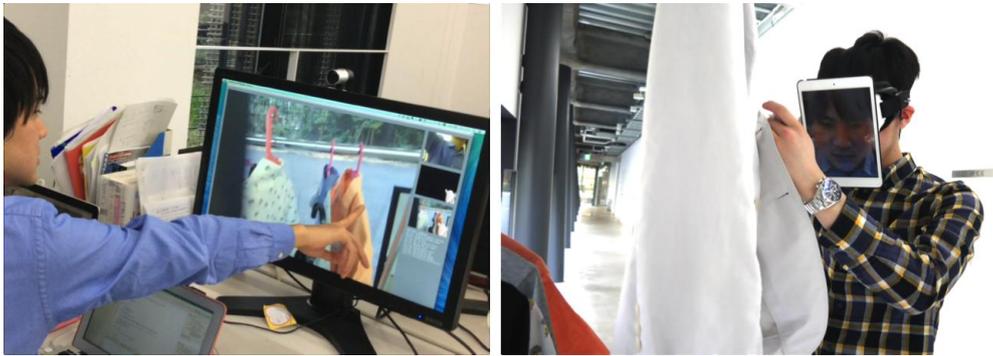


図 6.7: 左: Director が近くで見たい洋服を指差している。右: Director の顔がディスプレイに表示されている。Surrogate は洋服を取って director に見せている。

被験者に対して同性の director2 名が対応した。また director は、surrogate に知られている人が担当した。Director は、すべての被験者に対して同じ対応が取れるよう、事前に練習をし、用意したシナリオを読み上げてもらった。どんな服があるか見せてもらい、チャックを開けて商品タグを確認したり、鏡で確認する内容である。実験時間は、10 分である。また、スクリプトや手のジェスチャーを使った指示を出してもらった。ユーザ調査の後、7 点を最高点にしたリッカート尺度でアンケートを取った。実験は、1) システムの説明、2) システム評価、3) テスト後のアンケート、および 4) インタビューの順番で行った。

6.3.3 実験シナリオ

各 surrogate は、director の服の購入を手伝う。Director は何らかの理由で外に出ることができない。Director はインターネット上で服を買うことができるが、お店で買い物をする楽しみを体験したがつている。そこで、director は surrogate に買い物を助けてほしいと依頼した。お店を見て回った後、director は 5 種類の服を選んだ。Surrogate は、director が最終的にどの衣服を購入すべきか判断するのを手伝うように求められた(図 6.7)。

6.3.4 結果と考察

実験結果を図 6.8 にまとめた。すべての被験者が、director の要請に応じて上手く手助けをしていた。Director からの指示を不快に感じる人もいなかった。

参加者の多くは、手のジェスチャー表示が視覚的に分かりやすいと述べていた。Director がパーカーのジッパーを開ける素振りをした時に、被験者がパーカーのジッパーを実際にかける様子が観察された。彼らは director が何を望んでいたかを理解しているよう

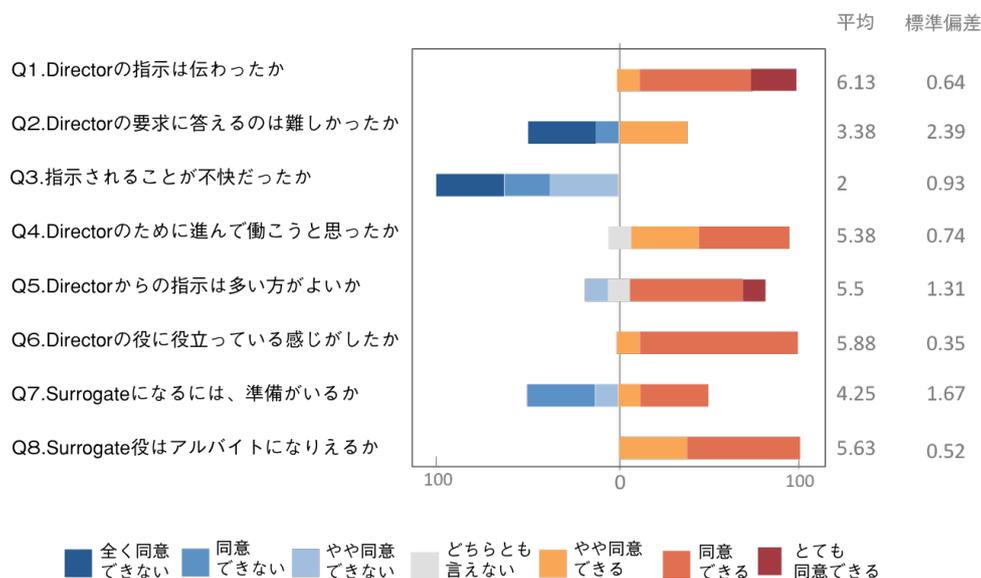


図 6.8: アンケートの結果

だった。Director は実験でのタスクが難しいと感じていなかった。

実験前、人々は誰かの surrogate になることに対して否定的であると仮説した。驚いたことに、被験者は surrogate になることに対して肯定的に感じる傾向があった。また、多くの参加者が自発的に働きかけ、director からは多くの要望をもらいたいと考えていた。ある被験者は、「director が何をしたいのか、もっと要望を聞きたかった」。「Director から私にしてほしいという願いはなかったけれど、私はパーカーを着用して director に似合う着用感を見せた。」というコメントがあった。加えて、多くの surrogate は服の触感について director に説明していた。Director は、直接服に触れることができず、触感のフィードバックがないためである。

この実験では、ほとんどの被験者は事前に特別な準備練習をする必要がなくシステムを使いこなせた。視界が狭くなるため、VR を通した景色になれる必要がある人もいた。最後に、被験者は surrogate 役はアルバイトとしてになる仕事には可能性があるとして述べた。

6.4 考察

6.4.1 身体的存在感と社会的存在感

実験 1 の間、Double を操作していたら、興味を持った通りすがりの人が、声げなくスマートフォンで写真を撮る行為が見られた。しかし、ChameleonMask に対しては

好奇心な目で見ても、写真を撮ることはなかった。これは、人々が対峙した対象を人が物のどちらと見なしているかを示していると考えられる。Surrogate は、身体を通してここにいるという人間としての存在感を提示することができる。

6.4.2 意思疎通の取り方

Director は音声指示に加え、文字、ジェスチャーを使って自身の意図を伝える。両者にとって一方方向、双方向にどんな情報を伝えるべきか、さらに検討が必要である。Director が得られる情報は、surrogate が見た映像のみであるが、周辺環境をより細かに知るには、Jackin [20] を併用して 360 度の周辺映像を見ることに役立つだろう。また、director の単純な身体動作は説明がなくても surrogate に行ってもらえるが、ダンスなど手足の細かな動きを模倣させるには、全身映像を分かりやすく見せる工夫が必要になる。Surrogate が、自立的に動作するのではなく、電気刺激で遠隔から制御する方法もあるだろう。一方、surrogate は指示に対して「はい」や「いいえ」などの受け答えを音声でしか使える方法がない。二人しかいない場所ではいいが、手軽に返答できるよう腕に身につけたウェアラブルデバイスから応答するなどの方法が考えられる。

6.4.3 テレプレゼンスロボット vs Surrogate

テレプレゼンスロボットと surrogate を比較すると、surrogate の方が人間である故にできる行動が多い。しかし優劣を競うものではなく、棲み分けが必要であると考えている。テレプレゼンスシステムは、すでに使用用途に応じて細分化されており、それらが最良であることが多い。人間の surrogate が特に役に立つタスクもあれば、テレプレゼンスロボットの使用が好ましいタスクもある。実験中、被験者は簡単な作業のために surrogate を稼働させることを申し訳なく考えていた。また、プライベートな会話をする際は人である surrogate を介在させるより機械の方がよいだろう。今後、ChameleonMask が適する場面をより検討する必要がある。

6.4.4 人が人を遠隔操作したら何が起こるのか？

“人を活用することは、ロボットを開発するより安い”という考え方がある。しかし、人の取り扱いが難しく、慎重さを要する。それは、director や surrogate の性格や人間関係といった、いくつかの不特定要素が影響し合うからである。Surrogate は、director に似ている人が望ましいと考えていたが、違いが双方を補い合うことができるとも言える。Surrogate は、自身の強みや能力を生かすことができるだろうし、director は自身の弱みを補うことができる。Director を事前によく知っている必要があるタスクは、director の知人に依頼すればよい。また、専門性の高い仕事は、代行可能な専門家に依頼すれば

よい。Surrogate から物理的に身体をただ借りるのではなく、自分にはない身体特徴や身体技術を借りることで、能力を拡張させる、Human Augmentation の使い道ができる。

ChameleonMask は新しい雇用を創出する可能性がある。人々は、実験において surrogate になることに好意的であった。当然ながら、タスクに影響されることもあるが、被験者は director が指示を出さないと居心地が悪く感じ、director を進んで手伝おうとする姿勢があった。また、何人かの被験者が surrogate になることが心地よく、快適だと感じたことが興味深かった。その理由として「自分の意見を持つ必要がない。私はただ director がしてほしいことをするだけでよい」と言っていた。

6.4.5 どんな時に ChameleonMask を使うべきか？

本研究の主要目的は、人を用いて遠隔地に director の存在感を提示することである。顔をテレプレゼンスシステムで表示するだけで、遠隔ユーザの存在感をつくるため様々な場面で使用できると考えられる。そして、本システムは人が身体を借りるだけでなく、誰かの顔を借りることができるものである。その対で、人に身体や顔を貸すことができるシステムとも言える。これは、システムによって顔と身体が切り離されるから成立する。例えば、顔を借りるとする。女性から多くの羨望を得ているアイドルに director になってもらうことで、アイドルに対してどのようにファンたちが接しているのか追体験することができる。現在のマスクは、ChameleonMask の実用可能性を調べるため簡素なマスクを用いているが、マスクの重量、視野角、外観が改善されれば、より実用的な場面で使用ができるであろう。

6.5 結論

本章では、フィールドテストの知見からシステムの改良を行い、director の指示が伝えやすくなるよう文字による指示出し機能とハンドジェスチャーによる指示出し機能のソフトウェアを開発した。また、今後の応用へ向け、ChameleonMask 使用時の director と surrogate の使用感や体験を調べる基礎検討を行った。まず、director としてテレプレゼンスロボットと ChameleonMask の使用感を比較した。その結果、テレプレゼンスロボットの操作を楽しむ被験者は多かったが、衝突を気にして操作に時間がかかる人が多かった。また、ChameleonMask に比較して、外に出たり、自身の代わりに務めてさせることに不安を抱える被験者が多かった。次に、被験者に surrogate になってもらい ChameleonMask を被って director から指示を受けてもらった。予想に反して、被験者は surrogate になることを肯定的に捉えていた。さらに、surrogate 役の被験者らは director の要望を欲しがるとの傾向にあり、自主的に行動する様子が見られた。ChameleonMask は、遠隔ユーザにとっても、そしてアバターになる surrogate にとっても好意的な結果を得た。

第 7 章

結論

本博士論文では、対人コミュニケーションで行われている人のやり取りや関係性が再現できるよう、遠隔ユーザらしさを具現化した (personalized) テレプレゼンスシステムについて論じた。既存のテレプレゼンスシステムの外見や動作は機械的であり、開発コストを抑え、両方を兼ね備えることは難しい。そこで、本論はその人が誰であるかを特定する顔と、コミュニケーションにおいて重要な役割を持つ非言語情報に着目し、コミュニケーションの形式別に存在感の提示ができるテレプレゼンスシステムについて論じた。

7.1 本論文のコントリビューション

1. ディスプレイと可搬性に注目したテレプレゼンスシステムの整理と提案
 - (a) 既存のテレプレゼンスシステムを可搬性で分類し、固定型システム、装着型システム、自律移動型システムの問題点を整理した。
 - (b) 実際のコミュニケーションに近い感覚を得るテレプレゼンスシステムとして非言語情報に注目した。
 - (c) 非言語情報である顔や首振りなどの頭部動作や視線伝達ができる、固定型テレプレゼンスシステム (LiveMask) を考案した。
 - (d) 非言語情報である外見的特徴や動作、対人空間の取り方が再現できる、自律移動型テレプレゼンスシステム (ChameleonMask) を考案した。
2. 立体顔形状のスクリーンを用いたテレプレゼンスシステムの開発と検証
 - (a) スクリーンのみを顔スクリーンに変更する汎用性の高い方法によって、遠隔ユーザの分身をつくり、非言語情報の伝達を目指した。
 - (b) 遠隔ユーザの顔と頭部動作を抽出して、顔映像を投影し三軸で動作するテレプレゼンスシステム、LiveMask を開発した。

- (c) 顔スクリーンと平面のスクリーンに投影された人物の死角や表情の認識の違いが生じるか実験を行った。その結果、顔スクリーンは死角が少なく広範囲な角度で見えるため、複数人でテーブルを囲んで会話をするような場面でも視認されやすいことが分かった。その一方、平面スクリーンと顔スクリーンの表情の認識のしやすさに関しては、差異が見られなかった。
- (d) 遠隔ユーザの頭部動作に追従する LiveMask の動きが、方向指示の伝達に有効であることを示した。平面スクリーンでは、遠隔ユーザが首を傾けている方向や視線の先を読み取ることが難しいが、LiveMask では一位の方向を示すことが確認できた。
- (e) 顔スクリーンが、意思疎通や会話を促進させる視線伝達を可能にすることを示した。平面スクリーン使用時に遠隔ユーザが正面を見る場合、モノリザエフェクト（どの角度から見ても、視線が合うように感じる現象）が起こるが、LiveMask では起こらなかった。LiveMask の特徴である、立体形状の顔スクリーンが視線方向を伝達するのに有効であることが明らかになった。
- (f) 顔スクリーンを小型化しても視線伝達の効果が担保されることを示した。実寸大の 1/14 サイズの顔スクリーンを作成し、視線伝達ができるか実験を行った。これにより、小型化が求められるウェアラブルシステムや自律移動型システムでも顔スクリーンが使用できることが分かった。

3. 人を用いたテレプレゼンスシステムの開発と検証

- (a) 自律移動型システムとして人に遠隔ユーザの仮面を被ってもらい、human surrogate になる仕組みを提案した。
- (b) 仮面型テレプレゼンスシステム、ChameleonMask のハードウェアプロトタイプを開発した。
- (c) “人”を遠隔操作するにあたってのコミュニケーションフレームを整理した。
- (d) ChameleonMask のフィジビリティを検証し、surrogate が遠隔ユーザ本人だと思われる傾向があることを示した。
- (e) 遠隔ユーザから surrogate へ指示出しできる機能を実装した。音声による指示に加え、スクリプトによる指示とハンドジェスチャーによる指示出しが可能になった。
- (f) 被験者に surrogate になってもらい、surrogate の体験に関する知見を得た。被験者は、surrogate になることに対してポジティブに考える人が多かった。
- (g) 被験者に遠隔ユーザ役（以降、指示する人という意味で director と呼ぶ）になってもらい、ChameleonMask とテレプレゼンスロボットの使用感を比較した。テレプレゼンスロボット使用時は、操作に集中してしまう傾向が出た。

- (h) ChameleonMask で実現できる動作を整理した。接触コミュニケーションの可能性を調べるため、遠隔握手の実験を行った。Director、surrogate が知人同士の時に接触効果が高かった。
- (i) ChameleonMask を使った新しい応用について考察した。

7.2 課題と解決策

7.2.1 LiveMask における課題

表情の伝達

顔スクリーンのメリットは、3D スキャナーや 3D プリンタを用いることで汎用性高く、本人に近い外見をつくり、視線伝達できることにあるが形状が変形しないため、人の表情を忠実に再現するには限界がある。映像の目や鼻の位置とスクリーンが完全に一致していても、ユーザが大きく口を開ける動作を行うと、骨格が変わるため映像とスクリーンが一致しない。それを解決するには、スクリーン内に収まらない表情を他の顔映像に差し替えたり、スクリーン内に収まるよう画像処理を行うことが考えられる。

視線の一致

顔スクリーンの形状は、遠隔ユーザの視線方向を正しく伝えることができた。実際の使用時にアイコンタクトを可能にするには、LiveMask に取り付ける、USB カメラの位置を目元付近に設置するなど工夫が必要であろう。川口らの研究 [141] では、平面ディスプレイの回転における注視方向の影響について、条件分けをして調べている。顔スクリーンであっても正確な注視方向を提示するためには、遠隔ユーザが見るモニターのサイズ、ディスプレイからの距離も含めたデスクトップの設計が必要になる。

7.2.2 ChameleonMask システムにおける課題

システムの改善

ChameleonMask は、遠隔ユーザの顔を表示するために前面にタブレットを搭載する。また、surrogate の視界を確保するため HMD を取り付けるため前方に比重がかかる。初期に開発したヘルメット型のプロトタイプから軽量化させたことにより、長時間の使用が可能になったが、さらに視野を拡大させ、装着感を上げることが必要である。

Surrogate の応答方法の改善

現状のシステムでは、遠隔ユーザから surrogate への指示出し方法はいくつかあるが surrogate が遠隔ユーザに応える手段が音声しかない。二人だけで使用している時は音

声で応答すればよいが、他の人と対峙した時に surrogate が director のみに応答できるデバイスが必要である。応答する内容が、「はい」や「いいえ」など簡易な内容であれば、スマートウォッチなどウェアラブルデバイスを用いて返答を返すこともできるであろう。それ以上に伝えたいメッセージがある場合、もっともシンプルな方法は surrogate が使い慣れた自身のスマートフォンを用いて返答することである。しかし、使用できない場合は福本らの Fingering のように指の動作パターンで文字を入力したり [142]、爪に装着したマグネットによって文字を入力する FingerPad [143] など手を使った入力デバイスを併用することで、意思疎通が図れると考えている。

全身動作の伝達および遠隔操作

現状のシステムでは surrogate は視界の中で、director の上半身しか画面で見ることができない。基本設計をそのようにした理由は、全身を使う動作でも、上半身のみで事足りることが多いと考えたからである。例えば、目的の場所まで歩くことは全身動作であるが、一般的な動作のため全身を見ずとも surrogate は行動でき、一挙一動を director に合わせる必要はない。しかし、ChameleonMask は、全身が使えるテレプレゼンスシステムなので全身動作をどのように surrogate へ伝達できるか検討した方がよいだろう。Director の全身動作の伝達、および surrogate の行動を遠隔操作するにはいくつかの方法が考えられる。まず、カメラの位置を director の全身が映る場所へ固定し、それを surrogate が見やすいよう映像を加工することが考えられる。Surrogate は、現実環境の視野も確保する必要があるため、視界の映像に全身映像を半透明に重ねる、director のカメラのビューを手元のスイッチで切り替えられるなど分かりやすいビューをつくる必要がある。Director の映像を見て行動を模倣してもらうことを前提としているが、見ている映像がアフォーダンスとなり surrogate の行動を制御することもできるであろう。石井らは、HMD で提示する映像によって人の歩行を制御する研究を行っている [144]。また、電気刺激によって surrogate の行動をコントロールする方法も考えられる [145, 146]。電気刺激は、遠隔ユーザの指令から surrogate が行動を起こすまでの時間遅延が少ないが、手や腕といった身体の一部の制御であり、身体全体をコントロールすることはできない。また、director が surrogate の行動をコントロールするには、surrogate に危険が伴わないよう現地の環境を適切に把握する必要がある。Surrogate にどこまで主体性を持たせるかも検討が必要である。

遠隔ユーザ (director) の体験価値の向上

本研究では、テレプレゼンスシステムとして人を活用した点に新規性があるため、surrogate への指示出し方法や surrogate になる体験の理解など、surrogate を中心に研究を行った。一方、director にとっても機械ではなく人を遠隔操作することは新しい体

験であり、これまでにないインターフェイスが考えられる。実験中、director 役を行った被験者から「操縦席で surrogate を操作しているよう」というコメントをもらったが、モニターで遠隔地を眺める体験でよいのか、それとも自分の体験として認識できるよう没入感を高める方がよいかは検討の余地がある。例えば、director も HMD を装着し、surrogate の視界を共有したり、環境音を三次元音響で聞くことで臨場感の高い経験ができると考えている。

ChameleonMask 使用時の課題

- 使用場面の検討

フィジビリティの検証の結果、surrogate を director と見られる傾向があったが、以後、ChameleonMask を何度か使用したり、システムが普及することで「本人ではないとばれて使うことになるのでは」という指摘があった。実験では、本人に見えるかどうか確かめるため黙って使用したが、通常、ChameleonMask を使用する場合は、他のテレプレゼンスシステムやロボットを使用する時と同様、黙って使うものではないと考えている。その前提で、今後 ChameleonMask が活用できる場面や使用方法を検討する必要がある。しかし、5章の実験より ChameleonMask を使った実験だと分かっているにもかかわらず、surrogate の印象が director に見えるという結果が出ており、人は見た目の印象に影響を受けやすいことが明らかになった。今後は、長期間利用した時に人々の印象がどのように変化するか調べることも考えられる。ChameleonMask を用いて、買い物に行ったところ、店主は、新規で買い物に来る director だけでなく毎回来る surrogate にも声がけをするようになった。人ならではの特征だと考えており、surrogate を生かした新しい活用方法にもつながるであろう。

- 身体と顔の貸し借り

ChameleonMask は、surrogate の存在ありきでシステムが成立する。システムの開発だけでなく、どのように surrogate を集め、どのような人が surrogate に適するのか、さらに検討する必要があるだろう。検討するにあたっては、実験環境で調べるのではなく、具体的なタスクを基に実証実験することが必要だと考えている。Surrogate の選び方は、自分そっくりな人を選ぶだけでなく、着せ替え人形のように、気分や用途に合わせて身体を選ぶことができる。テレプレゼンスシステムは、遠隔にいる人が同じ空間にいるように感じさせる技術であるが、システムを用いることで本人よりもよい印象を残すことができれば、よりシステムの活用が進むのではないだろうか。ChameleonMask では、director として身体を選ぶだけでなく、surrogate として director を選ぶことができるシステムでもある。Surrogate としてある人物の顔を借りることができたら、別の人生を追体験できるであろう。

著名人に director になってもらうだけでなく、背の高低差のあるペア、男女間、子供と大人の組み合わせなどで用いることで普段の自分とは違う他人の世界を体験できるであろう。

- 責任の所在

ChameleonMask 使用時に、起こした事故や事件はどちらに責任が発生するのもかも検討課題である。指示を出した director が悪いのか、行動を起こした surrogate が悪いのかは定かではない。Director の指示に従い、surrogate が事故を起こした場合は、どちらに罪があるのだろうか。Surrogate が、どこまで自主性を持つのかにも影響する。Surrogate と言えど、遠隔ユーザへの拒否権は持つべきであり、使用時に必ず規約を設けることが必要であろう。

7.3 今後の展望

7.3.1 個の複製と多人格化した個

本研究は、遠隔にいるある一人のユーザに対し、代わりになる一人の surrogate が対応するコミュニケーション形式をとっていた。これに加え、コミュニケーションの形式は一对多、多対一の体験も可能であると考えている。ある director が複数人の surrogate から身体を借りることによって、director はある特定の拠点にいても複数拠点で同時に director の顔を表示した分身を持ち、周囲に働きかけることが可能である。これにより、例えば選挙演説を世界中のあらゆる拠点で行うことができるようになるなど新しい使い方ができる。また、複数の director が一人の surrogate に入り込むことも考えられる。ある surrogate が被る仮面に、複数の director が代わる代わる登場する。周囲の状況を見て、A が話していたかと思ったら、B が登場するなど多人数が現実世界に出現する。Director が何かのエキスパートであった場合、surrogate は状況に応じてそれぞれのエキスパートから助けを請うことができるかもしれない。

7.3.2 テレプレゼンス以外での用途

ChameleonMask は、遠隔コミュニケーションに使用できるだけでなく、他人の人生を追体験ができるシステムでもある。新しい遊びとしてのエンタテインメントを提供するだけでなく、社会問題解決への寄与が期待できる。例えば、コミュニケーションが苦手な患者を対象にしたリハビリテーションに応用できるだろう。引きこもりの人のなかには対人コミュニケーションに苦手意識を抱えている。ChameleonMask であれば、直接目を見て話すことが苦手でも surrogate になることで、自分の顔を隠したまま相手の顔を見たり、様子を伺うことができる。このようなやり取りを続けることで、対人への心理的負荷が下がっていくと思われる。また、コーチングにも役立つ可能性がある。教

え方を教える方法はなかなかない。ベテラン教師が映るマスクを新米教師が被り、子供への指導方法を目の当たりにすることで、子供たちにどんな言葉を投げかけると、どう反応するのか表情や行動をリアルタイムで体感することができる。新しいOJT(on the job training)の方法としても活用できるであろう。

参考文献

- [1] D.Engelbart. A research center for augmenting human intellect., December,1987.
- [2] Clarence A. Ellis, Simon J. Gibbs, and Gail Rein. Groupware: Some issues and experiences. *Commun. ACM*, 34(1):39–58, January 1991.
- [3] WR Corliss and EG Johnson. Teleoperators and human augmentation. an aec-nasa technology survey. 1967.
- [4] Marvin Minsky. Telepresence. *OMNI magazine*, 1980.
- [5] 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.
- [6] Ontario Telepresence Project. <https://www.dgp.toronto.edu/tp/tphp.html>.
- [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] Robin Mason. *Using communications media in open and flexible learning*. Psychology Press, 1994.
- [9] Skype. <http://www.skype.com/>.
- [10] Google Hangout. <https://hangouts.google.com/?hl=ja>.
- [11] Min Kyung Lee and Leila Takayama. “now, i have a body”: uses and social norms for mobile remote presence in the workplace. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, CHI '11, pages 33–42. ACM, 2011.
- [12] AnyBots. <https://www.anybots.com>.

- [13] Eric Paulos and John Canny. Social tele-embodiment: Understanding presence. *Auton. Robots*, 11:87–95, July 2001.
- [14] Double Robotics. <https://www.doublerobotics.com/>.
- [15] Beam. <https://suitabletech.com/beam/>.
- [16] VGo. <http://www.vgocom.com/>.
- [17] Hiroaki Tobita, Shigeaki Maruyama, and Takuya Kuzi. Floating avatar: Telepresence system using blimps for communication and entertainment. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, pages 541–550, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [18] Keita Higuchi and Jun Rekimoto. Flying head: A head motion synchronization mechanism for unmanned aerial vehicle control. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, pages 2029–2038, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [19] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. inform: Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pages 417–426, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [20] 小宮山 凌平, 味八木 崇, 暦本 純一. Jackin space: 一人称・三人称映像間の連続的な遷移を可能にするテレプレゼンスシステム. *インタラクシオン* 2016, 2016.
- [21] 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.
- [22] Keisuke Suzuki, Sohei Wakisaka, and Naotaka Fujii. Substitutional reality system: a novel experimental platform for experiencing alternative reality. *Scientific reports*, 2, 2012.
- [23] 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.

- [24] 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.
- [25] Irene Rae, Gina Venolia, John C. Tang, and David Molnar. A framework for understanding and designing telepresence. In *Proceedings of the 18th ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work & Social Computing*, CSCW '15, pages 1552–1566, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [26] Talking Head Projection. <http://www.billbuxton.com/hydraNarrative.htm>.
- [27] Hideyuki Nakanishi, Kei Kato, and Hiroshi Ishiguro. Zoom cameras and movable displays enhance social telepresence. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, CHI '11, pages 63–72, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [28] Sigurdur O. Adalgeirsson and Cynthia Breazeal. Mebot: a robotic platform for socially embodied presence. In *Proceedings of the 5th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, HRI '10, pages 15–22, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [29] Ray L. Birdwhistell. *Kinesics and context: Essays on Body Motion Communication*. Philadelphia:Univ. of Pennsylvania Pres, 1970.
- [30] ロバート・ポルトン. *People Skills*. 宝島社, 2009.
- [31] 深田博己. *インターパーソナルコミュニケーション*. 北大路書房, 1998.
- [32] Cisco Telepresence. <http://www.cisco.com/en/US/products/ps7060/index.html>.
- [33] Talking Head Projection. <http://http://www.naimark.net/projects/head.html>.
- [34] F Delaunay, J De Greeff, and T Belpaeme. *Towards Retro-projected Robot Faces: an Alternative to Mechatronic and Android Faces*, pages 306–311. Ieee, 2009.
- [35] Eric Paulos and John Canny. Prop: Personal roving presence. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98,

- pages 296–303, New York, NY, USA, 1998. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [36] 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.
- [37] 中西 英之. ソーシャルテレプレゼンスとロボティクス. *日本ロボット学会誌*, 29(1):23–26, 2011.
- [38] Kana Misawa and Jun Rekimoto. Wearing another’s personality: A human-surrogate 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.
- [39] Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Tetsuo Ono, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Android as a telecommunication medium with a human-like presence. In *Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, HRI '07, pages 193–200, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [40] Tachi Susumu. 産業用ロボットの将来. *自動車技術会誌*, 37:24–29, 1983.
- [41] Norbert Wiener. *The Human Use of Human Beings*. Houghton Mifflin, 1950.
- [42] Kana Misawa, Yoshio Ishiguro, and Jun Rekimoto. Livemask: A telepresence surrogate system with a face-shaped screen for supporting nonverbal communication. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '12, pages 394–397, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [43] Kana Misawa, Yoshio Ishiguro, and Jun Rekimoto. Livemask: A telepresence surrogate system with a face-shaped screen for supporting nonverbal communication. *Journal of Information Processing*, 21(2):295–303, 2013.
- [44] Kana Misawa, Yoshio Ishiguro, and Jun Rekimoto. Ma petite chérie: What are you looking at?: A small telepresence system to support remote collaborative work for intimate communication. In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, AH '12, pages 17:1–17:5, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [45] Kana Misawa and Jun Rekimoto. Chameleonmask: Embodied physical and social telepresence using human surrogates. In *Proceedings of the 33rd Annual*

ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '15, pages 401–411, New York, NY, USA, 2015. ACM.

- [46] Kana Misawa and Jun Rekimoto. Who am i touching?: User study of remote handshaking with a telepresence face. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction*, HAI '16, pages 163–170, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [47] Tachi Susumu and Abe Minoru. テレイグジスタンスの研究 (第 1 報) 視覚ディスプレイの設計 . In 第 21 回 SICE 学術講演会, pages 167–168, 1982.
- [48] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya, and M. Kaneko. *Tele-existence (I): Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence*, pages 245–254. Springer US, Boston, MA, 1985.
- [49] Susumu Tachi. テレイグジスタンスの研究—「テレイグジスタンス」の概念の提唱とその工学的実現可能性の実証—, May 19, 2016.
- [50] マジヨリー・F・ヴァーガス. 非言語コミュニケーション. 新潮選書, 1987.
- [51] Josef Parvizi, Corentin Jacques, Brett L. Foster, Nathan Withoft, Vinitha Rangarajan, Kevin S. Weiner, and Kalanit Grill-Spector. Electrical stimulation of human fusiform face-selective regions distorts face perception. *Journal of Neuroscience*, 32(43):14915–14920, 2012.
- [52] Faraz Farzin, Chuan Hou, and Anthony M. Norcia. Piecing it together: Infants' neural responses to face and object structure. *Journal of Vision*, 12(13):6, 2012.
- [53] Irene Rae, Leila Takayama, and Bilge Mutlu. One of the gang: Supporting in-group behavior for embodied mediated communication. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pages 3091–3100, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [54] William Buxton. Living in augmented reality: Ubiquitous media and reactive environments.
- [55] John C. Tang and Scott L. Minneman. Videodraw: A video interface for collaborative drawing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '90, pages 313–320, New York, NY, USA, 1990. ACM.
- [56] John C. Tang and Scott Minneman. Videowhiteboard: Video shadows to support remote collaboration. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human*

- Factors in Computing Systems*, CHI '91, pages 315–322, New York, NY, USA, 1991. ACM.
- [57] Hiroshi Ishii, Minoru Kobayashi, and Kazuho Arita. Iterative design of seamless collaboration media. *Commun. ACM*, 37(8):83–97, August 1994.
- [58] HP Halo. <http://hphalo.org/>.
- [59] Y. Harada, K. Miyamoto, and R. Onai. Vispatch: graphical rule-based language controlled by user event. In *Visual Languages, 1997. Proceedings. 1997 IEEE Symposium on*, pages 160 –161, sep 1997.
- [60] A Kendon. Some functions of gaze-direction in social interaction. *Acta Psychologica*, 26(1):22–63, 1967.
- [61] 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.
- [62] Hajime Nagahara, Yasushi Yagi, and Masahiko Yachida. Wide field of view head mounted display for tele-presence with an omnidirectional image sensor. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, 7:86, 2003.
- [63] Kennon M Sheldon, Andrew J Elliot, Youngmee Kim, and Tim Kasser. What is satisfying about satisfying events? testing 10 candidate psychological needs. *Journal of personality and social psychology*, 80(2):325, 2001.
- [64] Nobuchika Sakata, Takeshi Kurata, Takekazu Kato, Masakatsu Kouroggi, and Hideaki Kuzuoka. Wacl: Supporting telecommunications using wearable active camera with laser pointer. In *In ISWC 2003*, pages 53–56, 2003.
- [65] 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.
- [66] Hideaki Kuzuoka, Toshio Kosuge, and Masatomo Tanaka. Gesturecam: a video communication system for sympathetic remote collaboration. In *Proceedings of the 1994 ACM conference on Computer supported cooperative work, CSCW '94*, pages 35–43, New York, NY, USA, 1994. ACM.

- [67] Don Kimber, Patrick Proppe, Sven Kratz, Jim Vaughan, Bee Liew, Don Severns, and Weiqing Su. *Polly: Telepresence from a Guide's Shoulder*, pages 509–523. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [68] Tadakazu Kashiwabara, Hirotaka Osawa, Kazuhiko Shinozawa, and Michita Imai. Teroos: A wearable avatar to enhance joint activities. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pages 2001–2004, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [69] Abigail Sellen, Bill Buxton, and John Arnott. Using spatial cues to improve videoconferencing. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '92, pages 651–652, New York, NY, USA, 1992. ACM.
- [70] Irene Rae, Leila Takayama, and Bilge Mutlu. The influence of height in robot-mediated communication. In *Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction*, HRI '13, pages 1–8, Piscataway, NJ, USA, 2013. IEEE Press.
- [71] Judith A Hall, Erik J Coats, and Lavonia Smith LeBeau. Nonverbal behavior and the vertical dimension of social relations: a meta-analysis., 2005.
- [72] Judee K Burgoon and Norah E Dunbar. An interactionist perspective on dominance-submission: Interpersonal dominance as a dynamic, situationally contingent social skill. *Communications Monographs*, 67(1):96–121, 2000.
- [73] Akira Matsuda, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Scalablebody: A telepresence robot that supports face position matching using a vertical actuator. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, pages 13:1–13:9, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [74] C.D. Kidd and C. Breazeal. Effect of a robot on user perceptions. In *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 4, pages 3559 – 3564 vol.4, sept.-2 oct. 2004.
- [75] Jun-Ho Oh, David Hanson, Won-Sup Kim, Young Han, Jung-Yup Kim, and Ill-Woo Park. Design of android type humanoid robot albert hubo. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1428–1433, oct. 2006.
- [76] Masahiro Mori. The uncanny valley. In *Energy*, 7(4), pages 33–35, 1970.

- [77] Susumu Tachi, Naoki Kawakami, Kouichi WATANABE, and Kouta MINAMIZAWA. Telesarphone: Mutual telexistence master-slave communication system based on retroreflective projection technology. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 1(5):335–344, 2008.
- [78] Mask-bot: A robot with a human face. <http://theweek.com/article/index/221216/mask-bot-the-creepy-robot-with-a-human-face>.
- [79] iCub. <http://www.icub.org/>.
- [80] Frédéric Delaunay, Joachim de Greeff, and Tony Belpaeme. Lighthouse robotic face. In *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction, HRI '11*, pages 101–102, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [81] Microsoft Kinect. <http://kinectforwindows.org/>.
- [82] H. Komei and N Yasushi. Telepresence robot as media for express unconscious gestures. In *Human-Agent Interaction symposium 2011*, 2011.
- [83] John P Whitney, Tianyao Chen, John Mars, and Jessica K Hodgins. A hybrid hydrostatic transmission and human-safe haptic telepresence robot. In *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on*, pages 690–695. IEEE, 2016.
- [84] Samer Al Moubayed Jens Edlund and Beskow Jonas. The mona lisa gaze effect as an objective metric for perceived cospatiality. In *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Virtual Agents., IVA'11*, pages 439–440, 2011.
- [85] O Divorra, Jaume Civit, F Zuo, H Belt, I Feldmann, O Chreer, E Yellin, W Ijsselsteijn, R van Eijk, D Espinola, et al. Towards 3d-aware telepresence: Working on technologies behind the scene. *Proc. ACM CSCW: New Frontiers in Telepresence*, 2010.
- [86] Jonas Beskow and Samer Al Moubayed. Perception of gaze direction in 2d and 3d facial projections. In *Proceedings of the ACM/SSPNET 2nd International Symposium on Facial Analysis and Animation, FAA '10*, pages 24–24, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [87] Frederic Delaunay, Joachim De Greeff, and Tony Belpaeme. A study of a retro-projected robotic face and its effectiveness for gaze reading by humans. *2010 5th*

- ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction HRI*, pages 39–44, 2010.
- [88] 川口幸也. 仮面を展示するープリミティブアートは超えられるかー. 公益財団法人東京都歴史文化財団 東京都庭園美術館, 2015.
- [89] 坂部恵. 仮面の解釈学. 東京大学出版会, 1976.
- [90] Melissa M.; Aguinis, Herman; Simonsen and Charles A. Pierce. Effects of non-verbal behavior on perceptions of power bases. In *Journal of Social Psychology* 138, no.4 (August), pages 455–469, 1998.
- [91] Senko K Maynard. 会話分析. くろしお出版, 1992.
- [92] Michael Argyle, Luc Lefebvre, and Mark Cook. The meaning of five patterns of gaze. *European Journal of Social Psychology*, 4(2):125–136, 1974.
- [93] Seeing Machine faceAPI. <http://www.seeingmachines.com/product/faceapi/>.
- [94] MicroVision PicoProjector. <http://www.microvision.com/showwxplus/>.
- [95] K. Hayashi, Y. Onishi, K. Itoh, H. Miwa, and A. Takanishi. Development and evaluation of face robot to express various face shape. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pages 481–486, May 2006.
- [96] MegaFaces. <http://www.asif-khan.com/project/sochi-winter-olympics-2014/.120>.
- [97] kagami. <http://www.nobumichiasai.com/post/152843985367/kagami-real-time-face-generator-20161011>.
- [98] Eric Brockmeyer, Ivan Poupyrev, and Scott Hudson. Papillon: Designing curved display surfaces with printed optics. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pages 457–462, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [99] Thiago Pereira, Szymon Rusinkiewicz, and Wojciech Matusik. Computational light routing: 3d printed optical fibers for sensing and display. *ACM Trans. Graph.*, 33(3):24:1–24:13, June 2014.
- [100] Toshiki Sato, Haruko Mamiya, Hideki Koike, and Kentaro Fukuchi. Photoelastic-touch: Transparent rubbery tangible interface using an lcd and photoelasticity.

In *Proceedings of the 22Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, pages 43–50, New York, NY, USA, 2009. ACM.

- [101] P. Ekman and W. V Friesen. The repertoire of nonverbal behavior: Categories, origins, usage, and coding. In *Semiotica*, 1, pages 49–98, 1969.
- [102] Paul Ekman. Handbook of cognition and emotion. In *Basic Emotions*, 1999.
- [103] M. Yuki, W.W. Maddux, and T Masuda. Are the windows to the soul the same in the east and west? cultural differences in using the eyes and mouth as cues to recognize emotions in japan and the united states. In *Journal of Experimental Social Psychology*, 43, 1997.
- [104] Y. Tsumaki, Y. Fujita, A. Kasai, C. Sato, D. N. Nenchev, and M. Uchiyama. Telecommunicator: a novel robot system for human communications. In *Robot and Human Interactive Communication, 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on*, pages 35–40, 2002.
- [105] Toshihiro Osumi, Kenta Fujimoto, Yuki Kuwayama, Masato Noda, Hirotaka Osawa, Michita Imai, and Kazuhiko Shinozawa. *BlogRobot: Mobile Terminal for Blog Browse Using Physical Representation*, pages 96–101. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [106] Luna. <http://www.schultzeworks.com/luna/>.
- [107] Kubi. <http://kubi-robot.com/>.
- [108] iRobots Ava. <https://telepresencerobots.com/robots/irobot-ava-500>.
- [109] Irene Rae, Bilge Mutlu, and Leila Takayama. Bodies in motion: Mobility, presence, and task awareness in telepresence. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pages 2153–2162, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [110] Akira Hayamizu, Michita Imai, Keisuke Nakamura, and Kazuhiro Nakadai. Volume adaptation and visualization by modeling the volume level in noisy environments for telepresence system. In *Proceedings of the Second International Conference on Human-agent Interaction*, HAI '14, pages 67–74, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [111] Taskrabbt. <https://www.taskrabbt.com/>.

- [112] Fiverr. <https://www.fiverr.com/>.
- [113] K. Goldberg, D. Song, Y. Khor, D. Pescovitz, A. Levandowski, J. Himmelstein, J. Shih, A. Ho, E. Paulos, J. Donath, U. Berkeley, and J. Donath Mit. Collaborative online teleoperation with spatial dynamic voting and a human "tele-actor". In *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1179–1184, 2002.
- [114] Omnipresenz. <http://www.omnipresenz.com/>.
- [115] Amazon Mechanical Turk. <https://www.mturk.com/>.
- [116] 八谷和彦. 視聴覚交換マシン, 1993.
- [117] Jun Nishida, Hikaru Takatori, Kosuke Sato, and Kenji Suzuki. Childhood: Wearable suit for augmented child experience. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '15, pages 7:1–7:1, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [118] BeAnotherLab. The machine to be another, 2014.
- [119] Domna Banakou, Parasuram D. Hanumanthu, and Mel Slater. Virtual embodiment of white people in a black virtual body leads to a sustained reduction in their implicit racial bias. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10:601, 2016.
- [120] 平野啓一郎. 私とは何か 「個人」から「分人」へ. 講談社現代新書, 2012.
- [121] Jennifer G Sheridan, Alan Dix, Simon Lock, and Alice Bayliss. Understanding interaction in ubiquitous guerrilla performances in playful arenas. In *People and Computers XVIII Design for Life*, pages 3–17. Springer, 2005.
- [122] Tatsuo Yotsukura, Shigeo Morishima, Frank Nielsen, Kim Binsted, and Claudio Pinhanez. Hypermask—projecting a talking head onto a real object. *The Visual Computer*, 18(2):111–120, 2002.
- [123] P. Lincoln, G. Welch, A. Nashel, A. Ilie, A. State, and H. Fuchs. Animatronic shader lamps avatars. In *2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 27–33, Oct 2009.
- [124] Amit Bermanto, Philipp Brüscheiler, Anselm Grundhöfer, Daisuke Iwai, Bernd Bickel, and Markus Gross. Augmenting physical avatars using projector-based illumination. *ACM Trans. Graph.*, 32(6):189:1–189:10, November 2013.

- [125] Karl Willis, Eric Brockmeyer, Scott Hudson, and Ivan Poupyrev. Printed optics: 3d printing of embedded optical elements for interactive devices. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pages 589–598, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [126] B. H. Thomas. Minimal social weight user interactions for wearable computers in business suits. In *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '02, pages 57–, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [127] Cagatay Basdogan, Chih-Hao Ho, Mandayam A. Srinivasan, and Mel Slater. An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 7(4):443–460, December 2000.
- [128] Hideyuki Nakanishi, Kazuaki Tanaka, and Yuya Wada. Remote handshaking: Touch enhances video-mediated social telepresence. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pages 2143–2152, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [129] Alberto Gallace and Charles Spence. The science of interpersonal touch: An overview. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(2):246 – 259, 2010. Touch, Temperature, Pain/Itch and Pleasure.
- [130] Osamu Morikawa and Takanori Maesako. Hypermirror: Toward pleasant-to-use video mediated communication system. In *Proceedings of the 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, CSCW '98, pages 149–158, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [131] Osamu Morikawa, Sayuri Hashimoto, Tsunetsugu Munakata, and Junzo Okunaka. Embrace system for remote counseling. In *Proceedings of the 8th International Conference on Multimodal Interfaces*, ICMI '06, pages 318–325, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [132] Scott Brave and Andrew Dahley. intouch: A medium for haptic interpersonal communication. In *CHI '97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '97, pages 363–364, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [133] BJ Fogg, Lawrence D. Cutler, Perry Arnold, and Chris Eisbach. Handjive: A device for interpersonal haptic entertainment. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, pages 57–64, New York, NY, USA, 1998. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

- [134] Masahiro Furukawa, Hiroyuki Kajimoto, and Susumu Tachi. Kusuguri: A shared tactile interface for bidirectional tickling. In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference, AH '12*, pages 9:1–9:8, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [135] Florian 'Floyd' Mueller, Frank Vetere, Martin R. Gibbs, Jesper Kjeldskov, Sonja Pedell, and Steve Howard. Hug over a distance. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '05*, pages 1673–1676, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [136] H. Hashimoto and S. Manoratkul. Tele-handshake through the internet. In *Robot and Human Communication, 1996., 5th IEEE International Workshop on*, pages 90–95, Nov 1996.
- [137] Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka, and Hideyuki Nakanishi. Embodiment of video-mediated communication enhances social telepresence. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction, HAI '16*, pages 171–178, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [138] Chris Bevan and Danaë Stanton Fraser. Shaking hands and cooperation in tele-present human-robot negotiation. In *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, HRI '15*, pages 247–254, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [139] Juulia T Suvilehto, Enrico Glerean, Robin IM Dunbar, Riitta Hari, and Lauri Nummenmaa. Topography of social touching depends on emotional bonds between humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201519231, 2015.
- [140] Hideki Koike, Wataru Nishikawa, and Kentaro Fukuchi. Transparent 2-d markers on an lcd tabletop system. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '09*, pages 163–172, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [141] 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.
- [142] Masaaki Fukumoto and Yasuhito Suenaga. Fingering: A full-time wearable interface. In *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems, CHI '94*, pages 81–82, New York, NY, USA, 1994. ACM.

- [143] Liwei Chan, Rong-Hao Liang, Ming-Chang Tsai, Kai-Yin Cheng, Chao-Huai Su, Mike Y. Chen, Wen-Huang Cheng, and Bing-Yu Chen. Fingerpad: Private and subtle interaction using fingertips. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pages 255–260, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [144] Akira Ishii, Ipppei Suzuki, Shinji Sakamoto, Keita Kanai, Kazuki Takazawa, Hiraku Doi, and Yoichi Ochiai. Optical marionette: Graphical manipulation of human's walking direction. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pages 705–716, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [145] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Possessedhand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 543–552, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [146] Pedro Lopes, Doaa Yüksel, François Guimbretière, and Patrick Baudisch. Muscle-plotter: An interactive system based on electrical muscle stimulation that produces spatial output. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pages 207–217, New York, NY, USA, 2016. ACM.

業績リスト

博論の骨子になる主要論文

Journal **【Recommended Paper】**

顔スクリーンを持つテレプレゼンスシステムの提案とその効果の検証

- Kana Misawa, Yoshio Ishiguro, Jun Rekimoto. LiveMask: A Telepresence Surrogate System with a Face-Shaped Screen for Supporting Nonverbal Communication, 情報処理学会論文誌, vol.54, no.4, 2013.
DOI <http://dx.doi.org/10.2197/ipsjjip.21.295>

Full paper

肩乗せ型コミュニケーションデバイスにおける小型顔スクリーンの視線検証

- Kana Misawa, Yoshio Ishiguro, and Jun Rekimoto. Ma petite chérie: What are you looking at?: A small telepresence system to support remote collaborative work for intimate communication. In Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference (AH '12). ACM, New York, NY, USA, 17:1-17:5 , 5 pages.
DOI=10.1145/2160125.2160142

Full paper **【honorable mention (3%)】**

代理人を用いた仮面型テレプレゼンスシステムを用いた使用者と代理人の使用評価

- Kana Misawa and Jun Rekimoto. Wearing another's personality: a human-surrogate system with a telepresence face. In Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC '15). ACM, New York, NY, USA, 125-132. 8 pages.
DOI=10.1145/2802083.2808392

Full paper 【Best student award nominee】

代理人を用いた遠隔握手の検証

- Kana Misawa, Jun Rekimoto. Who am I Touching?: User Study of Remote Handshaking with a Telepresence Face. In Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction(HAI '16). ACM, New York, NY, USA, 163-170. 8 pages.
DOI=10.1145/2974804.2974821

その他国際学会査読付き論文

Short paper

顔スクリーンを持つテレプレゼンスシステムの提案とその効果の検証

- Kana Misawa, Yoshio Ishiguro, and Jun Rekimoto. LiveMask: a telepresence surrogate system with a face-shaped screen for supporting nonverbal communication. In Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '12). ACM, New York, NY, USA, 394-397. 4 pages.
DOI=10.1145/2254556.2254632

Open review paper

仮面型テレプレゼンスシステムの提案と検証

- Kana Misawa and Jun Rekimoto. ChameleonMask: Embodied Physical and Social Telepresence using Human Surrogates. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '15). ACM, New York, NY, USA, 401-411. 10 pages.
DOI=10.1145/2702613.2732506

Demo paper

- Kana Misawa and Jun Rekimoto. ChameleonMask: Embodied Physical and Social Telepresence using Human Surrogates. In SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies (SA '15). ACM, New York, NY, USA , 3 pages.
DOI=10.1145/2818466.2818473

国内学会査読付き論文

Long paper

- 三澤 加奈, 石黒 祥生, 暦本 純一. LiveMask : 立体顔形状ディスプレイを用いたテレプレゼンスシステムにおけるコミュニケーションの評価, インタラクション 2012, pp.41-48, 2012

Long paper 【最優秀論文賞、発表賞受賞】

- 三澤 加奈, 暦本 純一. ChameleonMask : 人の存在感を提示する仮面型テレプレゼンスシステム, インタラクティブシステムとソフトウェアに関わるワークショップ 2015