

身体性の拡張に着目した
創出的コミュニケーション支援に関する研究

Study on Creative Communication Support Focused on
Expansion of Embodiment

2014 年 2 月

渡辺 貴文

Takabumi WATANABE

身体性の拡張に着目した
創出的コミュニケーション支援に関する研究

Study on Creative Communication Support Focused on
Expansion of Embodiment

2014 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

渡辺 貴文

Takabumi WATANABE

目次

第 1 章	序論	1
1.1.	はじめに	1
1.2.	研究背景	1
1.2.1.	情報通信技術における身体性の欠如	1
1.2.2.	身体性に関する従来研究	4
1.3.	研究目的	12
1.4.	研究手法	14
1.4.1.	道具の影に着目した遠隔への身体性拡張	14
1.4.2.	手合わせ表現に着目した遠隔の他者への身体性拡張	15
1.5.	本論文の構成	17
第 2 章	道具の影による身体性とその評価	21
2.1.	はじめに	21
2.2.	道具のバーチャル影の呈示システム	21
2.2.1.	バーチャル影のデザイン	21
2.2.2.	設計要件	22
2.2.3.	投影型 AR によるバーチャル影呈示システム	23
2.2.4.	呈示システムの動作	26
2.3.	Cross-modal interference に着目した身体性の評価	27
2.3.1.	Cross-modal interference について	27
2.3.2.	Cross-modal interference 実験システム	29
2.3.3.	実験方法	31
2.3.4.	実験結果	33
2.3.5.	考察	34
2.4.	まとめ	35

目次

第 3 章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援..... 37

3.1.	はじめに.....	37
3.2.	遠隔映像空間におけるバーチャル影共有システム.....	37
3.2.1.	設計要件.....	37
3.2.2.	テーブル接合型空間共有技術	39
3.2.3.	バーチャル影の共有システム	41
3.3.	バーチャル影の共有範囲.....	44
3.3.1.	共有可能な行為の空間的範囲	44
3.3.2.	共有可能な行為の種類	46
3.4.	遠隔地でのインタラクションにおける身体性の拡張評価.....	48
3.4.1.	実験方法.....	48
3.4.2.	実験結果.....	50
3.4.3.	考察.....	52
3.5.	まとめ	53

第 4 章 手合わせ表現における身体動作の計測システム..... 55

4.1.	はじめに.....	55
4.2.	手合わせ表現の動作自由度の制限.....	55
4.2.1.	手合わせ表現の動作的特徴	55
4.2.2.	動作自由度の制限機構の設計指針と要件.....	57
4.2.3.	手合わせ表現の動作制限装置	60
4.3.	計測対象と計測システム.....	61
4.3.1.	計測対象の選定.....	61
4.3.2.	計測システム	63
4.4.	システムの評価	70
4.4.1.	熟練者の主観による評価.....	70
4.4.2.	初心者と熟練者による手合わせ表現.....	71
4.5.	まとめ	73

第 5 章 身体性に着目した手合わせ表現の計測..... 75

5.1.	はじめに.....	75
5.2.	手合わせ表現における表面筋電図の計測.....	75
5.2.1.	リード・フォロー動作における筋電図.....	75
5.2.2.	役割を固定した手合わせ表現における筋電図.....	80
5.2.3.	役割を固定しない手合わせ表現における筋電図.....	83
5.2.4.	身体性を捉える身体動作計測手法の検討.....	83
5.3.	手合わせ表現における身体動作計測.....	85
5.3.1.	計測手法.....	85
5.3.2.	1人での表現における身体動作.....	85
5.3.3.	2人での表現における身体動作.....	88
5.3.4.	手の動きの振幅と周期の変動.....	92
5.3.5.	熟練者と初心者のペアの手合わせ表現の計測.....	94
5.4.	まとめ.....	96

第 6 章 手合わせ表現に着目した創出的コミュニケーションの遠隔支援..... 99

6.1.	はじめに.....	99
6.2.	手の動作に着目した遠隔手合わせ表現システム.....	99
6.2.1.	設計指針と要件.....	99
6.2.2.	ハードウェア.....	100
6.2.3.	身体動作計測部.....	102
6.2.4.	位置・力並列型バイラテラル制御.....	104
6.2.5.	システムの評価.....	105
6.3.	COP 情報に着目した遠隔手合せ表現システム.....	107
6.4.	遠隔手合わせ表現実験.....	109
6.4.1.	実験方法.....	109
6.4.2.	実験結果.....	110
6.5.	考察.....	113
6.6.	まとめ.....	115

目次

第 7 章	結論	117
7.1.	本論文の結論.....	117
7.2.	提案手法に関する考察	121
7.2.1.	道具のバーチャル影のはたらき	121
7.2.2.	COP 情報呈示のはたらき	122
7.2.3.	提案手法のまとめ	123
7.3.	今後の課題と展望.....	125
参考文献	129	
謝辞	136	
研究業績	137	
著者紹介	143	

第1章 序論

1.1. はじめに

近年の情報通信技術（ICT：Information and Communication Technology）の発達やソーシャルメディアの登場により、いつでも、どこでもコミュニケーションを行うことや、地理的に離れた場所の間で共同作業を行うことが可能になった。しかしながら、既存の遠隔コミュニケーションシステムでは同じ場所に身体が居合わせるときのように、身体の働き（身体性）を介してコミュニケーションを行うことが難しく、双方の間で状況を十分に共有できないことや、一体感^{※1}や共存在感^{※2}が生まれるような関係を創りにくいことなどの問題が生じる。そこで、本研究では、このような身体性が遠隔の空間や遠隔の他者に拡張されるような技術の設計手法を提案し、創出的なコミュニケーションを支援することを目指す。

本章では、本研究が要請される社会的な状況と ICT に身体性を取り込むことの意義について述べる。また身体性およびその拡張に関する知見と課題についてまとめ、本研究の位置づけと学術的な新規性、および研究手法について説明する。

1.2. 研究背景

1.2.1. 情報通信技術における身体性の欠如

携帯電話やインターネットなど、情報を伝達し共有する技術が広く一般に普及している。政府の調べによれば、携帯電話の世帯普及率は 90%を超え、また、インターネット世帯利用率もここ数年は 90%前後を推移している[1]。また最近では、スマートフォンの登場により、いつでもどこでもインターネットに接続できる環境が整備されてきた。このような状況において、Facebook[2]、mixi[3]に代表されるソーシャルネットワーキングサービス（SNS: Social Networking Service）や Twitter[4]などのミニブログ、共有の仮想空間において作業や行動を共に行うメタバース[5]、MMO

※1 本研究では双方の間で「私たち」として感じられるつながりの感覚を指すことにする。ただし、「私」という個の感覚が失われているわけではない。

※2 同じ場所に共に存在している感覚

(Massively Multiplayer Online) ゲーム[6]など、不特定多数のユーザーの間でコミュニティを作り、情報を共有するソーシャルメディアが数多く登場し、広く利用されている。

一方で、既存のソーシャルメディアにおいては、さまざまな社会的問題が生じている。例えば、ウェブ上の特定の対象に対して批判が殺到し、収まりがつかないようなことを意味する「炎上（した・している）」と呼ばれる現象が頻繁に発生している[7]。キャス・サンスティーンは、インターネットはきわめて短期間かつ大規模に同様の意見・感想を持つ者同士を結びつけることができるメディアであるとし、その一方で、議論はしばしばもともとの主義主張から極端に純化・先鋭化した方向に流れ（これをサイバーカスケードと呼んでいる）、異質な者を排除する傾向を持ちやすくなるため、特定の個人が、非常に多数の者から攻撃を受けるという事態に発展する事があることを指摘している[8]。また、「SNS 疲れ[9]」「LINE 疲れ[10]」など、ソーシャルメディアに対して疲労感を覚えるといった声が聞かれる。SNS は自身のコメントに対する評価や、他者のやり取りが明示的に表示されるため、自身の発言に対する反応を過剰に気にしたり、知人の発言に返答することに義務感を感じたりする人が多いといわれる。それにより、SNS に長時間張り付くことになり、精神的・肉体的疲労が生じてしまうのである。一方で、いわゆるネット依存[11]やネトゲ廃人[12]と呼ばれるようなインターネットに過度に依存してしまう人も多く、日常生活に支障をきたし、場合によっては、過労死や自殺につながるケースも散見される。

これらの諸問題の一因として、既存の ICT における「身体性」の希薄化が指摘されている。私たちは身体がその場所に存在することで、身体の働きを通じて周囲の状況を感じ捉えたり、個物が身体の一部になる感覚や、他者との一体感や共存在感を感じたりできるような関係を創り出すことができる。本論文ではこのような身体の働きを「身体性」と呼ぶことにする。西垣は「私（自己）」の特性に着目し、以下のような記述を行っている[13]。「私（自己）」は意識的な存在であり、名前や経歴、職業などの社会的プロフィールで記述され、理性に基づき合理的な推論を行うことができる「言語的な自己」と、半ば無意識的な存在であり自分がどういう身体的な状況にあり、何を知覚しどういう気分であるかなどの体験についての、直感的印象のまとまりで、感情の源泉をなす「身体的な自己」に大別できるとした。後者の「身体的な自己」とは本研究での身体性の意味に近い。そして西垣は、現代の情報社会では特に

第1章 序論

言語的自己が肥大し、身体的自己が縮小することによって両者のバランスが崩れていると指摘している。同様の指摘は西垣以前にも清水や三輪らによって行われている[14][15]。

既存の ICT において、言語的自己が肥大してしまうのは、ICT におけるコミュニケーション支援システムの設計手法そのものに原因があると考えられる。ほとんどのシステムでは、文字情報や音声、映像といった情報を明示的に伝達する手法が採られている。ここで、送られてきた情報に対して、受信者がどのような意味づけを行うかは、受信者に委ねられることになるが、明示的に送られた情報のみによるコミュニケーションは、同じ場所に身体が居合わせて行うコミュニケーションとは、身体的な自己の関わり方が異なるため、意味の取り違いや誤解が生じやすくなる。また、このようにして明示的に呈示される自己に関する情報は、異質な他者と自身との差異を際立たせるものであり、つながりを創ることを阻害することがあると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、周囲の状況を捉えたり、個物や他者との関係性を創り出したりするような身体性を創出して行うコミュニケーションを「創出的コミュニケーション」と呼ぶことにし、これを遠隔地間で技術的に支援することを目指す。そのためには身体性が遠隔の空間や、遠隔の他者にまで拡張されるような技術が必要となるため、その具体的な設計手法について研究することにした。

なお、コンピュータネットワークや音声・実画像通信を利用して共同作業やコミュニケーションを支援する CSCW (Computer Supported Cooperative Work) 分野などにおいては、視線やジェスチャや指さし、身体配置などのコミュニケーションにおける身体的なリソースとしての身体のはたらきを「身体性」と呼んで、これを遠隔地間で空間的な整合性をもって共有し、共同作業を行いやすくする研究が進められている。代表的なものとして、小型のテレビ会議端末を人数分用意して自分の前に配置することで、視線の一致を実現した Hydra[16]、再帰性反射スクリーンを利用して多人数の対話における視線の一致を実現した MultiView[17]、ロボットを利用して指さしや視線、身振りなどの遠隔共有を実現した Gesture Cam[18]や Mebot[19]、TEROOS[20]などが挙げられ、その他数多くのシステムが提案されている。しかしながら、これらのシステムは、身体的なリソースを明示的に双方向に通信するものであって、身体が同じ場所に居合わせている時とは、身体的なリソースに対する注意の向け方や強さが異なる。このことにより、身体が居合わせている時のような双方の関係を創りにくくなると考えられる。ドレイファスは、事物と人々に対するリアリティの

感覚と、それらと有効に相互作用する能力が、バックグラウンドで暗黙のうちに機能する身体のはたらきに依存していることを指摘し、高解像度の画像や、多様なフィードバック・チャンネルやそれらの情報の整合性を実現するテクノロジーでは、これを補うことができず、身体そのものがその場所に居合わせていなければならないことを指摘している[21].

1.2.2. 身体性に関する従来研究

本研究では、ICT に身体性を取り込むために、身体性によって、身体と道具が一体化して、あたかも道具が身体の一部のように感じられたり、他者との間に一体感や共存在感が創出したりする現象に着目する. このような現象を遠隔地間においても生じさせることができれば、同じ場所に身体が居合わせている時のような身体性を遠隔の空間や他者にまで拡張できると考えられる. 以下にそれぞれの現象について説明する.

道具を使用する際、道具が身体化するような身体性が生じることについては、古くから様々な分野で指摘されている. 例えば脳科学者の H. Head は自己の身体の姿勢や運動や位置の認知を、道具の先端に向かって投射することができると述べている[22]. また哲学や現象学の分野では、ポランニーが洞窟探検者の探り棒の例を[23]、市川が医者ゾンデや盲人の杖の例を挙げ[24][25]、道具の使い初めにおいてはそれを握った手に生じた感覚が、道具を使うのに慣れるにつれ道具の先から感覚が生じるようになると指摘している. また、ハイデガーが金槌で無心に叩いているときには、金槌はほとんど意識に上らず、打ち損じたときに意識に立ち上がることを指摘している[26]. このように道具使用においては、道具の先から感覚が生じるとともに、身体同様道具そのものには注意を向けずに操作することができる.

また、他者とも身体が一体となるような身体性が生じることを私たちは経験的に知ってしている. 例えば集団で行うスポーツや即興的^{※3}な身体表現においては、目まぐるしく変化する状況に対して、集団であるまとまった対応をすることが要求される. この際、集団を構成する個人が他の個人を単なる対象として捉えるのではなく、集団として状況を把握し、集団としてまとまった行動をとることができる. このとき、集団が全体で一つの身体を為していると考えてもよいと思われる. またその際には一体

※3 あらかじめシナリオや役割が決まっていない状況において振る舞うことを「即興」と呼ぶことにする. 清水は人間が無限定な未来に向かって生きることを一種の「即興劇」と見立てている. 「即興劇」はシナリオの決まっていないドラマであり、そのドラマが始まる前には役者の間の関係は決まっておらず、どのような役を演じることができる状態であると述べている[15]

第1章 序論

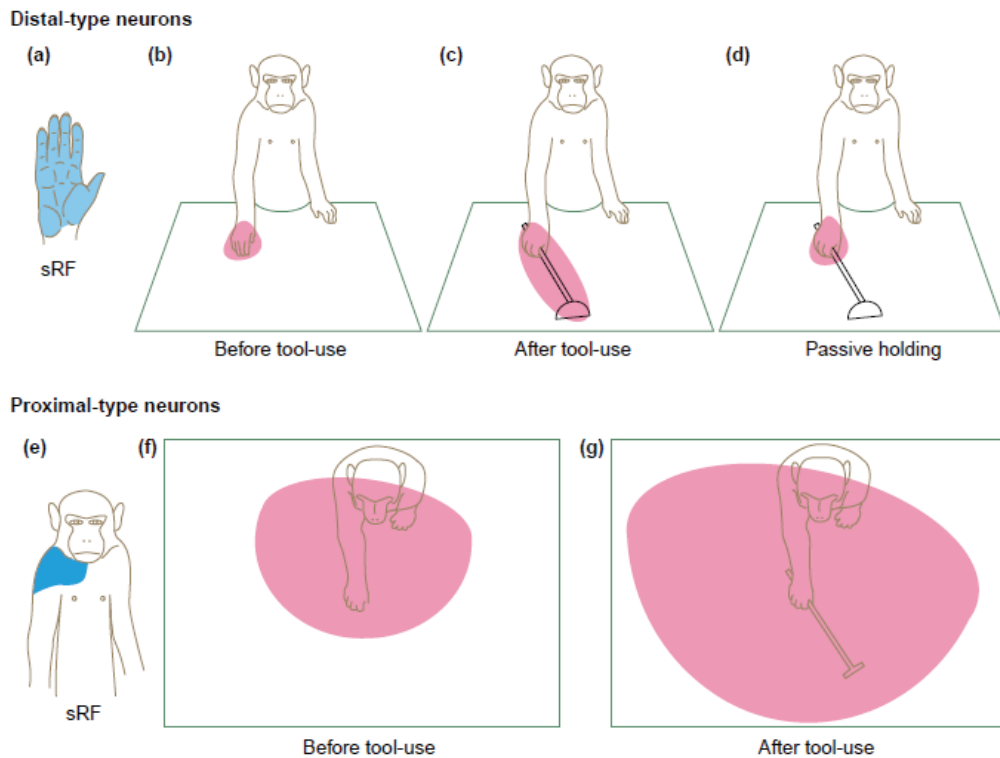
感や共存在感といった感覚が生起する。

そこで、以下に人工物を身体化する身体性や、他者との身体的な関係性を創出する身体性についての科学的、工学的知見についてまとめ、遠隔の空間や他者に身体性を拡張するための手掛かりや、本研究における課題について明らかにする。

1.2.2.1. 人工物の身体化に関する研究

身体が身体外部の物体に移るような感覚が生じる現象として、ラバーハンドイリュージョン (RHI) [27]が有名である。これは、ゴムの手を自分の手の隣に同じ向きで並べて置き、自分の手だけを見えないように隠した状態でゴムの手と自分の手に同期させた触刺激を与えると、ゴムの手の方を実際の自分の手であると錯覚してしまう現象である。またこの RHI は腕など一部の身体のみならず全身でも生じるとの報告もある[28][29]。ゴムの手に刺激が与えられている様子（視覚情報）と、自身の手に与えられる触刺激（視覚情報）が時間的に同期することが、RHI の成立にとって必要条件であることは多くの研究で示されているが、十分条件であるかどうかは議論が続いている[30]。Armél & Ramachandran の研究では、視触覚の同期した刺激を与えることで、実際の身体形状とは一致しない 2m のラバーハンドや、机などに対してまで RHI が生じることを報告した[31]。これに対し、Takiris, Haggard は、実際の手とラバーハンドの角度や左右が異なる場合や木の棒に対しては RHI が生じないことを示した[32]。さらに、人差し指と薬指の両方に刺激を与えた場合、刺激されていない中指も含めて RHI が生じることを明らかにした。このことは RHI が視触覚刺激を与えた局所において生じるのではなく、被験者がもともと有していた手全体の形状や配置などの情報（身体図式[22]）が関与することを示していると考えられる。

以上のように、RHI では、被験者がもともと有していた身体図式が、実験者により外部から受動的に与えられる視覚情報と触覚情報によって遷移すると考えられる。一方で、遠隔の空間に身体性を拡張するためには、物理的形状の異なる身体外部の人工物があたかも自身の身体であるかのように感じられる現象に着目する必要がある。そこで、道具の身体化に関する知見に着目した。道具の身体化に関する神経生理学的な知見として、Iriki らの研究が挙げられる。Iriki は通常、道具を使用しないといわれるニホンザルに対し、熊手状の道具を介して餌をとる訓練を施し、道具使用時における脳活動を侵襲的な手法により計測した[33][34]。その結果、手の位置における触覚



A. Maravita, A. Iriki: Tool for body (schema), Trends in Cognitive Sciences, Vol.8 No2, pp.79-86 (2004). より

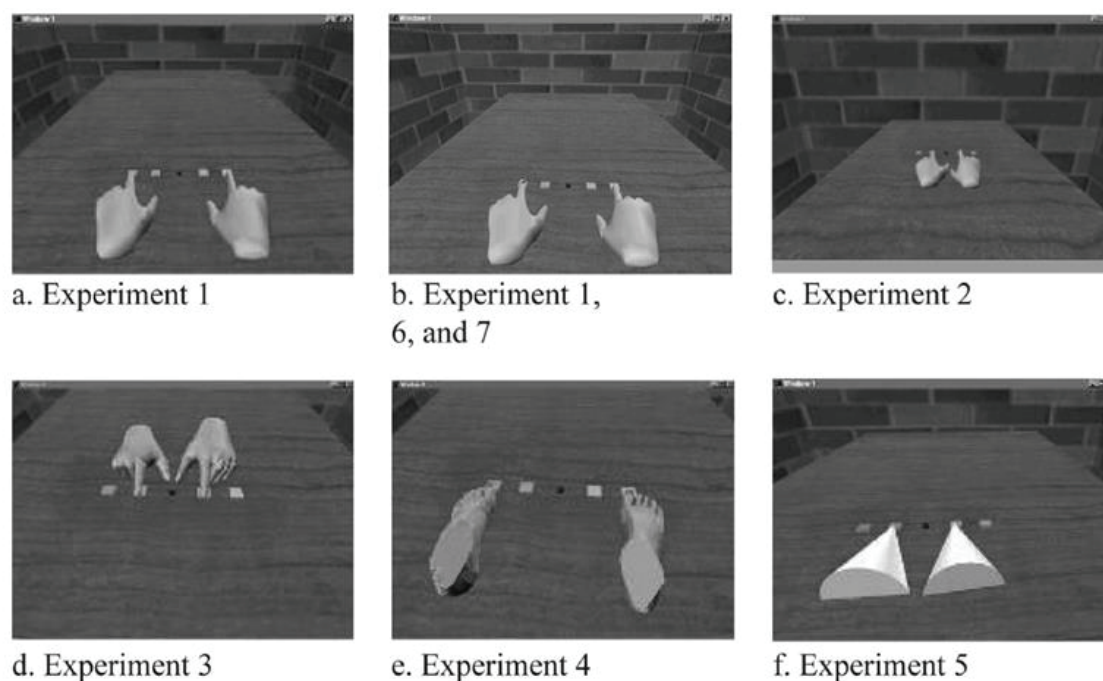
図 1.1 サルの道具使用における身体性

Figure1.1 Monkey's body (schema) expanded to tool by tool-use

刺激と視覚刺激の両方に反応して活動する **Bimodal** ニューロンが、熊手状の道具を使用した直後においては、熊手の先端位置への視覚刺激に対しても活動を示すことが分かった(図 1.1)。一方で、道具を使用せずにただ把持している時には、熊手の先端位置への視覚刺激に対する **Bimodal** ニューロンの反応がないことが分かった。このことは、道具使用によって道具が身体化している可能性を示しているとともに、身体の形状と異なる人工物が身体化されるには、人工物に対する能動的な操作が必要になることを示唆している。

Short らは、バーチャルリアリティ (Virtual Reality, 以下 VR) 環境を利用して、バーチャルな身体を自身の身体と捉えるために必要な要因を調べた[35]。具体的には、ヘッドマウントディスプレイによって被験者に呈示するバーチャル空間に手を再現し、このバーチャルな手が被験者の実際の手の動きと同じように時間遅れなく動くシステムを用いて以下の実験を行った。図 1.2 に示すように、被験者から見て自身の手と同じ位置にバーチャルな手を呈示する場合、前方の遠くにバーチャルな手を配置する場合、鏡のように向かい合ってバーチャルな手を配置する場合、手の形状とは違う

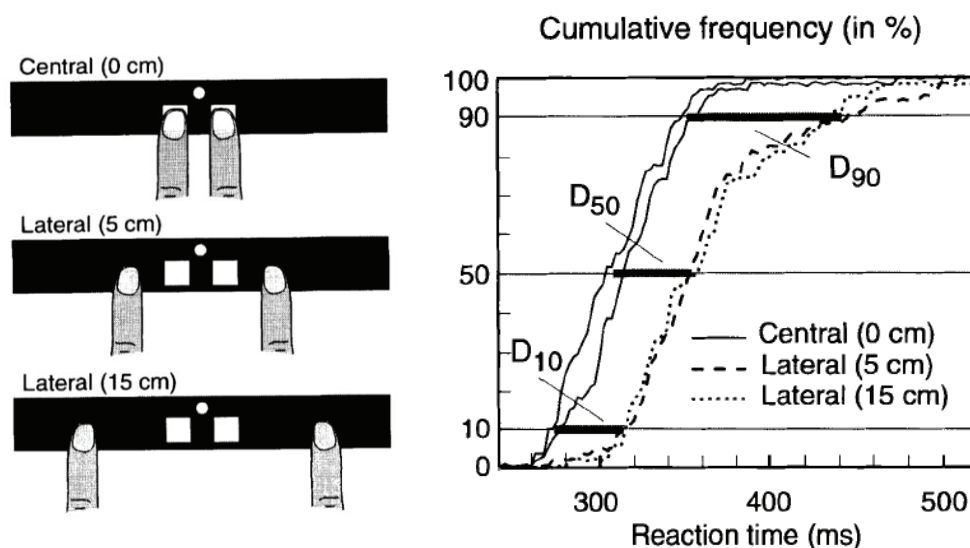
第1章 序論



Short, F., Ward, R.: Virtual Limbs and Body Space: Critical Features for the Distinction Between Body Space and Near-Body Space. *Journal of Experimental Psychology; Human Perception and Performance*, 35, 4, pp.1092-1103. (2010)より抜粋

図 1.2 Short らの VR を活用した身体性に関する研究

Figure1.2 Short's study on embodiment by use of VR



Hari, R., & Jousmaki, V.: Preference of personal to extrapersonal space in visuomotor task; *Journal of Cognitive*, (1996). より抜粋

図 1.3 Hari による身体上の視刺激と運動反応に関する研究

Figure1.3 Hari's study on visuomotor task in personal space

物体を呈示する場合、同じ手の形をしていても実際の被験者の手と違う動きをさせる場合などを比較し、どの条件においてバーチャルな身体を自身の身体と捉えているかを実験心理学的に調べた。評価の手法として、**Hari** らが提案している実験パラダイム[36]を用いている。これは、図 1.3 に示すように自己の身体上から呈示される視覚刺激（光刺激）に対する検出（指動作による応答）が、自己の身体外から呈示された場合よりも早くなるというものである。すなわち、バーチャルな手上から呈示される視覚刺激に対する反応時間によって、そのバーチャルな手を自身の身体として捉えているかどうかを評価した。その結果、同じ手の形をしていても実際の被験者の手と違う動きをさせた場合のみ、バーチャルな手に呈示される視覚刺激に対する反応時間の短縮が見られなかった。また、各条件におけるバーチャルな手が自分の手と感ずるかということに関する主観アンケート調査と、視覚刺激への反応時間の短縮率との相関を見たところ、両者の間には正の相関が見られた。

以上の結果より、身体の形状とは違う人工物を自身の身体と捉えるためには、対象の能動的な操作とそれに対する感覚フィードバックの時間的整合性が重要な働きを担っていると考えられる。また、バーチャルな身体においても実際の手と同様の現象が生じたことは、映像で構成されたバーチャルな身体においても身体感覚が生じうること示している。

対象に対する能動的な操作とそれに対する感覚情報の整合的なフィードバックによって、VR 環境におけるバーチャルな身体や道具に対して身体感覚を生起することの試みは **Short** ら以外にもいくつか報告されている。**Slater** らは VR 空間に被験者の腕よりも長く、被験者の腕の動きと連動して動くバーチャルな腕を投影し、バーチャルな手でバーチャル空間の個物を触れた際に、被験者の手に対して触刺激を与えたところ、被験者の腕よりも長いバーチャルな腕が、あたかも被験者自身の腕のようになる感覚が生じることを報告している[37]。また、**Moizumi** らは、VR 空間上にスティラスで操作可能なバーチャルな道具を呈示し、それと合致する力覚のフィードバックを被験者の手に与えたところ、北澤らが報告した手や道具をクロスさせて与えた触刺激の時間順序判断の逆転現象が[38][39]、このバーチャルな道具をクロスさせた際にも生じるようになったことを報告した[40]。さらに、**Jiménez** らは、自身が能動的に机を叩いたときに生じる音を、実際に聞こえる場所より遠くから聞こえるようにすることで、机を叩いた腕が、実際の腕よりも長くなるような感覚が生じることを発見

第1章 序論

した[41]. Jiménez らの報告は、聴覚情報も身体感覚の生成に影響を及ぼすという発見に加え、能動的な動作とそれに関連した時間的に整合な感覚のフィードバックが身体感覚の生成において重要であることを支持している.

Gallagher[42]は、「そこ行為を引き起こしたのは私である」という感覚である *sense of agency* (運動主体感, 自己主体感, 以下 SoA) と、「その身体は自分のものである」という感覚である *sense of ownership* (身体所有感, 自己所有感, 以下 SoO) という概念を提案した. RHI の研究は, SoO に関する錯覚であり, 対象に対する能動的な操作とそれに対する視覚情報や触覚情報の整合的なフィードバックは SoA に関係していることが分かりつつある[43]. 一方で, SoO や SoA は区別されながらも, 両者は密接に関わり合っている. 上述した Short らが行ったバーチャルな手に対する主観アンケートは[35], まさにこの SoA と SoO に関するものであったが, 視覚刺激への反応時間の短縮率と両方の質問項目に対する評価との正の相関が認められている. すなわち, 能動的な操作とそれに対して時間的に整合する感覚情報のフィードバックは, SoA だけを独立して高めるのではなく, SoO にも影響を及ぼしている.

一方, Berti らは右脳に損傷を受け身体の近傍空間 (*peri-personal space*, 手の届くと見なす範囲) のみ左半側無視が生じる患者に見られた興味深い現象を報告している[44]. この患者は紙に書かれた線分の中央を手で指さそうとすると半側無視の影響で中央より右側を指してしまう. また手が届かない 1m 先の壁に貼られた紙に描かれた線分の中央を棒状の道具を用いて指そうとすると, 同様に左半側無視が生じ, 中央より右側を指した. 一方で, レーザーポインタを用いた場合では正確な指示が遂行された. このことは, 実体を持つ棒状の道具によって, 身体近傍空間が広がるのに対し, レーザーポインタによる映像の点を操作するだけでは身体近傍空間が広がらなかったことを意味している. したがってこの結果は, 操作する身体と指示の対象点との間のデザインが, 道具と身体の間関係を強める上で重要であることを示唆している.

以上まとめると, 人工物を身体化する身体性を生じさせるには, 能動的な操作とそれに対して時間的に整合する感覚情報のフィードバックだけでなく, 操作する身体と指示の対象点との間のデザインが重要である. しかしながら, どのようなデザインやメディアが有効であるかは明らかになっていない. また映像空間に呈示した人工物の身体化に関する研究は, 3 次元的な CG (Computer Graphics) 空間に呈示した CG の個物に対するものが多く, 遠隔の空間に呈示した人工物が身体化する身体性の拡張

手法についてはほとんど取り組まれていない。

1.2.2.2. 他者との身体的な関係性に関する従来研究

Petkova らは、一方の被験者が頭部にカメラを装着し、他方の被験者がこの映像をヘッドマウントディスプレイ (HMD) によって見ながら握手をしてもらったところ、自身の身体と他人の身体が入れ替わるような感覚が創出することを報告している[45]。これは握手をする際に、視覚情報と触覚情報が同期して与えられることによって、RHI 現象が他者の身体に対して生じていると考えられている。しかしながら本研究で着目するのは、一体感や共存在感を生み出すような身体性であり、このような自身の身体と他人の身体が入れ替わってしまう現象とは異なるものである。

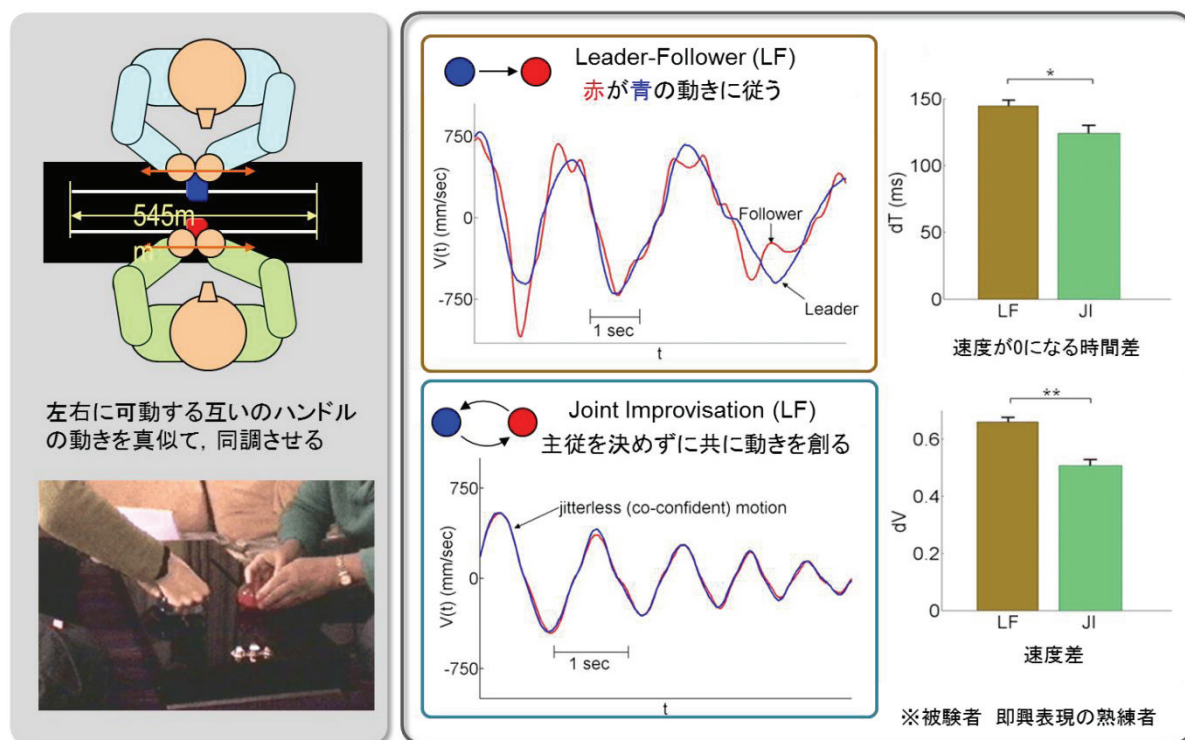
一方、コミュニケーションにおける 2 者の身体的な関係を科学的・工学的に調べた研究はこれまでに数多くなされている。例えば、対話などにおいて、身体動作や呼吸などが無意識のうちに同調する「エントレインメント」に関する一連の研究が挙げられる。Condon や小林らによって、母と子（新生児）間におけるコミュニケーションにおいて、母親の語りかけの抑揚や発声の ON-OFF のタイミングと、新生児の身体各部の運動の生成タイミングが合うことが報告されている[46][47]。また、渡辺らは成人間の会話において発話に対してうなずきが引き込むことを計測、解析にて捉え[48]、これを遠隔地間における円滑なコミュニケーションの支援に活用した[49][50]。一方、本研究では、複数人全体で状況を捉え、一つの身体のように振る舞うことができるとともに一体感や共存在感を生み出すような身体性に着目する。したがって、この問題を端的に扱うには、会話など話し手と聞き手が交互的に入れ替わるコミュニケーションよりも、身体表現などのように、即興性が高く、身体が同時的かつ直接的にインタラクションを行うようなコミュニケーションを対象とする必要があると考えられる。

板井らは自他の間で時空間的な間合いを生成するコミュニケーションにおいてエントレインメントがどのような特性を有するかを、先行的な身体リズムを取り出すことが可能な独自のコントローラによるアバタ操作システムと剣道タスクを開発することで調べた。その結果、時空間的な間合いが生成する際には、コントローラによって取り出したリズムにおいて多様な周期でのエントレインメントが創出することを発見し[51][52]、これが人間の身体によって創り出されるソフトインタフェースの自他間における柔らかいコヒーレンス（ソフトエントレインメント）であることを考察

第1章 序論

した[53]. しかしながら, 板井の研究は, アバタを介したコミュニケーションを対象としており, 身体そのものを直接的に介したコミュニケーションではない.

一方で, 振付などの動き方やかつ双方の役割をあらかじめ決めない即興的な共同行為に関して人間同士を対象とした研究も行われつつある. L. Noy らは双方の行為を真似合うミラーゲームを対象として双方の動作の計測及びそのモデル化を行なっている[54]. この研究は図 1.4 に示すように, 自分側(手前)と相手側(奥)に平行に配置した左右1軸方向に動かすことが可能なハンドルを用いて, 相手と同じ動きを即興的に創るコミュニケーションタスクを調べたものである. 実験の結果, 即興的な表現活動(即興劇や即興音楽)を長年行っている表現者においては, リーダー, フォロワーの役割を決めて行う条件よりも, リーダー, フォロワーの役割を決めないで自由に行う条件の方が, 双方の間の動きのズレが小さくなることを発見した. 特に手の動きの速度が $0[\text{m/s}]$ となる時間を基準にして, 双方の動きの時間ズレを算出したところ, $40[\text{ms}]$ 以内に収まる時間ズレがしばしば観察された. この時間ズレは, 双方が互いの



L. Noya, et al.: The mirror game as a paradigm for studying the dynamics of two people improvising motion together, PNAS, (2011).

図 1.4 ミラーゲームに着目した即興的な共同行為に関する研究
Figure 1.4 Study on improvisational joint action focused on mirror game

動きを予測しければ実現できないほど小さいものであり、L. Noy らはこの結果やこの結果を再現するシミュレーションモデルを踏まえて、熟練者のペアは同時的に生成される予測的な情報が合致することで、双方が手の動きを即興的に創ることを可能にしていると論じている。この結果は、創出的なコミュニケーションにおいては、予測的な情報の合致が関わっていることを示唆するものである。しかしながら、このような予測的動きを含めた身体的な関係を直接的に捉えた研究例はなく、また遠隔地間のコミュニケーション支援への応用は行われていない。

本節の最後に、身体の直接的なインタラクションを遠隔で実現するコミュニケーション支援システムもいくつか提案されているのでその代表的なものについて記す。石井らは、手のひら転がすローラーの動きを伝え合う inTouch を提案している[55]。身体が直に触れる物理的実体を介して、力触覚情報を伝え合うことで、離れたところにいる使用者の存在を感じられるとしている。inTouch では、木製のローラーが入力デバイスであると同時にフォース・ディスプレイにもなっており、入力と出力の境界がまったく存在しない。このことにより、遠隔であたかも一つの道具を共有し、操作し合っているような感覚が創出する。また、上杉らはターンテーブル状の道具を遠隔の相手と共有し、相手とのつながり感を強化する共存在的メディアを提案している[56][57]。これは、道具の身体化のはたらきを活用することで、実体である道具と、映像や CG といったバーチャル空間内の人物や個物とを接続し、現場と現場を統合しようとするものである。また上杉らは、電話などの遠隔のコミュニケーションにおいて使用者が座っている回転椅子の動きを同期させることで、全身の動作を直接的に伝え合うシステムなども開発している[58]。以上に加え、遠隔地間で腕相撲や[59]、握手[60]などの身体の直接的なインタラクションを実現したシステムは数多く存在する。しかしながらこれらのシステムは、あくまで双方の身体の直接的なインタラクションを実現したに過ぎず、このシステムが双方の身体性にどのような影響を及ぼすかについて、計測などを用いて調べた研究はほとんど見当たらない。

1.3. 研究目的

本研究では、遠隔の空間や遠隔の他者に身体性を拡張し、創出的コミュニケーションを遠隔で支援する手法について研究する。具体的には大きく以下の二つの課題に取り組む。研究のイメージを図 1.5 に示す。

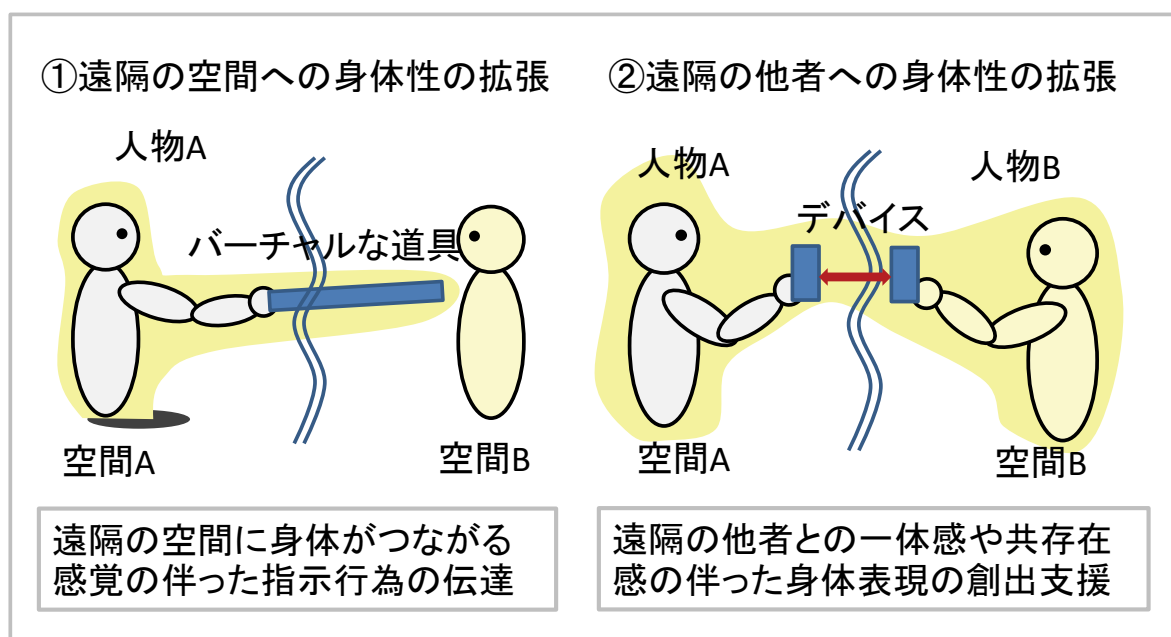


図 1.5 研究イメージ

Figure1.5 The goal of this study

- ① 遠隔の空間に身体が直接つながる感覚を生み出すような身体性の拡張によって、創出的コミュニケーションを支援する手法を提案，開発する．その方法として，映像呈示するバーチャルな道具を身体化する手法を実現し，これを指示行為など実現する遠隔映像コミュニケーションシステムに実装する．ここで，操作に対して単に空間的，時間的に整合な感覚情報をフィードバックするのではなく，後述するように，身体と非分離な影を活用したバーチャルな道具を提案，開発しその妥当性について検討する．また，提案したバーチャルな道具を介して遠隔の映像中にまで身体性を拡張するためのシステムを考案，開発し，身体性の拡張の効果を評価する．
- ② 遠隔の他者と一体感や共存在感を生み出すような身体性の拡張によって，創出的コミュニケーションを支援する手法を提案，開発する．そのために，即興的な身体表現を共に創り合うことと身体性を関連付けて研究する．そこでまずは，表現を創り合い，一体感や共存在感が生じる際の身体動作を計測し，両者の関係性について調べることにした．さらにこの計測結果から得られた知見をもとに，表現を共に創り合う際の身体性を遠隔において生成することで創出的コミュニケーションを支援することを試みる．

次節にそれぞれの研究手法について，さらに詳しく述べることにする．

1.4. 研究手法

1.4.1. 道具の影に着目した遠隔への身体性拡張

前節でも触れたように、本研究では、身体化するバーチャルな道具を実現し、これを遠隔の映像空間中にまで伸長することで、バーチャルな道具を介して身体性を遠隔の映像空間に拡張することを試みる。

本研究では、身体化するバーチャルな道具の手法として、「影」に着目した。影は一般に光源からの光が遮られることによって生じる周囲より暗い部分である。影が存在すれば影と光源の間には必ず個物が存在するというように、影は個物や身体と切り離すことができない非分離な関係にある。実際に、影には身体や個物の存在感を創出するというはたらきがあることが、三輪や石引の影を用いた一連のコミュニケーション支援の研究によって示されている[61-64]。また、影は、通常、周辺視的に捉えられており、無意識的に処理されているにもかかわらず、身体の空間的な感覚統合や行為の際の運動感覚に直接的に影響を及ぼしていることが知られている。河本は、影は身体の運動感覚(キネステーズ)に直接作用するメディアであると指摘している[65]。Bonfiglioli らは、目の前に置かれた個物を、手を伸ばしてつかむリーチングタスクにおいて、影の投影の方向を変えたり、影を通常と異なる形状に変えたりした場合に、手の運動軌道が変わることを明らかにした[66]。また、三輪らによって身体の影を傾けることで、歩行の仕方が変化することなどが明らかにされている[67]。さらに Pavani らは身体の影にまで身体近傍空間が拡張することを実験心理学的に明らかにしている[68][69]。したがって以上のような影の働きを踏まえれば、影によるバーチャルな道具が身体化するような身体性が生じる可能性がある。そこで、本研究では、映像技術を用いて道具のバーチャルな影(以下バーチャル影)を生成するシステムを開発し、この道具のバーチャル影による身体性について調べることにした。

また、本研究では、開発したバーチャル影における身体性の評価として、主観報告に加えて、客観的、定量的な評価を行う。詳細については2章で述べるが、Spence[70]やMaravita ら[71]が提案した視覚と触覚の統合に着目した実験心理学的な手法を用いる。これにより呈示したバーチャルな道具のデザインに対する先入観や過去の記憶などの反省的、認識的な影響を除外して評価することが可能になると考えられる。このような評価手法による実験結果を踏まえながら、本研究では、バーチャル影を具体

第1章 序論

的にどのように呈示すればよいのかの要件を明らかにする。

そしてこの要件を満たしながら、道具のバーチャル影を遠隔の実映像中にまで伸長、共有することを可能にするシステムを考案、開発する。そして身体性が拡張するうえで、本システムが有効であるかを評価する。

1.4.2. 手合わせ表現に着目した遠隔の他者への身体性拡張

本研究では経験の差はもとより、年齢や性差、障害の有無を超えて、多様な他者と出会い、関係を深めていく身体表現活動であるインクルーシブ※4 ダンスの現場[72]で取り入れられている「手合わせ表現（図 1.6）」に着目した。手合わせ表現とは、予め振付や双方の関係が決められていない状態で、2 者が手と手を触れ合わせることを主として、全身で行う即興的な身体表現手法である。この手合わせ表現を共に創ることと身体性を関連付けて調べ、手合わせ表現における身体性を遠隔地間においても生成することで、遠隔の他者にまで身体性を拡張する創出的コミュニケーションを支援することを目指す。手合わせ表現に着目した理由は以下の通りである。

まず、二者が一つの表現物を創る即興的な協調行為であることが挙げられる。このためには少なくとも相手を外的な対象物として捉えるのではなく、双方があたかも一つの身体として振る舞う必要がある。対戦型のタスクや相手に単に同調するだけのタスクにおいては、相手を外的な対象として捉えても成立してしまう。また、振付など行為の方法をあらかじめ決めてしまうと、その振付に対して、厳密に従うことができれば、他者との関係を創らずしてもタスクが成立してしまう恐れがある。

次に身体的な接触を伴うインタラクションであるということが挙げられる。身体的接触を保ちながら即興的に表現を創り合うことが要請されるため、各人が相手を見無視すると表現が破綻してしまうことから、相手と状況を共有し、何らかの関係を創ることが、否が応にも必要となる。したがって、手合わせ表現は、二者の関係性の違いが表現の違いや感覚の違いとして顕著に現れると考えられる。

最後に一体感や共存在感が創出することが挙げられる。西は、手合わせ表現におい

※4 “インクルーシブ”とは「全てを包み込むような」という意味であり、1994 年のサラマンカ宣言により国際的にクローズアップされたインクルージョン（Inclusion）あるいはインクルーシブ・エデュケーション（Inclusive Education）と方向性を同じくするものである。ここでインクルーシブされるものは、障害の有無はもとより、性や年齢、活動経験や技術の差といった活動者のさまざまな特性をすべて指し示す。（文献[73]より一部抜粋）



図 1.6 手合わせ表現

Figure 1.6 Hand Contact Improvisation

て「他者と私自身の身心とがさまざまなレベルで同調し、そこを起点に新たな表現がおのずから創られていく鮮明な体験」を持つことができた」と述べ、これを身体表現における「共振の発現[74]」と定義した。また、そのプロセスにおいて、“私”としての主体性と、それぞれに異なる者同士の“私たち”としての共同性の関係は「包まれつつ・包む、包みつつ・包まれる」という感覚に近いことを指摘している[75]。また西はこうした体験は、身体での表現活動を行う実践者やそれを対象とする研究者がさまざまに報告しているとも述べている。演出家の竹内は、言語以前の身体的な関わり合いによってからだが響きあう状況を、「わたしのからだの延長としての相手。その相手の働きかけてくる動き、すなわち相手のからだの延長としてのわたしのからだ。これをわたしは共生態と名付けたい[76]」と述べている。

以上より、手合わせ表現が上手く創り合える状態においては、相手と状況を共有し、あたかも一つの身体のように振る舞うことができるとともに一体感や共存在感が生起するような身体性が生じていると考えることができる。

次に手合わせ表現における双方の関係性を捉えるための手法について述べる。本研究では、各人の筋電図などの動作に関わる生理情報や全身の動作の計測からこの身体性に関わる情報を見出すことを試みる。

他者と道具のもっとも大きな違いは、主体的に行為を行うか否かであり、手合わせ表現では、自他の間において、操作者と道具の間のような主従の関係が常に成立する

第1章 序論

わけではないと考えられる。そこで、本研究ではまず、主体的な他者が関わる状況に特徴的な身体の関係性を捉えることにした。具体的には、主従（リード・フォロー）の役割を固定した条件と主従（リード・フォロー）の役割を固定しない条件で比較をする。ここで、実験条件による双方の身体的な関係性の違いは、手の動きなどの外部からの観察では捉えることが困難であると考えられる。そこで、本研究では、各人が身体内部に発生している力を捉えることにし、その手段として筋電図を計測することにした。さらに本研究では、手合わせ表現において生じる身体性に関連した双方の身体的な関係性を捉えるため、意識に上りやすい合わせた手のひら同士の動作に加え、あまり意識の上らない全身の身体動作にまで計測対象を広げ、表現を共に創り合うことができた」と報告された試行とそうでない試行の計測結果の比較を行う。

また被験者として、手合わせ表現の熟練者を含めることにした。なお、熟練者とは、インクルーシブな現場や療法・療育の現場において、手合わせ表現を活用した身体表現活動を表現者あるいは支援者として10年以上行なってきた者を指す。この理由として、手合わせ表現を創り合う状態が生成しやすいことが挙げられる。また身体表現は単に身体動作だけを指すのではなく、身体動作によって思いやイメージなどの内観が変化するとともに、内観を身体動作として表出する側面をもつ。したがって、手合わせ表現を創り合うことができたかどうかを評価するためには内観の報告を必要とするが、熟練者はその内観を手合わせ表現後に比較的正確に言語化でき、報告することができる。

以上の結果を踏まえ、遠隔地間で手合わせ表現における身体性の拡張を実現し、創出的コミュニケーションを支援する手法について研究する。まず、合わせた手において生じる手の物理的なインタラクションを遠隔において実現するため、バイラテラル制御を実装したシステムを開発する。そして、このバイラテラル制御によって同じ場所における手合わせ表現と同様の身体的な関係が双方の間において生成するかを調べる。もし、生成しないとすれば、どのような制御手法によって、それが可能になるかを検討、実装し、その有効性を評価する。

1.5. 本論文の構成

本論文の構成を図1.7に示す。本論文は7章から構成されている。以下に、各章ごとの概要について述べる。

第1章では、現在のソーシャルメディアやコミュニケーション支援システムの問題点を明らかにし、身体性を取り込んだ創出的コミュニケーション技術の意義について述べた。そして、身体性に関する従来研究などについて記し、本研究の位置づけと研究手法について説明した。

以下に続く、第2章と第3章では、道具のバーチャル影によって、遠隔の映像空間中に身体性を拡張し、指示行為を実現するための設計手法を明らかにする。

第2章では、道具のバーチャル影を呈示するシステムを開発し、道具のバーチャル影においても身体性が生じるかを調べる。さらに開発した道具のバーチャル影における身体性を評価するため、実験心理学的手法などを適用する。そして実験結果を踏まえ身体性が生じる道具のバーチャル影の要件について明らかにする。

第3章では、前章の結果を踏まえ、道具のバーチャル影によって遠隔の空間にまで身体性が拡張するかを明らかにする。まず、遠隔の実映像を送り合うコミュニケーションシステムにおいて、道具のバーチャル影を共有する技術の開発について述べる。そして、本システムにおいて遠隔の映像空間に身体性が拡張するかを評価する。

第4章から第6章では、手合わせ表現に着目し、遠隔の他者に身体性を拡張することで、創出的なコミュニケーションを支援する手法について述べる。

第4章では、手合わせ表現における身体性を、身体動作や生理情報の計測から調べるためのシステムの設計と開発について述べる。実際の現場で行われている手合わせ表現は動きの自由度が高く計測データの解析が複雑になるため、手の動きを前後1自由度に制限する装置を開発する。そして、手の動きや各人の力の発生に伴う腕部の筋電図に加え、全身の動作を計測可能なシステムを開発、実装したのでその詳細について述べる。

第5章では第4章において述べた計測システムを用いて、手合わせ表現における双方の身体の関係性を捉え、身体性について調べたので記す。まず、主体的な他者が関わる状況に特徴的な様相を捉えるため、リード・フォローの役割を固定した条件と固定しない条件の違いを各人の筋電図計測から調べる。さらに手の動きに加えて、全身の身体動作にまで計測対象を拡張し、表現を共に創り合うことができたと報告された試行とそうでない試行の計測結果を比較する。そしてこの結果から手合わせ表現における身体性と双方の身体動作の関係性について論じる。

第6章では、遠隔地間で手合わせ表現における身体性の拡張を実現し、創出的コミ

第1章 序論

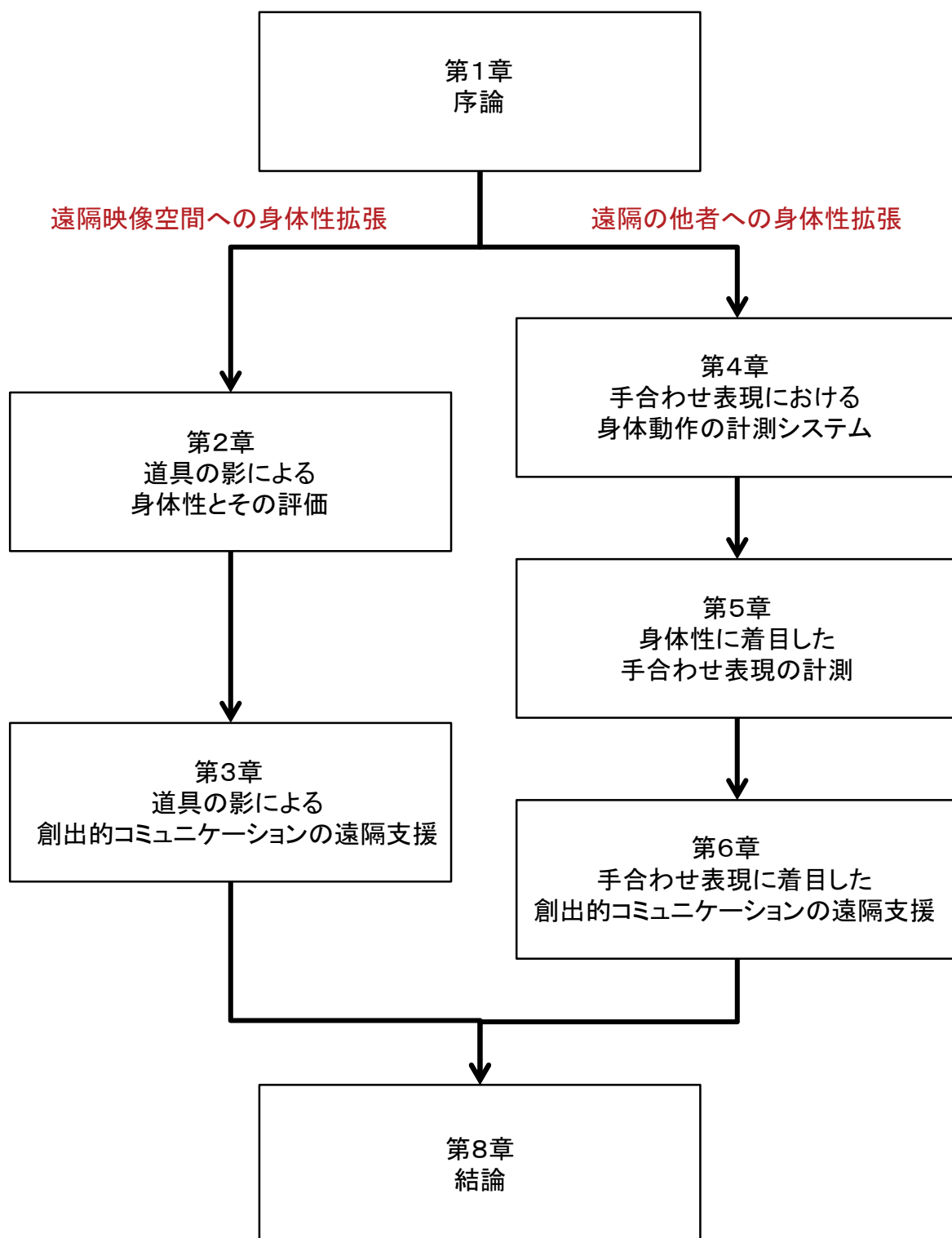


図 1.7 本論文の構成

Figure1.7 Structure of the thesis

コミュニケーションを支援する装置の開発とその評価について述べる．具体的には合わせた手において生じる物理的なインタラクションを遠隔において実現するため，バイラテラル制御を実装したシステムについて記す．そして，第 5 章の結果を踏まえ，遠隔の相手にまで身体性を拡張するための独自の制御手法を考案，システムに実装し，創出的コミュニケーション支援における有効性について調べたので記述する．

最後に，第 7 章において本論文の総括と今後の展望について記す．

第2章 道具の影による身体性とその評価

2.1. はじめに

道具使用においては、道具自体にはあまり注意が向かなくなるとともに、道具を介して感覚が得られるように道具が身体化する。このような身体性を、映像呈示するバーチャルな道具においても生じさせることができれば、バーチャルな道具を介して遠隔の映像空間にまで身体が直接つながるように身体性を拡張でき、創出的コミュニケーションの支援が実現され则认为られる。その手法として、本研究では身体や個物と非分離的な関係にある「影」に着目し、道具のバーチャル影によって身体性を生じさせるアプローチを前章において説明した。本章では道具のバーチャル影の具体的なデザインの提案とそれを実現するための装置開発、および開発した道具のバーチャル影に対して身体性の拡張の評価を行ったので説明する。身体性の評価についてはアンケートやコメントによる主観調査に加え、価値観や先入観などの影響を極力省いた客観的・定量的な手法が必要であると考えられる。本研究では、その手始めとして、Spenceらが考案した身体の近傍空間で生じる視覚刺激と触覚刺激の干渉現象（Cross-modal interference）を定量的に評価する実験手法[70]に着目し、これをバーチャル影に適用することで、身体性を評価することにした。そして、これらの結果を踏まえて道具のバーチャル影に身体性が生じるための要件を明らかにしたので、以下に記す。

2.2. 道具のバーチャル影の呈示システム

2.2.1. バーチャル影のデザイン

本研究では、指示を行う棒状の道具を対象として研究を行う。

提案する道具のバーチャル影のイメージを図 2.1 に示す。あたかも長い棒を把持したときに生じるような影を実空間や映像空間にバーチャルに呈示する。具体的には、使用者が把持する円柱状のグリップに対し、グリップの先に棒を接続した際に生じるような影を実際のグリップの影に接合させ連続的に呈示する。

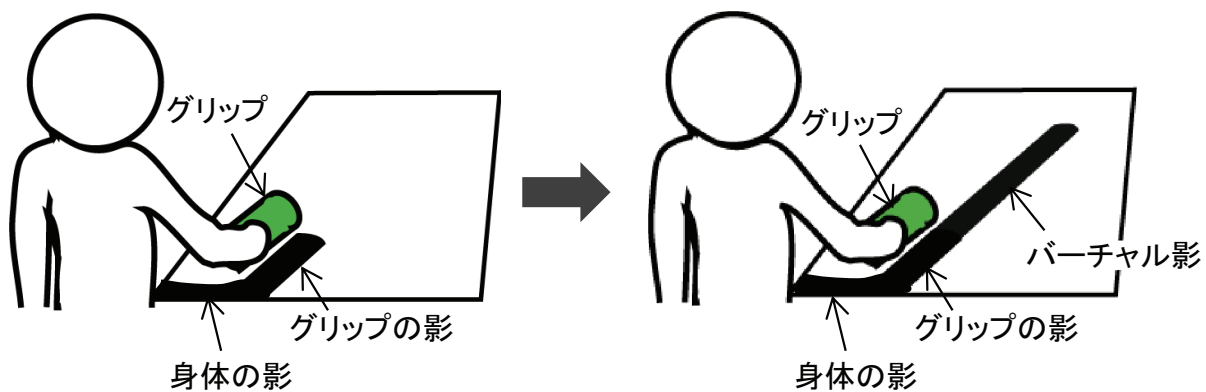


図 2.1 提案するツールのイメージ

Figure2.1 A conceptual image of the proposed interface

本研究で提案する手法は、テーブル上の面に棒のバーチャルな影のみを呈示する手法であり、3次元空間上にバーチャルな棒の映像は呈示しない。また、棒が個物に触れたときの力触覚や、棒が持つ質量や慣性モーメントも呈示しない。バーチャルな影のみを呈示することで、バーチャルな影における身体性への効果について調べることができると考えられる。また、3次元空間上に映像を呈示するデバイスは、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)やヘッドアップディスプレイ(HUD)を用いたり、視点の位置を固定したりしなければならないものが多く、拘束が強い。このことは遠隔映像コミュニケーションでの使用においては強い制限となる。バーチャル影のみで身体性を生じさせることができれば、実用上の観点からも有用性が高いと考えられる。

なお、バーチャルな個物のバーチャルな影を実空間に投影するインタラクティブなシステムがこれまでに提案されており、実空間とバーチャル空間の接合が試みられているが[77]、本手法は、実際の影とバーチャル影を結合する技術であり、実空間とバーチャル空間の統合手法としても新しいものである。

2.2.2. 設計要件

バーチャル影呈示システムにおける設計要件を下記に挙げる。

- (1) 実際の影と同様に実空間の個物へ落ちるバーチャル影の呈示
- (2) 身体やグリップの動きとバーチャル影の実時間での幾何的な整合

バーチャル影を実空間に重畳呈示する手法として、ビデオ透過やハーフミラーを用

第2章 道具の影による身体性とその評価

いる光学透過による AR (Augmented Reality) 手法が挙げられる。ビデオ透過とは、使用者の視野から見たような実世界の映像をカメラで撮影し、この映像と CG 映像を合成した後、HMD などによって使用者に呈示する手法である。また光学透過とは、目の前の実世界に対し、ハーフミラーを介して CG 映像などを重畳する方法である。しかしながら、ビデオ透過や光学透過による手法では、実空間に存在する個物にあたかも実際の影が落ちているように棒のバーチャル影を呈示することは困難である。ビデオ透過型では、バーチャル影が落ちる実空間面の立体形状をあらかじめ把握する必要があるため、実空間面の立体形状を限定したり、あるいはステレオ計測などを用いて逐一計測したりする必要がある。したがって、使用状況の制限や計算コストが大きくなり実時間での処理が困難になるという問題がある。また、光学透過では、そもそもその光学的特性から実空間にそこよりも暗い領域を生成することができず、身体やグリップの実際の影からつながるバーチャル影を呈示することは原理的に不可能である。

そこで、本研究では、バーチャル影の呈示を、プロジェクタにより上方から投影する投影型 AR 技術によって実現する。プロジェクタの光を空間の照明に用いるとともに、同一のプロジェクタによってバーチャル影の部分を黒色のテクスチャで投影することで、その部分が周囲より暗くなるため、幾何的に整合で実際の影の質とほとんど同等のバーチャル影を、任意の形状やさらには動きを持つ実空間上の物体面に、計算コストを掛けずに呈示することが可能となる。

2.2.3. 投影型 AR によるバーチャル影呈示システム

バーチャル影の呈示システムの構成を図 2.2 に示す。本システムはグリップ (φ45×190[mm]) とグリップの位置や姿勢を計測するための 3 次元磁気トラッキングセンサ (Polhemus 社製 Fastrak)、バーチャル影の CG 映像を生成する PC (CPU: ペンティアム 4 3.2[GHz], ビデオアダプタ: NVIDIA QuadroFX1400)、光源およびバーチャル影を投影するプロジェクタ (EPSON 製 ELP730) によって構成した。

先述の通り、本システムではプロジェクタに、空間の照明としての機能と、影の投影装置としての機能を兼ねさせることで、身体やグリップによって生じる影と同様のバーチャル影の呈示を可能にする。そして、使用者が把持するグリップに対して、グリップの長手方向に棒を接続したときに生じるようなバーチャル影の投影を実現す

るため、本システムでは、3次元CGのリアルタイムレンダリング技術を用いて、グリップに連動する棒の3次元モデリングデータからバーチャル影の映像を生成することにした。

バーチャル影の形状や生成位置は、設定する光源の位置や種類と棒の形状、位置・姿勢によって決定される。身体やグリップの実際の影とバーチャル影の見た目を近づけるには、バーチャル影を生成する際の光源のモデルと光源としてのプロジェクタ光のモデルができるだけ等しくなる必要がある。本システムでは、プロジェクタの光源を点光源とみなし、バーチャル影を生成するために設定する光源もプロジェクタの光源位置に存在する点光源とした。また、バーチャル影を生成するCG空間と実空間の座標を対応付けるため、3次元磁気トラックセンサのトランスミッタの位置をCG空間と実空間双方の世界座標の原点に設定した。

棒型の道具のバーチャル影の生成および投影処理の流れを図2.3に示す。

まず、棒のモデリングデータを、グリップに取り付けたトラッキングセンサからの位置、姿勢情報によって幾何変換する。これによって棒のモデリングデータはグリップの先端に接続される位置姿勢に移動・回転する。そして、CGをレンダリングするための視点と向きをプロジェクタの光源位置から鉛直下向きにし、プロジェクタの投影角と合致するように視錐台を設定する。これによりこの設定でモデリングデータをレンダリングし、プロジェクタで投影するだけで、テーブル面上には、整合的な形状の影が呈示される。またテクスチャを黒色に設定することで、あたかも影のような質感が実現される。なお、棒のモデリングデータは3Dポリゴンモデラーソフトであるメタセコイアを使用した。モデリングデータを変更すれば棒の代わりに任意の形状の影を呈示することも可能である。以上のバーチャル影のCG映像の生成や幾何変換は、Direct X ライブラリを用いた。

本システムの動作確認を行ったところ、バーチャル影の呈示位置の精度は同形状の実物の道具を同様に動かした場合に生じる影の位置と比較して、静止時で2[cm]以内、比較的早い動きで動かした場合（グリップを把持する手の動きが60[cm/s]程度）において、最大で約4[cm]以内の誤差となった。

第2章 道具の影による身体性とその評価

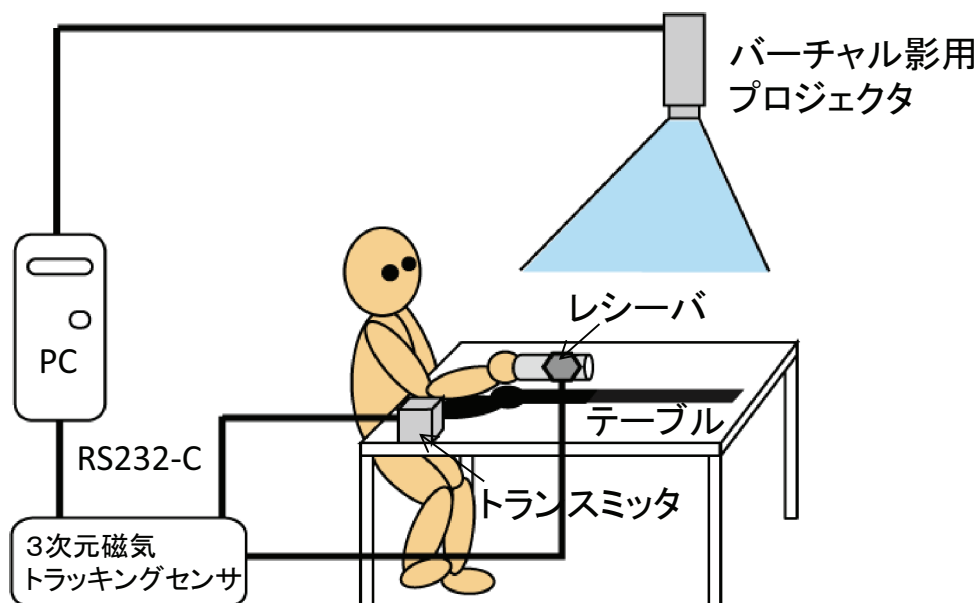


図 2.2 バーチャル影の呈示システムの構成

Figure2.2 Composition of virtual shadow display

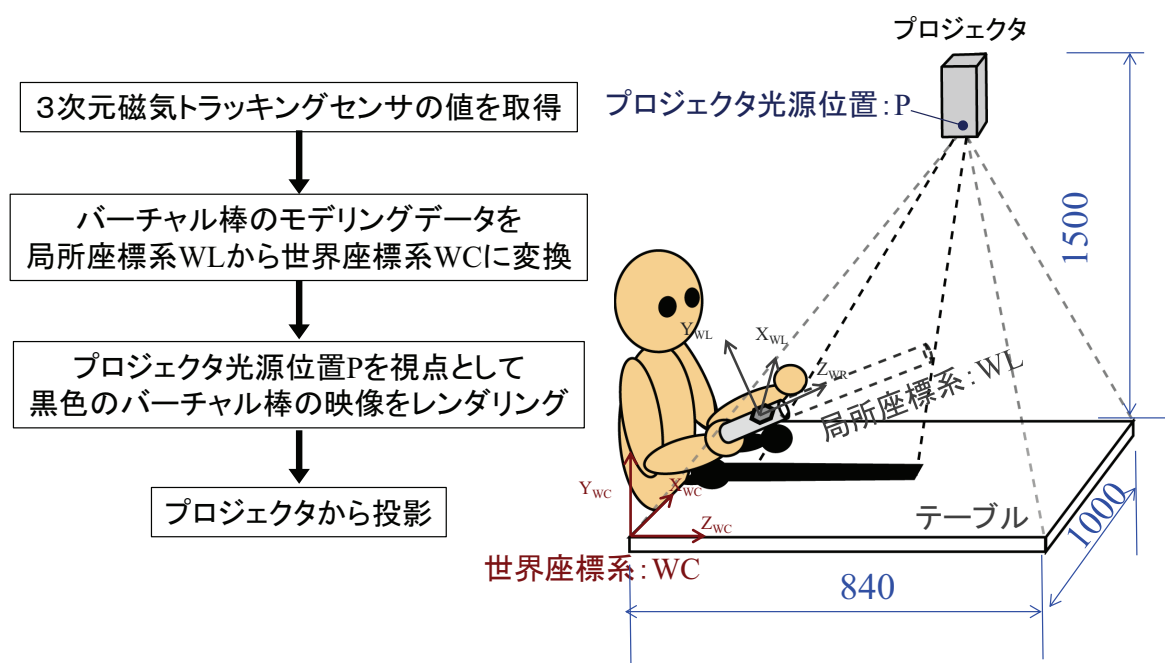


図 2.3 バーチャル影の生成手法

Figure2.3 Generating method of virtual shadow

2.2.4. 呈示システムの動作

バーチャル影の先端を使って、任意の場所を指し示すなどの指示行為を行なってもらい、その際のコメントを得た。被験者は、20 台男子学生 5 名である。その様子を図 2.4 に示す。実際の長い棒を持っている時に生じるようなバーチャル影が呈示できていることがわかる。「影の先端を用いれば、指示行為を行うことができる」「長い棒の影のように感じた」「分離感が少ない」等の感想が聞かれ、さらには「あたかも長い棒を持っているような感じがする」というように、何も映像を投影していないグリップの先に棒の存在感が喚起されていることに関する感想も聞かれた。以上のことは、バーチャル影の映像を実際の影のように捉えていたこと、身体とバーチャル影の間につながりの感覚が生じていたこと、実体がなくとも実際の棒を使用していたときと近い感覚を得ていた可能性を示唆するものである。そこで、このようなバーチャル影による身体性の効果を定量的に評価することを試みることにした。

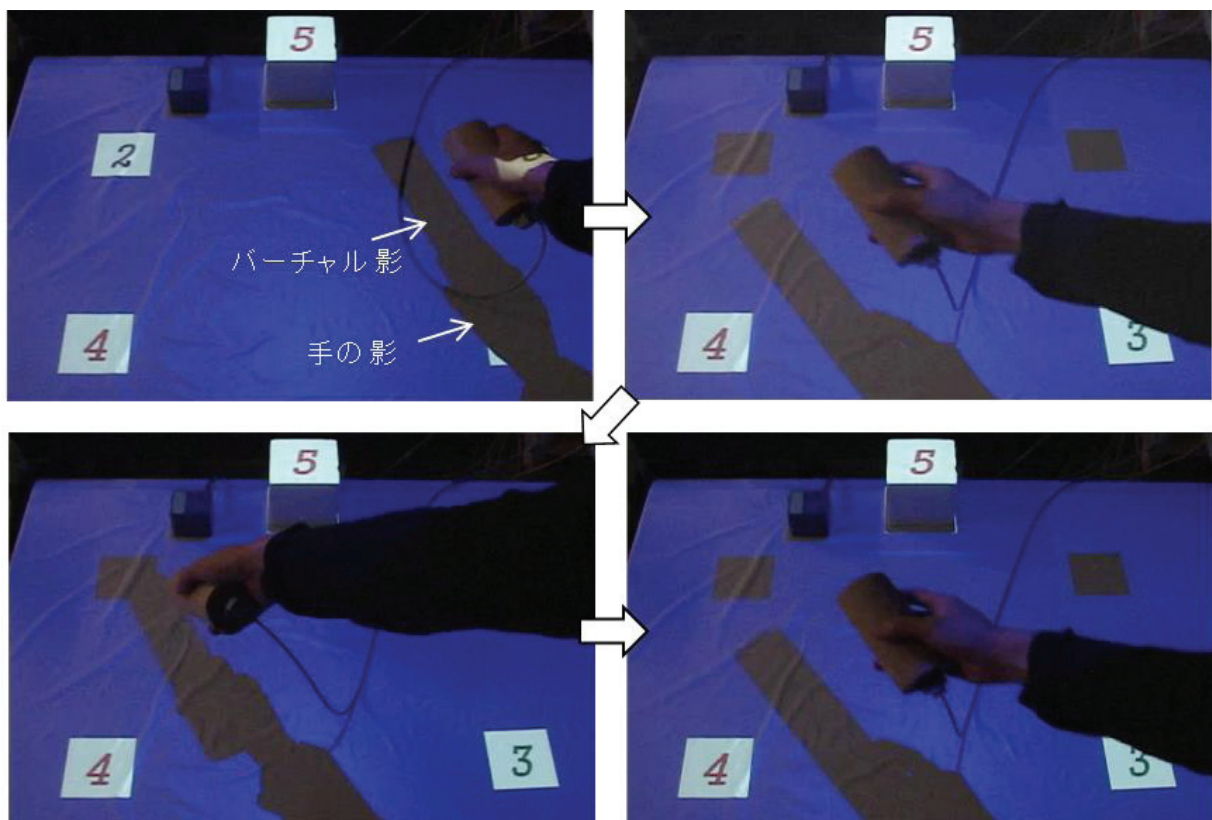


図 2.4 バーチャル影による指示行為
Figure2.4 Pointing task by virtual shadow

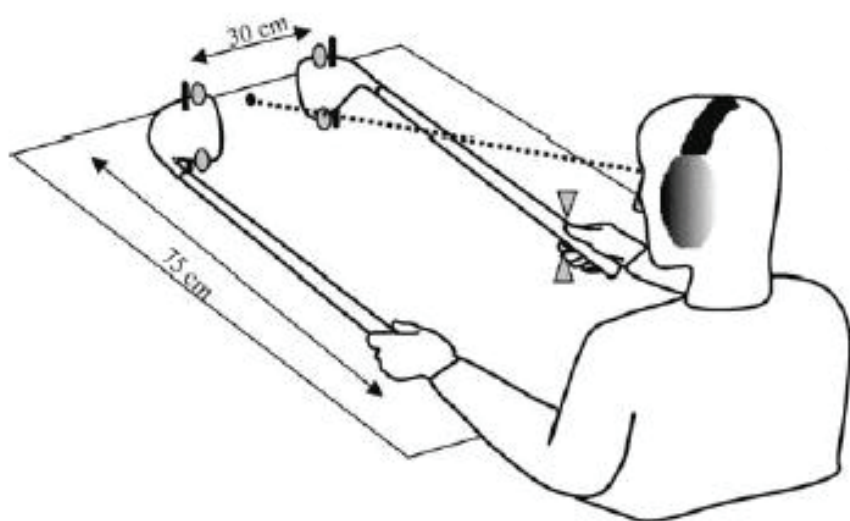
第2章 道具の影による身体性とその評価

2.3. Cross-modal interference に着目した身体性の評価

2.3.1. Cross-modal interference について

次に提案した本手法における身体性を客観的、定量的に評価することを試みる。そこで、Maravita らが提案している道具使用における Cross-modal interference 実験手法に着目した[71] (図 2.5)。この実験手法は、手にした道具の先端の視刺激によって、手元の触刺激が影響を受けること、つまり、道具の利用による視・触覚統合への影響に着目した手法である。

その実験の概要を以下に述べる。この実験において使用したゴルフクラブ状の道具にはグリップ部の上下に振動子が一つずつ付いており、また先端のヘッド部の上下には LED が一つずつ付いている。被験者はこのゴルフクラブ状の道具を両手に一本ずつ把持する。そして両手のグリップ部に取り付けられた計4つの振動子のうちランダムに一つだけを振動させ被験者に触刺激を呈示する。被験者にはグリップの上と下のどちらの振動子が振動したかを出来るだけ早く判別する（左右は問わない）タスクを課す。また、振動子が振動するとほぼ同時に、道具の先端上下に取り付けた計4つの LED のうちのいずれか一つが視刺激としてランダムに光る。この際の、タスクの反応時間を計測することで、道具の先端から与えられる視刺激が手元のグリップにおける触刺激の位置判断に対する影響を調べる。Spence らの、LED と振動子を取り付け



A, Maravita, et al. (2002) [71]より

図 2.5 道具使用における Cross-modal interference

Figure 2.5 Cross-modal interference in tool-use

たボックスを利用した Cross-modal interference 実験の先行研究[71]では、手の近傍から与えられる触刺激の位置判断に視刺激が影響を及ぼすことが分かっており、Maravita らの実験はこの先行研究を、道具を対象とした実験に拡張したものといえる。

具体的には、触刺激位置判断の反応時間データから、“Cross-modal Interference Effect (以下 CIE)” を算出する。CIE とはグリップにより道具を持つ手に与えられる触刺激の上下の位置と、その道具の先端に与えられる視刺激の上下の位置が不一致のときの反応時間と一致したときの反応時間の差分と定義されている (図 2.6)。差分することにより、触刺激に対してペダルを操作する反応時間がキャンセルされ、視刺激の影響による反応時間の遅れのみを抽出でき、CIE を視・触覚統合への影響の尺度として扱うことができる。

例えば左手側への触刺激判別は左手側の道具に付いている LED の視刺激に影響を受け CIE が大きくなるが、右手側の道具に付いている LED の影響をあまり受けず CIE が小さくなる結果が示されている。また、道具を把持しているだけの場合と道具を実際に操作し使用した場合を比較すると、道具を使用した条件のときのほうが、よ

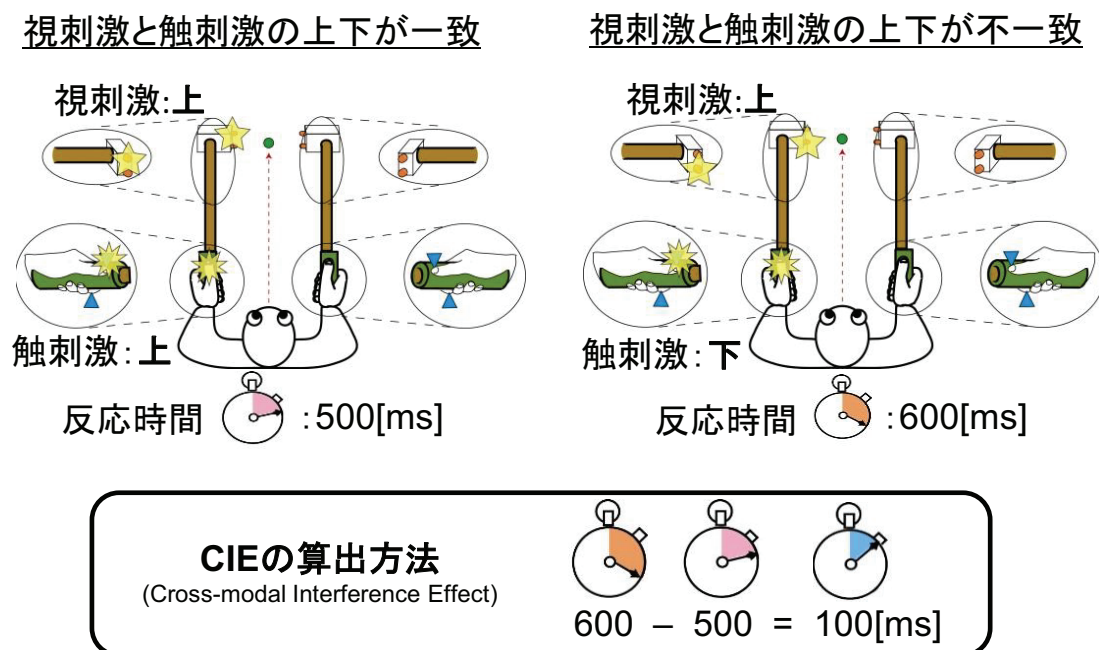


図 2.6 Cross-modal interference effect (CIE) の算出方法

Figure 2.6 Method for calculating CIE

第2章 道具の影による身体性とその評価

り触刺激の判別に視刺激からの影響を受け CIE が大きくなる．このことは視・触覚統合に影響する領域が道具の先端においても生じていることを示している．このことは、身体性が道具の先において生じることと関連があると考えられる．さらにこの結果はサルの視触覚のバイモーダルニューロンに着目した入来らの研究とも現象的に共通する部分が多い[34]．そこで本研究では、この Cross-modal interference 実験手法を著者らが提案した道具のバーチャル影に対して適用することにした．

2.3.2. Cross-modal interference 実験システム

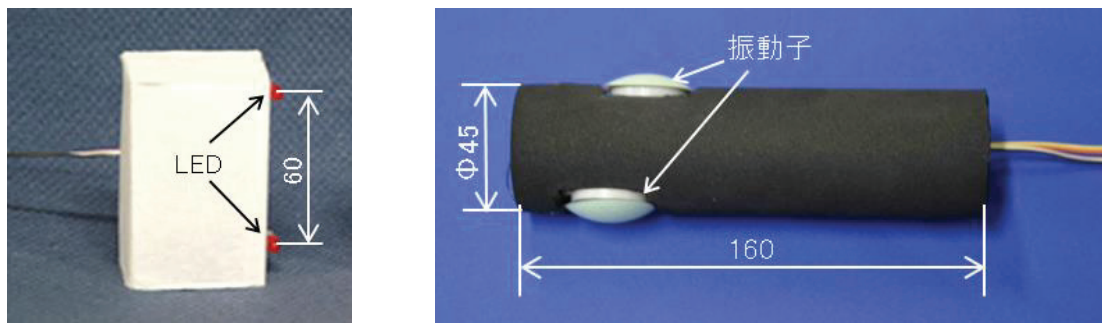
Maravita らの Cross-modal interference 実験手法をふまえ、それを本インタフェースの評価に適用するためには、以下の要件を満たす実験システムが必要である．

- ① 手元への振動子による触刺激とバーチャル影の先端からの視刺激の組み合わせをランダムに呈示
- ② 触刺激判別の反応時間を計測

これらの要件を満たす実験システムを図 2.7 のように実装したのでその詳細を以下に述べる．

著者らが提案したツールにおいて、グリップより先の部分は映像で呈示されるバーチャル影であるため、LED をバーチャル影の先端に付加することは出来ない．そこで視刺激呈示については高輝度赤色 LED (1500mcd, $\phi 5$) を上下に 6[cm]間隔で光の指向性が元も強い先端方向を被験者側に向けて取り付け付けたボックス (図 2.8 (a)) を左右 2 つ設置し、バーチャル影の先端をこのボックスに重ねることで視刺激を被験者に与えることにした．なお視刺激は点滅表現 (100[ms]周期, 3 回周期) を生成、呈示する．また実験中、視線を固定するための緑色の注視用 LED (750mcd, $\phi 5$) を左右の視刺激呈示用 LED の中央のテーブル上に設置した．今回の実験においては、Maravita らの先行研究と同じ視野角に左右の視刺激呈示用 LED が配置されるように設定した．すなわち、視刺激呈示用 LED を被験者の手から奥行き方向に 75[cm]のところに設置し、左右の間隔を注視用 LED の位置を中心に 30[cm]とした．

触刺激呈示については、振動呈示デバイスとして振動モータを左右のグリップの上下、計 4 箇所にそれぞれ取り付け付けた (図 2.8 (b))．触刺激の呈示は視刺激呈示と同様



(a) 視刺激提示用 LED

(b) 触刺激提示用振動子

図 2.8 視刺激・触刺激提示デバイス

Figure 2.8 Device for presenting visual stimulus and tactile stimulus

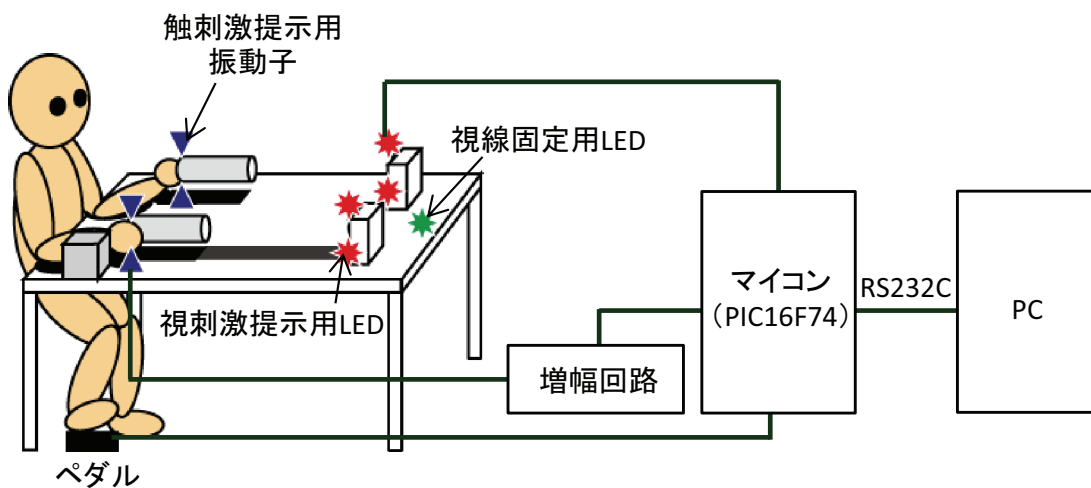


図 2.7 Cross-modal interference 実験システムの構成図

Figure 2.7 Diagram of an experiment system for cross-modal interference

に 100[ms]周期, 3 回周の ON, OFF にて行う. 触刺激の上下の位置判断の結果を応答するためのペダルは足元に設置した. 視刺激と触刺激の提示制御とペダルからの信号処理は視触覚提示制御用 PC にて行われる. また, Cross-modal interference の効果が一番顕著に現れるとされている条件として視刺激提示は触刺激提示より 30[ms] 先行して与える.

開発した Cross-modal Interference 実験システムを用いて, 被験者 5 人に対し, Maravita らの行った実験と同様に実体の道具を用いた追実験をおこなったところ, 視刺激, 触刺激とも十分に確認できることや図 2.9 に示すように CIE において先行研究と同様の結果が得られたことから, 本システムが Cross-modal Interference 実験を行う性能を有することを確認した.

第2章 道具の影による身体性とその評価

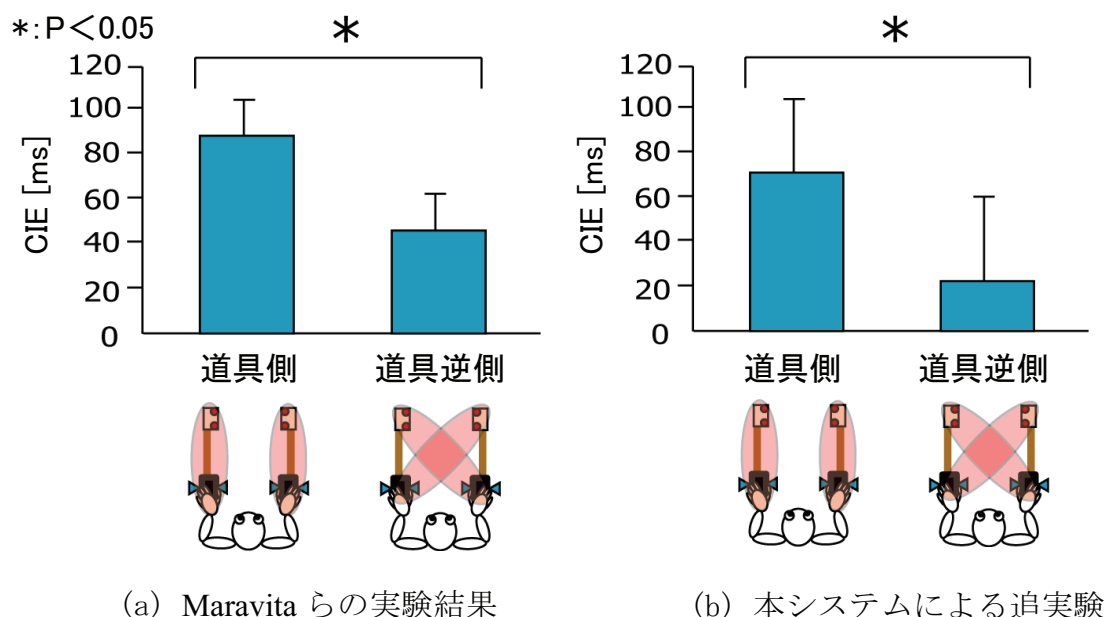


図 2.9 本システムによる Maravita らの追実験

Figure 2.9 Check experiment of Maravita's test by use of our system

2.3.3. 実験方法

バーチャル影による身体性への影響のみを抽出することが必要である。仮に両手にバーチャル影を把持して実験を行ったとすると、それがバーチャル影による影響なのか、把持しているグリップによる影響なのかがわかりにくい。そこで反対の手にグリップのみを把持させることで、グリップのみを把持した場合の **cross-modal interference** の影響と直接比較することにした。また、単に映像のオブジェクトを操作することができれば身体性が生じるのか、あるいはバーチャル影のようにあたかも実体の棒の影のような手法が必要なのかを調べるため、レーザーポインタのような操作は可能であるが、グリップから分断された手法である「ポインタ」の条件についても実験を行うことにした。以上を踏まえ、以下の3つの条件で実験を行った。

- (i) 片手に実体の「道具」、もう片手には「グリップ」のみ把持する(図 2.10 (a)).
- (ii) 片手にバーチャル影を重畳したグリップ、もう片手には「グリップ」のみ把持する(図 2.10 (b)).
- (iii) 片手にポインタを投影したグリップ、もう片手には「グリップ」のみ把持する(図 2.10 (c))

被験者は実験に先立って、ツールによってテーブル上の所定の複数の場所を指示してもらい指示作業を約 2 分間行ってもらった。次に被験者にグリップを所定の位置に置き、注視用の LED を見るように指示した。なお振動モータの振動音が実験結果に影響を及ぼさないように、ホワイトノイズが流れているヘッドホン装着してもらい、外部の音を遮断した。実験は視覚刺激呈示から被験者の位置判別信号の取得までを 1 フェーズとし、20 フェーズ行った。20 フェーズのタスクの繰り返しが 1 ターンとすると、バーチャル影のインタフェースを持つ手を左右換え、4 ターンずつ行った。すなわち被験者は 160 フェーズ分の位置判別作業を行った。なお被験者は健常な成人男性 12 名である。

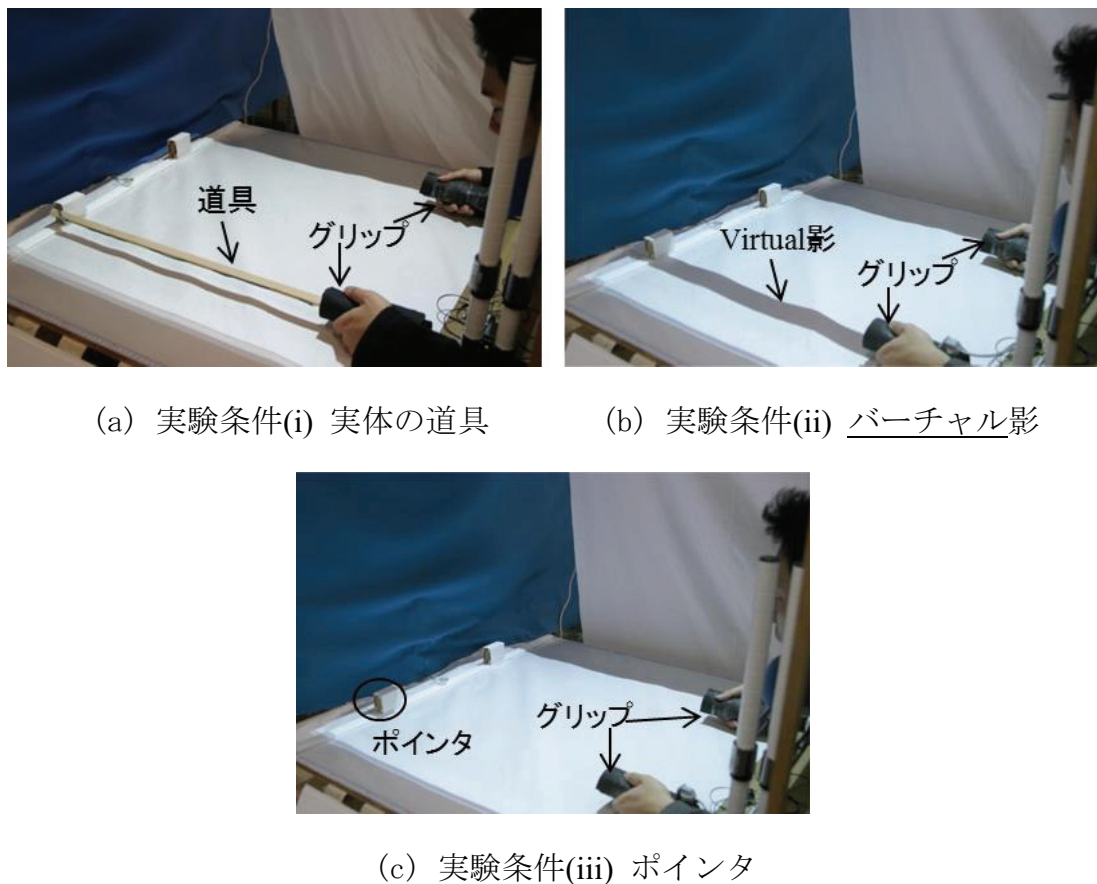


図 2.10 各条件下における実験の様子

Figure 2.10 Scenes under two experimental conditions

第2章 道具の影による身体性とその評価

2.3.4. 実験結果

実験結果を以下に示す．本実験は被験者の反応時間を計測し，各条件における CIE を算出した．また，各条件において，グリップのみの CIE と，道具あるいはバーチャル影あるいはポインタの CIE の平均について t 検定を行い統計的な有意差があるか調べた．(i)，(ii)，(iii)の各条件における CIE を以下の図 2.11 に示す．

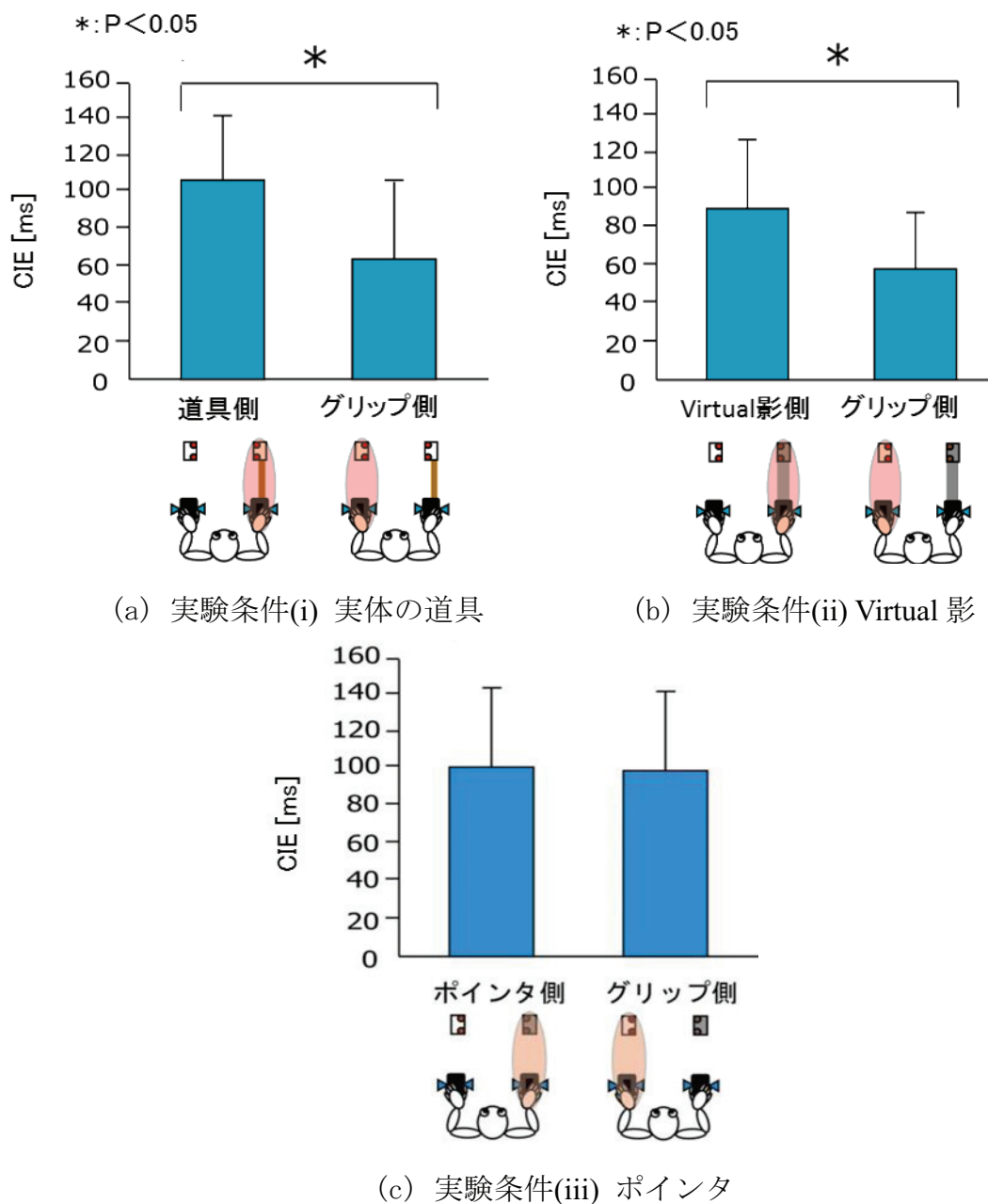


図 2.11 各条件下における実験結果

Figure 2.11 Experimental results under three conditions

まず、実験条件(i)の結果についてであるが、実体の道具をグリップのみの CIE と比較すると、有意水準 5% の有意差で実体の道具側の方が大きくなった。次に、実験条件(ii)の結果をみると、グリップのみに対し、映像棒側の CIE が有意水準 5% の有意差で大きくなった。最後に、実験条件(iii)の結果をみると、グリップのみとポイントとの間の CIE に統計的な有意差は認められなかった。

2.3.5. 考察

条件(i)において、グリップ側に対し、実体の道具側の CIE が大きくなったことは、道具の先端からの視刺激と道具を把持している手元への触刺激の統合が起こったことを意味しており、Maravita の実験結果とも矛盾しない。またこのことは道具の先端において身体性が生じた結果であると考えられる。条件(ii)においても、バーチャル影側の CIE が大きくなったことから、バーチャル影先端の視刺激が手元に与えられる触刺激に強く影響を及ぼしていることを示している。実験結果の傾向は、条件(i)と酷似しており、バーチャル影においても実体の道具と同様に身体性が生じる可能性を示すものである。

一方で、条件(iii)で、グリップ側とポイント側との間の CIE に有意な差が認められず、条件(i)や条件(ii)と異なる傾向が得られたことは、実体の道具において生じる身体性が、ポイントと身体の間では生じなかったことを意味していると考えられる。

では本研究におけるバーチャル影とポイントの違いとは何であろうか。バーチャル影もポイントも映像であるため、質量や慣性モーメントは同一であり、操作したときの手に返ってくる力覚的なフィードバックは同一である。また、バーチャル影の先端やポイントで指示行為を行う際、指示に関する機能的な違いはほとんどないと考えられる。両者の大きな違いは身体の影や把持したグリップの影からバーチャル影の先端まで途切れることなく連続的に伸びているか否かという点である。使用者においては、先述の通りバーチャル影に対して「長い棒の影のように感じた」といったコメントや、「あたかも長い棒を持っているような感じがする」といったコメントをしており、グリップの影に対し、バーチャル影が連続していることで、バーチャル影を実際の影のように捉えていたと考えられる。このことから、指示機能を実現する先端にのみバーチャル影を投影するのではなく、身体やグリップの実際の影からバーチャル影の先端にまで連続的に投影することがバーチャル影による身体性の生成にとって重要な要

第2章 道具の影による身体性とその評価

件の一つになると言えよう。

以上まとめると、提案した道具のバーチャル影において身体性が生じることが明らかとなった。特に、実体としての道具がなくとも、身体の影からバーチャル影の先端まで連続的に呈示することで身体性が生じることを見出した。影はその環境に存在する光源によって、個物や身体の下テーブルや床面などに映るものである。したがって、影によって道具の働きが喚起され身体性が生じたとすれば、バーチャル影による身体性は、バーチャル影の領域だけでなく、影から喚起される道具の空間においても生じている可能性が考えられる。このような性質は、遠隔の映像空間と身体の関係性を創る創出的コミュニケーション支援において有用であると考えられる。

なお、近年、道具における **Cross-modal interference** の結果について新たな解釈が行われている[78]。Holms は、道具の先端だけでなく手元に近い箇所や、柄の中間から視刺激を呈示する実験を行ったところ、道具の先端において、CIE が大きくなるが柄の中間部分では CIE が小さくなるような結果が得られた。この結果から、Holms は **Cross-modal interference** は、身体の近傍空間が道具の先端にまで拡張することを評価しているというよりは、空間的な注意が道具の先端に移ったことを評価している可能性があるのではないかと考察している。

仮にこの考えに従うならば、CIE がバーチャル影において道具と同等の結果が得られたことは、注意が道具そのものから道具によって操作される対象に向いた可能性を示唆している。注意がバーチャル影の先端に向くことと、本研究で着目した身体性との間には関係性があると思われ、**Cross-modal interference** による身体性の評価の有効性を覆すものではないと考えられる。いずれにせよ、このような注意と身体性の関係性については、今後さらに研究を進めていく必要がある。

2.4. まとめ

本章を以下の通りまとめる。

- (1) 道具のバーチャルな影に身体性を生じさせることができれば、これを介して遠隔の映像空間にまで身体性を拡張することが期待される。またこれによって、遠隔の映像空間に身体が直接つながるような感覚を生じさせることができると考えられる。そこで、本章では道具のバーチャル影の具体的なデザインとそれを実現

するための装置開発，および開発した道具のバーチャル影による身体性の評価を行った．

- (2) 棒状の道具のバーチャル影の呈示を，投影型 AR を用いて実現するシステムを開発した．具体的には，グリップに三次元トラッキングセンサを付け，ここから得られるグリップの位置，姿勢をもとに，PC 上で棒状のバーチャル 影映像を生成し，上方からプロジェクタで投影するシステムを製作した．
- (3) 道具のバーチャル影を使用した時の感覚の主観調査に加え，身体の近傍空間で生じる視覚刺激と触覚刺激の干渉現象（Cross-modal interference）が道具の先端とそれを把持する手の間においても生じるという Maravita の知見[71]に着目し．これを道具のバーチャル影に適用することで，身体性の評価を行うことにした．
- (4) 実体の道具の条件と，道具のバーチャル影の条件と，ポインタの条件で Cross-modal interference 実験を行った．その結果，実体の道具の条件と，道具のバーチャル影の条件において CIE が有意に大きくなることを確認した．このことは，道具のバーチャル影においても実体の道具と同様に身体性が生じていることを示していると考えられる．

以上要するに本章では，実体としての道具はなくとも，道具のバーチャル影を呈示することで身体性が生じることを明らかにした．また，指示機能を実現する先端にのみバーチャル影を投影するのではなく，身体やグリップの実際の影からバーチャル影の先端にまで連続的に投影することがバーチャル影による身体性の生成にとって重要な要件の一つになることを見出した．

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

3.1. はじめに

前章において実体としての道具はなくとも、道具のバーチャル影を呈示することで、これに身体性が生じることを明らかにした。また、身体やグリップの影から、道具の先端までバーチャル影が一続きに連続して呈示されることがバーチャル影によって身体性が生じるための要件であることを明らかにした。したがって、遠隔の映像空間中においてもバーチャル影を以上の要件を満たして呈示することで、身体性が遠隔まで拡張すると予想される。そこで、本章では、このような要件を満たしながら、指示作業などの身体行為を共有する遠隔映像コミュニケーションシステムにバーチャル影を実装する技術を実際に開発し、バーチャル影による身体性拡張について実証的に検証することで創出的コミュニケーションの遠隔支援における有効性を評価する。

ここで、既存の遠隔映像コミュニケーションシステムでは、遠隔の空間と自身の空間とが視覚的に分断されるため、バーチャル影を双方の間で整合的に共有することが困難である。本章では、まず遠隔の映像空間と自身の空間を連続的に接合する空間共有手法を提案、開発する。そしてこの空間共有手法において遠隔地間においてバーチャル影を共有する技術を実現する。さらに、開発したシステムにおいて、身体性が拡張したかどうかを評価したので以下に記す。

3.2. 遠隔映像空間におけるバーチャル影共有システム

3.2.1. 設計要件

バーチャル影を遠隔地間において共有し、遠隔の映像空間中に身体性を拡張するためには、第2章で得た知見を踏まえると以下の設計指針を満たす必要がある。

- ① 遠隔の映像空間中においても使用者の把持するグリップの実際の影に対して整合的なバーチャル影が呈示できること

- ② 使用者の身体やグリップの影と遠隔の映像空間中の呈示されるバーチャル影とが連続に接合すること

なおこれまでに、数多くの空間共有技術が提案されている。映像を用いた双方性を有する空間共有技術として、図 3.1 に示すように一般的なビデオ会議システムや、メディアスペースで用いられている Hydra[16], VideoWindow[79], MAJIC[80], t-room[81]に代表されるビデオ型, AGORA[82]などに代表されるテーブル共有型[83][84], Clear Board[85]に代表される、向かい合ってボード面を共有するボード対面型, Hyper Mirror[86]に代表される鏡のメタファを利用し映像空間中に相手と自身の自己像や背景を鏡写しで同時に合成表現するミラー型などが提案されている。身体の影響から連続して伸びるバーチャルな影を遠隔地間で共有するためには、遠隔の空間の高さや奥行情報を得られること、自身の空間と映像空間がひと続きに繋がっている

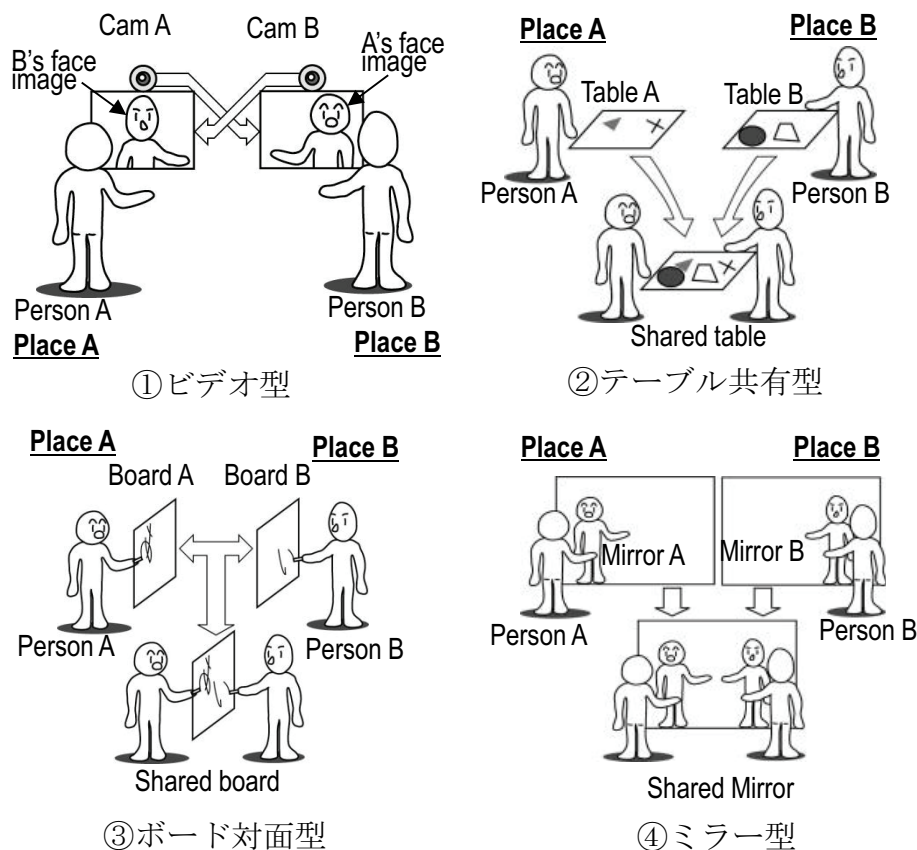


図 3.1 既存の主な映像コミュニケーションシステムの分類
Figure 3.1 Classification of existing video communication systems

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

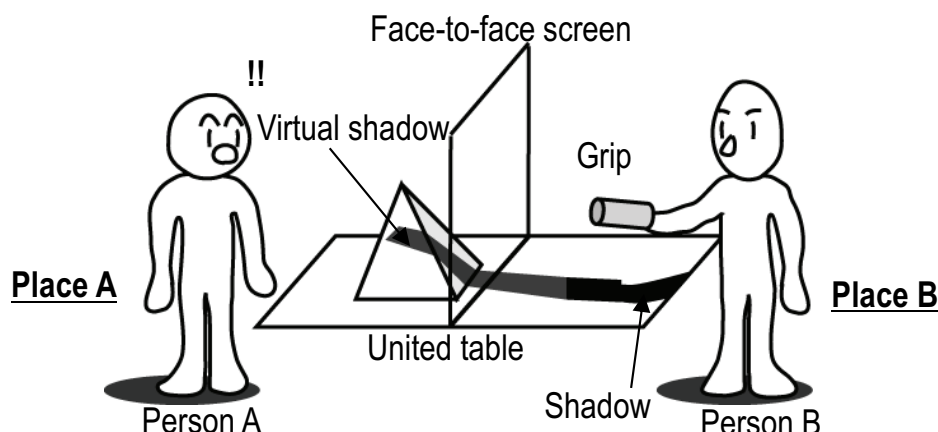


図 3.2 テーブル接合型の空間共有手法とバーチャル影
Figure 3.2 United-table-type shared space method and virtual shadow

ように空間を共有することが必要であるが、従来手法ではこれらの要件を満たすことができない。そこで本研究では図 3.2 に示すシステムを提案する。離れたテーブル上の空間を接合し、このテーブル上において、道具のバーチャル影を共有する手法である。テーブルをあたかも一つのテーブルのように接合することで、そこに投影されるバーチャル影の連続性が確保される。また、テーブル同士の接合部にスクリーンを立てることで、遠隔のテーブル上の空間を斜めから見ることができ、高さ方向や奥行き方向の情報が失われないため、遠隔のバーチャル影が自身の空間のバーチャル影と自然に接合したように呈示されることが期待される。以上を踏まえ、提案したテーブルを接合する空間共有技術と、共有された空間においてバーチャル影を共有するシステムを開発した。

3.2.2. テーブル接合型空間共有技術

テーブル同士をあたかも一つのテーブルのように接続して空間を共有することを技術的に実現するために、テーブル及び周辺空間をビデオカメラにて撮影し、この映像をリアルタイムにて離れた場所に相互に送り合い、テーブルの奥端に取り付けたスクリーンに投影する。この際、テーブル端を含むテーブル全体の映像を撮影すること、高さを有する個物の形状を撮影すること、カメラからテーブルを撮影する際、スクリーンによる視野の遮りを避けること、撮影した相手のテーブルの映像を自身のテーブルから視覚的に一続きになるように投影することが要件として挙げられる。なお、本

研究では、1台のカメラで相手のテーブル上とその周囲の相手の身体の映像を取得することにした。

これらの要件を考慮し、相手のテーブルや参加者を投影するプロジェクタとそれを映すスクリーン、そして自身のテーブルやその周囲を撮影するビデオカメラ（720×480[pixel]）から構成される空間接合ディスプレイを製作した。相手の空間に自身が立たと想定したときの目の位置に一致するように、ビデオカメラを設置し、テーブル面を斜め上方から見下ろす角度で設置する。また、対面スクリーンは水平面から40[deg]傾けて設置した。これにより、図 3.3 に示すように、従来のテーブル共有型のように対面スクリーンに穴を開け、そこにカメラを設置するという手法では困難であった、相手のテーブル端まで映像が取得できる。また、カメラの光軸とその映像が投影される対面スクリーンとがほぼ垂直の関係となるため、自身のテーブル面と相手のテーブル面が違和感なく1つのテーブル面であるかのように呈示される。さらには斜めのスクリーンによって奥行き感が創出される効果も期待できる[87]。ビデオカメラで撮影した映像は、相手の場所のビデオプロジェクタを用いて対面スクリーンに投影する。このとき、プロジェクタが使用者の動きを制限したり、身体やテーブル上の個物によって、対面スクリーンに投影する映像が遮られたりしないよう、鏡像反転した撮影映像を、対面スクリーンに斜め下方から背面投影する(図 3.4)。

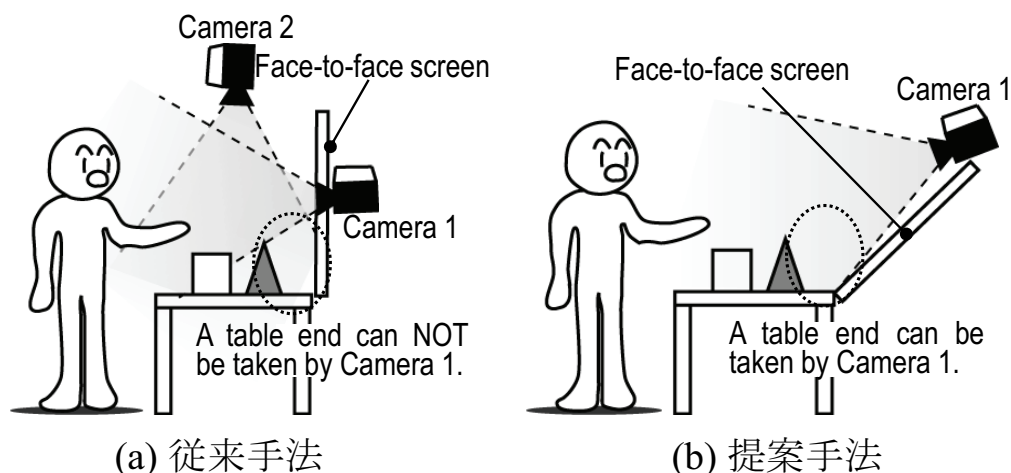


図 3.3 対面スクリーンを斜めにするアイデア

Figure 3.3 Idea to install a face-to-face screen with a slope

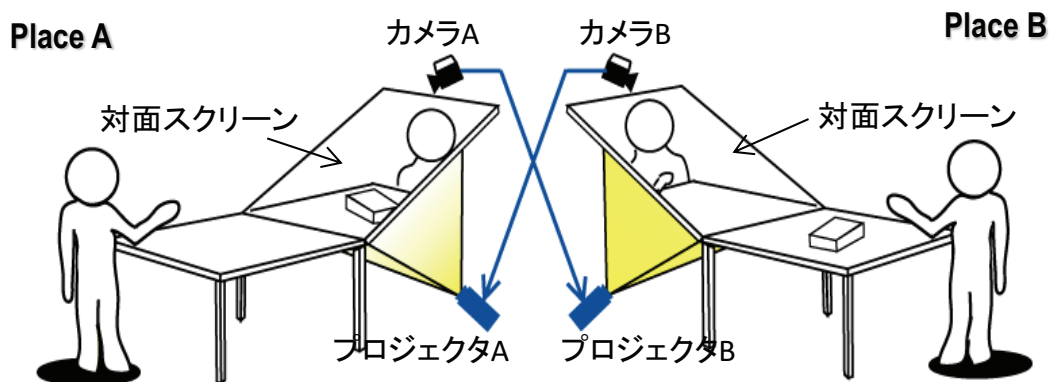


図 3.4 提案する空間共有手法における映像取得と投影方法
Figure 3.4 Method of taking and projecting the image of the remote space

3.2.3. バーチャル影の共有システム

次にテーブル接合型空間共有システムにおいて、バーチャル影を双方の空間で共有するシステムにおいて説明する．このシステムの設計要件を以下に挙げる．

- ① 自身が操作するグリップの影に連続的につながるバーチャル影の映像をリアルタイムに生成できること
- ② 自身のテーブル上のバーチャル影と、相手のテーブル上のバーチャル影が連続的に接合したように呈示できること

なお、①については第2章と同様であるのでここでは割愛し、②の詳細について説明する．本システムでは、バーチャル影の映像は各場所に設置されたテーブル上方に設置したプロジェクタより投影する．従って、自身の把持したグリップの真下から投影されるバーチャル影の映像が自身のテーブルから相手のテーブルにまで伸びるとき、相手のテーブルに投影されるバーチャル影の映像は、相手側のPCにて生成、プロジェクタにて投影する．そのため、グリップの位置・姿勢データは相手側のPCに送信（LAN：通信速度 100[Mbps]）する．この時、自身の場所と相手の場所は光源位置が異なる．従って相手の場所における自身のバーチャル影を先のアルゴリズムで投

影すると、相手の光源を基準にしてテーブル面に投影されるため、自身のテーブル上のバーチャル影とズレが生じる。そこで図 3.5 のように相手のテーブル上において、想定される自身の光源位置を基準に、自身の仮想の棒のモデルデータを射影変換してバーチャル影映像を生成し、これを相手のテーブルに投影する相手の道具のバーチャル影映像と重ねることにした。以上により、ひとつの長い棒のバーチャル影が自分のテーブル上から相手のテーブル上へ連続してつながるように呈示する。

テーブル接合型空間共有システムとバーチャル影を統合したシステムの全体構成を図 3.6 に示す。また、空間共有ディスプレイによって双方のテーブルが視覚的に接合し、双方の参加者がテーブルを挟んで対面している様子と、接合されたテーブル上においてバーチャル影を連続的に呈示した様子を図 3.7 に示す。

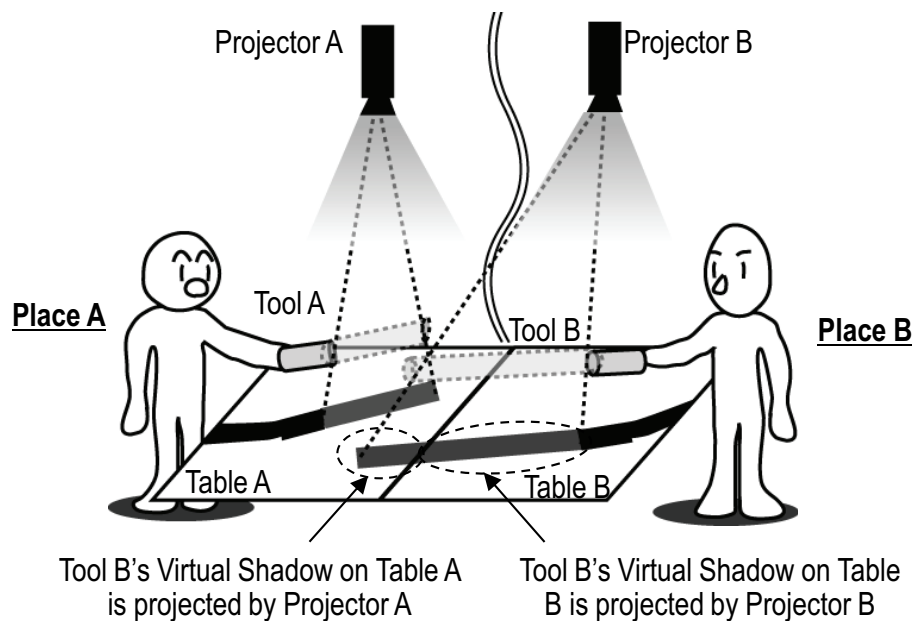


図 3.5 二つの場所間におけるバーチャル影の接合

Figure 3.5 Connection between two virtual shadows cast on each tabletop

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

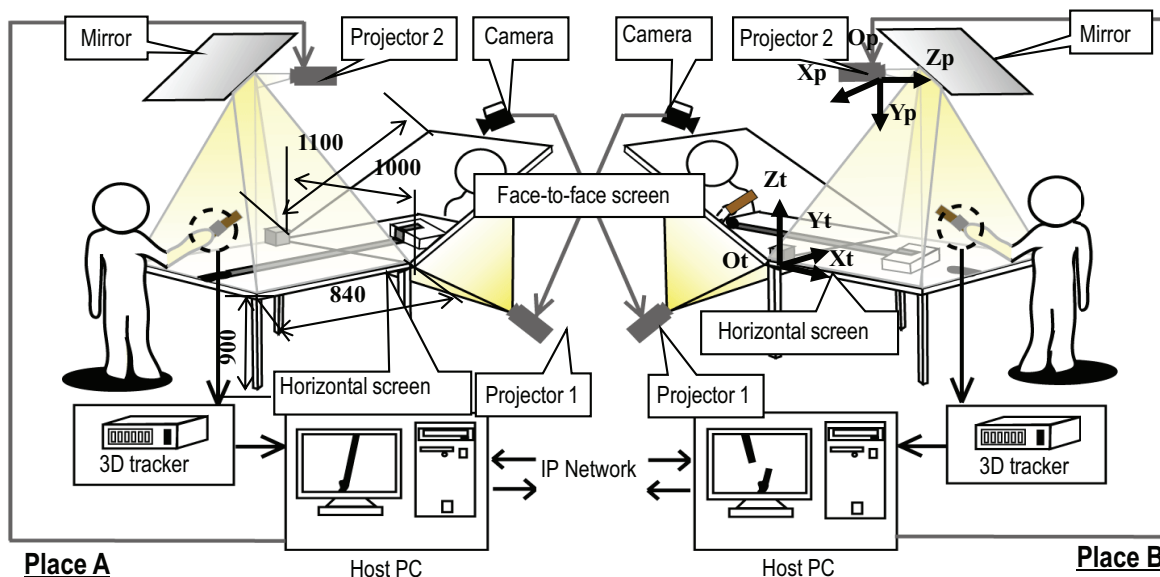


図 3.6 バーチャル影を活用した空間共有ディスプレイの構成

Figure 3.6 Schematic diagram of shared space display utilizing virtual shadow

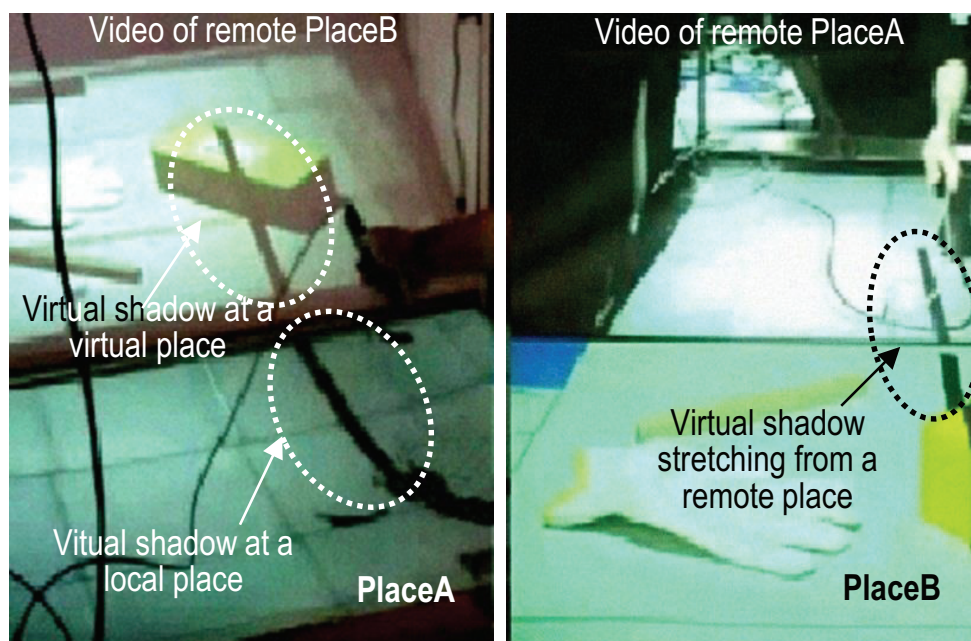


図 3.7 相手の空間にバーチャル影を伸張している様子

Figure 3.7 A scene of a virtual shadow stretching toward a remote place

3.3. バーチャル影の共有範囲

本節では、バーチャル影共有システムの仕様を明らかにする性能評価を兼ねて、バーチャル影の共有範囲やそれを介して行われる指示行為の共有範囲、およびその特徴について調べることにした。

3.3.1. 共有可能な行為の空間的範囲

指示行為が共有される空間的な範囲を調査する実験を行った。A4 サイズのボードを 8×5 のマス目状に区切り、これらの区間に 1 から 40 までの数字が記入してある。このボードを相手側のテーブル上に置き、実験者が指示者に 1 から 40 までの任意の数字を指定する。指示者は伝えられた任意の数字をバーチャル影によって相手に指示する。このとき、指示者が指示を行える範囲を指示者側の指示可能範囲とする。また、相手側においては指示者のバーチャル影がボード上に見える範囲を相手側の指示可能範囲とする。

上記のような実験タスクにおいて、ボードの位置を、テーブル面中央を基準に、前後左右と上下、さらに鉛直軸周りと水平軸周りに傾け、指示可能な三次元的範囲を調べた。指示者の視点から撮影した実験の様子を図 3.8 に、実験結果を表 3.1 に示す。

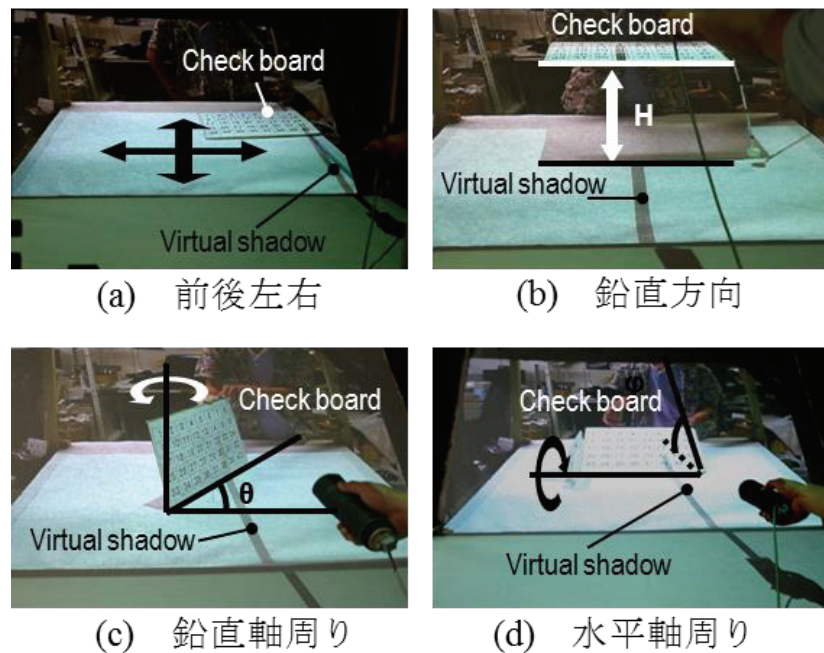


図 3.8 指示可能な 3 次元範囲に関する実験の様子（指示者の視点）

Figure 3.8 Scenes of experiments on three-dimensional pointing ranges

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

表 3.1 指示伝達の三次元範囲
Table 3.1 Three-dimensional pointing ranges

ボードの動かし方	指示者側	相手側
前後左右	テーブル面全体	テーブル面全体
鉛直方向 H [cm]	0～40	目線の高さまで
垂直軸周り θ [deg]	-60～60	-90～90 (指示が見えるよう テーブルの周りを動い た場合)
水平軸周り ϕ [deg]	0～90	0～90 (指示が見えるよう テーブルの周りを動い た場合)

なお、鉛直軸周りに関しては、ボードをテーブルに対し垂直に立て、ボード面が指示者に対し正面を向いた状態を基準にした。また本実験において対面スクリーンに映し出される相手側の映像の解像度は 720×480 [pixel]である。なお指示者と相手側の被験者は、テーブル奥に置かれたボードの数字を識字可能な視力を有している。

指示者が指示を行える3次元範囲は、指示者側からバーチャル影が視認可能な範囲であることが、指示行為の観察や指示者に対する聞き取りなどから分かった。したがって、表 3.1 に示した指示者の指示伝達の範囲とは、バーチャル影が指示者から視認可能な範囲を意味している。図 3.8 を見ると、ボードを前後左右方向の移動だけでなく、鉛直方向の移動や鉛直軸周りの回転、水平軸周りの回転した場合においても、ボードがそのような3次元的な姿勢を保っていることを指示者の視点から確認でき、さらにボード上にバーチャル影が投影されていることが確認できる。また、遠隔のテーブルは自身のテーブルとあたかも一続きであるように呈示され、そこにバーチャル影が自身と相手のテーブル上で一続きに繋がるように呈示されている様子がわかる。このように、本システムによって、奥行き方向や高さ方向の情報を失うことなく、遠隔と自身の空間の間で整合的にバーチャル影が共有できていることがわかる。また、バーチャル影の特徴として、個物の陰となっている部分や、対面スクリーンで視認できない遠隔の個物の裏側への直接の指示は行えないことも分かった。

3.3.2. 共有可能な行為の種類

次にどのような指示行為や共同作業が可能であるか調査するため、既知の間柄の被験者 10 組 20 名（理系学生，20-24 歳，男性 18 名，女性 2 名）を対象に，一方の場所の発泡スチロールの立方体や円錐などを，もう一方の場所からバーチャル影を利用した造形作業を自由に行ってもらった．なお，作業中には音声対話はしないこととし，約 2 分間体験した．そして，バーチャル影によってどのような行為が共有可能になるかを観察した．本システムにより実現されたインタラクションの状況を図 3.10 に示し，その説明を表 3.2 にまとめた．これらの結果から，従来のシステムでは困難であった，実体の個物を伴う共同作業において，左右，奥行き，高さ方向の知覚や指示を支援すること，テーブルの周りを比較的自由に移動できることなど本システムの特長が示された．さらに，2 名以上の人間が同時に共同作業に参加できることも示した．

また，異なるテーブル同士の接合の例として，一方の空間において長方形，もう一方の空間において三角形のテーブル同士の接合を試みたところ，同形状のテーブルを接合表現したときと同様のインタラクションが可能であることが確かめられた．その様子を図 3.9 に示す．

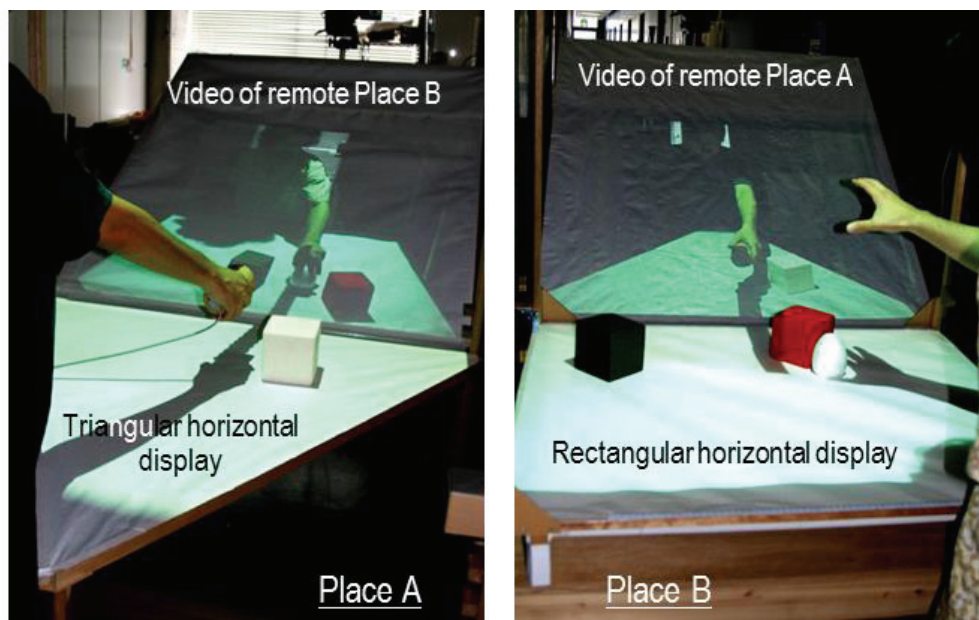


図 3.9 異なる形状のテーブル同士を接合

Figure 3.9 Connection between different shape tables mutually

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

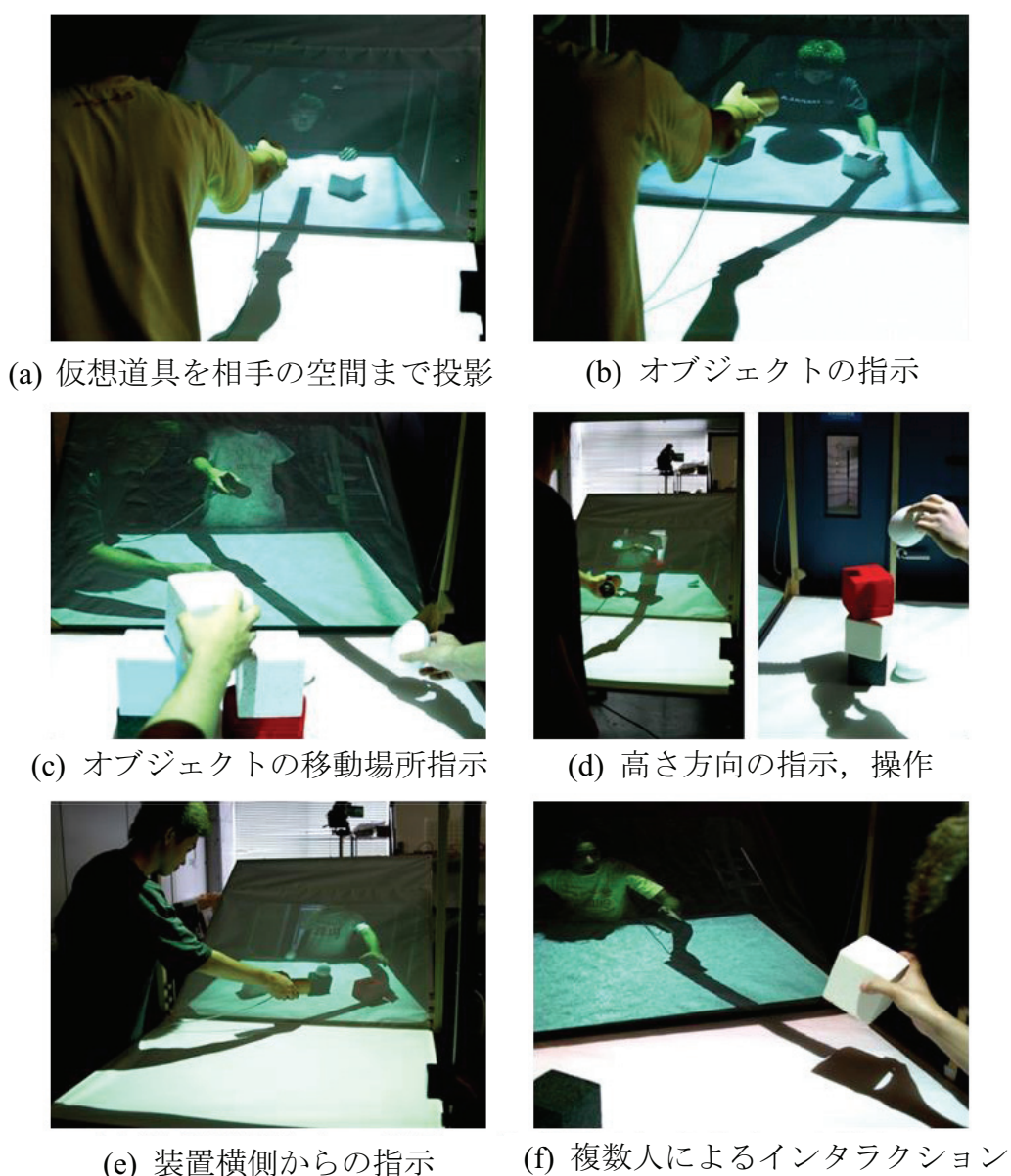


図 3.10 バーチャル影を利用したインタラクションの様子

Figure 3.10 Various scenes that people interact with a remote people by utilizing virtual shadow

表 3.2 本システムによるインタラクションの観察結果

Table 3.2 Observations of interaction by utilizing this system

- ・自分の空間から相手の空間にまでバーチャル影を自由に動かしながら伸ばす(図3.10 (a))
- ・相手の空間の個物の上や横にバーチャル影を投影する(図3.10 (a))
- ・バーチャル影を利用してテーブル上のオブジェクトを指し示す(図3.10 (b))
- ・Virtual影を利用してテーブル上のオブジェクトの移動などを指示する(図3.10 (c))
- ・個物の上に別のオブジェクトを積み重ねるようにバーチャル影によって指示する(図3.10 (d))
- ・相手のバーチャル影の指示に従い、高さのある造形物に積み上げていく(図3.10 (d))
- ・お互いの表情や身振りを見ながら、インタラクションを行う
- ・テーブルの正面のみならず、斜め前や、横から参加している (図3.10 (e))
- ・複数人対複数人で参加している(図3.10 (f))

3.4. 遠隔地でのインタラクションにおける身体性の拡張評価

バーチャル影が遠隔地間で整合的に共有されること、さらにバーチャル影を介して遠隔地間で空間的な指示作業が実現できることが確かめられた。本節では、身体性の遠隔への拡張という観点から、バーチャル影を操作する際の感覚に関する実験をおこなった。具体的には、バーチャル影のテクスチャなどや形状を別に差し替えて、主観調査などにより比較を行った。

3.4.1. 実験方法

既知の間柄の被験者 6 組 12 名（理系学生，20-24 歳，男性 11 名，女性 1 名）を対象に，以下に示すようなバーチャル影と他の映像呈示手法を比較する実験を行った。被験者は長い棒を操作する指示作業を不自由なく行える健常な被験者である。

- 条件 1 バーチャル影：実体のグリップの影と連続的に接続している（図 3.11 (a)）
 条件 2 棒：実体のグリップの影からは幾何的には連続しているが質感としては分離している（図 3.11 (b)）
 条件 3 ポインタ：レーザーポインタのように実体のグリップの影からは空間的に分離している（図 3.11 (c)）

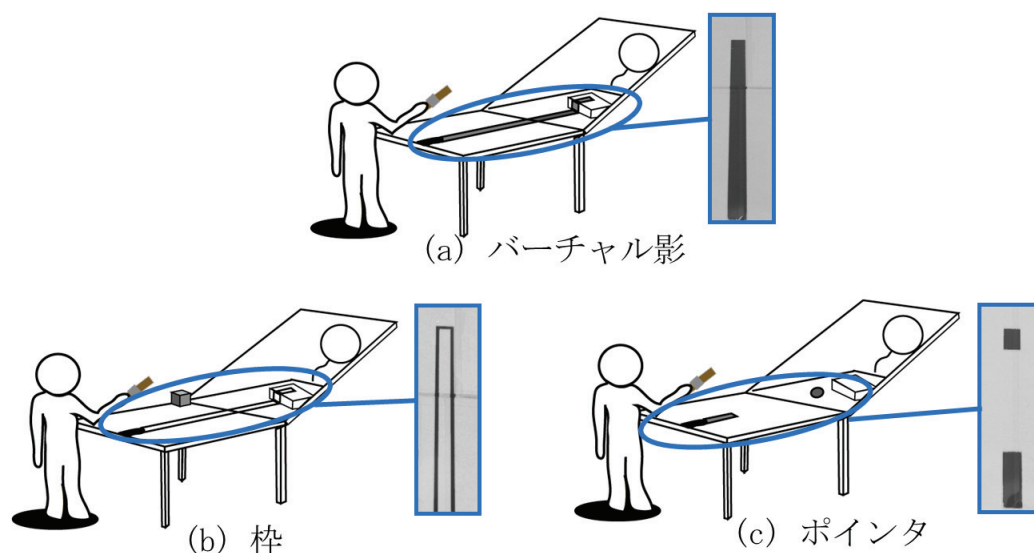


図 3.11 実験条件

Figure 3.11 Experimental Conditions

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

なお、把持したグリップから道具の映像の先端までの全長はすべての条件において900[mm]に設定した。また、各条件においてテクスチャや色の違いの影響を除外するために、これらの色はすべて黒とした。

各組それぞれの被験者は離れた2箇所に分かれ、指示される側のテーブル上は、縦6×横8の計48区画に分割され、各区画には番地が割り当てられている。指示者は、どのオブジェクトをどの番地に移動するかという指示書を予め受け取っており、その指示書に従って各条件の手法を用いて遠隔の相手に指示をする。そして相手(操作者)

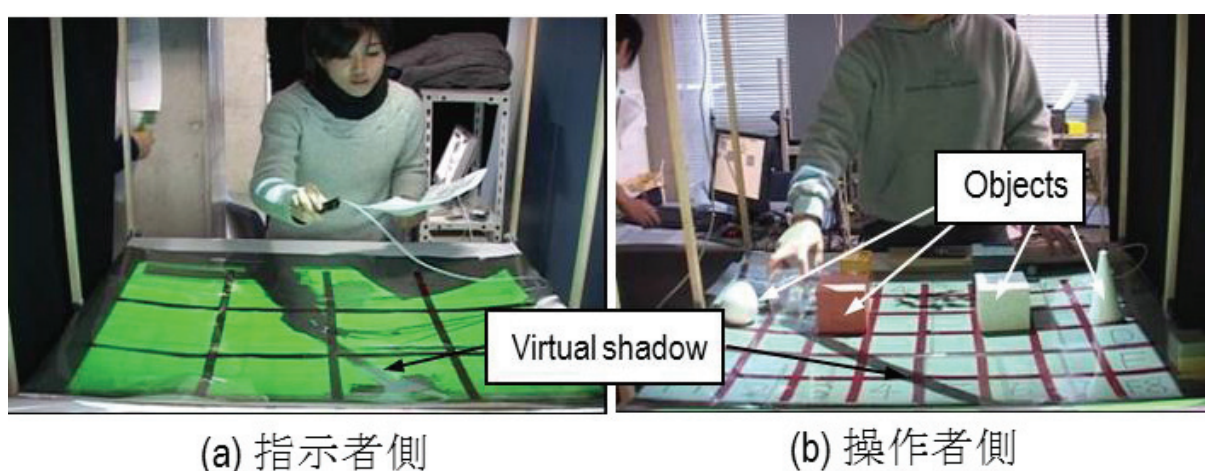


図 3.12 バーチャルな道具の映像手法に関する実験の様子

Figure 3.12 A scene in experiment on utilizing the interface with variable representations

は指示者の指示に従ってオブジェクトを別の場所に移動させる。以上の「指示—移動」課題（図 3.12）を、各 3 条件においてそれぞれ 150 秒間行った。なお、実験に使用したオブジェクトは、アクリルや発泡スチロール製の立方体や円錐などの 7 個のオブジェクトである。また被験者は各条件の実験開始前に、1 分程度の練習を行った。

実験中は、オブジェクトの「指示—移動」回数を計測し、終了後は、各条件を操作している感覚や、自身と遠隔の相手の空間との関係に関して、表 3.3 に示す 6 項目を各項目 7 段階（中立 0）で評価させる主観調査を各条件で行った。さらに、どのようなインタラクションができたか、各条件の操作にどのような印象をもったのかについてのコメントを記述するように指示した。

3.4.2. 実験結果

主観調査の評点の平均と標準偏差を算出した結果を図 3.13 に、コメント調査の結果を表 3.4 に示す．なお各条件間での有意差の評価には，Wilcoxon の符号付順位検定を適用した．

表 3.3 質問項目
Table 3.3 Items of questionnaire

評価項目：指示者側
Q1.相手のテーブルに触れている様に感じた
Q2.相手オブジェクトに触れている様に感じた
Q3.自分の道具が相手の空間に存在する様に感じた
Q4.道具が伸びた様に感じた
評価項目：操作者側
Q5.相手の道具が自分の空間に存在する様に感じた
Q6.相手の道具が伸びてきた様に感じた

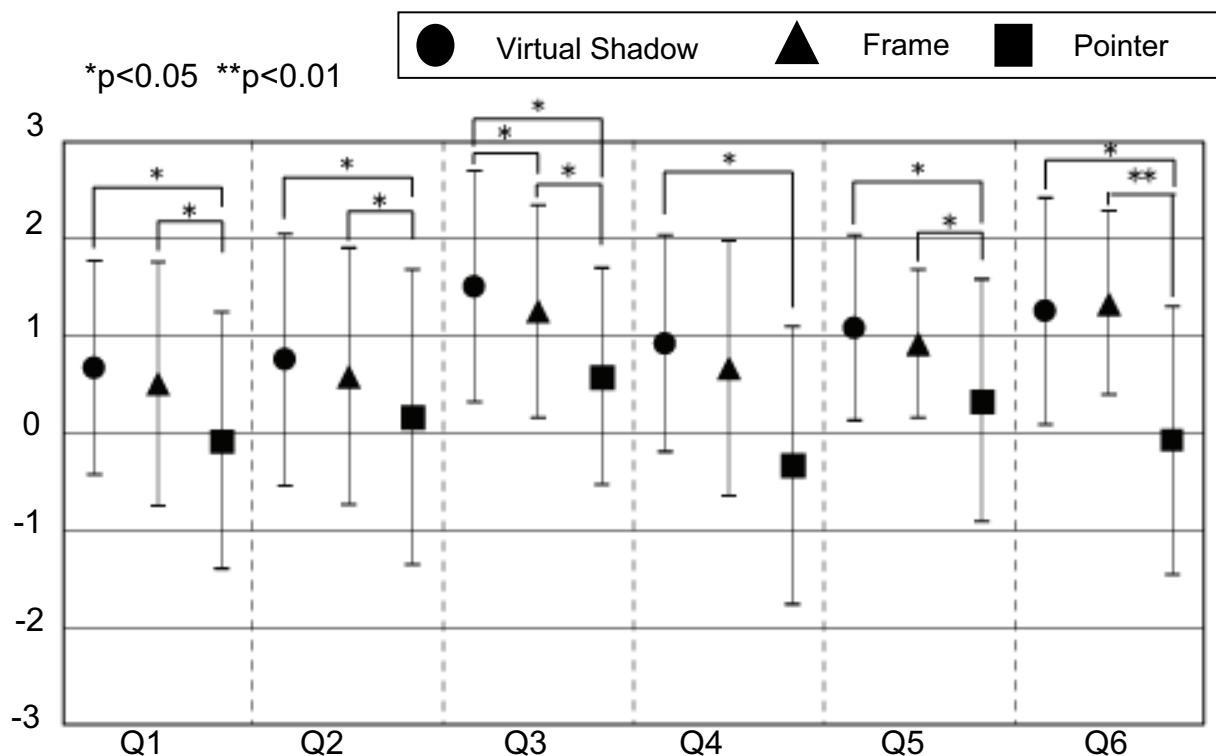


図 3.13 バーチャルな道具の映像手法に関する評価結果
Figure 3.13 Result of questionnaire on representations of virtual tools

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

表 3.4 コメント調査のまとめ

Table 3.4 Comments in three representations of interfaces

①黒い棒
<ul style="list-style-type: none"> ・指示がしやすい ・相手の空間とつながっている感じがする ・長い棒の影が投影されているように感じる ・安定感がある ・人間味を感じる ・親近感を感じる ・他の影と重なって見にくい ・単調に感じる ・距離感をつかみにくい ・相手の動きを不明瞭に感じる ・相手が指示を間違ったかどうか分かりづらい
②枠
<ul style="list-style-type: none"> ・指示がしにくい ・見やすい ・距離感をつかみにくい ・相手が指示を間違ったかどうか分かりづらい
③ポインタ
<ul style="list-style-type: none"> ・指示がしにくい ・相手側との一体感がない ・指示者とつながっている感じがしない ・相手が指示を間違ったかどうか分かりづらい ・機械的な感じがする ・道具がつながっている感じがしない

図 3.13 において、バーチャル影とポインタを比較すると、すべての項目においてバーチャル影の方が肯定的な評価を得ており、さらに有意水準 $p<0.05$ の有意差が示された。また、バーチャル影と枠の比較では、Q1 から Q5 までにおいてバーチャル影の評価が高い傾向が見られ、特に、項目 Q3 では有意水準 $p<0.05$ の有意差が見られた。枠とポインタの比較では、すべての項目において枠の評価が高く、特に、Q1, Q2, Q3 の項目においては有意水準 $p<0.05$ の有意差が見られ、Q6 の項目においては有意水準 $p<0.01$ の有意差が見られた。

次に、各 3 種類の表現において、規定時間の間にオブジェクトの「指示—移動」が行われた回数について、全被験者の平均を図 3.14 に示す。この評価において分散分析を行ったところ、3 種類の表現において有意な差は確認できなかった。すなわち、遠隔のオブジェクトや場所を指し示し、相手に伝える効果については、3 種類の表現において同程度であるといえる。

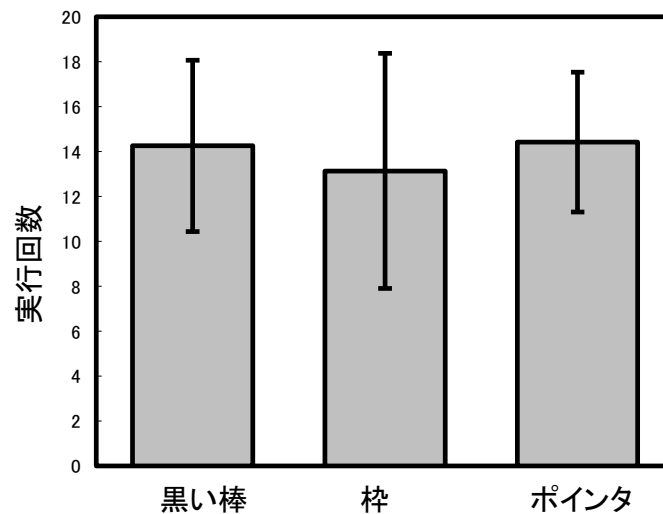


図 3.14 「指示-移動」課題の実行回数

Figure 3.14 Number of times of “instruction-movement” task

3.4.3. 考察

まず注目すべき点として、バーチャル影の条件において、項目 Q3 で特に高い評価が得られたことは、バーチャル影を実際の影と同様に捉えていたことを示していると考えられる。このことは「長い棒の影が投影されているように感じる」というコメントからも裏付けられる。すなわち、遠隔地間にまたがって投影されたバーチャル影においても、前章で確認したバーチャル影による身体性が損なわれていない可能性を示していると考えられる。実際に、項目 Q1 や Q2 において、バーチャル影の条件が最も高くなったことは、実際の道具使用時に道具上に生じる感覚の生起がバーチャル影においても生じやすくなることを意味しており、遠隔の映像空間に身体性が拡張する可能性を示す結果である。

また、ポインタの条件で、すべての項目で評価が低く、また「相手側との一体感がない」などの否定的なコメントが得られたことは、前章において得た身体やグリップの影から、道具の機能を担う道具の先端までバーチャル影が一続きに連続して呈示するという要件が損なわれたことによって身体性が拡張しなかったと考えられる。さらに、枠の条件に対し、多くの質問項目でバーチャル影の条件の方が、評価が高かったことは、身体やグリップの影から道具の先端まで繋がってさえすればどの様な映像で

第3章 道具の影による創出的コミュニケーションの遠隔支援

も良いというわけではなく、影のように捉えられることが重要であることが本実験からも明らかとなった。

なお、図 3.14 に示したように作業効率においては、各条件において有意な差を認めることはできなかった。一方で、AR 空間において、影を呈示することでバーチャルな物体の奥行き方向の位置認識が行いやすくなることが報告されている[88]。指示—操作課題を用いた本実験は、単純な位置認識の課題と比べ、様々な要素が含まれる複雑な課題であったため、作業効率への差として現れなかった可能性が考えられる。バーチャル影の条件においては「指示がしやすい」とのコメントが得られており、バーチャル影が作業効率に対して有効に働く可能性がある。

以上より、本研究で提案したバーチャル影を遠隔地間で共有する手法は、遠隔の映像空間中に身体性を拡張する上で有効であることが分かった。前章において実体としての道具はなくとも、道具のバーチャル影を呈示することで、身体性が拡張すること、身体やグリップの影から道具の先端までバーチャル影が一続きに連続して呈示されることがバーチャル影に身体性が拡張する要件となることが明らかになったとなったが、これが遠隔の映像空間においても有効であることが検証できたと言えよう。

このように提案システムによって、遠隔の映像空間にまでバーチャル影を介して自身の身体性が拡張し、遠隔の映像空間に身体がつながるような感覚の創出と、指示行為などの身体的なインタラクションを実現した。提案システムはこのような側面から創出的コミュニケーションの支援を実現した。

3.5. まとめ

本章を以下の通りまとめる。

- (1) 前章において実体としての道具はなくとも、道具のバーチャル影を呈示することで身体性が生じることや、身体やグリップの影から道具の先端までバーチャル影が一続きに連続して呈示されることがバーチャル影において身体性が生じるための要件であることを明らかにした。本章では、バーチャル影を空間共有技術において共有することを可能にするシステムを開発し、その遠隔映像空間への身体性の拡張の効果を検証することにした。

- (2) バーチャル影が、自身の影やグリップの影から遠隔の映像空間にまで、分断されることなく伸張して呈示するために、遠隔地間のテーブルを接合するという新たな空間共有手法を提案し、さらにバーチャル影の映像が双方で共有される独自のシステムを開発した。
- (3) 本システムによって、遠隔地間でどのように空間やバーチャル影が共有され、指示行為が実現されるのかを確認した。その結果、遠隔のテーブル面が自身のテーブル面が一つの平面をなすように一続きに共有され、さらに、遠隔のテーブル上の個物の奥行や高さ方向の情報も把握できることが分かった。またこの共有空間において、3次元的なグリップの操作に応じたバーチャル影が整合的に呈示されていることを確認した。
- (4) 遠隔地間において共有されたバーチャル影において身体性が拡張されたかどうかを指示行為の際の使用感覚に関する主観調査などから調べた結果、バーチャル影の条件において最も身体性が拡張されたことを示す結果が得られた。

以上要するに本章では、前章で提案した道具のバーチャル影を遠隔地間で整合的に呈示することが可能なテーブル接合型の空間共有技術とバーチャル影の共有システムを開発した。そして指示行為を行う実験の結果を通じて、道具のバーチャル影を呈示すること、そのバーチャル影は身体影から連続していることが遠隔の映像空間へ身体性を拡張する上でも有効であることを明らかにした。また、このことから本システムは遠隔の映像空間に身体が直接つながるような感覚を創出し、指示行為をおこなうような創出的コミュニケーションを支援する上で有効であることが示された。

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

4.1. はじめに

本章以降、手合わせ表現を創り合う際の自身と他者の関係性を身体性に着目して捉え、これを遠隔地間で実現することで遠隔の他者に身体性を拡張する創出的コミュニケーションの支援手法について述べる。本研究では手合わせ表現における身体性に関わる両者の関係性を、主観報告に加え、生理情報や身体動作の計測にて捉えることを試みることにした。本章ではこのための計測方法および計測装置の開発について記す。

手合わせ表現を共に創り合うことと、身体性の問題を関連付けて研究するには、少なくとも手合わせ表現を共に創り合うことを妨げることなく表現者の身体情報を計測する装置を設計、開発を行う必要がある。一方で、実際の手合わせ表現の動きは自由度が高く複雑で、また試行によって手の合わせ方などが異なるため、動作をある単位で区切って解析をおこなったり、試行間の計測データを比較したりすることが困難であることが予想される。そこで、まずは実際の手合わせ表現のビデオ観察などを踏まえ、動作自由度を制限する機構の設計、開発を行う。そして、計測対象の検討及び、計測センサの実装を行い、本システムの評価を行ったので以下にこれらの詳細について述べることにする。

4.2. 手合わせ表現の動作自由度の制限

4.2.1. 手合わせ表現の動作的特徴

まず、実際の手合わせ表現の身体動作の特徴について調べることにした。そこで、熟練者のペアが手合わせ表現を行う様子をビデオで撮影、観察した。本実験においては、熟練者 N(50 代女性)と熟練者 M (30 代女性) に手合わせ表現を 2 分程度行ってもらった。また撮影に使用したビデオカメラは HDR-PJ760V Sony 製である。その様子を図 4.1 に示す。

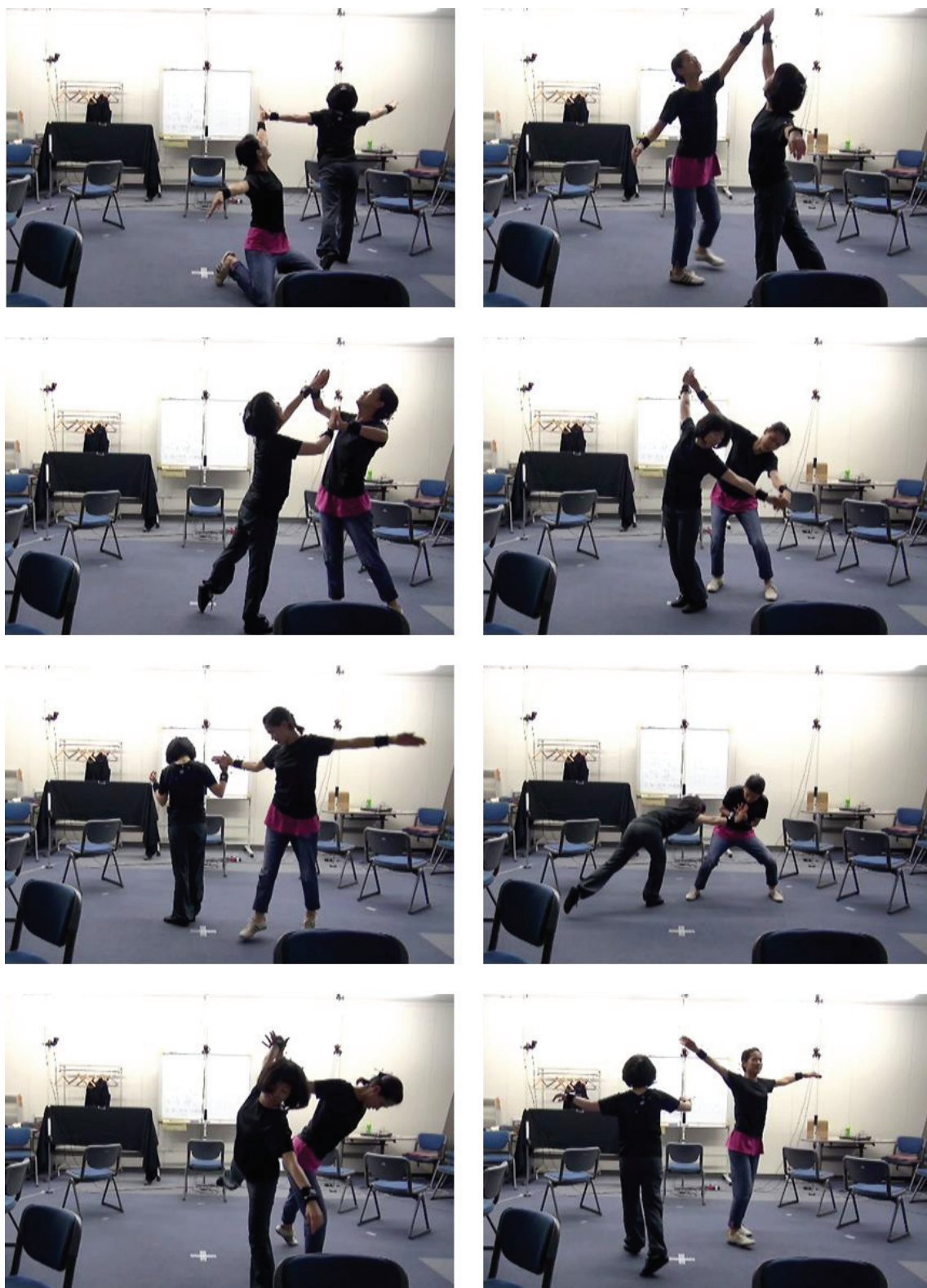


図 4.1 手合わせ表現の様子

Figure4.1 Scenes of hand contact improvisation

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

まず、手の合わせ方に着目してみると、右手と左手を合わせたり、右手同士あるいは左手同士を合わせたり、あるいは、両方の手を合わせたり、手を離したりというように2分間の試行のなかで様々なパターンを切り替えている様子が見て取れた。合わせた手は左右方向や前後方向に動かすのに加え、3次元的に複雑に動かす様子が観察された。また、相手の身体に向けて手に力をこめたり、あるいは受け止めたりといったシーンもよく見られた。次に全身の動きにまで視野を広げて観察してみると、お互いの立ち位置をあまり変えずに合わせた手を動かしている様子や、逆に合わせた手を双方の身体の接点として、全身で動いたりする様子が観察された。さらには、合わせた手を離し、身体を広げながら空間全体を動き回る様子などが確認された。

4.2.2. 動作自由度の制限機構の設計指針と要件

以上のように実際の手合わせ表現では、手の動作だけでなく、全身においても動きが生じ、またこれらの動作は多数の自由度を持ち複雑な軌道を描くことが分かった。したがって、この複雑な状態のまま身体動作を計測しても、動作をある単位で区切って解析をおこなったり、試行間の計測データを比較したりすることが困難である。そこで本研究では、手合わせ表現における身体動作そのものに制限をかけ、自由度を限定することにした。

本研究では、他者との間で生じる身体性について調べるため、手合わせ表現に着目した。その理由は序章でも述べたが、手合わせ表現は相手を対象物として操作したりするものではなく、役割が決められていないなかで、相手と即興的に一つの表現を創り合う点が挙げられる。したがって、少なくとも2者の関係が外部から規定されることなく、双方が自由に表現を創ることができる必要がある。これらの特性に着目して、表現動作の自由度を制限することを試みた。具体的は手合わせ表現の下記の特徴が失われないように装置のデザインを行うことにした。

- (1) 合わせた手のひらを表現者が主体的、随意的に動かすことができること
- (2) 相手に対してのはたらきかけや、相手の表現動作を受けることができること
- (3) 合わせた手のひらにおいて生じる力のやり取りが行えること
- (4) 手のひらの動作範囲を十分に確保できること
- (5) 全身に生じる動作が確保されること

以上の指針に基づいて下記のように手合わせ表現の動作自由度の制限を行った。

- (i) 手のひらの動きを1自由度に制限する。
- (ii) 合わせる手のひらは右手とし、また手のひらが離れることを制限する。
- (iii) 立ち位置の変化については取り扱わない
- (iv) 手のひらの面の変化によって生じる複雑なやり取りについては取り扱わない。

(i)について、1自由度であっても、指針で掲げた(1)～(5)のすべての項目は実現可能であると考えた。一方で、1自由度の向きや種類について、熟練者にヒヤリングなどを行ったところ、自身の身体と相手の身体を結ぶ直線上の前後運動が好ましいとの意見が聞かれた。この理由として、左右方向の動作や、回転動作と比較して、相手への働きかけや相手を受けとめる表現が行いやすいこと、全身が伴った表現が行いやすいことなどが挙げられた。これらの意見を踏まえ、本研究では、手の動作については、前後1自由度の直線運動に制限することにした。

(ii)については、合わせる手のひらが左右のどちらか、あるいは両手であるかといった事項については、指針(1)～(5)との関連性は小さいと考え、本研究では、一般に利き手であることが多い右手同士を合わせることを設定した。また、手を合わせたり離れたったりといった動作については、それによって自由度が増加するため、双方の手が離れないように結束することとした。

(iii)について、エドワード・ホールがプロクセミックスとして提唱しているように[89]、私たちは相手との相互作用において空間や距離を使い分けていると言われている。したがって、各人の立ち位置や距離は双方の関係性を何かしら反映するものと考えられる。しかしながら、本研究は手を合わせることを前提としており、双方の距離は大きく変化することがない。また、実際の手合わせ表現においては、手を合わせたまま立ち位置を変え、空間全体を使用して表現を行う様子が見られるが、本研究ではひとまず合わせた手のひらにおけるインタラクションに着目し、このような表現動作における空間使用の形態的な特徴については取り扱わないこととした。以上から本研究では、着座して向かい合った状態において手合わせ表現を行うこととした。なお着座した状態においても、上半身を用いる表現動作は可能であり、手合わせ表現におけ

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

る全身性は失われない。

(iv)について、実際の手合わせ表現においては、合わせた手のひら面の複雑かつ繊細な動きで表現をより豊かなものに行っている。しかしながらこのような手のひらの複雑な動きは自由度が非常に高く、計測や解析上の困難さが懸念される。そこで本研究では、合わせる手のひらの間に板を介在させ、1面的な動きや力のやり取りに単純化した。インクルーシブな活動の現場においては、棒や紐、ビニルボールなどを介在させて手合わせ表現を行うことがあり、手のひらの複雑な動きそのものを伝達しなくても、手合わせ表現の本質は失われないと考えられる。

以上を踏まえてデザインした手合わせ表現の動作制限機構のイメージを図 4.2 に示す。

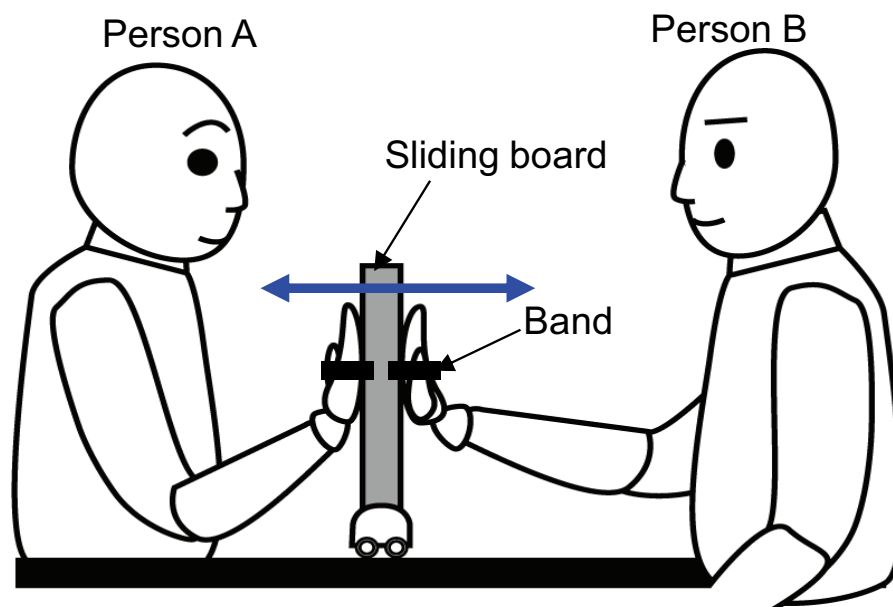


図 4.2 手合わせ表現の動作制限機構のイメージ

Figure4.2 Conceptual design of the mechanism for limiting movement of hand contact improvisation

4.2.3. 手合わせ表現の動作制限装置

前節のデザインを踏まえて手合わせ表現の動作制限装置を開発した．本装置では，前後に駆動するスライド機構上部に梁を介して板を固定し，この板に両側から手を結束することで，手の動きを前後 1 自由度に拘束する．本装置にける要求諸元は以下のとおりである．

- ① 腕の伸縮が十分にできるストローク (700[mm])を有すること
- ② 手合わせ表現における力のやり取り(最大 10[kgf])に構造が耐えうること
- ③ 身体的な特徴にかかわらず老若男女が使用できること

装置の外観を図 4.3 に示す．スライド機構は，手で押し引きする際に左右にがたつきがないこと，振動が極力抑えられること，またたわみなどが生じない十分な強度を有することが要求される．また慣性や摩擦の影響を極力小さいほうが好ましい．そこ

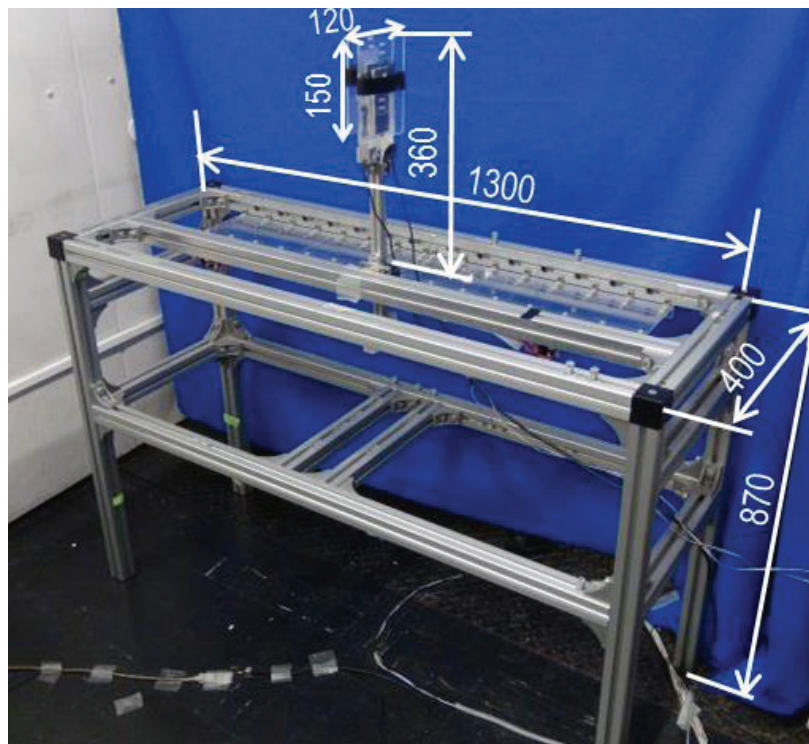


図 4.3 手合わせ表現の動作制限装置の外観

Figure4.3 Appearance of the mechanism for limiting movement of hand contact improvisation

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

で鉄製のリニアガイドレール（長さ 800[mm]，可動域 700[mm]）に設置したリニアベアリングにアルミ製の梁（20[mm]角）をネジで締結し，手で押し引きを行う2枚の亚克力板（150×120）をこのアルミ製の梁に挟み込むかたちで固定した．また，亚克力板にはマジックテープ式のベルトで手のひらを結束する機構を実装した．

手を結束する板は，着座して向かい合った状態で，自然に手を合わせた高さに配置されるよう，四足テーブル型の筐体（1300×400×870）の天面に配置した．筐体は40[mm]角のアルミフレームで構成した．

4.3. 計測対象と計測システム

4.3.1. 計測対象の選定

本研究では，他者との間での身体性の問題について取り組むために，手合わせ表現における双方の関係性を捉える．そこで，手のひらの動きを前後一自由度に制限した手合わせ表現において図 4.4 に示すように，(a)手の動作と(b)手に生じる力，(c)各人の筋電図，(d)COP を計測可能な装置を開発することにした．各項目に着目した理由は以下の通りである．

(a) 手の動作

手合わせ表現は手と手を合わせて即興的に表現を創り合う手法である．合わせた手はお互い身体の物理的なインタラクションが生じる接点であると同時に，表現物として動きを表出する箇所でもある．したがって，合わせた手の動きは表現が共に創り合っているかどうかは直接反映されていると考えられる．

(b) 手に生じる力

合わせた手における物理的なインタラクションは，反力として現れる．お互いの間の力の出し合いや力の調整は合わせた手のひらの動きを創り合ったり，相手の身体を感受したりする上で重要である．このことから，手に生じうる力は双方の関係を捉える上で重要な情報が含まれていると考えられる．

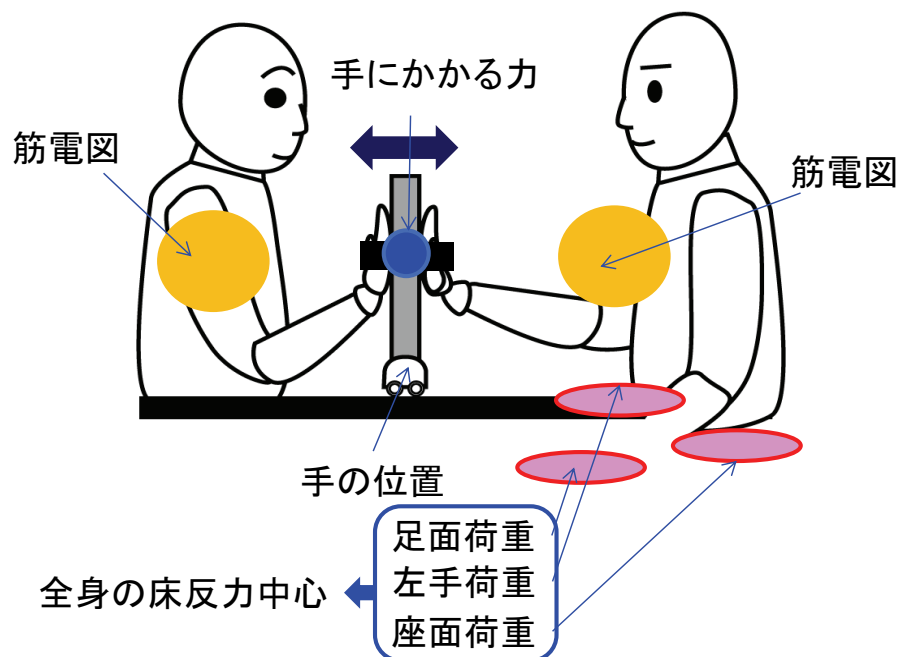


図 4.4 本研究における計測対象

Figure4.4 Measurement objects

(c) 筋電図

手に生じる力は双方のインタラクションによって生じた力の合力であり、各人の身体が随意的に発した力を捉えることはできない。どちらの身体がどの程度力を発生しているのかを調べる指標として筋電図を計測することは有効であると考えられる。そこで本研究では、スライド機構を前後させる際に生じる腕部等の筋電図を計測することにした。筋電図は筋収縮が生じると必ず生じるものであり、また筋張力の大きさとともなって筋電図の大きさも多くなる傾向にあることが知られており[90]、筋電図の振幅の大小から、各個人内における相対的な力の大小を調べることができる。

(d) 床反力中心 (COP)

実際の手合わせ表現においては、合わせた手を接点として全身で表現を行い、双方の間で一体感などが生起する。したがって、手合わせ表現での他者への身体性のプロセスでは、接点となる手だけでなく、それ以外の身体各所においても、双方の関係性の変化が表出する可能性があるのではないかと考えた。本研究では、手という局所的な動きに対して、上半身の動作に着目し、これを捉えるために全身の床反力中心 (center of pressure: 以下 COP) の前後方向の変化を計測することにした。

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

4.3.2. 計測システム

(a) 手の動作

合わせた手のひら動きは、時々刻々変化するスライド機構の位置を計測することで実現する。そこで、図 4.5 に示すようにリニアエンコーダ（E6L，オムロン製）をスライド機構に搭載し、検出スケールを筐体側に取り付けることで計測を実現する。また、リニアエンコーダから出力されるパルス状の信号はカウンタボード（PCI-6204，インタフェース製）を介して PC 上に送られ、CSV データとして記録される。なおリニアエンコーダの分解能は、0.25[mm]であり、手の動作を計測するためには十分な精度を有する。

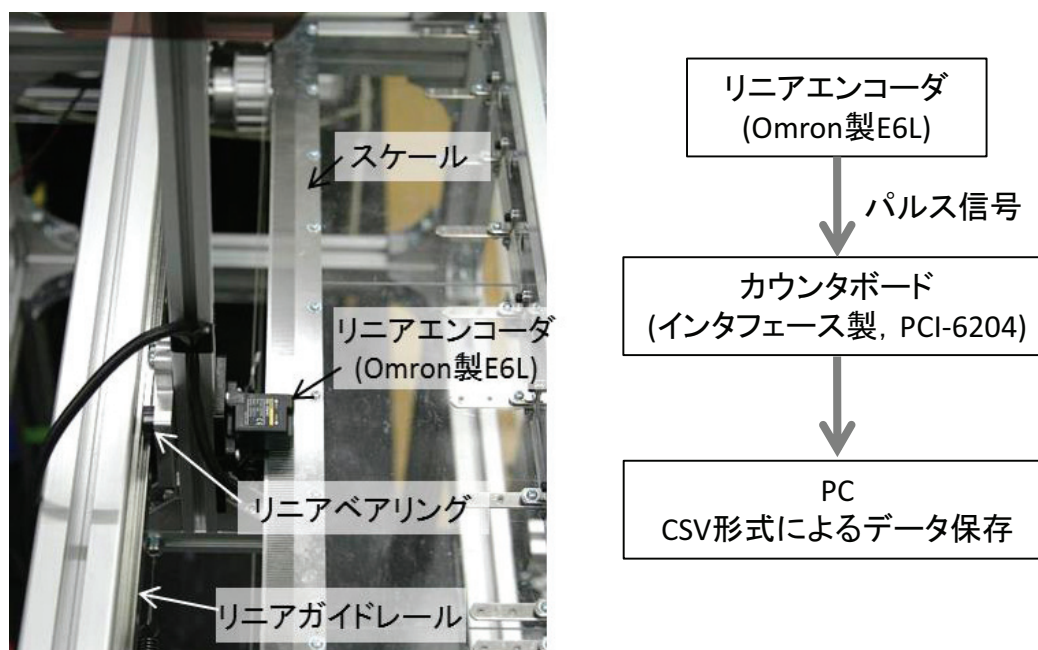


図 4.5 スライド機構および位置センサの詳細と計測システム

Figure4.5 Details of the sliding mechanism and position sensor, and measurement system

(b) 手に生じる力

本計測システムにおいてはスライド板を介して手合わせ表現を行うため、各人の手のひらに生じる力はスライド板の慣性や摩擦の影響も含まれる。スライド板を介した手合わせ表現において双方の力のインタラクションを正確に計測するために、両者の

手のひらとスライド板の間に生じる反力やスライド機構によって生じる摩擦と慣性の大きさや方向を実時間で把握する必要がある．特に摩擦力については，リニアガイドレールの状態や手合わせの際に生じる鉛直方向の反力のなどによって時々刻々変化するため，事前に把握することは困難である．そこで，以下の力計測システムを開発した．

本システムでは，図 4.6 に示すように，リニアベアリングに連結された柱を軸として，前後方向に対称となるように 2 個の力センサを実装した．このように力センサを 2 個用いることで，両者の手のひらとスライド板の間に生じる反力だけでなく，摩擦と慣性の和を算出することが可能となる．ここで，図 4.6 に示すように両端から $f_{sensorA}$, $f_{sensorB}$ の力で押し合っているスライド機構の運動方程式を式(4.1)に示す．

$$f_{sensorA} - f_{sensorB} = Ma + f_{friction} \quad (4.1)$$

$f_{sensorA}$, $f_{sensorB}$ は，力センサで計測される値なので，式(4.1)から $f_{sensorA}$ と $f_{sensorB}$ の差がスライド機構の摩擦と慣性の和となる．また， $f_{sensorA}$, $f_{sensorB}$ は各人の手と板の間に生じる反力の大きさとなる．

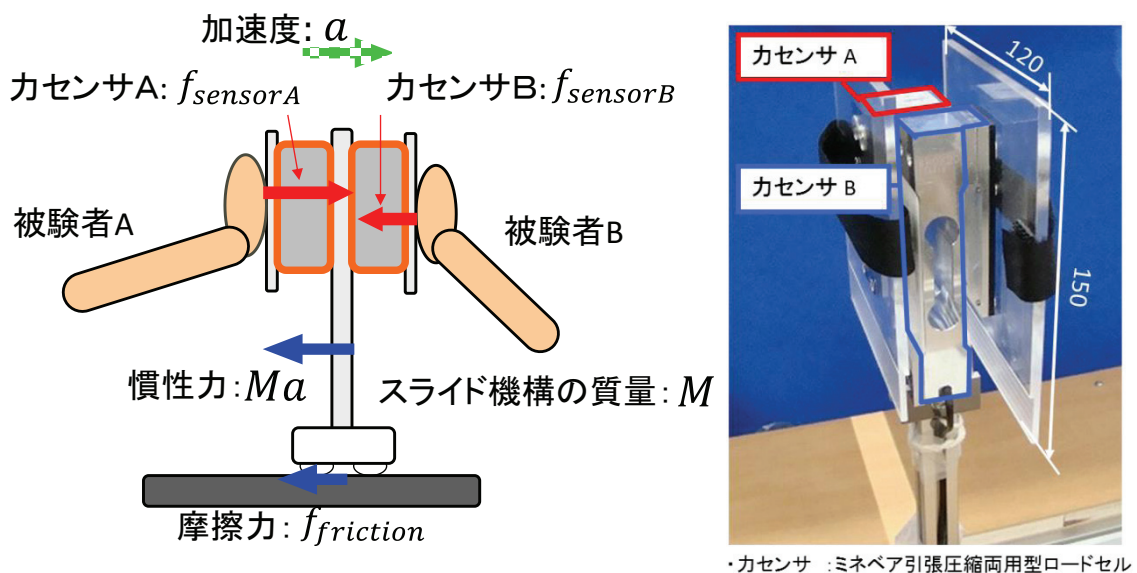


図 4.6 手合わせ表現における力計測機構

Figure 4.6 The force measurement mechanism in hand contact improvisation

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

使用した力センサは、荷重点がロードセルの中心線からずれることによってトルクが発生しても、その影響を受けずに前後方向の正確な力が計測できるものを使用した。力センサからの信号はアンプによって増幅した後、A/Dボードを用いてPCに取り込む（図4.7）。

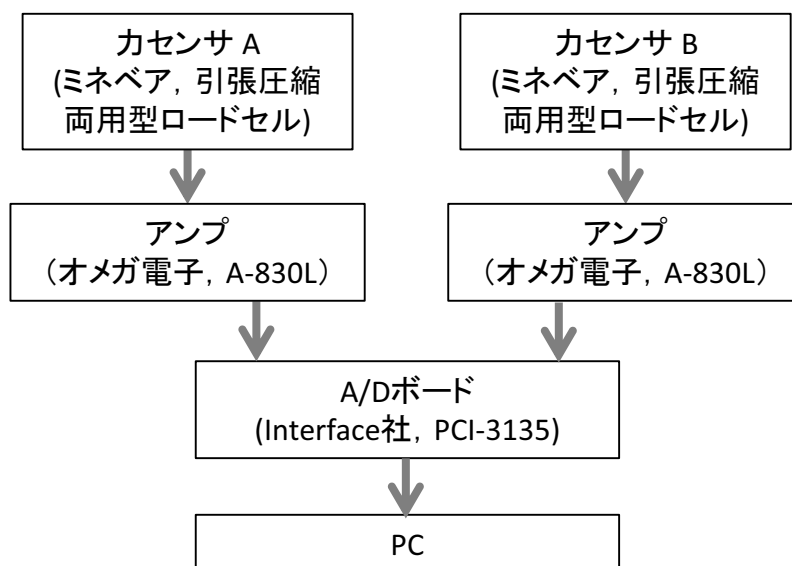


図 4.7 手合わせ表現における力計測システム

Figure 4.7 The force measurement system in hand contact improvisation

(c) 筋電図

表面筋電図は、数十 μ V～数mV程の信号であり、表面筋電図の計測には、体動によるアーティファクトやノイズが乗りにくい電極やアンプが必要となる。また周波数成分は、5～500[Hz]に分布すると言われている[90]。従って表面筋電図の計測およびデータ記録システムは、サンプリングの定理から、少なくとも1k[Hz]以上のサンプリング周波数が必要となる。本研究で表面筋電図の計測システム（DELSYS社、The Bagnoli-2）を用いた。本システムは能動電極（合計4ch）、及びアンプから構成される。なお本アンプはリファレンス電極を用いた差動増幅（利得80dB）が可能である。アンプから出力された増幅後の筋電図信号はADボード（Interface社、PCI-3135, 16ビット）を介してPCに記録される。本システムの構成を図4.8に示す。また、以上の各データには μ sオーダの精度が保証されている関数を用いて時間情報を取得し、これとともに記録した。本システムを用いて筋電図4chと位置を同時に計測した場合、約1800[Hz]のサンプリング周波数で記録できることが確認された。

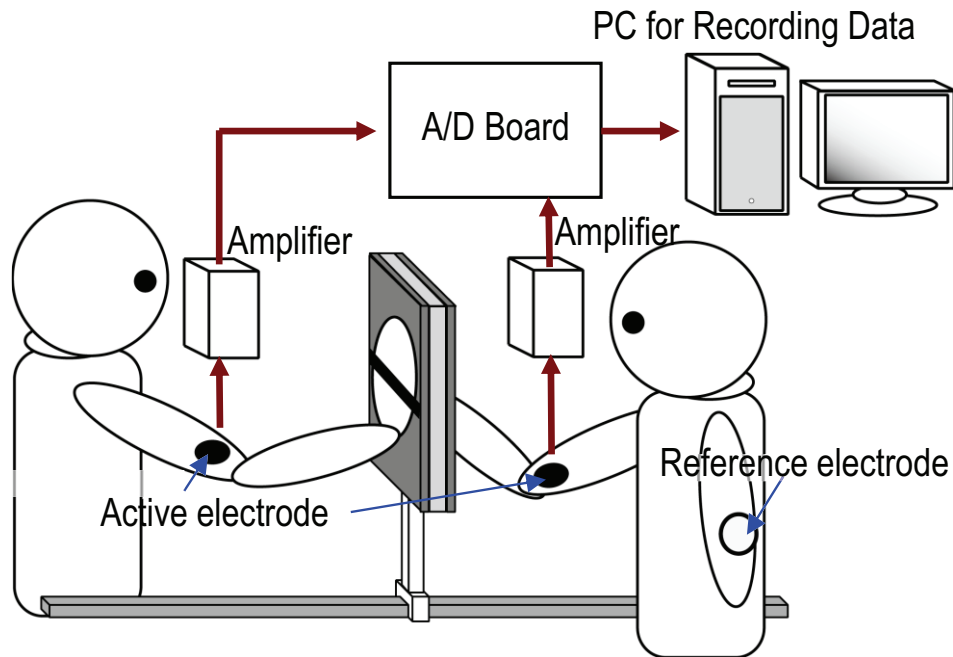


図 4.8 手合わせ表現における筋電図計測システム

Figure 4.8 System of EMG measurement during hand contact improvisation

(d) 床反力中心 (COP)

COP の計測システムの概略図を図 4.9 に示す。身体の接地面である左手，座面，足部に荷重計を配置し，それぞれの荷重計により得られた荷重と位置関係から算出する。座面，足部の荷重計は任天堂の「バランス Wii ボード」を，また，左手の荷重計測については，自作の小型荷重計を利用した。

自作の小型荷重計は図 4.10 に示すように，ポリアセタール板（ $240 \times 180 \times 5$ ）四隅にロードセル（ミネベア，CB17-3K-11，定格容量 29.42[N]）を配置することで，左手の荷重の大きさと，左手の反力中心がポリアセタール板上のどこに存在するかを調べることが出来る。

バランス Wii ボードについては，COP を計測する上で十分な性能を有していることが既に確かめられている[91]。一方で，バランス Wii ボードを複数台使用する本システムでは，バランス Wii ボード間のデータ取得の同期性を高めるために，バランス Wii ボードが内蔵する Bluetooth による通信を使用せず，四隅に配置されたロードセルにアンプ（オメガ電子 A-830L）を直接接続し，データを取得した。

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

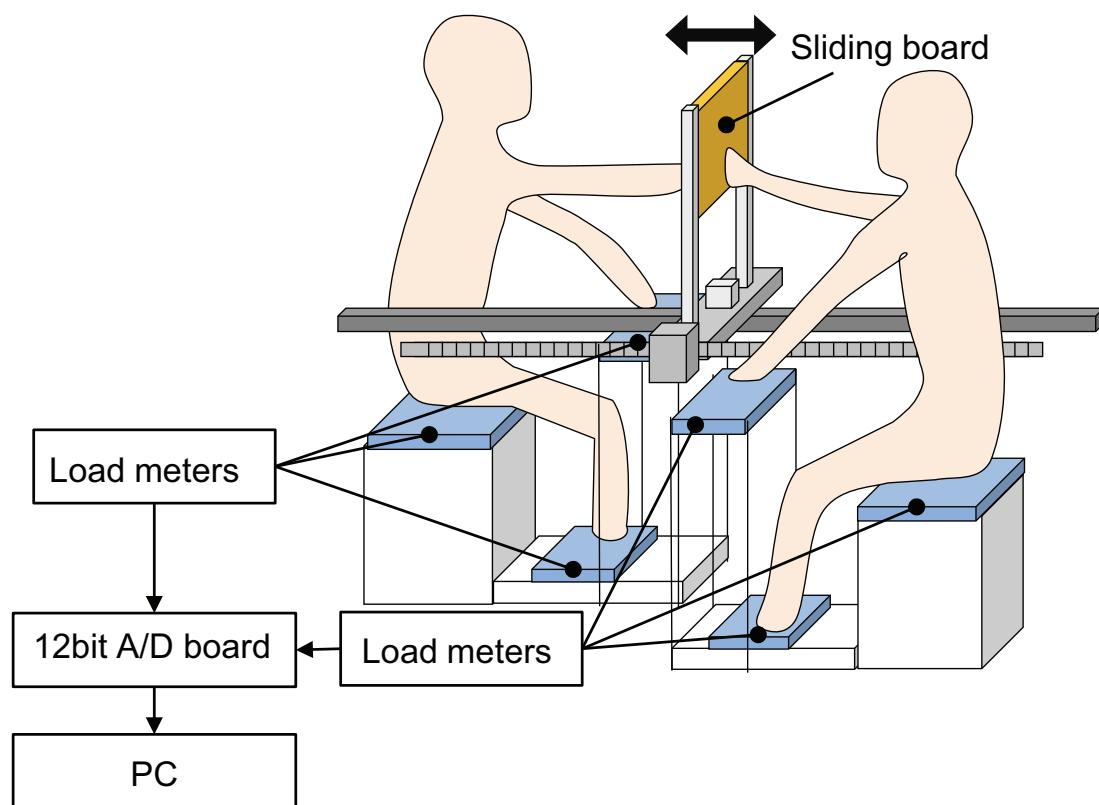


図 4.9 手合わせ表現における COP 計測システム

Figure 4.9 COP measurement system in hand contact improvisation

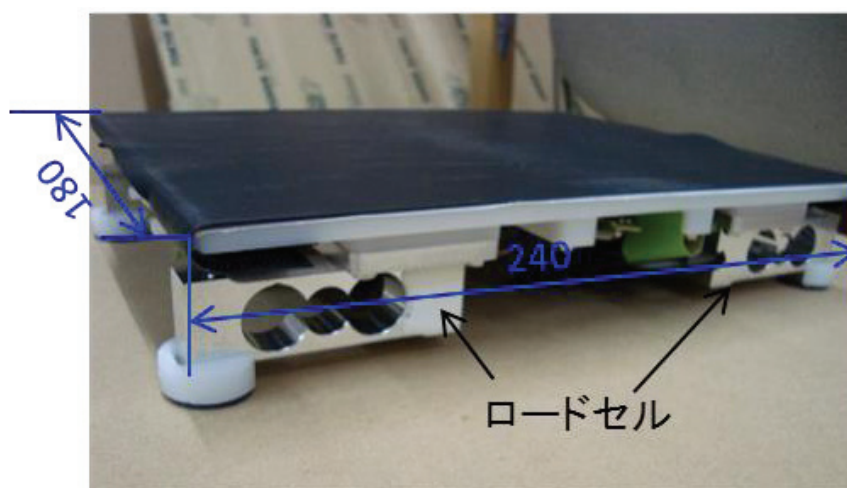


図 4.10 左手用荷重計

Figure 4.10 Load meter for left hand

各荷重計における COP の位置と荷重の大きさを得ることが出来れば，各荷重計間の相対的な位置関係から全身の COP を算出することができる．この時，各荷重計間の相対的な位置関係を予め固定しておくことで，各荷重計の位置補正を計測毎に行う手間を省くことができる．そこで，図 4.11 に示すアルミフレームを用いて座面，足面，左手の荷重計を固定する枠組みを作成した．イス，テーブルの高さ及び足置き部の前後方向はそれぞれ 30[mm]間隔の 5 段回で調節可能な構造とした．

各荷重計からの信号は，A/D ボード(インタフェース製，分解能 12[bit])を介して PC (CPU: Core 2 Quad 2.66[GHz]) に記録した．以上のシステムにより，200[Hz] のサンプリング周波数で，手の動きと COP の動作を同時に計測することを実現した．

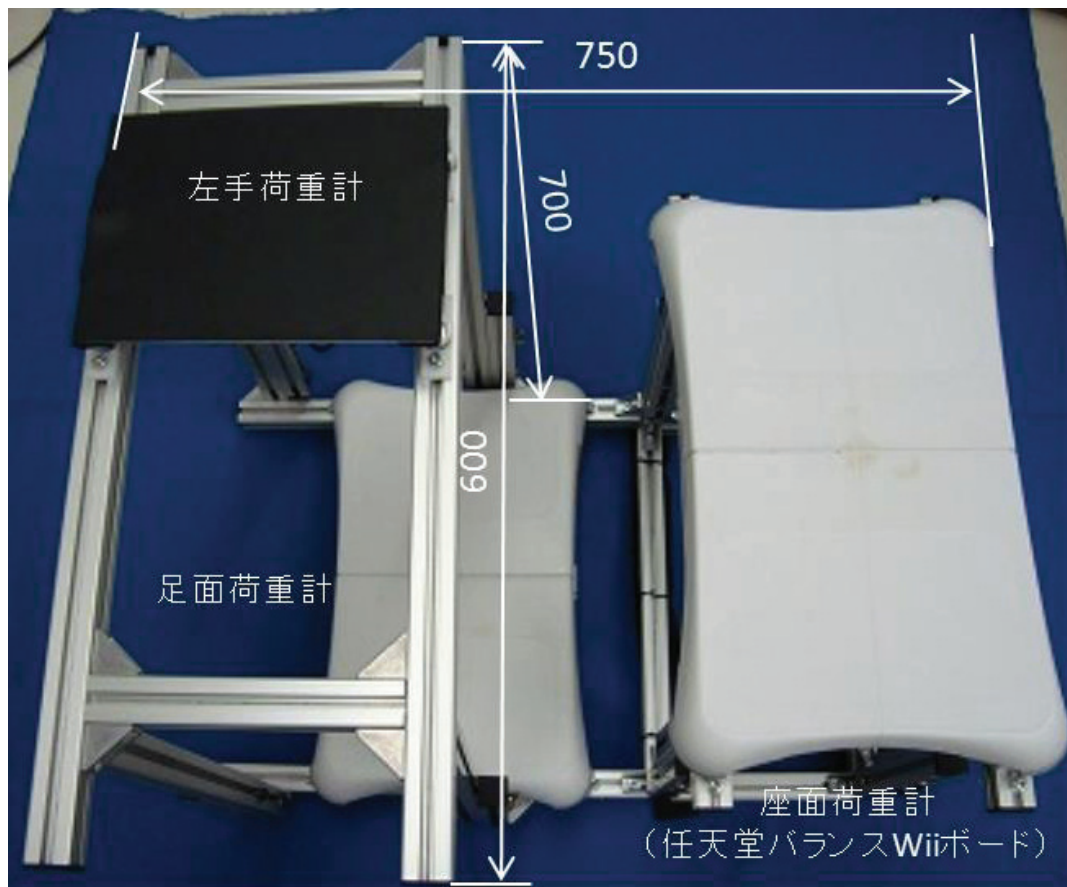


図 4.11 身体全体の COP 計測装置の外観

Figure 4.11 Appearance of measuring system for COP of the entire body

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

各荷重計の COP と荷重の大きさを算出し、各人において 3 つの荷重計の相対的な位置関係から全身の COP を算出する。

まず、各荷重計における COP の位置と荷重の大きさを算出する。荷重の大きさ W は式(4.2)で、各荷重計の中央部を原点とした COP の位置 X, Y は、式(4.3), (4.4)で決定される。なお、下記の $f_{ur}, f_{ul}, f_{br}, f_{bl}$ は各荷重計の右上、左上、右下、左下に搭載したロードセルから得られるそれぞれの荷重を表す。なお、ロードセルから得られる電圧の信号と実際の荷重の関係については、事前のキャリブレーションにより求めた。

$$W = f_{ur} + f_{ul} + f_{br} + f_{bl} \quad (4.2)$$

$$X = \frac{(f_{ur} + f_{br}) - (f_{ul} + f_{bl})}{W} \times \frac{width}{2} \quad (4.3)$$

$$Y = \frac{(f_{ur} + f_{ul}) - (f_{br} + f_{bl})}{W} \times \frac{height}{2} \quad (4.4)$$

次に上記で求めた値から、全身の COP を算出する。座面、足面、左手の荷重計の位置関係はアルミフレームによって固定されている。本システムでは、各人の座面荷重計の中心を原点とし、その点からの各荷重計の COP の位置と荷重の大きさより、式(4.5), (4.6)を用いて、全身の COP 座標 (X_{whole}, Y_{whole}) を算出する。なお本研究では、各人の座面の中心を原点とした座標系を採用した。右手の位置と各被験者の COP の座標関係を図 4.12 に示す。

$$X_{whole} = \frac{\sum W_n X_n}{\sum W_n} \quad (4.5)$$

$$Y_{whole} = \frac{\sum W_n Y_n}{\sum W_n} \quad (4.6)$$

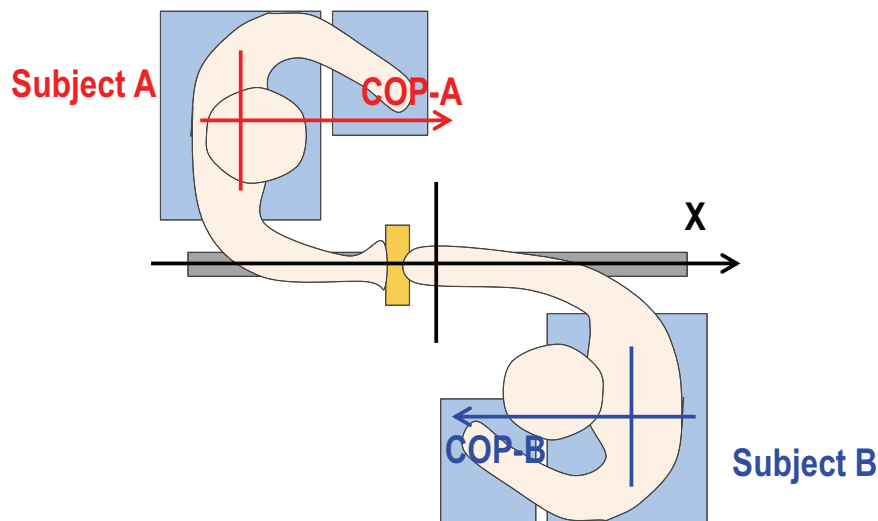


図 4.12 手と COP の位置の座標関係

Figure 4.12 Coordinate systems of the position of hand and the COP

自作した左手 COP 計測用の小型荷重計について性能評価を行った．その方法として，おもりを左手荷重計上の所定の位置に 200[g]から 1600[g]まで，200[g]ずつ増やして載せていき，算出した荷重点の位置のずれと，荷重の大きさのずれを調べた．おもりを載せた位置は，左手荷重計上の 5×7 の格子上 35 点である（格子の 1 辺は 30[mm]）．その結果，荷重点の位置誤差は，平均 2.0 ± 0.3 [mm]であり，荷重の大きさの誤差は 0.1%以内に収まった．

次に，左手，座面，足面の 3 つの荷重計に 1 つのおもりの荷重を分散させて付加した際に，その錘の重さと，COP が正確に計測されるかを確認した．そこで，3 つの荷重計におもりの荷重を分散させるためのフレーム部材を組み，この上に錘を乗せた．その結果，荷重の大きさについては 2%以内，COP と荷重点のずれは 5%以内に収まることを確認した．

4. 4. システムの評価

4. 4. 1. 熟練者の主観による評価

開発した動作制限機構を用いても，双方の身体表現が十分に行えるかどうかを確認するため，手合わせ表現の熟練者 3 名（30 代～50 代，女性，N,M,T）で構成する 3

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

組のペア（N・M，N・T，M・T）に実際にスライド機構を介した手合わせ表現を行ってもらった。各実験時間は、それぞれ 120 秒間である。その様子を図 4.13 に示す。評価の方法として、第 1 章でも述べたとおり、身体表現は単に身体動作だけを指すのではなく、身体動作によって内観が変化するとともに、内観を身体動作として表出する側面をもつ。そこで、手合わせ表現の熟練者の内観を記述式のアンケートにより報告してもらい、本装置において表現が創り合えるかどうかを調べた。

その結果、「互いの手のひらで直接ふれあっている感じがする」「相手の動きを十分に感じ取ることができる」「自分のイメージをスライド機構の動きで表現することができる」「表現が相手と合致した」といったコメントが聞かれ、本装置において、手合わせ表現を共に創り合うことが出来ることを確認した。



図 4.13 スライド機構を介した手合わせ表現の様子

Figure4.13 Hand contact improvisation through the sliding mechanism

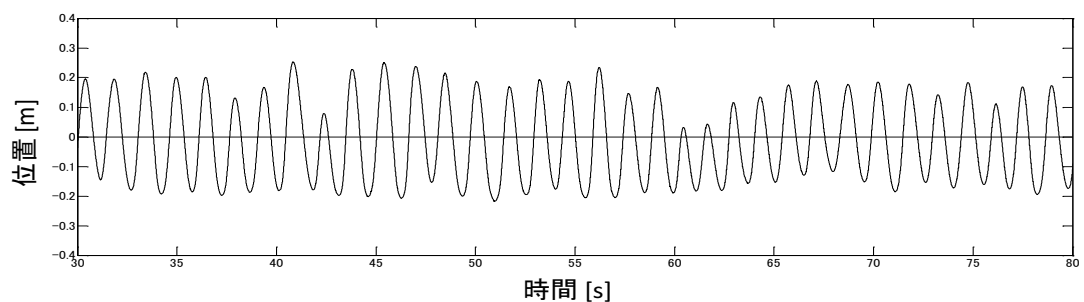
4.4.2. 初心者と熟練者による手合わせ表現

本装置を用いて計測したデータの一部を図 4.14 に示す。なお被験者は、手合わせ表現の熟練者 N と手合わせ表現をこれまで経験したことのない初心者の M（20 代男

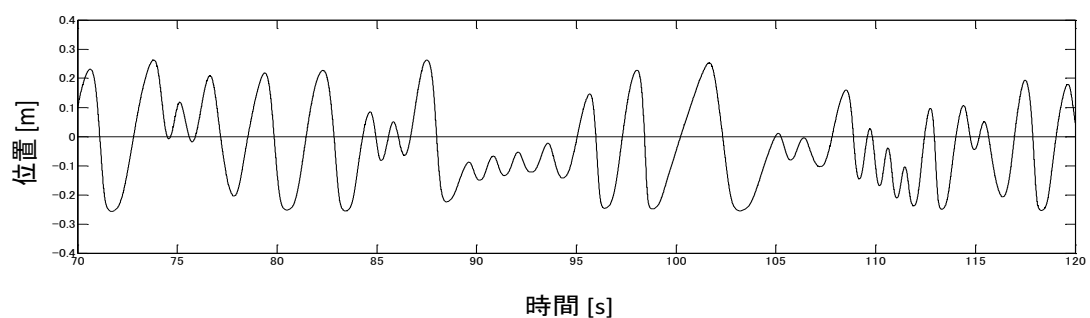
子学生)である。

ここで初心者 **M** がリードして表現を創る場合 (条件 **I**) と, 熟練者 **N** がリードして表現を創る場合 (条件 **II**) の二条件において手合わせ表現を行なった。実験時間はそれぞれ 2 分間である。

まず, 手の動きに合わせて変動する波形データが見られ, 本システムによって位置が計測できていることがわかる。また条件間の違いに着目すると, 条件 **I** の場合, ノコギリ状の単調な動きをしていることが見て取れる。この時, 初心者 **M** からは, 「何をしたら良いのかわからない」「表現を上手く作れない」といったコメントが聞かれた。一方, 条件 **II** では周期や振幅が様々に変化している様子が見て取れ, 「変化に富んだ表現を創ることができた」と言ったコメントが聞かれた。条件 **I** と **II** で計測結果や感想に違いが出たことは, 表現を創り合える状態とそうでない状態, すなわち身体性が拡張する場合としない場合の双方が本装置において起こりうることを示しており, またその違いが計測データの違いとして取り出せることを示唆していると考えられる。



(a) 条件 **I**: 初心者 **M** がリードした場合



(b) 条件 **II**: 熟練者 **N** がリードした場合

図 4.14 本システムによる計測結果

Figure 4.14 Measuring result by the system

第4章 手合わせ表現における身体動作の計測システム

以上より、前後1自由度に手の動きを制限する本装置において、手合わせ表現が行えることを確認し、本装置を用いて手合わせ表現における身体性を計測にて捉えうる可能性を示した。

4.5. まとめ

本章の内容を以下にまとめる。

- (1) 本研究では、遠隔の他者に身体性を拡張し、創出的コミュニケーションを支援する方法に関する知見を得るため、手と手を触れ合わせて即興的に表現を創り合う手合わせ表現において身体動作や生理情報を計測することで、他者との間で身体性が生成する際の双方の関係を捉えることにした。本章では、このための装置開発について記述した。
- (2) 通常の手合わせ表現の動きをビデオにより観察したところ、自由度が高く複雑で、また試行によって手の合わせ方などが異なるため、動作をある単位で区切って解析をおこなったり、試行間の計測データを比較したりすることが困難であることが分かった。そこで、他者と表現を即興的に共に創りあえることを妨げることなく表現者の動作自由度を制限する機構の設計を行った。
- (3) 具体的には、本研究では、着座して向かい合った状態において手合わせ表現を行うこととした。さらに、テーブル上面に取り付けられたスライド機構に梁を介して板を固定し、この板に両側から手を結束することで、手の動きを前後1自由度に拘束する装置を制作した。
- (4) 本研究では、計測する身体動作や生理情報として、合せた手の動作と手に生じる力に加え、各人が発生する力を捉える筋電図や、各人の全身の動作捉える COP に身体性に関する情報が表出するのではないかと考え、これらを計測するためのシステム開発し、その動作を確認した。
- (5) 本装置を用いて実際に熟練者に手合わせ表現を行ってもらい、主観調査などによ

り本装置においても表現を創り合うことが可能であることを評価した。その結果、本装置において、手合わせ表現を共に創り合うことが出来ることを確認し、本装置においても手合わせ表現における身体性が生じうることが示唆された。

以上要するに本章では、手合わせ表現における身体性を、生理情報や身体動作によって捉える計測システムの設計と開発について述べた。具体的には、計測やデータの解析を容易にするために、手の動きを前後 1 自由度に制限する装置を開発した。そして、手の動きや各人の力や筋電図、全身の COP を計測可能なシステムを開発した。本装置による身体動作の拘束下においても、手合わせ表現を創りあえることが確認され、本装置によって手合わせ表現における身体性を、双方の身体動作の関係性と関連つけて調べることを可能にした。

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

5.1. はじめに

本章では、遠隔の他者にまで身体性を拡張し、創出的コミュニケーションを支援するための知見を得るため、手合わせ表現を創り合う際の身体性を、前章にて説明した計測装置を用いた生理情報や身体動作から捉えることにした。

他者と道具のもっとも大きな違いは、主体的に行うか否かである。そこで、本章では手始めとして、手合わせ表現を行う際に、主体的な他者が関わる状況に特徴的な身体の関係性について調べることにした。具体的には、主従（リード・フォロー）の役割を固定した条件とリード・フォローの役割を固定しない条件で比較をする。ここで、実験条件による双方の身体的な関係性を捉えるため各人が身体内部における力の発生を筋電図により計測することにした。そしてこの計測結果から、手合わせ表現を創り合う際の双方の身体の関係性を捉えるための計測手法について検討する。

次に以上を踏まえ、本研究では合わせた手のひら同士の動作に加え、各人の COP に手合わせ表現を創り合う際の身体性が表出するのではないかと考え、表現を共に創り合うことができた試行とそうでない試行の計測結果の比較を行う。これらの計測結果より手合わせ表現を創り合う際の身体性における双方の関係性について明らかにする。以下に以上の詳細について記す。

5.2. 手合わせ表現における表面筋電図の計測

5.2.1. リード・フォロー動作における筋電図

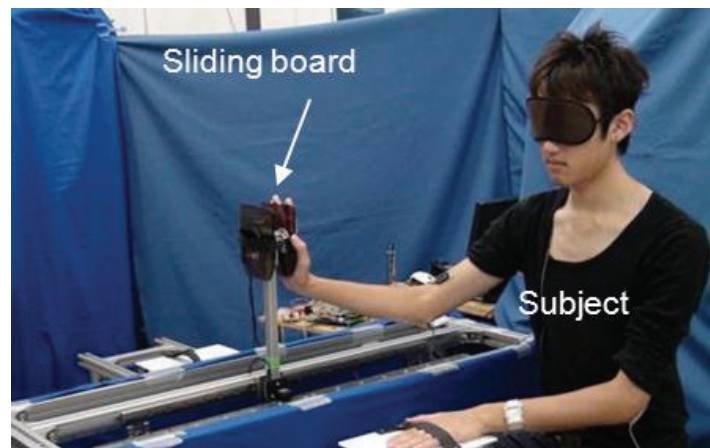
リード・フォローの役割を固定しない条件の双方の関係を捉えるのに先立ち、まず、リード・フォローの役割を固定した場合にそれぞれの条件の身体の状態を調べることにした。ここで、身体の動きの情報である位置や速度、加速度からはリード、フォローの役割に関わる情報を捉えることはできない。例えば、一方が手を前に動かした場合、相手をリードして押したのか、あるいは相手の引張りをフォローしたのか、外か

ら見ただけでは同じに見えるため判断が困難である．そこで，各々の身体に発生する力に着目し，その発生を簡易に捉えることのできる筋電図を利用することにした．

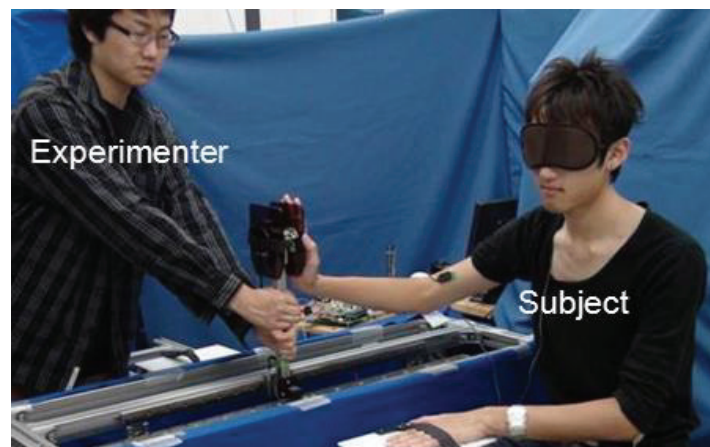
まず，リード、フォローの状態における筋電図の特徴を捉える手始めとして，被験者が1人のみで下記の2つの条件において実験を行った．被験者は20代男性8人である．

条件①（リード動作）：スライド板を，手を用いて能動的に前後に動かす（図 5.1 (a)）

条件②（フォロー動作）：他動的に動かされるスライド板に対し受容的に手を動かす（図 5.1 (b)）



(a) 条件① リード動作



(b) 条件② フォロー動作

図 5.1 実験条件

Figure 5.1 Experimental conditions

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

条件①については被験者に好きなタイミングで動かしてもらった。また条件②については実験者がスライド機構をランダムなタイミングで動かす。実験者の動きの視覚的な情報によって被験者があらかじめ身体を動かしてしまうなどの影響をなくし、視覚的な情報を条件①と条件②で揃えるため被験者には目隠しをしてもらった。またスライド機構を動かす手は右手とし、条件①、条件②共に被験者は60秒の間、繰り返し動かした。動きと動きの間には数秒静止するインターバルを設けた。なお、筋電図を計測する能動電極は図5.2に示すように、スライド機構を引く際に活動する上腕二頭筋と押す際に活動する大胸筋の脇の下寄りの箇所に両面テープで貼付し、差動増幅を行うためのリファレンス電極は筋肉がほとんどない左腕の肘の箇所に貼付した。条件①、条件②の計測データの一部を図5.3に示す。

筋電図はスライド板の位置や加速度に応じて変化している様子がわかる。ほとんどの被験者において、筋電図の立ち上がりは位置や加速度の変化において条件①に比べ条件②のほうが早い傾向が見られた。そこで、前方動作と後方動作のそれぞれについて筋電図と加速度の立ち上がりの時間差(筋電図の立ち上がり－加速度の立ち上がり)の8人の被験者の平均値を算出した(表5.1)。

その結果、条件①のほうが、条件②に対し、筋電図の立ち上がりが200[ms]程度早いことがわかった。前方動作と後方動作のそれぞれについて、条件①と条件②の平均値に対して対応のあるt検定を行ったところ、前方動作については、

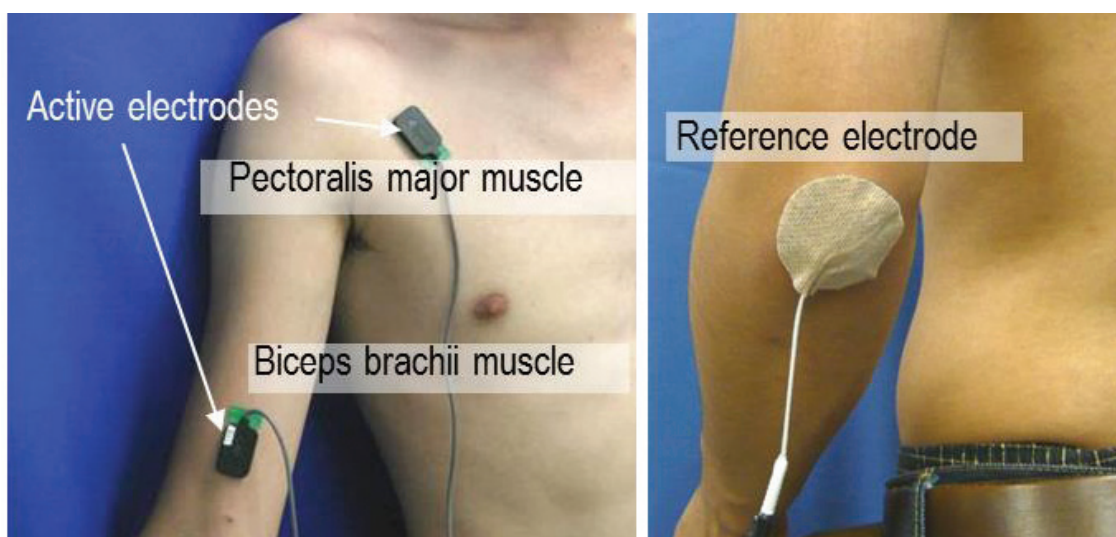
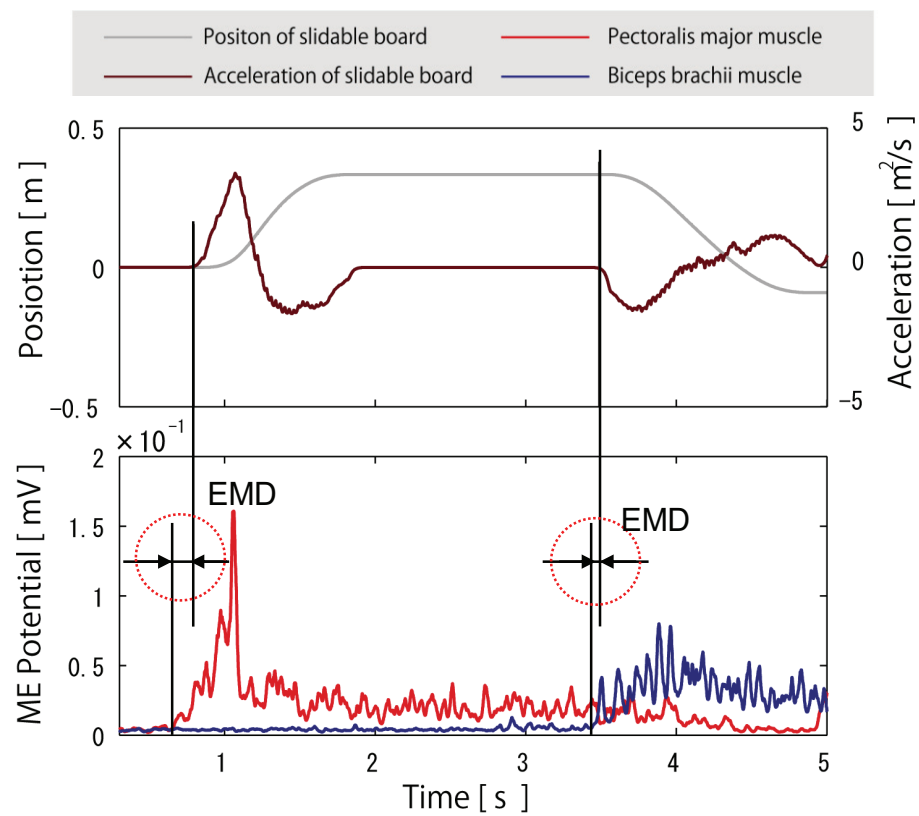
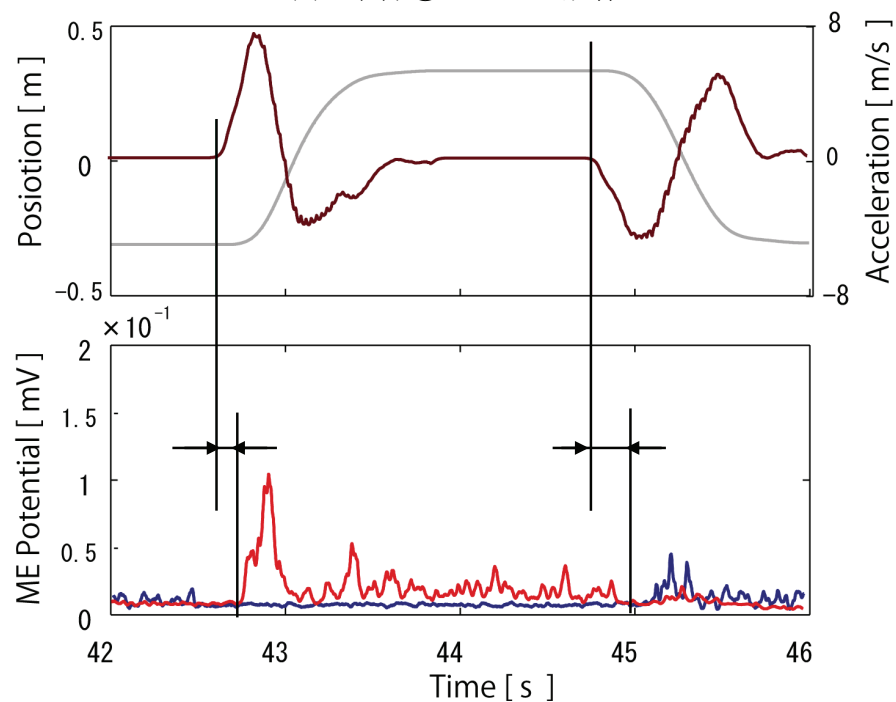


図 5.2 筋電計電極添付位置

Figure 5.2 Positions of active and reference electrodes



(a) 条件①: リード動作



(b) 条件②: フォロー動作

図 5.3 リード動作, フォロー動作における筋電図

Figure 5.3 Partial results of measurement of lead and follow movements

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

$t(7)=8.04, p<0.001$, 後方動作については $t(7)=5.69, p<0.001$, となり有意に条件①の方が筋電図の立ち上がりが早いことが確かめられた. また, 条件②における電気力学的遅延についてはスライド機構を前に動かすときには確認できたものの, スライド機構を後ろに動かすときには確認できなかった. この理由の一つとして, スライド機構を後ろ動かすとき上腕二頭筋が活動する前に, 腕や腰などの他の筋肉を用いてスライド機構を動かし始めている可能性が考えられる.

次に, 筋電図のピークの大きさについて調べた. 一般に筋電図はその筋肉において

表 5.1 手の加速度の立ち上がりに対する筋電図の立ち上がりの先行時間
Table 5.1 Average time of lags between the increase in ME potential and the start of the acceleration

前方動作		後方動作	
リード動作 s	フォロー動作 s	リード動作 s	フォロー動作 s
-0.027 ± 0.056	0.185 ± 0.049	0.050 ± 0.117	0.250 ± 0.117

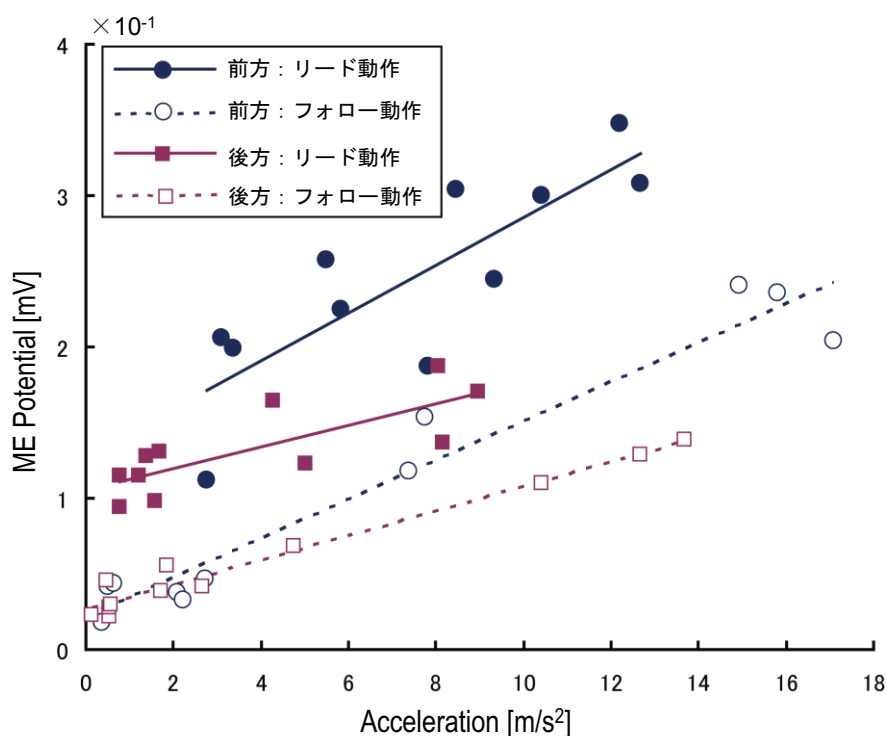


図 5.4 リード動作・フォロー動作における手の加速度と筋電図のピーク値の関係
Figure 5.4 Relationship between ME potential and acceleration of lead and follow movements

発生する力の大きさに対し、比例的に大きくなると言われている。また、スライド機構に対し力が大きく働けば、その分スライド機構の加速度も大きくなる。そこでスライド機構の速度の正負が切り替わる時点から次に正負が切り替わる時点までの間を一つの動作として区切り、一つの動作における加速度のピーク値を横軸に、その際の筋電図のピークの大きさを縦軸にプロットした。図 5.4 は被験者 K における結果である。その結果、筋電図は動きの加速度に対し、正の相関を持つことがわかり、さらに、同じ加速度でスライド機構が動いている場合、条件①の方が条件②に比べ筋電図が大きくなることが分かった。

以上より、手合わせ表現においてリード・フォローの役割を固定した状態においては、リードの際に筋電図が早く発生したり、筋電図の振幅が大きくなったりするなど、役割に特徴的な筋電図が得られることが示唆された。

5.2.2. 役割を固定した手合わせ表現における筋電図

次に、2 人の被験者がリードとフォローの役割を固定して手合わせ表現を行った場合に、リードとフォローの役割において役割と筋電図の間にどのような関係があるかを調べた。そこで、一方の被験者に対しては常にリードし、他方の被験者に対しては常にフォローするようにして、手合わせ表現を行ってもらうことを指示した。被験者は 20 代男性の大学院生 8 名の 4 ペアである。被験者は、各役割に付き 1 試行ずつ合計 2 試行を行った。1 試行 60 秒間である。また、視覚情報による影響を取り除くため、被験者に目隠しをしてもらった。その様子を図 5.5 に示す。計測データの一部を図 5.6 に示す。

図 5.6 を見ると、5.2.1 節の実験同様に筋電図のピークの大きさについては、リード条件において大きくなる傾向がみられた。一方で、動作を連続的に行う際には、筋電図の立ち上がりが不明瞭であり、立ち上がり時間によるリード・フォローの判別が困難になる箇所がほとんどであった。そこで、本研究では、筋電図のピークの大きさに着目し、それがリード・フォローの役割とどの程度対応するかを調べることにした。具体的には、5.2.1 節と同様に、役割がリードであった場合と、フォローであった場合の大胸筋と上腕二頭筋のそれぞれにおいて、加速度と筋電図の回帰直線をもとめる。そして、ある動作の加速度 a と筋電図 E_{myo} によってプロットした場合に下記のルール

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測



図 5.5 リード・フォローの役割を決めた状態での手合わせ表現
Figure 5.5 Hand contact improvisation with fixing leader/follower role

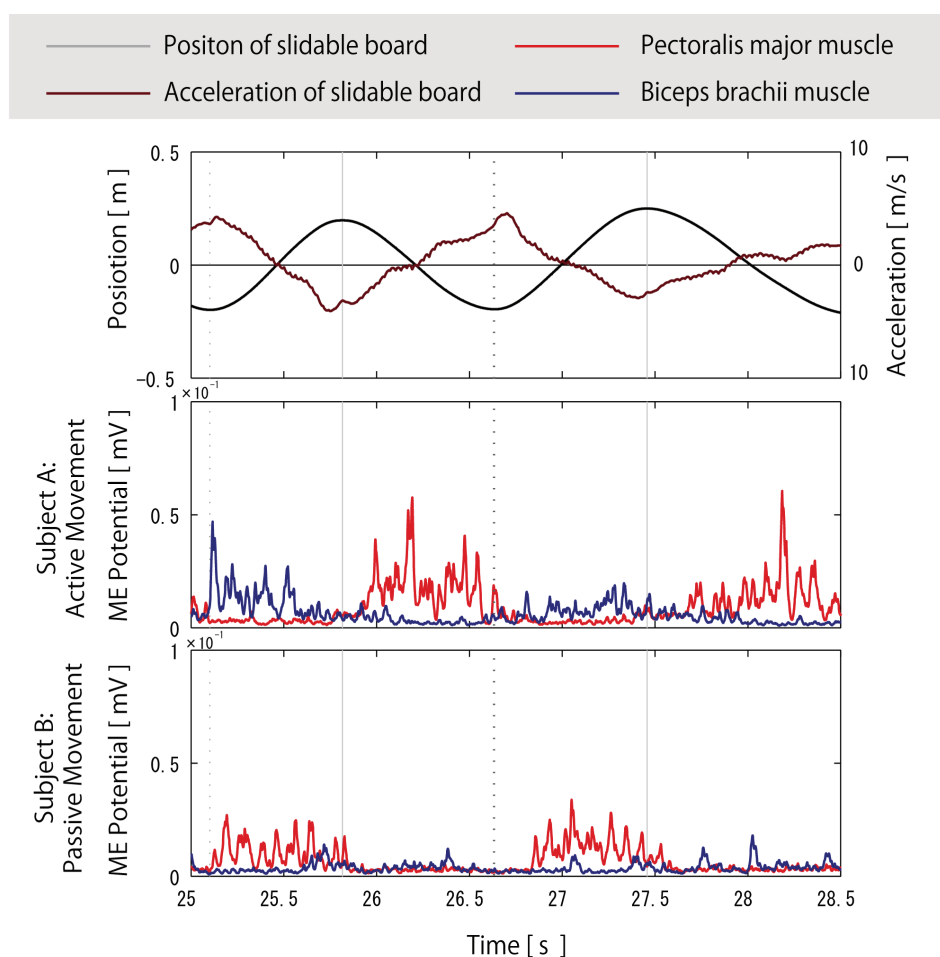


図 5.6 リード・フォローの役割を決めた状態での手合わせ表現における筋電図
Figure 5.6 A result of EMG measurement during hand contact improvisation with fixing lead/follow role

に従って、リードとフォローを判別することにした。なお、回帰直線の傾きと切片をリード、フォローでそれぞれ A_{lead} , B_{lead} , A_{follow} , B_{follow} とする。また、筋電図の大きさは個人差があったため、各人に対しそれぞれ求めた回帰直線を用いた。

$$(i) \quad |(A_{lead} \times a + B_{lead}) - E_{myo}| < |(A_{follow} \times a + B_{follow}) - E_{myo}| \text{ の時} \\ \Rightarrow \text{リード}$$

$$(ii) \quad |(A_{lead} \times a + B_{lead}) - E_{myo}| \geq |(A_{follow} \times a + B_{follow}) - E_{myo}| \text{ の時} \\ \Rightarrow \text{フォロー}$$

上記の手法に基づき、リードとフォローの役割を固定した条件の筋電図データからリードとフォローの状態を推定した場合に、その役割とどの程度合致したかを調べた。被験者 8 人の合致率の平均を表 5.2 に示す。その結果、筋肉の箇所によって、多少のばらつきがあるものの、全体として 8 割以上合致した。

以上により、リード・フォローの役割を固定した状態においては、リードにおいて筋電図の振幅が大きくなり、フォローにおいて振幅が小さくなるという対応関係が試行時間のほとんどにおいてできることが明らかとなった。

表 5.2 筋電図によるリード・フォロー推定の正答率

Table 5.2 Average rate of correspondence between actual lead or follow role and the estimated status

前方動作 %	後方動作 %	全体 %
86.2 ± 8.9	75.2 ± 7.9	80.7 ± 4.8

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

5.2.3. 役割を固定しない手合わせ表現における筋電図

次にリード、フォローの役割を固定せずに自由にインタラクションを行いながら手合わせ表現をした際の筋電図を計測することにした。この際、主観に立ち上がるリード、フォローの役割と筋電図の振幅の大小がどの程度対応づくかを調べることにした。この主観変化を捉えるため、リード、フォローの意図をリアルタイムに報告してもらった。具体的には、「リード」「フォロー」がそれぞれ割り振られている押しボタンを左手で実験中に押してもらうことを被験者に課した。また、筋電図から5.2.2節の手法を用いて、リード、フォローの状態を推定し、これがボタンによるリード、フォローとどの程度合致するかを調べた。なお被験者は5.4節にて実験を行った8人と同じである。また、実験の前に、5分間の主観報告の練習を行った。実験は先と同様、目隠しをした状態で行った。また、リード、フォローの状態を判別するための回帰直線は5.2.2節にて求めた値を用いた。

この筋電図の計測結果の一例を図5.7に、ボタンによるリアルタイムの主観報告と筋電図によるリード、フォローの推定結果の一例を図5.8にそれぞれ示す。主観報告の結果と筋電図からの判別結果がおおよそ対応しているものの、対応していない時間帯も見られた。この対応率について全被験者における平均値を算出したところは63%となり、4割弱の時間帯は合致していないことが明らかとなった。

5.2.4. 身体性を捉える身体動作計測手法の検討

以上の結果より、リード、フォローの役割を固定した状態においては、リードの際に筋電図の振幅が大きくなり、フォローの際には振幅が小さくなるという対応関係があることが明らかになった。一方で、リード、フォローの役割を固定しない場合、ボタンにて実時間で報告したリード・フォローの役割と筋電図の大小が必ずしも合致しないことが分かった。このことは、リード、フォローの役割を固定しない場合においては、リードしているという意図が意識に立ち上がっているにも関わらず、手においては力を抜いていたり、それとは逆に、フォローしているという意図が意識に立ち上がっているにもかかわらず、手に力を入れていたりする状況が生じていたことを意味している。

本実験では、手合わせ表現のインタラクションが生じる箇所として手の動作に着目

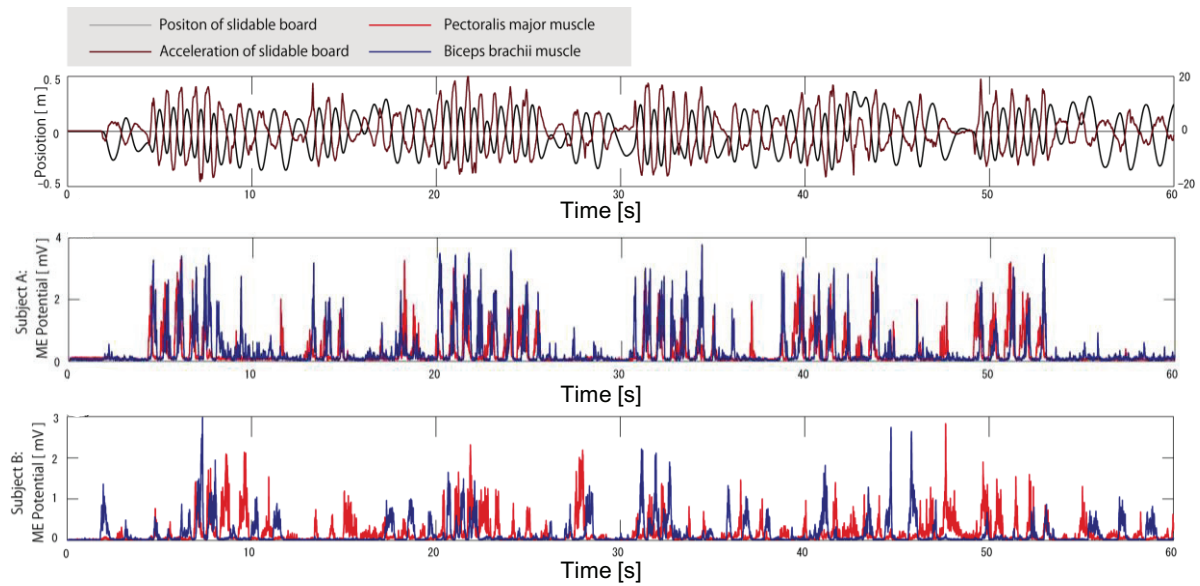


図 5.7 リード・フォローの関係を決めない状態での筋電図計測結果
 Figure 5.7 Result of EMG measurement during hand contact improvisation without
 fixing relationship between lead and follow

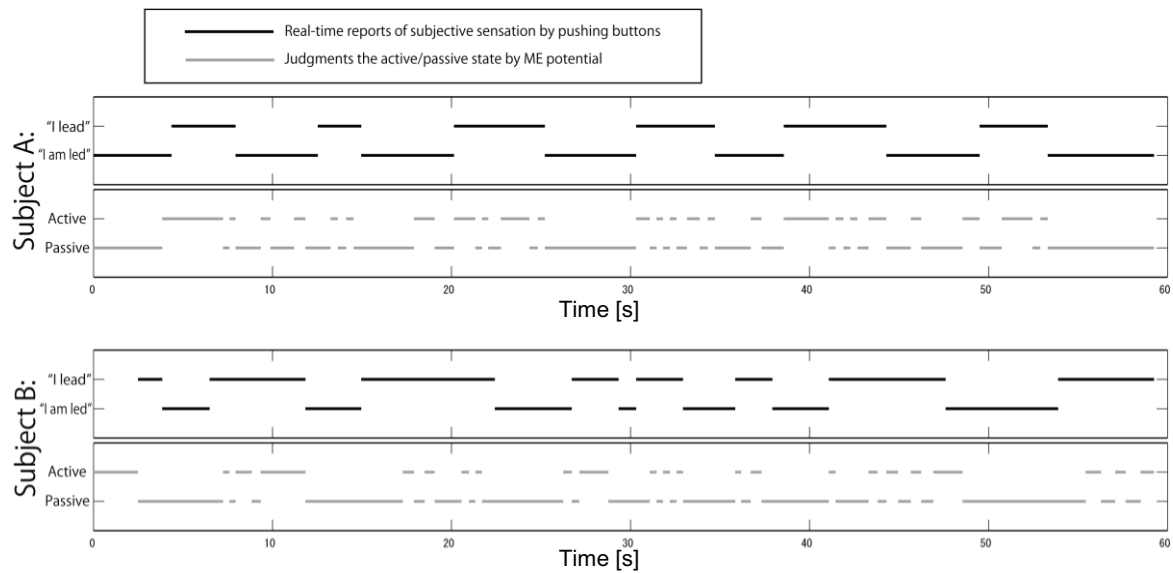


図 5.8 ボタンによるリアルタイムの主観報告と筋電図によるリード，フォローの推定結果

Figure 5.8 Result of real-time reports of subjective sensation by pushing buttons and
 judgments of the lead–follow state by ME potential

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

し、各人の手の押し引き動作に関わる筋電図を計測した。役割を固定しない場合において意図と筋電図が対応しなかったことは、手という相手と直接的にインタラクションする部分の関係性のみでは、手合わせ表現において身体性が拡張する双方の関係性を十分に捉えることができないことを物語っている。

そこで、本研究では、他者と表現を創り合う際の身体性を捉えるために、他者と直接的にインタラクションする手だけでなく、あまり意識の上らない全身の動作にまで計測範囲を拡張することにした。

5.3. 手合わせ表現における身体動作計測

5.3.1. 計測手法

手合わせ表現を創り合う際に生じる身体性を二者の身体動作の関係性から捉えるため、手のひらの動作に加え、各人の全身の動作として、COPに着目する。計測装置やCOPの算出手法については、前章に記載したとおりである。また、本節においては、手合わせ表現の熟練者を被験者に含め、手合わせ表現において表現を創ることができたと報告した身体動作の関係を捉えることにした。

5.3.2. 1人での表現における身体動作

手合わせ表現は、相手を、操作したり受け入れたりするというインタラクションの対象として捉えるというより、相手と一つの身体表現を創ることを志向するものである。ここで身体表現とは単に身体的な運動ではなく、イメージや思いといった表現者の内観に関わるものである。本研究では、2者が身体表現を創る手合わせ表現の計測に先立って、まずは単なる運動と身体表現の違い、すなわちイメージや思いの生成の有無が、COPの計測データにどのような違いとして現れるのかを調べた。この場合、他者で行う手合わせ表現においては、思いやイメージの有無に加えて、他者の影響が生じてしまうため、ひとまず、熟練者N（50代、女性、右利き）が1人で、イメージを持たずに手のひらを機械的な運動として動かしてもらった場合（条件1）と、イメージを創りながら手のひらで表現を行ってもらった場合（条件2）の2つの条件において計測を行った。また被験者には、本研究の目的や解析方法については告知せず実験を行なった。被験者に対しては、計測の様子を図5.9に示す。計測は各条件につ

き 60 秒とし、それぞれ 2 回ずつ行なった。

図 5.10 に、各条件におけるスライド板の位置と COP の時系列変化の一部を示した。COP の時系列変化に着目すると、両方の条件において、右手の動きと連動的に COP が変化している様子がわかる。また、右手に対する COP の先行時間に着目すると、条件 1 においては、右手の動きと COP の動きが同期していることが多いのに比べ、条件 2 においては、右手の動きに対して COP の変化が先行し、この先行時間が時々刻々変化する傾向があることが分かった。

そこで、右手に対する COP の先行時間を以下のように定義し、定量化した。

手に対する COP の先行時間は、手の動きの極値をとる時間とそれに対応する COP の極値をとる時間の差より算出する。そのために、まず、手の動きの極値を、エンコーダから得られたデータを微分することで算出する。図 5.11 に示すように一つ前の手の動きの極値 $Z_{h_{n-1}}$ と 1 つ後の極値 $Z_{h_{n+1}}$ の時間範囲において存在する COP の極値のうち、最大（又は最小）をとる極値を、 n 番目の手の動きの極値 Z_{h_n} に対応する COP の極値 Z_{c_n} とした。そして、手の動きが極値をとる時刻から、これに対応する COP の極値の時刻を引くことで、COP の先行時間 T_n を算出した。すなわち、COP が手に対し先行すると正、遅行すると負の値をとる。さらに、この COP の先行時間の時系列変化を見るために、手の動きが極値をとる時刻に、COP の先行時間をプロ

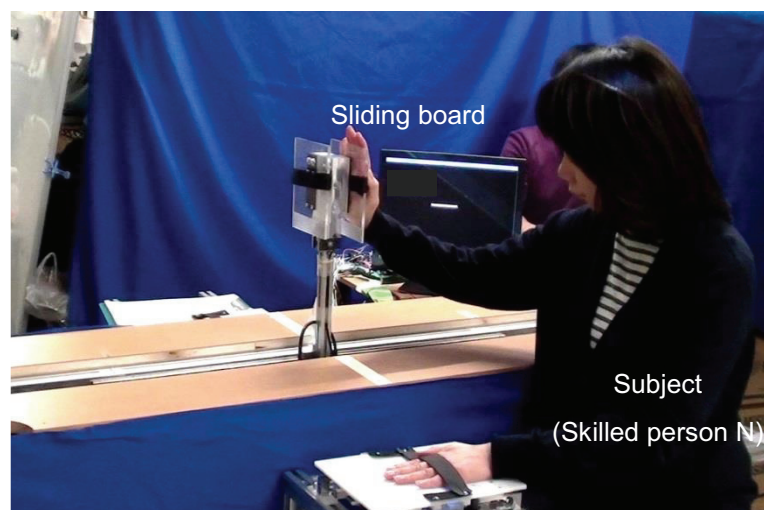
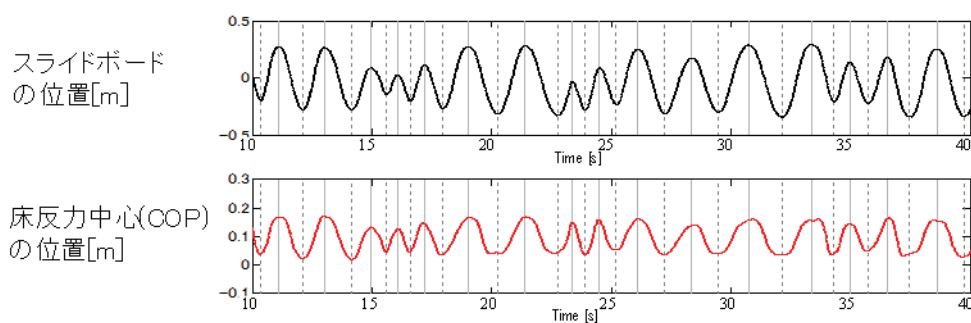


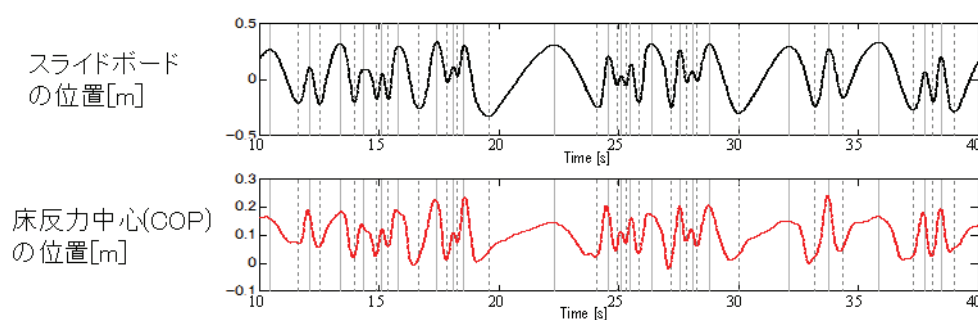
図 5.9 実験の様子（1 人による身体表現）

Figure 5.9 The situation of the experiment (bodily expression by one person)

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測



(a) 条件1：イメージを持たずに機械的に動かした場合



(b) 条件2：イメージを創りながら手のひらで表現を行った場合

図 5.10 実験結果（1 人による身体表現）

Figure 5.10 Measuring results of bodily expression by one person

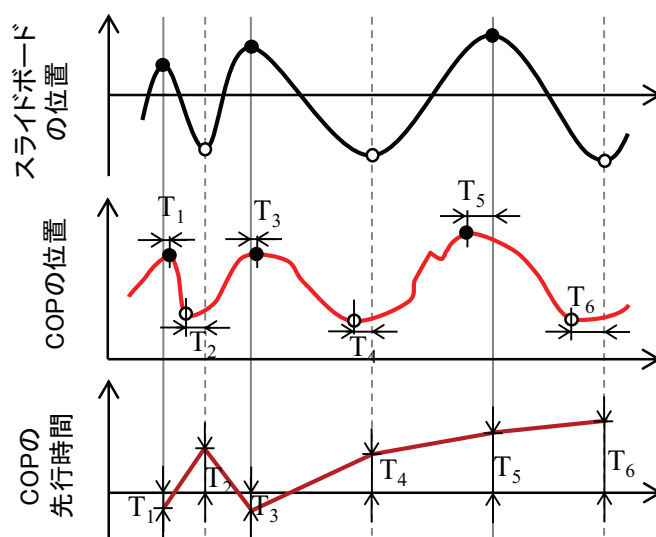
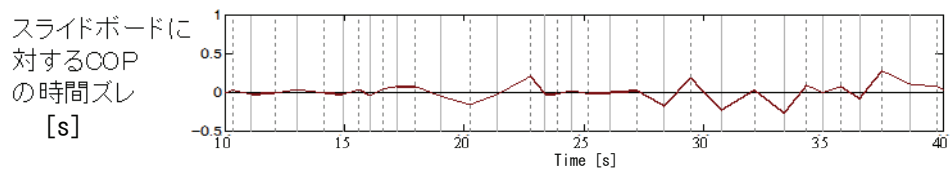
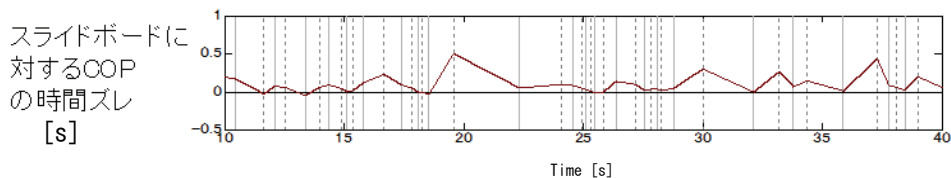


図 5.11 手の動作に対する COP の先行時間の定義方法

Figure 5.11 The way of definition of the precursor time of COP



(a) 条件 1 : イメージを持たずに機械的に動かした場合



(b) 条件 2 : イメージを創りながら手のひらで表現を行った場合

図 5.12 手の動作に対する COP の先行時間の時系列変化

Figure 5.12 Time series variation of the precursor time of COP

ットし，これを線形補間した．

図 5.12 に各条件における右手に対する COP の先行時間の時系列変化の一部を示した．これらの 2 つの条件の COP の先行時間の平均は，条件 1 では， $0.02 \pm 0.14[s]$ ，条件 2 では $0.10 \pm 0.21[s]$ であり， t 検定を行ったところ， $t(250) = -3.16$, $p < 0.001$ で有意な差が認められた．すなわち条件 1 では，COP の変化が手の動きに先立つような傾向が見られた．

以上のように，条件が異なることによって，右手と COP の関係に違いが見られたことは，少なくとも，右手の動作の関係が身体のキネマティクスによって一義的に決定しないことを意味しており，イメージを創ることの有無によって，右手の動きと COP の変化の関係に違いが生じることを示している．特に条件 2 の結果は，イメージや思いを創りながら表現する身体においては，手に COP が先立つような時間的な関係性が生成されており，表現に関わる身体性が，被験者が意図して動かそうとする手だけでなく，COP の変化として表出する可能性が示された．このことから手合わせ表現には全身の働きが関わることを確認され，手合わせ表現を創り合う際の身体性を手と COP の関係から捉えることにした．

5.3.3. 2 人での表現における身体動作

次に，ペアで自由に表現を 90 秒間創ってもらった．熟練者同士のペア (30-50 代，

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

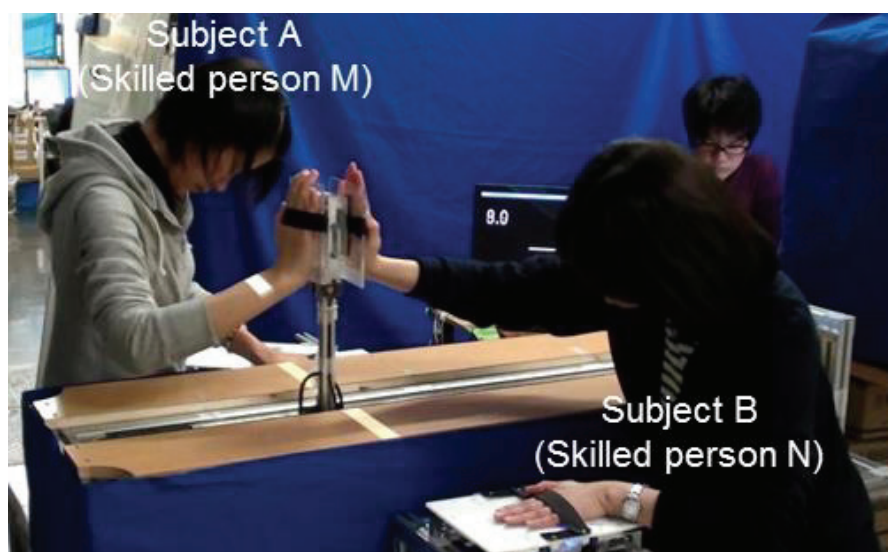


図 5.13 実験の様子（二人による手合わせ表現）

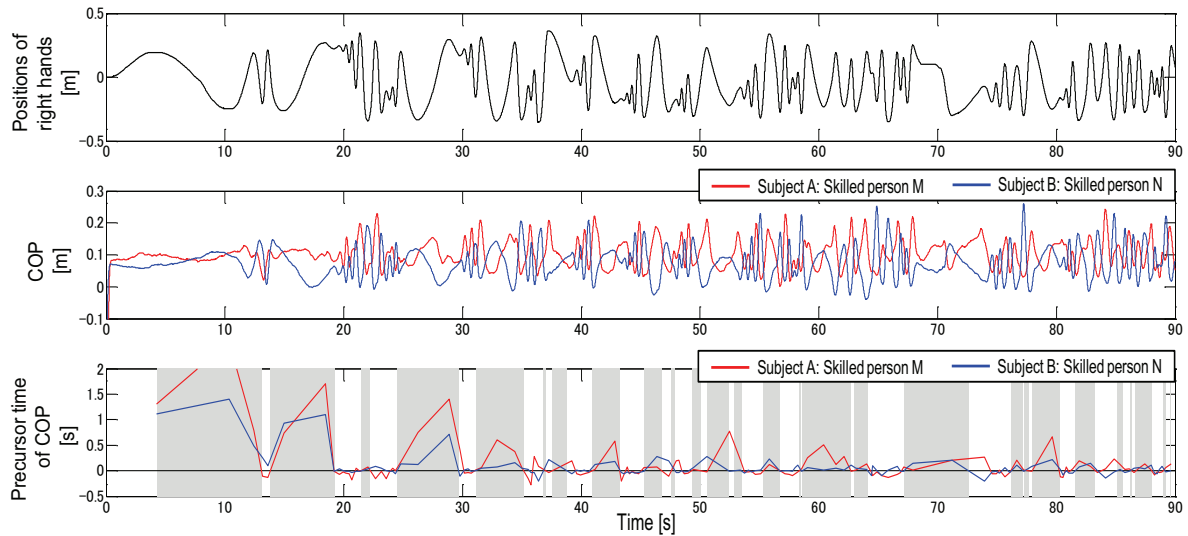
Figure 5.13 The situation of the experiment (hand contact improvisation by two people)

女性，右利き）と，初心者同士の3ペア（20代，男性，右利き，6名）において計測を行った．また比較のため，各人において1人でも表現を行なってもらった．なお，被験者には，本研究のデータ解析方法については告知せず実験を行なった．実験の様子を図 5.13 に示す．

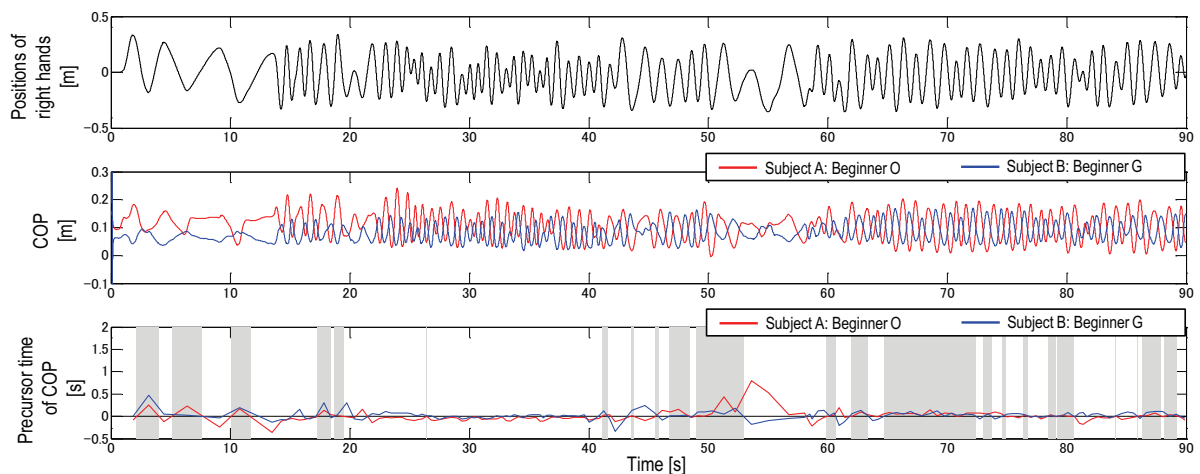
計測した右手の位置と COP，および右手の動きと COP の時系列変化の一例（熟練者 M・N，初心者 O・G）を図 5.14 に示す．また，表 5.3 に各被験者の COP の先行時間の平均と，実験時間において各人の COP が先行する時間の割合，双方の COP が先行する時間の割合，ひとりで表現を行なった際の COP の先行時間の平均および，COP が先行する時間の割合を示す．

熟練者同士のペアからは「終始深いレベルで同調している感覚がした」「互いの表現がよく合致していた」「多様なイメージのもとで表現を創り合っていた」などのコメントが得られたことから，一体感や共存在感のもとで表現を共に創り合うことができていたと考えられる．そこでこの試行におけるスライド板の動きに対する COP の先行時間に着目すると，各被験者において COP が先行することが頻繁に見られた．特に双方の被験者において共に先行する時間帯（図 5.14 (a)のグレー部）が多く見られ，その割合は実験時間の 61.6%に上った．

一方，初心者同士のペアからは「あまりイメージがわからなかった」「飽きてしまっ



(a) 熟練者同士の計測結果（被験者：熟練者 M-熟練者 N）



(b) 初心者同士の計測結果（被験者：初心者 O-初心者 G）

図 5.14 手合わせ表現における手と COP の計測結果

Figure 5.14 Results of measuring the hand contact improvisation by two people

た」などのコメントがすべてのペアから聞かれ、表現を共に創り合うことがうまくできなかったと推察される。表 5.3 に示したスライド板の動きに対する COP の先行時間に着目すると、熟練者と比較し、各被験者の COP の先行時間が小さい傾向が有ることがわかった。また、双方の被験者において手の動きに対して COP が共に先行する時間の割合は実験時間において、それぞれ、34.6, 24.5%, 26.3%パーセントであ

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

表 5.3 COP の先行時間の平均, COP が先行する時間の割合のまとめ

Table 5.3 The average precursor time of COP, the percentage of periods which COP precedes the hand

	被験者 イニシ ヤル	二人での手合わせ表現実験			一人での表現実験	
		COP の先 行時間 の平均[s]	COP の各 人の先 行時間 率[%]	COP が共 に先行す る時間 率[%]	COP の先 行時間 の平均[s]	COP の先 行時間 率[%]
熟練者ペア (M-N)	M	0.11±0.37	74.0	61.6	0.10±0.18	73.3
	N	0.07±0.22	76.3		0.15±0.36	82.4
初心者ペア (O-G)	O	0.00±0.11	48.2	34.6	0.03±0.06	73.9
	G	0.02±0.09	65.6		0.17±0.26	90.9
初心者ペア (Z-F)	Z	-0.04±0.13	38.1	24.5	0.11±0.11	97.7
	F	-0.01±0.12	57.0		0.08±0.12	77.7
初心者ペア (K-I)	K	0.00±0.02	57.7	26.3	0.07±0.15	73.5
	I	-0.01±0.05	39.1		-0.02±0.06	25.3

った。

また、表 5.3 において、2 人で手合わせ表現を行なった場合と各人が 1 人で表現を行った場合の結果を比較すると、初心者では、6 人中 5 名が、2 人で表現を行なう場合に、実験時間において COP が先行する時間の割合が小さくなることがわかった。また残りの初心者 I においては、1 人で表現を行う場合においても COP があまり先行しないことがわかった。一方、熟練者においては、2 人で手合わせ表現を行なっても COP が先行する時間の割合があまり小さくならない傾向があった。

熟練者のペアにおいて表現を共に創り合えたと報告した試行では、右手の動きに先立つ COP の動きが各被験者において見られたことから、各人の身体において、1 人で身体表現を創る際に見られたような手と COP の時間的關係が生成されていたことが分かった。また、合わせた手のひらに対して、両者の COP が同時に先行する時間が多かったことは、各人において生成した手と COP の時間的關係が双方の間で合致していたことを示している。このことは、合わせた手に対して時間的に先行する情報が、お互いの間で合致していることを示唆するものであり、またこれによって双方の身体があたかも一つの身体であるかのように表現を創り合うことができたのではな

いかと考えられる．このことから，手と COP の時間的關係が双方の間で合致することが，手合わせ表現を創り合う際に生じる双方の身体性を表しているのではないかと考えられる．

一方，初心者においては，1 人で表現を行う際には，身体表現を創る際に見られるような手と COP の時間的關係が生まれていたと考えられる．しかしながら，2 人で表現を行った場合では，両者の COP が同時に先行する時間が少なかったことから，手合わせ表現を創り合う際に見られる身体的な関係を双方の間で創ることができなかったと推察される．また，2 人で表現を行った場合においては COP の先行時間そのものが小さい傾向があることから，身体表現を創出する際に生じるような手と COP の時間的關係性をそもそも創ることができなかったと考えられる．

5.3.4. 手の動きの振幅と周期の変動

次に，表現を共に創り合うことができた試行の合わせた手の動きの特徴について述べることにする．

図 5.14 の手の動きに着目すると，熟練者同士のペアの結果においては，周期や振幅が複雑に変化するのに対し，初心者同士のペアにおいては，単調であるように見受けられた．そこで，このような周期や振幅の変化の特徴をとらえるため，手の動作の振幅や周期の時系列変化についても調べることにした．周期と振幅は，図 5.15 に示すように，手の変位の n 番目の極値と $n+1$ 番目の極値の時間差と変位差の絶対値からそれぞれ定義した．

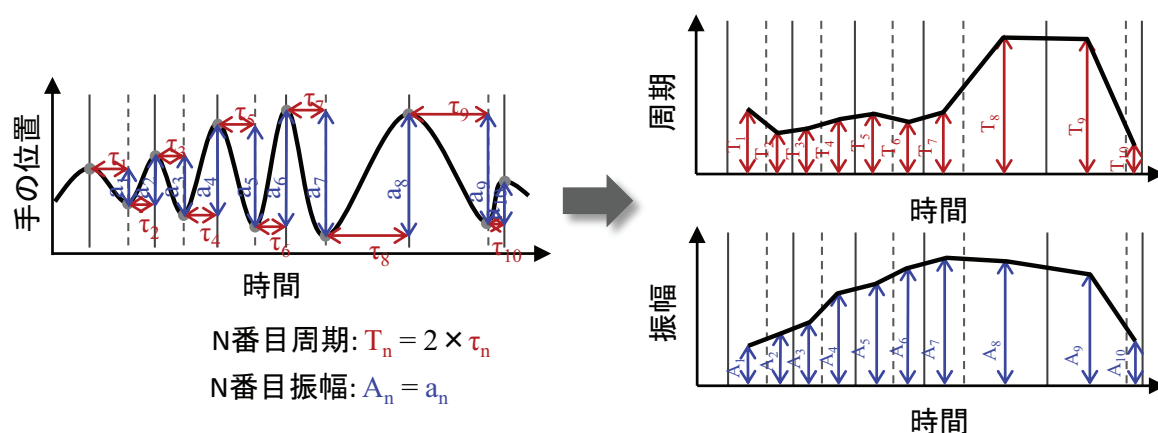
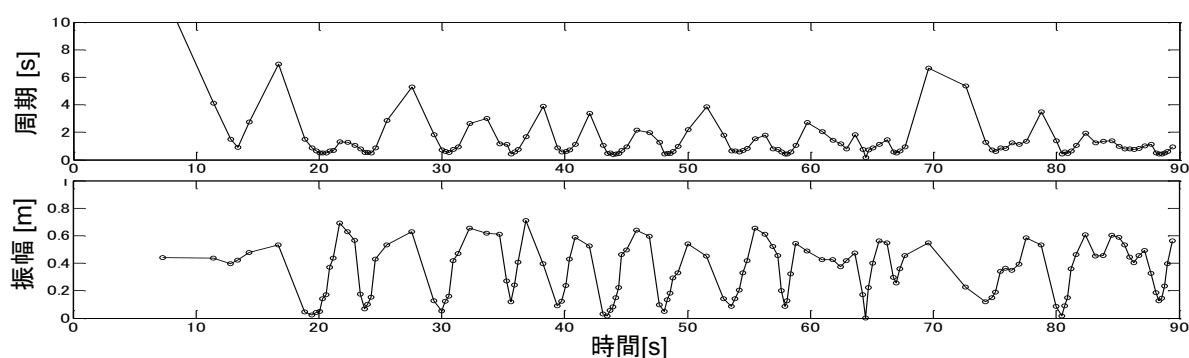


図 5.15 周期変動と振幅変動の算出方法

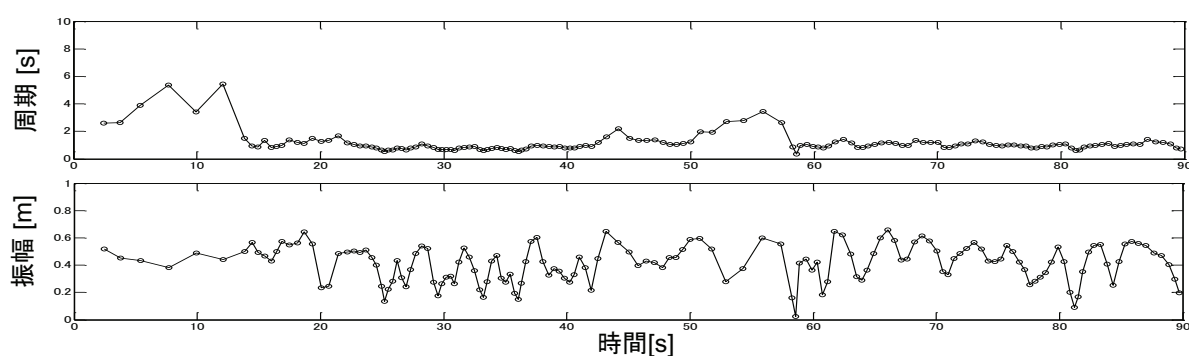
Figure 5.15 Calculation method of periodic and amplitude variations

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

熟練者 M-N のペアと、初心者 O-G のペアの手の動きの周期の時系列変化をグラフに表わしたものが図 5.16 である。熟練者 M-N のペアの結果（図 5.16(a)）においては、振幅のみならず、周期においても大きな変動が生じることが分かった。特に興味深いことに振幅や周期の時系列において数秒から 10 数秒程度の周期性をもつ変動パターンが見られた。一方、初心者同士の計測結果（図 5.16 (b)）を見ると、振幅においては大きな変動がみられるものの、周期にはついては変動が小さく、周期的なリズムについてもほとんど見られなかった。この傾向は、他の初心者のすべてのペアについても同様であり、振幅変動については熟練者同等に変動することがあるが、周期の変動については熟練者のペアに比べすべてのペアで顕著に小さいことが分かった。振幅や周期の変動の度合いを定量化するため、各ペアにおけるそれぞれの標準偏差を算出しまとめたものが図 5.17 である。



(a) 熟練者同士の計測結果（被験者：熟練者 M-熟練者 N）



(b) 初心者同士の計測結果（被験者：初心者 O-初心者 G）

図 5.16 手合わせ表現における手の周期変動と振幅変動

Figure 5.16 Cycle variation and amplitude variation of hand motion

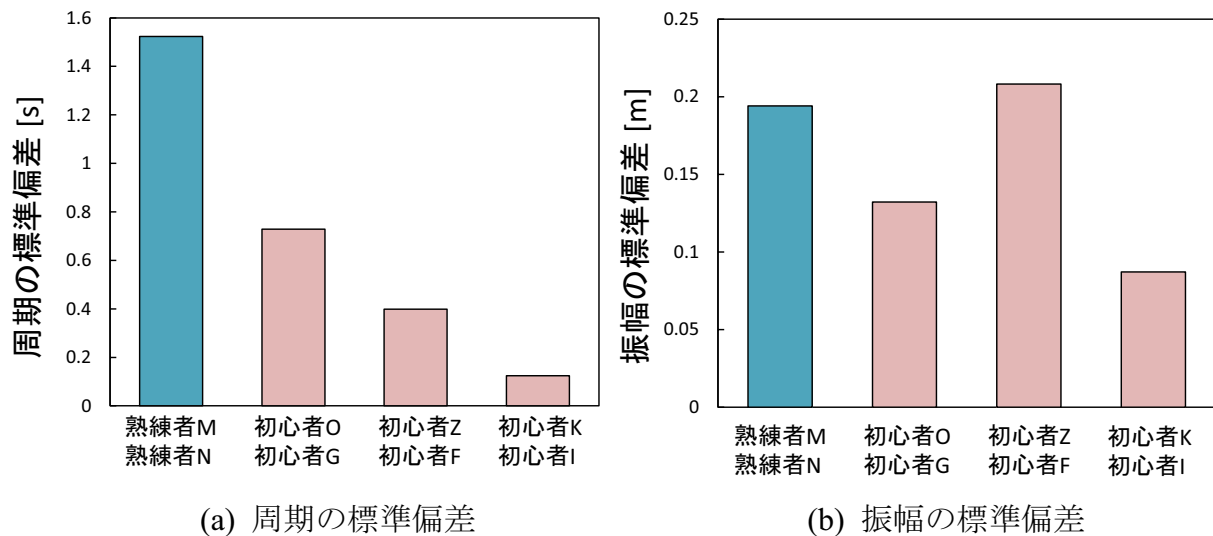


図 5.17 各ペアにおける手の周期と振幅の標準偏差
Figure 5.17 Standard deviations of cycle and amplitude in each pair

熟練者らは、振幅や周期の周期性をもつ変動パターンの生成は意識的に行なったものではないと答えており、互いの手のひらの動きから暗黙的に自己組織化したものであると考えられる。また、振幅や周期の変動パターンは、手の動きそのものの周期より時間スケールが大きな周期をもつことから、これをガイドラインにすることで表現の持続を実現させているように推察される。

手合わせ表現は、相手を対象として捉えるのではなく、相手の身体と一つの身体表現を創るものである。振幅や周期の変動パターン生成は、自他の中で創る身体表現の持続性という観点から、双方の間で生み出される身体性を評価する指標になるのではないかと考えられる。

5.3.5. 熟練者と初心者のペアの手合わせ表現の計測

最後に、熟練者と初心者の組み合わせのペアにおける手合わせ表現の計測を行ったのでその結果について記す。被験者は、熟練者 N（50 代女性）と初心者 M, O（共に 20 代男子学生）2 名がそれぞれ組んだ 2 ペアと、比較のため初心者同士が組んだ 1 ペアを加えた計 3 ペアである。実験時間は各試行につき 90 秒とした。

3 ペアにおける手のひらの動きに対する COP の動きの時間的先行性を図 5.18 に、周期の時系列変化を図 5.19 に示す。

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

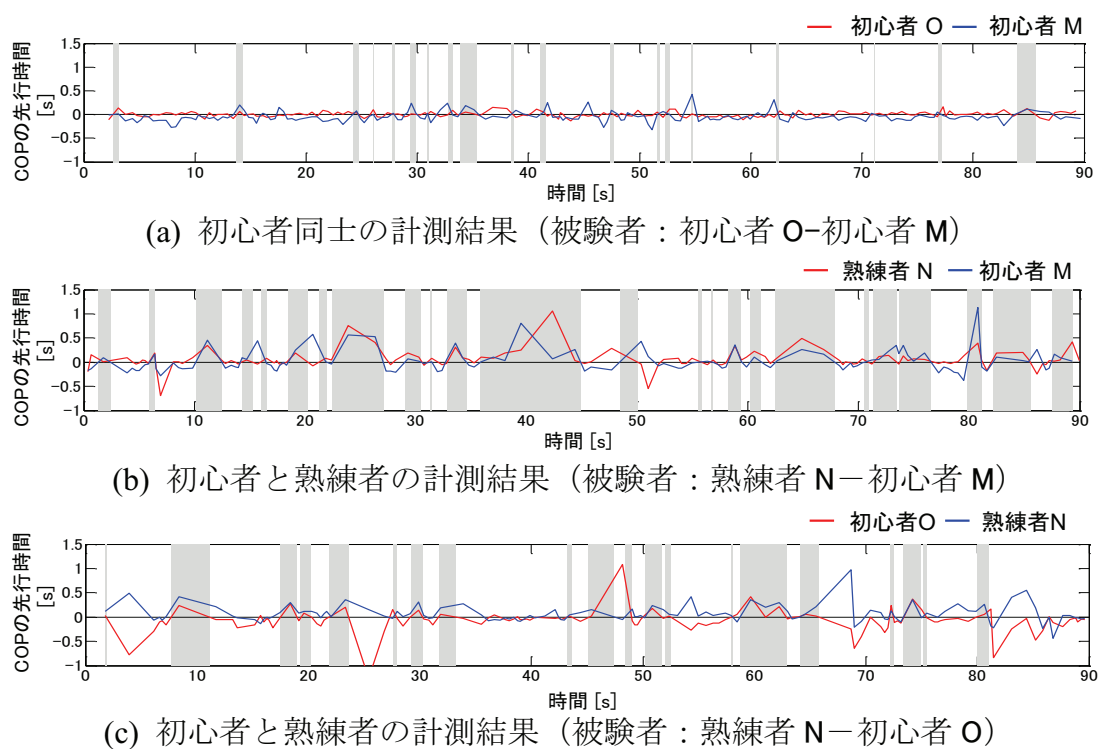


図 5.18 手に対する COP の先行時間

Figure 5.18 Precursor time of COP

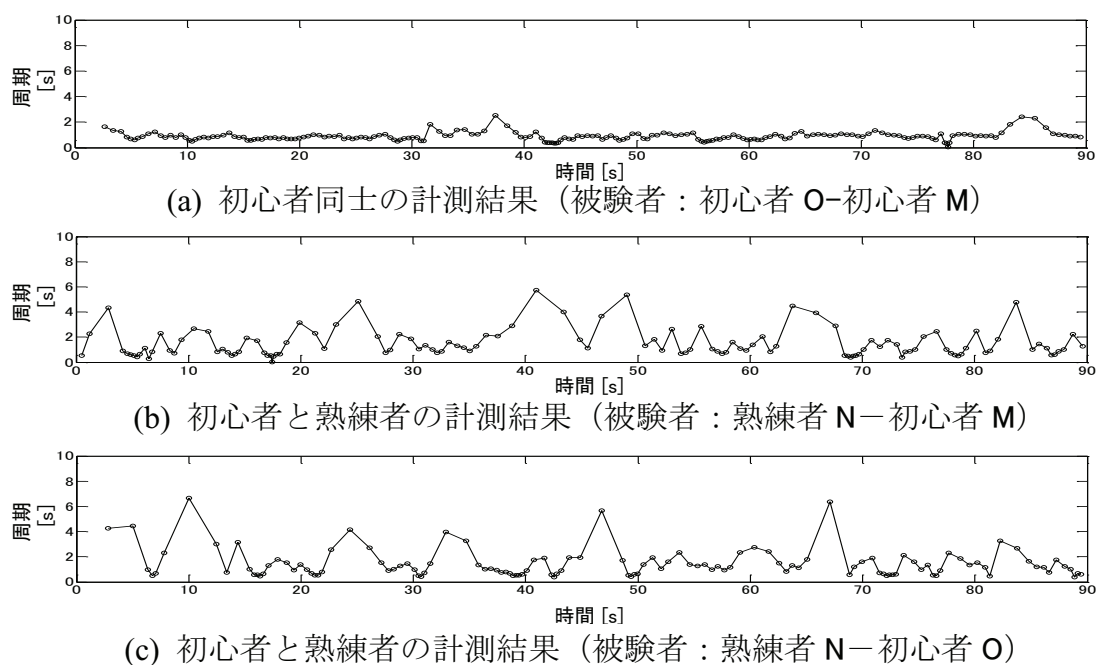


図 5.19 手の周期変動

Figure 5.19 Cycle variation of hand motion

初心者 O—初心者 M のペアについては互いに表現を創りあうことができなかったと報告しており、手のひらに対して双方の COP が共に先行する時間割合は小さく（図 5.18 (a)）、周期の変動もほとんど生じていないことがわかる（図 5.19 (a)）。一方、熟練者 N—初心者 M、熟練者 N—初心者 O のペアの結果を見てみると、初心者同士の場合に比べ、初心者と熟練者の間では手のひらに対して双方の COP が共に先行する時間割合が明らかに増加し（図 5.18 (b)(c)）、周期の時系列変化においても、リズム的な変動パターンが現れかけているのが分かる（図 5.19(b)(c)）。この時、初心者は熟練者とともに表現を創りあっている感覚を持ち得たと報告しており、手合わせ表現を創り合う際の身体性が生成していたと考えられる。

以上の結果は、熟練者は表現をうまく創ることができない初心者とであっても、合合わせた手のひらに対する COP の時間的關係性を双方の間で合致させることができ、手合わせ表現を創り合う際の身体性を生成することができたことを示していると考えられる。また、手の動きにおいてリズム的な変動パターンの生成が見られたことは、初心者のみでは創ることができなかった持続性を持つ表現が 2 者の間で生み出されていることを示唆するものである。

熟練者 N は、障害者を含むインクルーシブな現場や精神病棟などにおいて手合わせを活用して他者と身体表現を創り合う活動を長年に渡って続けている。熟練者と初心者の計測結果において、手に対する双方の COP の先行性や周期の変動性が、熟練者同士が表現を共に創り合うことのできた試行の結果に近づいたことは、これらの結果が手合わせ表現における身体性において重要な意味を持つことを裏付けていると考えられる。

5.4. まとめ

本章の内容を以下にまとめる。

- (1) 本章では、遠隔の他者にまで身体性を拡張し、創出的コミュニケーションを支援する手法に関する知見を得るため、手合わせ表現における両者の關係性を生理情報や身体動作の情報から捉え、手合わせ表現を創り合う際の身体性に関する知見を得ることを目的とした。

第5章 身体性に着目した手合わせ表現の計測

- (2) まず、主体的な他者が関わる手合わせ表現において特徴的な身体の状態を計測にて捉えることを試みた。具体的には、リード・フォローの役割を固定した条件と役割を固定しない条件で、手の押し引き動作に関わる筋電図を計測し比較した。その結果、役割を固定しない場合においては、意図する役割と筋電図振幅の大小の対応率が下がることが分かった。このことから主体的な他者が関わる手合わせ表現では、手という相手と直接的にインタラクションする部分の関係性のみでは、手合わせ表現における双方の身体性を十分に捉えることができないことを考察した。
- (3) 上記を踏まえ、他者と直接的にインタラクションする手だけでなく、あまり意識上らない各人の COP に身体性に関わる情報が表出するのではないかと考え、これを計測することにした。その結果、表現を共に創り合うことができ、一体感や共存在感に関するコメントが得られた試行では、相手と直接的にインタラクションする手のひらの動きに対して COP が双方で同時的に先行するような関係性が生成されることが明らかとなった。このような身体的な関係性が手合わせ表現を創り合う際の身体性と密接に関係していると考えられる。
- (4) また手の動きに着目したところ、その結果、表現を共に創り合うことができたと報告した試行では、振幅や周期の時系列において数秒から 10 数秒程度の周期性をもつ変動パターンが見られた。この振幅や周期の変動パターンは、手の動きそのものの周期より時間スケールが大きな周期をもつことから、これをガイドラインにすることで表現の持続を実現させていることを考察した。またこのことから、振幅や周期の変動パターン生成は、自他の間で創る身体表現の持続性という観点から、双方の身体性を評価するための指標になるのではないかと考えた。

以上要するに、本章では手合わせ表現における身体性を双方の身体動作の関係から捉えることを試みた。そして、表現を創り合うことができ一体感や共存在感に関するコメントが得られた試行の身体動作の計測結果を調べたところ、双方の手のひらの動きに対して COP の動きが双方で同時的に先行するような関係性が生成していることを発見した。このような身体的な関係性が手合わせ表現を創り合う際の身体性と密接

に関係していると考えられる。以上より、手合わせ表現において遠隔の他者に身体性を拡張する創出的コミュニケーションを支援するには、このような関係性を、遠隔地間においても生成することが重要であると考えられる。

第6章 手合わせ表現に着目した創出的コミュニケーションの遠隔支援

6.1. はじめに

前章では、手のひらの動きを1自由度に制限した手合わせ表現において、身体動作の計測を行った。その結果、両者のCOPが合わせた手に対し、共に先行する関係性が生成することを発見し、このような関係性が手合わせ表現における身体性と密接に関係していることを明らかにした。

本章では、以上のような双方の関係性に着目して、遠隔地間における手合わせ表現を実現する手法の提案、および装置開発を行い、創出的コミュニケーションの支援を行う。

そのために、まず手と手を合わせた際の物理的なインタラクションを遠隔において再現することを試みる。そしてこれによって、手合わせ表現が双方で実現されるかを調べる。仮に、手合わせ表現を創り合うことができないとすれば、どのような制御手法によって、それが可能になるかを検討、実装する。そして、遠隔における身体性の拡張という観点からその有効性を評価する。

現在では遠隔地間においても力や動きを伝達し身体的なインタラクションを行うことは可能になりつつあり、そのための制御手法に関する研究や[92]、テレイグジステンスへの応用[93]、さらには日常的な身体的インタラクション支援への応用研究などが行われている[94][95]。しかしながら身体性に関する双方の身体的な関係を計測にて捉え、これを遠隔で実現する研究は行われていない。

6.2. 手の動作に着目した遠隔手合わせ表現システム

6.2.1. 設計指針と要件

本研究では身体表現動作として、これまでの章で述べてきた前後1自由度の手合わせ表現の動作を参考に、着座状態において、腕を伸縮させて把持したグリップを水平前後一軸上に移動させる身体動作を研究対象とした。これにより、動作や生じる力の

やり取りが制限され、計測や制御が容易となる。本研究ではこの可動グリップを二台作成し、それぞれのグリップの動きをアクチュエータによって同期させることで、遠隔地間での手合わせ表現の実現を目指す。

同じ場所で行われる実際の手合わせ表現では、手のひらが直接接触しているため、2者の手のひらは同じ位置に存在する。また、双方の手のひらに生じる反力は、作用反作用により、逆向きでその絶対値は等しい。これを踏まえ、本研究では、ひとまずグリップの位置や、そこから把持した手に与えられる力を、物理的に離れた場所にある2台のグリップの間で合致させるような制御を実装することにした（図 6.1）。

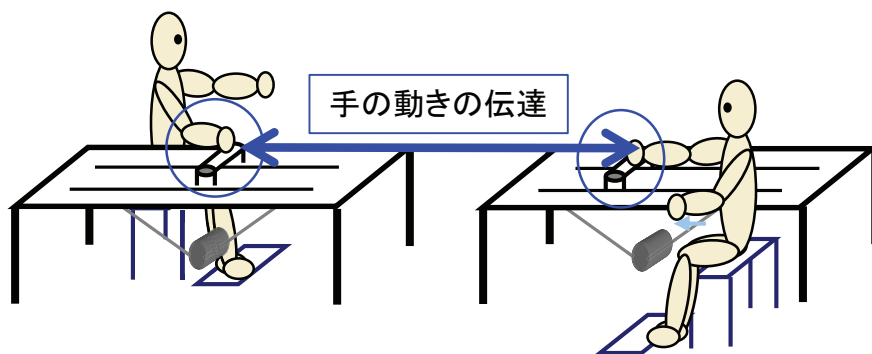


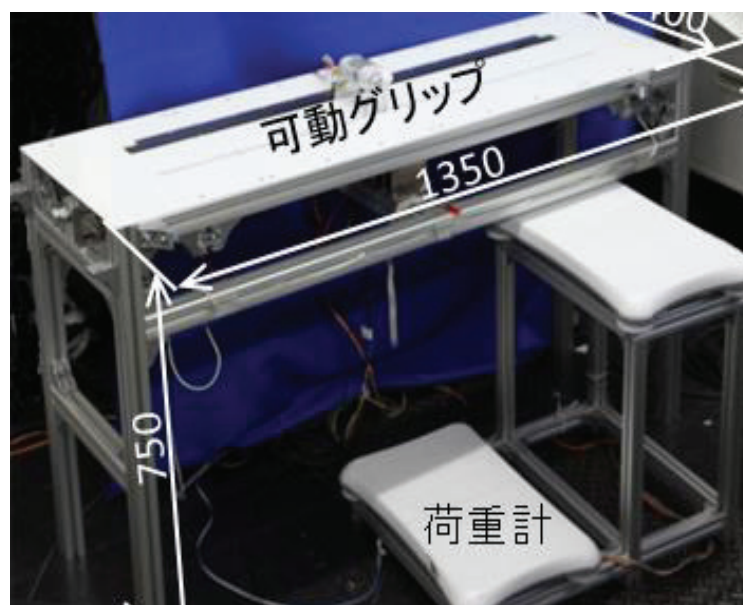
図 6.1 グリップを介した手の動作の伝達
Figure 6.1 Transmission of hand motion through grips

また遠隔地間で、手合わせ表現を実現するためには、少なくとも下記の性能が必要なる。

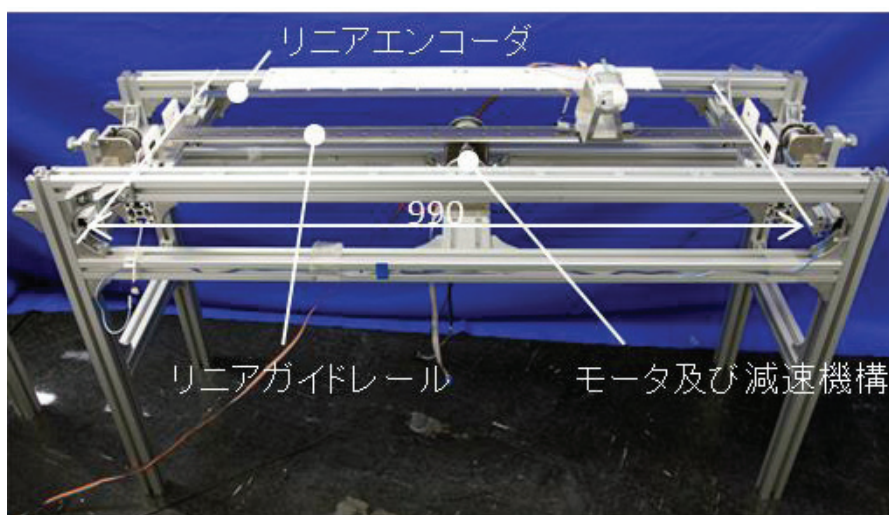
- ① 手の前後動作のストロークを十分確保できること（700[mm]以上）。
- ② 手合わせ表現の手の動きを追従できること（2.5[m/s]以上）。
- ③ 手合わせ表現において手と手の間に生じる力を呈示できること（10[Kgf]以上）。
- ④ 以上の手の動きや力を遠隔地間で時間遅れができるだけ小さく共有できること。
- ⑤ ハードウェアや制御手法によって手の動作が妨げられないこと。

6.2.2. ハードウェア

以上を踏まえて開発した本システムのハードウェアの外観を図 6.2 に示す。グリップ[50mm×36mm×130mm]は、可動領域 990[mm]のリニアガイドレールに取り付けられ、水平前後に移動する。そして、グリップに接続したワイヤを、減速機構を介



(a) 装置全体の外観



(b) 天板を外した様子

図 6.2 ハードウェアの外観

Figure 6.2 The appearance of the hardware

して DC モータ(Maxon 製, 定格 150W)で巻き取ることで手に任意の動作や外力を呈示する. ここで, 歯車による減速では摩擦など抵抗によって逆可動性が著しく低下するため, 表現者による瞬間的な力に対し, 装置が固いという感覚を与えてしまうことや, 手のひらに生じる反力とモータの入力との間に生じる外乱によって, 滑らかで正確な力覚呈示を行うことができないといった問題が生じる. そこで本装置では減速器に逆可動性の高い, ワイヤ・プーリ機構を用いた. 駆動機構は, 図 6.3 に示すように

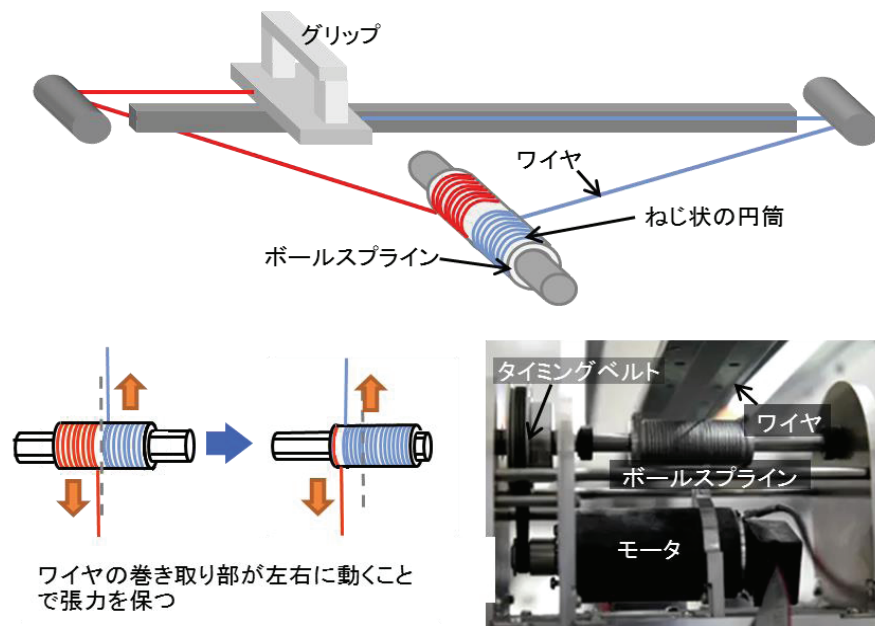


図 6.3 駆動機構の詳細

Figure 6.3 The detail of drive unit

把持棒の前後に取り付けた 2 本のワイヤを装置両端のプーリを経由させた後、DC モータ(Maxon 製 定格 150[W])とタイミングベルトを利用した減速器(1:3.6)により巻き取ることにした。また、雄ネジを切った軸に、2 本のワイヤを逆向きに巻き取る機構を採用し、一方を巻き取ると同時に他方を解くことで、モータの正転逆転に応じた前後駆動を可能にした。なお雄ネジを切った軸のネジの巻き数が大きいため、ワイヤの巻きとり位置が左右に移動し、張りが変化しないよう、ワイヤ巻き取り部自体が、左右に移動できるような機構を実装した。具体的には、ボールスプリング（呼び系 8）を用い、その外筒にネジ溝を掘った円筒($\phi 20[\text{mm}]$)を取り付けた。

6.2.3. 身体動作計測部

グリップにおける手の動作を計測する身体動作計測部について述べる。この側面にリニアエンコーダ（OMRON 社製，E6L-HW4C）を搭載し、位置計測を行う。

グリップの外観と内部構造を図 6.4 それぞれ示す。グリップはリニアガイドレールに接続される固定部と、両端が中央の梁にて接続された把持部からなり、中心部と把持部の間に力センサ(KYOWA 製，LUR-A-200NSA1)を配置した。ここで、把持部の前後は梁構造にて接続されているため、グリップを握る力の変化は梁構造に伝わり、力センサには影響を与えない。すなわち、この構造によって、グリップの持ち方によ

第6章 手合わせ表現に着目した創出的コミュニケーションの遠隔支援

らずにグリップから手に伝わる可動方向の力を計測することが可能となった。梁構造の上にはポリアセタール樹脂による曲面形状のカバーを装着した。グリップのカバーは、把持しやすい形状であることに留意した。また、本システムでは前章と同様 COP の計測システムを実装した。以上のシステムの構成を図 6.5 に示す。

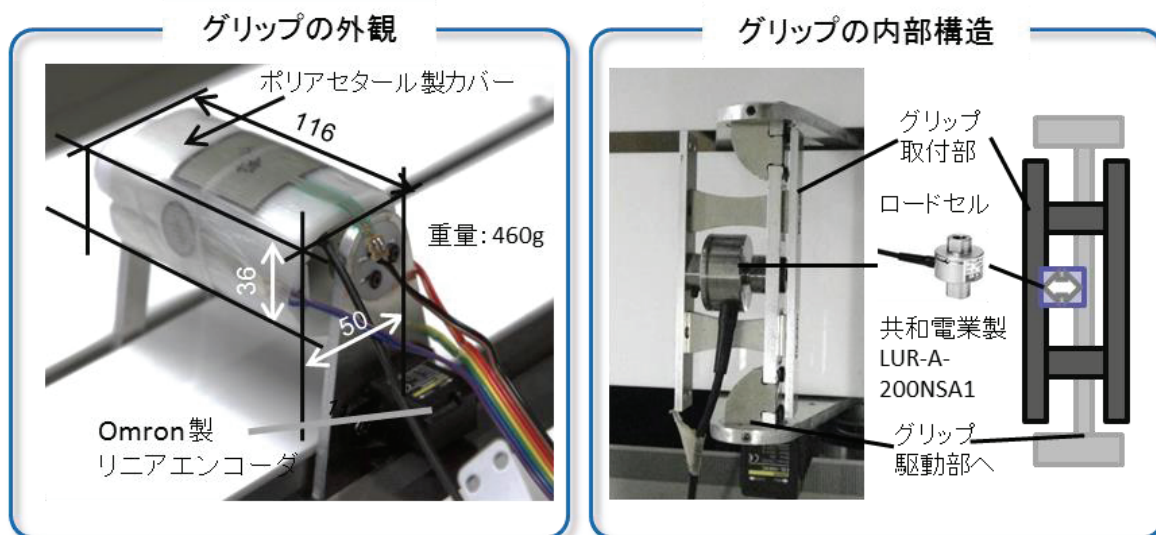


図 6.4 グリップにおけるセンサの実装
Figure 6.4 Sensors mounted into the grip

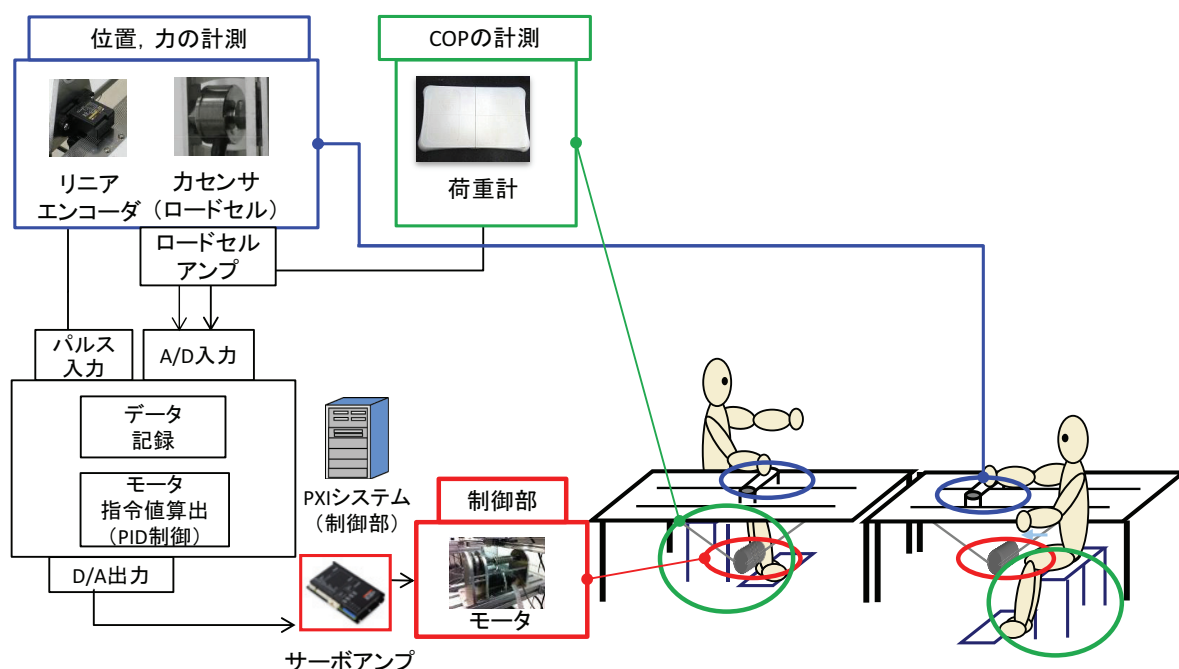


図 6.5 システムの構成
Figure 6.5 Composition of the system

6.2.4. 位置・力並列型バイラテラル制御

本研究では、手のひらの位置や力を双方で合致させる制御を実装する。操作者の手の動きを遠隔に伝達し、またそれによって遠隔において生じた手のひらと対象物の間の反力をフィードバックする一方向的な位置と力のバイラテラル制御については、数多く研究されている。一方、双方が同時的に動くような双方向のインタラクションにおいて、位置と力を双方で合致させる研究については、発展途上である。本研究では、位置と力のハイブリット型の並列型バイラテラル制御を採用することにした。

具体的には、図 6.6 に示すようにグリップに設置したリニアエンコーダと力センサの出力値の二台の間における偏差をなくすように PID 制御することで二台のグリップの力と位置を双方で同期させた。このとき位置と力の制御を一つのモータで独立して制御させることは困難であるため、位置と力の偏差のそれぞれに重みづけを行って加算することで、二台のグリップの位置と力を同時に同値に近づけた。

なお以上の制御については、データの収録同様、PXI システム (National Instruments 製, PXI-6229) を用いた。また本制御における制御周波数は 1[kHz] であった。

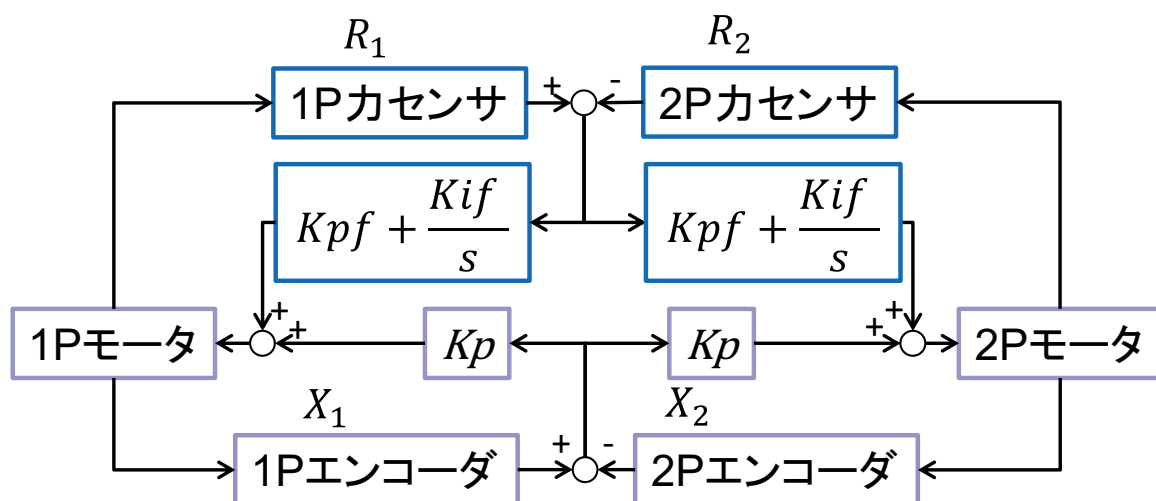


図 6.6 位置・力並列型バイラテラル制御

Figure 6.6 A schematic diagram of parallel control with hybrid servomechanism

6.2.5. システムの評価

まず、位置制御を用いた周波数応答について調べた。図 6.7 に示すように、およそ 3[Hz]までの動きに追従可能となっており、人間の動きに追従できることが示された。

次に開発したシステムにおいて、位置と力の双方向バイラテラル制御を行なった際、

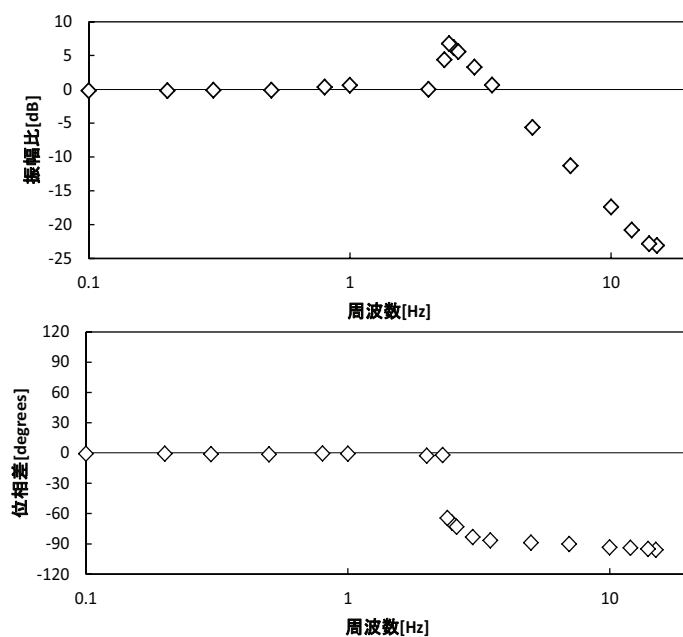


図 6.7 周波数応答試験（位置制御）

Figure 6.7 Frequency response (Position control)

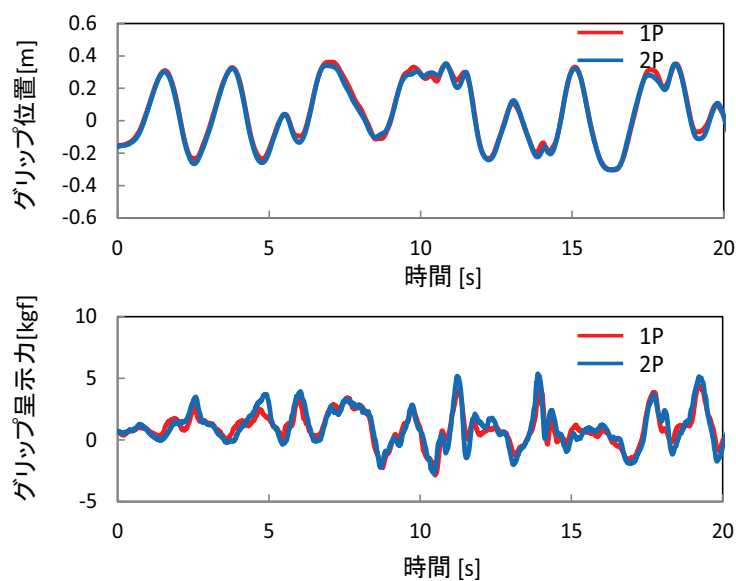


図 6.8 力・位置並列制御における性能試験

Figure 6.8 Performance of parallel control with hybrid servomechanism

位置と力が双方の間に一致するか確認した．そこで，グリップを把持した状態で，手合わせ表現のように双方で動かし合った際の，位置と力の値を計測した．その結果，図 6.8 に示すように，双方の位置と力がおおよそ合致した．このことは，1つのグリップを二人で把持し動かしているかのような動作の伝達を遠隔において実現できることを示すものである．

次に，本システムのように，グリップ把持しながら行う動作であっても，手合わせ表現と同様の COP を伴った表現動作が可能であることを確認した．そこで，身体表現の熟練者 N（女性 50 代）に，グリップを握りイメージを創りながらひとりで手を動かして表現をしてもらった．その結果を図 6.9 に示す．COP がグリップ位置の変化に応じて変化しており，さらに，その変化はグリップ位置に 0.1-1[s]程度先行していることがわかる．この結果は，前章において見出したイメージや思いを創りながら身体表現を行う際に見られた手と COP の関係と一致している．このことから，本装置においても，前章の装置と同様に身体表現を創ることができ，また計測結果においても類似性があるものとみなして良いと考えられる．

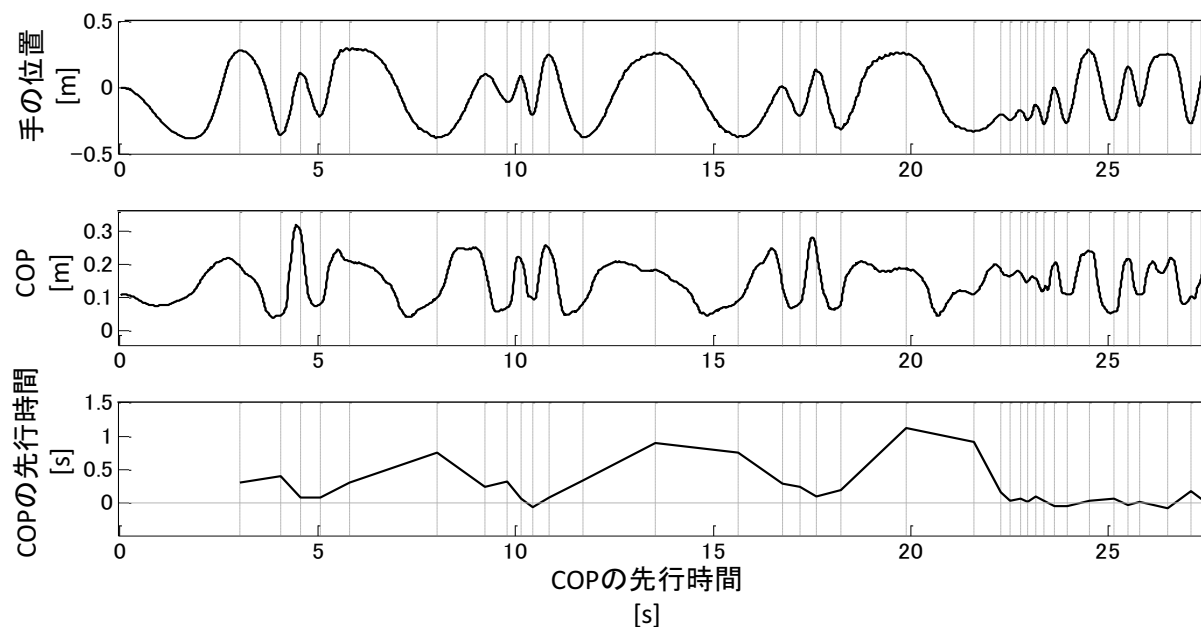


図 6.9 熟練者一人における表現動作の計測結果
Figure 6.9 Measuring result of expressive motion by skilled person

第6章 手合わせ表現に着目した創出的コミュニケーションの遠隔支援

最後に、予備的な実験として手の位置と力を伝達しあう本装置を用いて遠隔地間で手合わせ表現を創り合うことができるかを検証した。そこで、図 6.10 に示すように対面に装置を配置し、布製の仕切りやイヤーマフによって互いの姿や音が伝わりにくい状態で行った。実験時間は 120 秒間とした。被験者は、身体表現の熟練者 N と初心者 T のペアである。評価方法としてひとまず、身体表現の熟練者に対する自由記述式の主観調査を行いその使用感を尋ねた。

その結果、熟練者 N より、位置や力は伝達されるものの、イメージの創りにくさや相手の表現の伝わりにくさを指摘するコメントや表現を共に創り合うことが困難であることを指摘するコメント得られた。このことから、グリップの位置と力の同期のみでは表現が創り合うことができず、身体性の拡張が実現されない可能性が示唆された。すなわち、グリップのみの動作伝達では、身体性を遠隔に拡張するのに必要な情報が遮断されてしまう可能性がある。

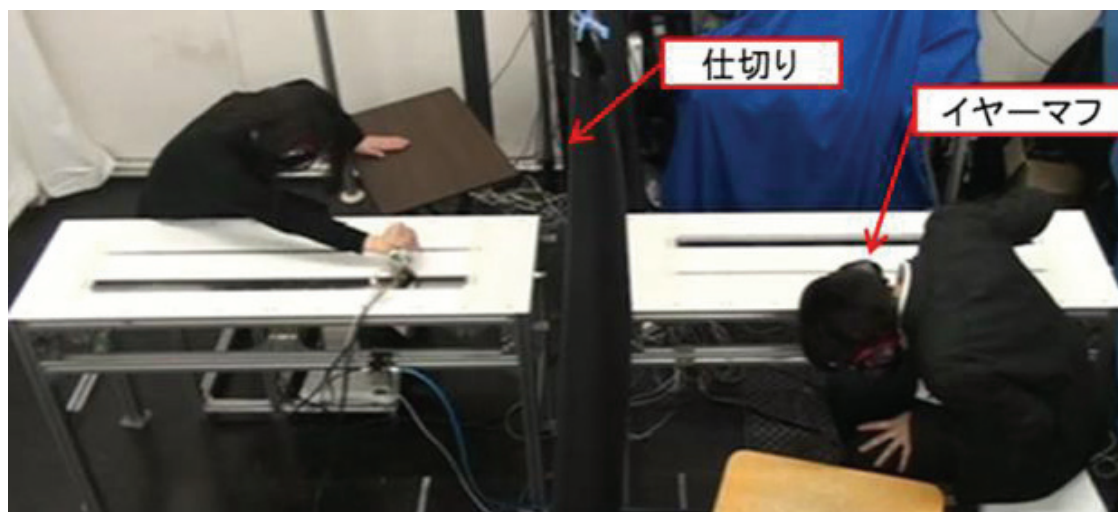


図 6.10 実験の様子

Figure6.10 Situation of the experiment

6.3. COP 情報に着目した遠隔手合わせ表現システム

前節において位置と力のバイラテラル制御は、手合わせ表現を創り合うことが困難であり身体性が遠隔に拡張しにくいことが示唆されたが、その原因はいくつか考えられる。まず、本システムにおいては位置と力のバイラテラル制御をフィードバック制御によって実現しており、原理的に必ず時間遅れが生じる。前章において、手合わせ表現において表現を創り合う際の身体性においては、手の動作に先行して COP が先行するという各人における時間的關係が他者との間で合致するような関係性が生成

することを見出した．このことは各人の中で生成される先行的な状況が自他間で合致している可能性を示唆するものである．したがって，時間遅れが生じるフィードバック制御においては，上述のような関係性の生成が阻害されてしまうことが予想される．また，手合わせ表現は，手を接点として双方の身体が関わって創り合うものであるが，手の動作だけ身体から切り離して遠隔地間で伝え合ったとしても手合わせ表現を実現し，身体性を拡張することは難しいと考えられる．

以上の問題に対して，本研究では，COP 情報に着目した新たな制御手法を導入することにより解決を試みる．すなわち，手の動きに先行して動作する COP 情報を自他の間で共有する機能を実装することにした．具体的には，COP 情報に基づいて生成した力を，グリップを介して自身と相手に呈示する．その手始めとして，各人の COP 情報をそれぞれ自身の手の動作情報（位置あるいは力情報）に足し合わせた上で，バイラテラル制御により双方で共有，合致させる手法を実装することにした．COP 情報の与え方として，手の位置に上乗せする場合，図 6.11 に示すように，COP の変化にゲインを乗じた後に，グリップの位置制御ループにおける目標位置に加算する．また手の力に上乗せする場合，グリップの力制御ループにおいて，COP の変化にゲインを乗じた後に，目標とする力に加算する．これらを位置・力並列型のバイラテラル制御に実装した場合の制御の流れを，図 6.12 に示す．

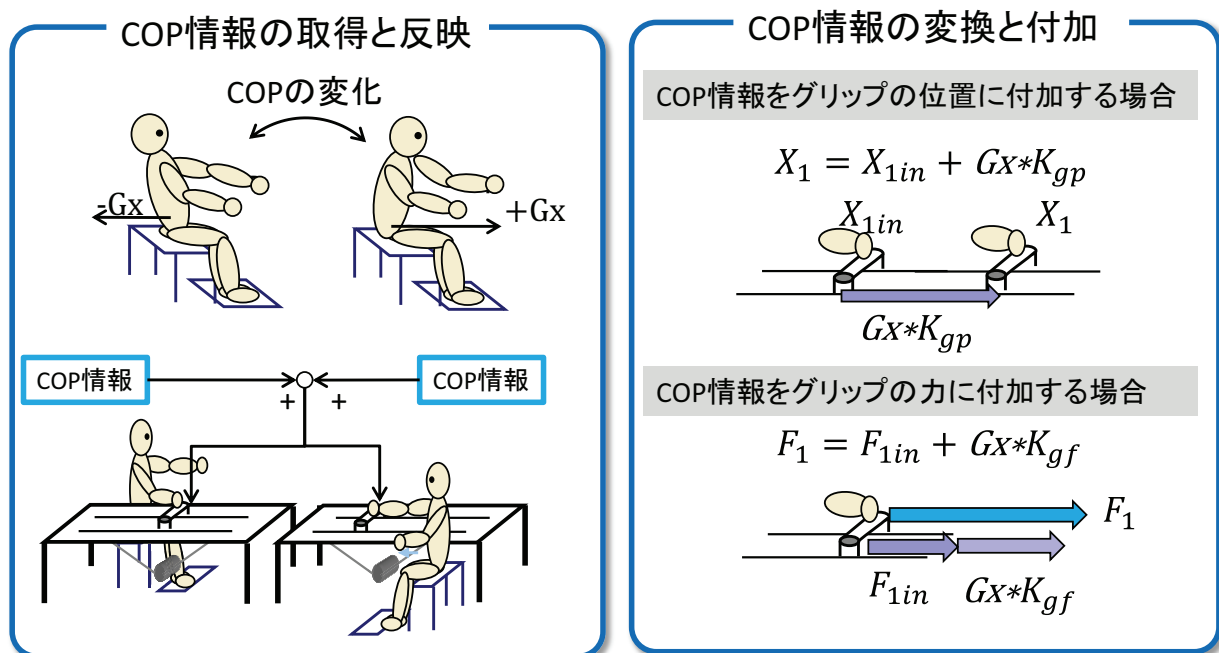


図 6.11 COP 情報の呈示方法

Figure 6.11 The ways to present the information of COP

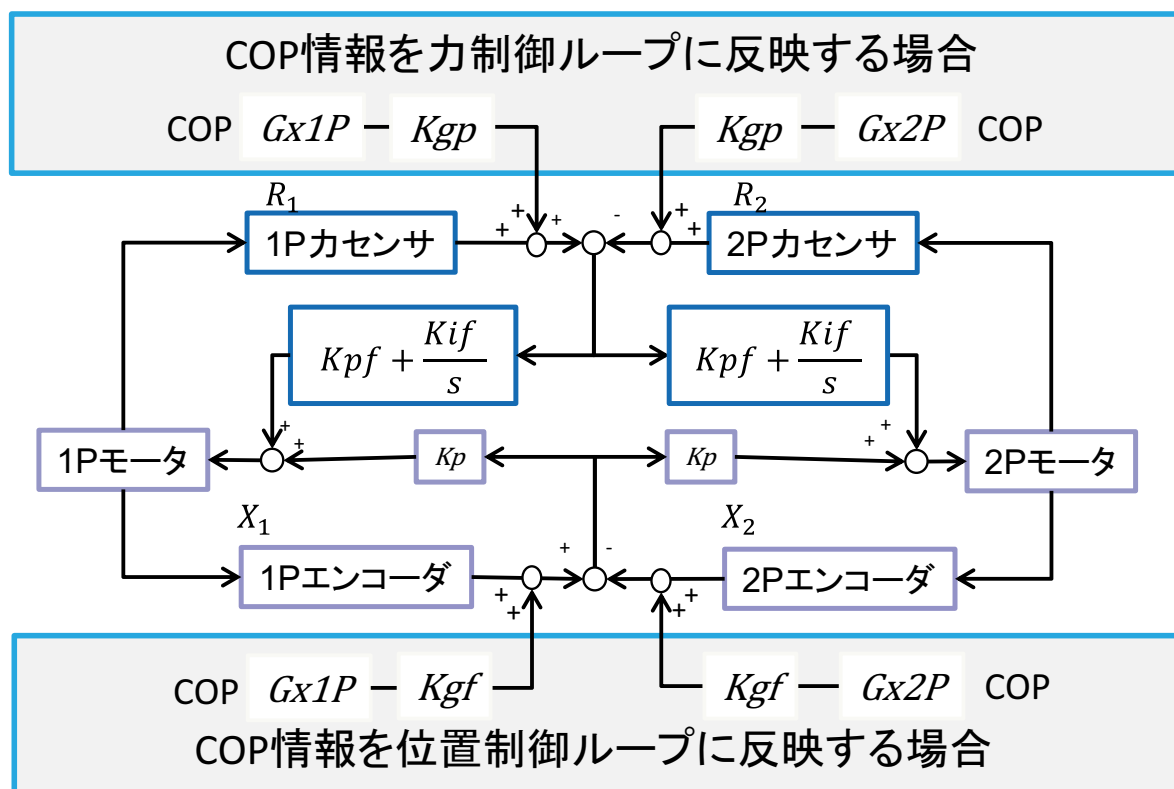


図 6.12 提案する制御手法のブロック線図

Figure 6.12 Block diagram of the proposed control method

6.4. 遠隔手合わせ表現実験

6.4.1. 実験方法

COP 情報を手の動作情報に付加し、これを相手と自身の双方に伝え合う本手法の身体性の拡張に関する効果を確認することにした。そこで、被験者に下記の条件において本システムを用いて手合わせ表現を行ってもらい主観調査や身体動作の計測結果による比較を行なった。

- ① 条件 I：手の位置と力のみを伝達した場合
- ② 条件 II：COP 情報を位置制御ループに加えた場合
- ③ 条件 III：COP 情報を力制御ループに加えた場合

なお、被験者には同場所において手合わせ表現を創り合うことができ、また身体性

に関わる内観を正確に報告できることが求められる。そこで、身体表現の熟練者 N と初心者 T ペアを被験者とした。熟練者と初心者のペアであっても手合わせ表現に創り合うことができることは前章において述べた通りである。また実験は、先述と同様に示すように対面に装置を配置し、布製の仕切りやイヤーマフによって互いの姿や音が伝わりにくい状態で行った。実験時間は各条件において 120 秒間とした。

6.4.2. 実験結果

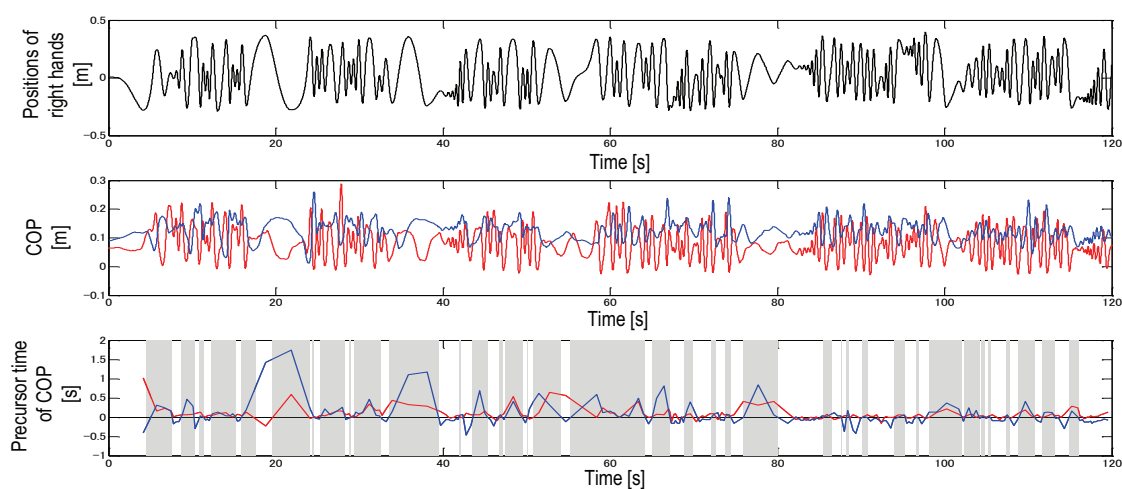
各条件における身体表現の熟練者 N と初心者 T 手の動きと COP の計測結果を図 6.13 に、手の動きの周期変動を図 6.14 示し、被験者からのコメントを表 6.1 に示す。

まず、各条件のコメントに着目すると、条件 II においては、表現の空間が広がり、身体を大きく動かして表現できていたことを示すコメントが、また条件 III においては「動きが持っている力性のようなものが自分の体を感じられる」「空間的にうねる感じがあり、次のことも出てきやすく、相手のこともよくわかる」といったコメントが熟練者から聞かれた。以上のコメントは、COP 情報を付加することにより手合わせ表現が遠隔においても創り合いやすくなったことを示している。また条件 II においては表現における空間に関するコメントが、条件 III においては表現における力に関するコメントが得られており、このことは COP 情報の付加方法によって、異なる表現が引き出される可能性を示唆するものである。

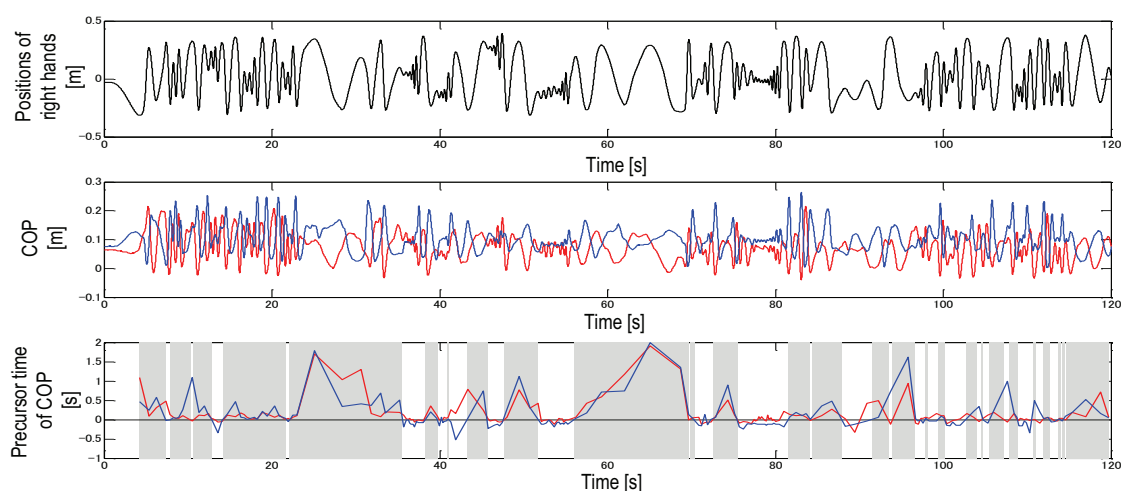
双方の COP が手の動きに対し同時に先行する時間の全時間における割合（図 6.13 グレー部）に着目すると、条件 I では 55%であったものが、条件 II、条件 III ではそれぞれ 66%、64%であった。このことは、COP 情報を加えた条件においては、手と COP の関係が双方の間でより合致する傾向にあることを意味している。すなわち、COP 情報を加えたことで、前章において述べた手合わせ表現を創り合う際に生成する身体性が、遠隔地間において拡張して生成されたことを示しており、本手法が遠隔の他者に身体性を拡張する上で有効であったと考えられる。

次に手のひらの動きの周期変動に着目すると、条件 I においては特に試行時間の後半においてあまり周期変動が見られなくなったのに対し、条件 II や条件 III においては、試行全体において周期が大きく変動する傾向があることが分かった。各試行における手の周期の標準偏差を算出したところ、条件 I においては、0.95[s]、条件 II、条

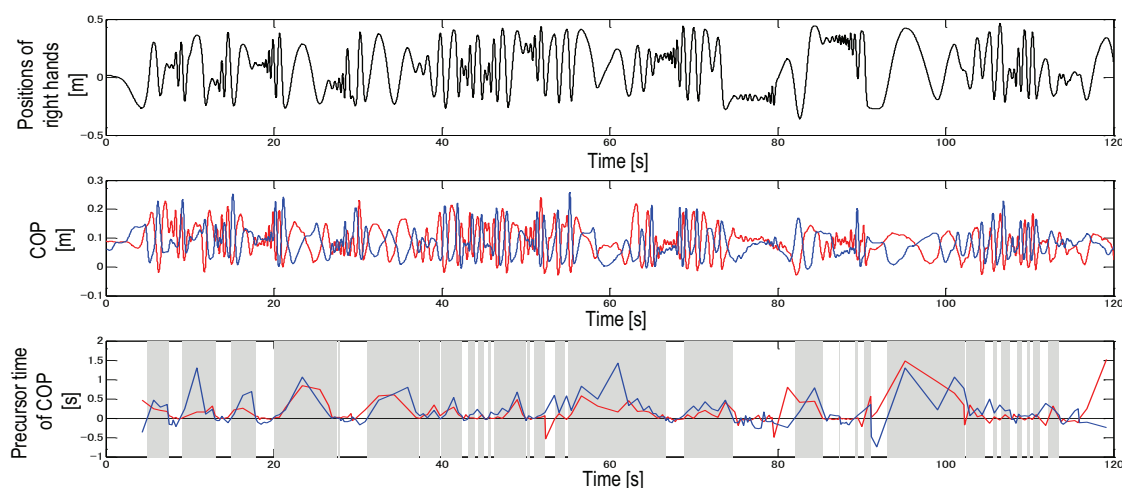
第6章 手合わせ表現に着目した創出的コミュニケーションの遠隔支援



(a) 条件Ⅰ：手の位置と力のみを伝達した場合



(b) 条件Ⅱ：COP 情報を位置制御ループに加えた場合



(c) 条件Ⅲ：COP 情報を力制御ループに加えた場合

図 6.13 各条件における身体動作の計測結果

Figure 6.13 Measuring result of body movements under each condition

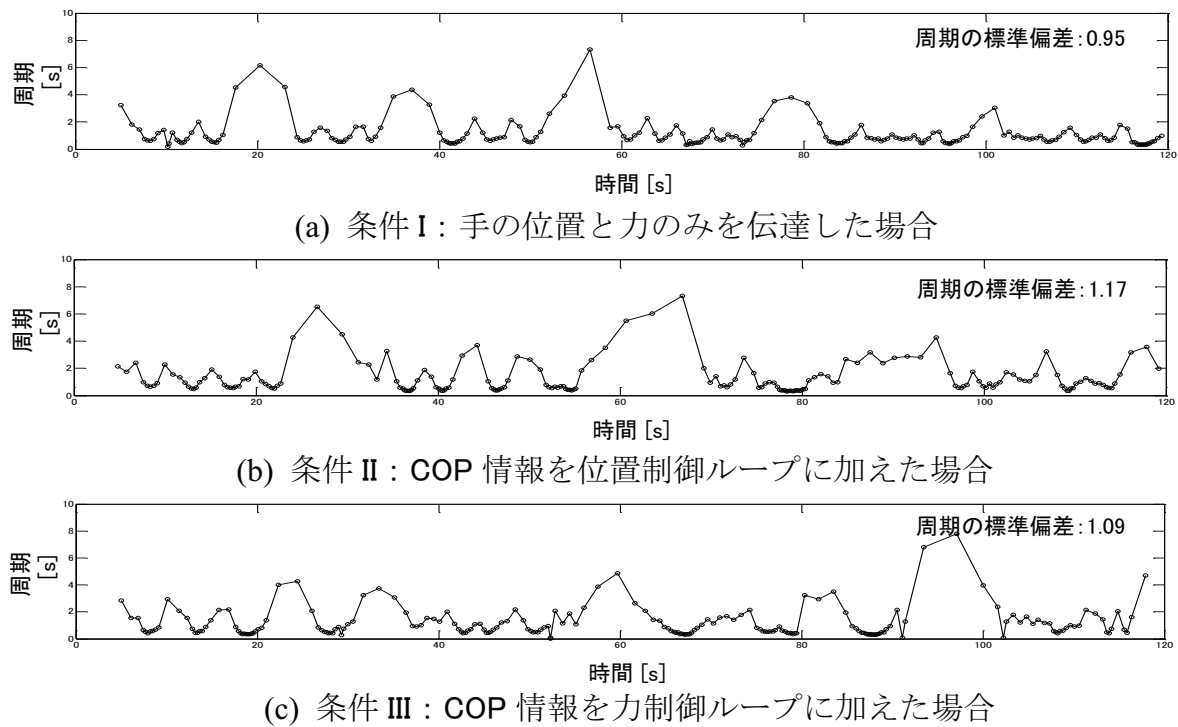


図 6.14 各条件における手の周期変動

Figure 6.14 Cycle variation of hand motion under each condition

表 6.1 被験者からのコメント

Table 6.1 Comments from subjects

条件	コメント
条件 I 手の位置と力のみを 伝達した場合	<ul style="list-style-type: none"> 位置や力は感じるが、対面時の手合わせと比較してやりにくい 相手の表現の強弱がわかりにくい 平面的な印象を受け、イメージが創りにくい 同じようなフレーズの反復だけど、増幅される感じ
条件 II COP情報を位置制御ループに加えた場合	<ul style="list-style-type: none"> 相手の身体が迫ってくる感じが広がり、三次元的な印象 深い感じ。新しいものがうまれる感じ。 自分の身体を大きく動かしたくなり、自分の表現を伝えようとする気持ちが強くなる 空間性が広がり、伸びやかな感じがする
条件 III COP情報を力制御ループに加えた場合	<ul style="list-style-type: none"> 動きが持っている力性のようなものが自分の体を感じる 自分の表現を出す感じや、相手の表現が伝わってくる感覚がダイナミックになる 表現の伝わりやすさ、伝わりにくさがはっきり分かる感じがする 空間的にうねる感じ。次のことも出てきやすく、相手のこともよくわかる

第6章 手合わせ表現に着目した創出的コミュニケーションの遠隔支援

件 III においてはそれぞれ 1.17[s], 1.09[s]となり 15~20%の上昇が認められた。このことから条件 II, 条件 III においては表現が持続的に創出するような関係が生成されていたと推察される。

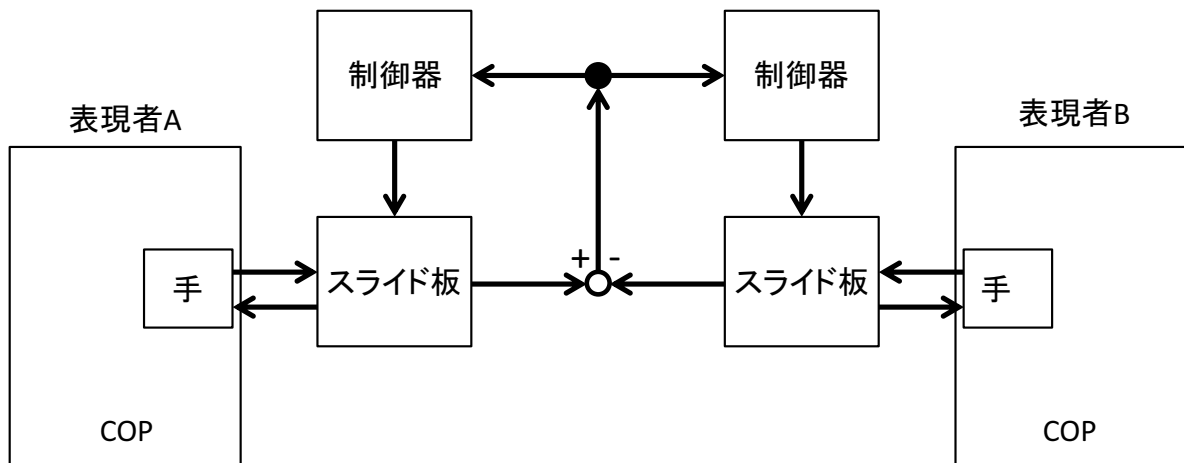
以上まとめると、条件 II, 条件 III の計測結果は、前章において表現を共に創り合うことができたと報告した試行の結果の傾向に近づくことが分かった。また主観調査においてもそれを支持するようなコメントが得られている。したがって、手合わせ表現において双方が直接的にインタラクションする手の動作情報だけでなく、それに加えて各人の COP 情報を自分と相手に送りあう本手法が、身体性を遠隔の他者に拡張するような創出的コミュニケーションにおいて有効であることが明らかとなった。

6.5. 考察

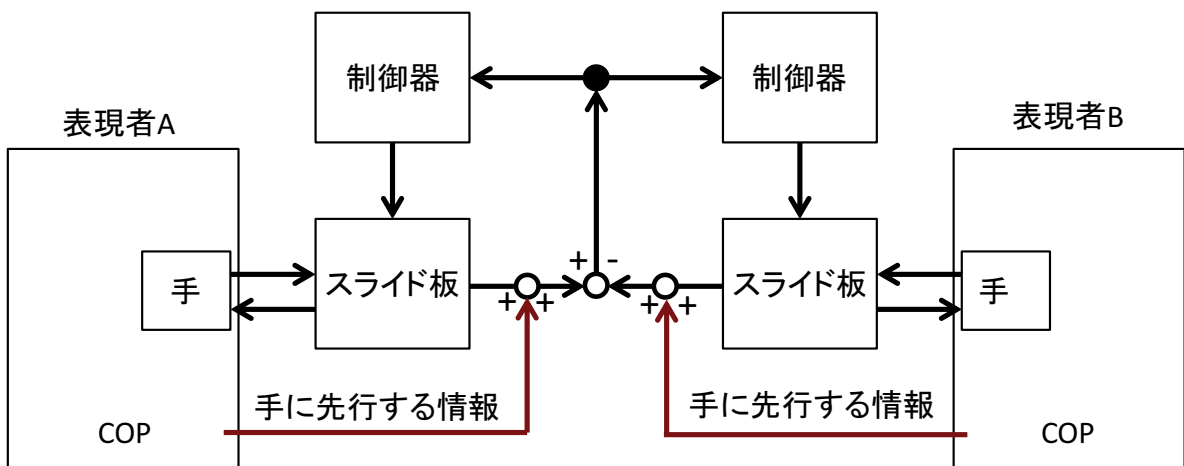
以上の結果を踏まえ、提案した本手法の特徴に対する考察を行う。

本研究では、はじめに手の位置と力の伝達による遠隔手合わせ表現を試みた。しかしながら、この手法では、コメントや身体動作の計測結果から、表現を創り合うことが困難であること示唆された。この手法を模式図に表したのが、図 6.15(a)である。手のみの動作の伝達であることに加えて、フィードバック制御を用いたバイラテラル制御によって手の位置と力を同期させるため、原理的に時間遅れが伴って双方に伝達される。このことが、手合わせ表現を創り合う際に成立する、手とそれに先行する COP の時間的關係性の他者との間での合致を妨げてしまったのではないかと推察される。

次に、本章で提案した手の動きに先行する COP の変化の情報をグリップの制御に加えた手法の模式図を図 6.15(b)に示す。本手法では、遠隔の他者にまで身体性が拡張する際に生じるような関係性の生成が促されていることが身体動作の計測結果やコメントから示された。この理由を以下のように考察した。まず、この手法では、COP の変化情報をグリップの位置や力に加えた上で、グリップの位置と力を双方の間で合致させているため、COP の情報は相手に伝達されるだけでなく、自分自身にもフィードバックされる。したがって被験者においては両者の合算された COP の変化に手が牽引される形になる。ここで、手と動作と COP の情報はもともと無関係にあるわけではなく、COP が手の動きに先立って変化するため、単に外乱として感じる



(a) 手の動作のみをバイラテラル制御で伝え合う場合



(b) COP の情報を自身と相手に伝え合う場合 (提案手法)

図 6.15 制御手法の模式図

Figure 6.15 Diagrams of control approaches

のではなく、自身が表現しようと手を動かす少し先の情報に牽引される形になる。このことは、制御による時間遅れを補償するような働きをなすと考えられる。さらに言えば、手が牽引されながら表現を創るが、その牽引する働きの一部は自分自身が創りだしているという状態が生み出される。すなわち、自分自身が受動的なのか能動的なのか混然となることで、相手と一体となりながら表現を創りあうことができ、このことが身体性の拡張と関わっているのではないかと推察される。

また提案手法は、同じ場所において手合わせ表現を創り合うプロセスを解明することに寄与する可能性があると考えている。西は手合わせ表現において深い一体感が生

第6章 手合わせ表現に着目した創出的コミュニケーションの遠隔支援

じる“共振”は，“私”としての主体性と、それぞれに異なる者同士の“私たち”としての共同性が「包まれつつ・包む，包みつつ・包まれる」という感覚となることに近いことを指摘している．したがって，双方の合算された COP の変化に手が牽引されつつ表現を創ることを支援する本提案手法と何らかの関係があるように思われる．

6.6. まとめ

- (1) 手合わせ表現においては，各人の COP が合わせた手に対し先行する時間的關係が生成し，これが双方の間で合致することを発見した．このことが手合わせ表現を創り合う際に生じる身体性と密接に関わっていると考えられる．この知見を踏まえ，そこで本章では，遠隔地間において手合わせ表現を実現し，他者への身体性が拡張するような創出的コミュニケーションを支援する手法を提案する．
- (2) 手のグリップを把持して前後に動かすリーチング動作に着目し，まずは，遠隔地間で手の動作を同期させることにした．具体的には，位置・力並列型のバイラテラル制御により，グリップの位置と力を遠隔地間で同期させる装置と制御を実現した．しかしながらこの手法では，手合わせ表現が創りにくいことが示唆された．
- (3) そこで COP 情報を手の動作情報に付加し，これを相手と自身の双方に伝え合う手法を考案し，システムに実装した．
- (4) 提案手法において，両者の COP が手に共に先行するような関係が生成し，さらに周期が大きく変動する傾向が見られた．この結果は前章において，手合わせ表現を創り合うことができ，さらに表現を持続的に創出したと考えられる双方の関係と傾向が類似するものである．このことから，本手法によって遠隔地間での手合わせ表現において，身体性を遠隔の他者に拡張することを実現し，創出的コミュニケーションが支援できることが明らかとなった．

以上要するに本章では，手合わせ表現を創り合う際に生じる身体性を遠隔地間で拡張することを実現する手法の提案，および装置の開発を行い，創出的コミュニケーションを実現することを試みた．具体的には，COP 情報を手の動作情報に付加し，こ

れを相手と自身の双方に伝え合う手法を考案し、システムに実装した。その結果、手合わせ表現を創り合う際に見られた結果に、類似した身体動作の関係性が双方の間で見られた。このことから、本手法によって遠隔地間において手合わせ表現を実現し、遠隔の他者にまで身体性を拡張するような創出的コミュニケーションが支援できることが示された。

第7章 結論

7.1. 本論文の結論

近年の情報通信技術の発達やソーシャルメディアの登場により、いつでも、どこでもコミュニケーションを行うことや、地理的に離れた場所の間で共同作業を行うことが可能になった。特に最近では、表情やジェスチャなどの身体的な情報をリアルタイムに伝え合うシステムがモバイル機器などで実現され、普及しつつある。しかしながらこれらの既存の遠隔コミュニケーションシステムは言語的な情報、あるいは身体的な情報を明示的、顕在的に伝達する手法を取っており、同じ場所に身体が居合わせる時のような身体的な関係性を実現するには至っていない。私たちは、身体がその場所に存在することで、身体を介して周囲の状況を捉えたり他者や個物との関係性を生成したりすることができ、この働きを本研究では身体性と呼んだ。またこの身体性によって道具が身体化したり、他者との間に一体感や共存在感が生まれたりするような関係が創出する。したがって、このような身体性を離れた場所までに拡張することができれば、既存の研究においては実現することができなかった、異なる場所にまで身体がつながるような感覚や、異なる場所にいる人々の間に一体感や共存在感が創出されることが期待できる。そこで本研究では遠隔の空間と遠隔の他者に身体性を拡張する二つの研究を行い、創出的なコミュニケーションを支援する手法を提案することを目的とした。

前者については、道具を身体化する身体性に着目し、バーチャルな道具においても身体性を生じさせることで、これを介して遠隔の映像空間にまで身体性を拡張する手法について研究した。具体的には、身体や個物と切っても切り離すことのできない非分離な影に着目し、道具の影をバーチャルに呈示する手法を考案した。そして、この道具のバーチャル影を遠隔の映像空間に、指示行為を実現するシステムを開発した。

後者については、他者と手と手を触れ合わせて即興的に表現を創る手合わせ表現に着目し、表現を創り合う双方の身体的な関係を、身体動作の計測によって身体性と関連付けて調べることで、遠隔の他者と手合わせ表現を創り合うことを支援するシステムを提案、開発した。

本論文は 7 章から構成されている。以下に、各章ごとのまとめについて述べる。

第 1 章では、現在のソーシャルメディアやコミュニケーション支援システムの問題点を明らかにし、本研究の意義について述べた。身体性の拡張に着目して創出的コミュニケーションを遠隔で支援する本研究の方針を示した。また人工物や他者に対する身体性に関する従来研究をまとめ、本論文の位置づけを行った。そして遠隔の空間や遠隔の他者の身体に身体性を拡張するための研究手法について説明した。

続く第 2 章と第 3 章では、バーチャルな影を用いた道具を介して、あたかも自身の身体が遠隔に存在するように遠隔の映像空間に身体性を拡張し、遠隔にある個物を指示することが可能な技術について記した。

第 2 章では、道具のバーチャル影を呈示するシステムを開発し、道具のバーチャル影においても身体性が生じるかを評価した。具体的には、長い指示棒を把持したときに生じるような道具のバーチャル影を、グリップの本物の影から整合的に連続して呈示することを、投影型 AR を用いて実現した。そして、身体の近傍空間で生じる触覚刺激判断に対する視刺激の干渉現象（Cross-modal interference）に着目し、触刺激の判断時間によって干渉の程度を定量化することで、バーチャル影に対する身体性の強さを評価した。実験の結果、実体としての道具はなくとも、道具のバーチャルな影を呈示することで実体の道具同様の身体性が生じる可能性が示された。また、身体やグリップの実際の影からバーチャルな影の先端にまで連続的に投影することがバーチャルな影による身体性の生成にとって重要な要件の 1 つになることを見出した。

第 3 章では、前章で得られた知見を踏まえ、道具のバーチャル影によって遠隔の空間にまで身体性が拡張するかを検証した。まず、バーチャルな影が、自身の影やグリップの影から遠隔の映像空間にまで、分断せずに連続的に呈示されることを実現するために、テーブル接合型の新たな空間共有手法を提案し、その開発に成功した。そしてこれによって、道具のバーチャルな影の映像が双方で共有され、指示行為が可能となるシステムを実現した。本システムにおいて、指示行為の際の使用感覚に関する主観調査などから身体性の遠隔への拡張を評価した。その結果、バーチャルな影を身体の影から連続している条件において、自身の道具の存在感や遠隔の個物やテーブルに触れた感覚が強まることが示された。以上より、本システムが身体性を遠隔の空間に拡張する上で有効であることを明らかにし、身体が遠隔の映像空間にまでつながるような感覚を生み出して指示を行う、創出的なコミュニケーションが実現されることを

第7章 結論

述べた。

第4章から第6章では、手合わせ表現に着目し、一体感や共存在感が生まれるような身体性を遠隔の場所にいる他者にまで拡張することで、創出的なコミュニケーションを支援する研究について述べた。

第4章では、手合わせ表現を創り合うことと、身体性との間にどのような関係があるかを調べるため、手合わせ表現における身体動作や生理情報の計測を実現するシステムの設計と開発について述べた。一方で、実際の現場で行われている手合わせ表現は動きの自由度が高く計測データの解析が複雑になるため、手の動きを前後1自由度に制限する装置を開発した。そして、手の動きや各人の力の発生に伴う腕部の筋電図を計測するセンサを実装した。さらに、手合わせ表現における身体性が、他者との接点となる手の動作だけでなく、あまり意識しないような各人の全身の動作に表出するのではないかと考え、全身のCOPを計測可能なシステムを開発した。本装置による身体動作の拘束下においても、手合わせ表現を創りあえることができることを、手合わせ表現の熟練者の主観評価により確認した。

第5章では、手合わせ表現において、双方の関係を捉える手始めとして、リード・フォローの役割を固定した条件と役割を固定しない条件で、手の押し引き動作に関わる筋電図を計測し比較した。その結果から手合わせ表現ではリード・フォローという関係だけでは説明できないインタラクションが存在することが分かった。そこで、手の動作に対し、あまり意識に上らないようなCOPに着目し、この2種類の情報を計測することにした。その結果、手合わせ表現を創り合うことができ、一体感や共存在感が生じた試行においては、双方の手のひらの動きに対してCOPが双方で同時的に先行するような関係性が生成することを発見した。そして、このような関係性が手合わせ表現を創り合う際の身体性と密接な関係があることを論じた。またこのことから、遠隔の他者に対して身体性を拡張し創出的コミュニケーションを支援するには、この関係性を遠隔地間においても生成することが重要であることを述べた。以上に加え、手の動きに着目したところ、手合わせ表現を創り合うことができた試行では、振幅や周期の時系列において数秒から10数秒程度の周期性をもつ変動パターンが見られることも併せて発見し、このパターンによっても身体性を評価できる可能性があることを述べた。

第6章では、前章までに得られた知見を踏まえ、遠隔地にいる他者と手合わせ表現

を実現する装置の開発を行い、創出的コミュニケーションの支援手法について述べた。まずは、位置・力並列型のバイラテラル制御により、グリップの位置と力を遠隔地間で同期させる装置と制御を開発した。しかしながらこの手法では、手合わせ表現が創りにくく、身体性の拡張支援に不十分であることが示唆された。そこで COP 情報を手の動作情報に付加し、これを相手と自身の双方に伝え合う手法を考案し、システムに実装した。その結果、両者の COP が手に共に先行する関係が生成し、さらに手の動作の周期が大きく変動する傾向が見られた。この結果は、手合わせ表現を創り合うことができた際の双方の関係と類似する傾向を示すものである。このことから、本手法によって手合わせ表現において生じる身体性を、遠隔の他者にまで拡張するような創出的コミュニケーションが支援できることが示された。

最後に、第 7 章では、本論文の結論として内容をまとめ、今後の課題と展望について述べた。

以上、要するに本論文では、遠隔において創出的なコミュニケーションの支援を行うため、遠隔の空間にまで身体性を拡張する手法と他者にまで身体性を拡張する手法についてそれぞれ研究した

まず、バーチャルな道具を利用することで遠隔の空間へ身体性を拡張することを着想した。そのバーチャルな道具のデザインに関しては

- (i) 道具の影を呈示することで身体性が生じること。
- (ii) 影の先端まで、身体の影から連続して呈示する必要があること。

の二つの知見を得た（図 7.1）。

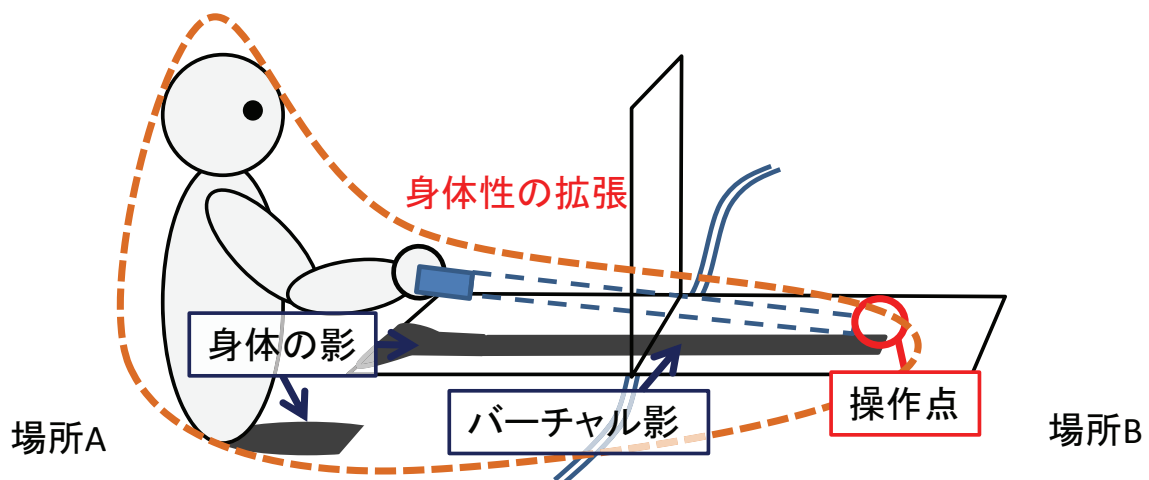


図 7.1 遠隔の空間における創出的コミュニケーション支援手法

Figure 7.1 The proposed support method for creative communication in remote space

第7章 結論

次に、手合わせ表現を遠隔で実現し、遠隔の他者への身体性の拡張する手法に関しては、

- (i) 各人において生じる、手の動作とそれに先立つ COP の時間的な関係を、双方の間で合致させること.
- (ii) 手の動作にそれに先立つ COP の情報を付加して、自分と相手の双方に呈示する手法が有効であること.

の二つの知見を得た (図 7.2).

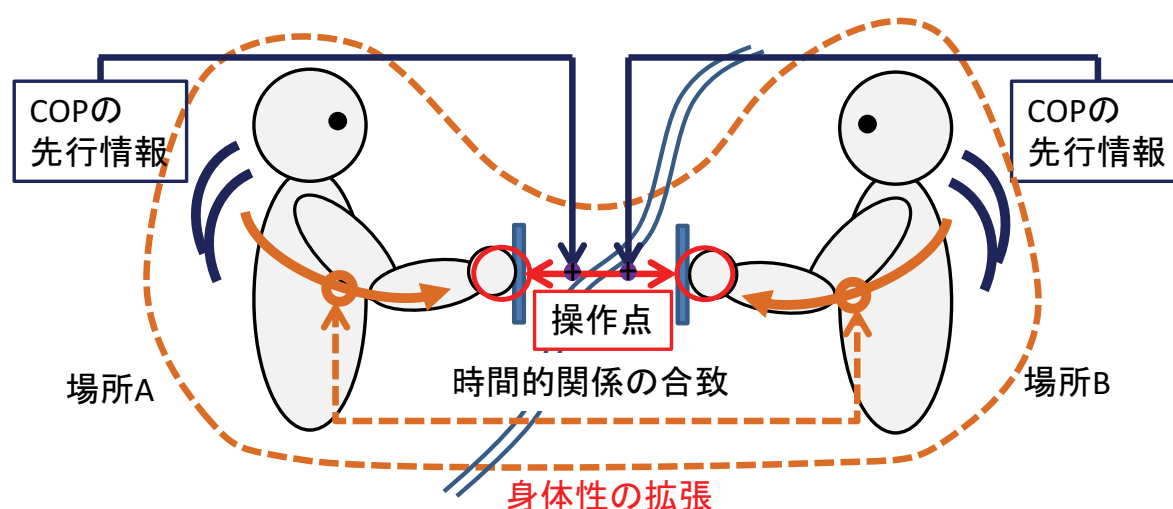


図 7.2 遠隔の他者における創出的コミュニケーション支援手法

Figure 7.2 The proposed support method for creative communication between people in remote

7.2. 提案手法に関する考察

本節では、本研究で提案した創出的コミュニケーション支援のための遠隔の空間と他者への身体性拡張手法の特徴について考察を行い、それぞれの手法がどのような意味を持っているのかを述べることにする。

7.2.1. 道具のバーチャル影のはたらき

本研究では、指示行為の機能を担い、指示の対象との直接的な接点となる先端付近だけでなく、道具のバーチャル影を身体の影響やグリップの影響から接続して呈示することで身体性が生じることを明らかにした。このようなバーチャル影の意味について以

下に述べることにする。

まず、提案したバーチャル影によって身体から道具の先端まで実体的な連続性が喚起されることが挙げられる。Berti らは右脳に損傷を受け、身体の近傍空間にのみ左半側無視が生じる患者において、レーザーポインタを使用した場合は指示点において半側無視が生じないが、実体の指示棒の場合は半側無視が生じることを報告した[44]。このことは、患者が捉えた自身の身体の近傍空間が実体の棒があることで拡張したことを意味している。影は、個物と非分離であるため、実体の存在感を喚起することが知られており[64]、バーチャル影によって実体の棒を把持した時と同等の関係が創られ、これによって身体性が生じたと考えられる。

また、バーチャル影によって指示行為を行う際、影が連続的に伸びている部分は実際の影のように周辺視的に捉えていたと考えられる。周辺視は中心視とは異なるプロセスで処理されることが知られている[96][97]。中心視から入る情報は、腹側経路と呼ばれる脳内経路において処理がなされ、対象の形や色などの認識に用いられるとともに、意識に立ち上がる情報である。一方、周辺視から入る情報は背側経路と呼ばれる脳内経路において処理がなされ、周囲の全体的な状況を把握し、自身の行為を遂行するための視覚情報として処理がされていると考えられている。事故によって、腹側経路の一部を損傷したある患者は、視覚情報が意識上らない盲目のような状態であり、対象物が何であるかを答えることはできないにもかかわらず、家具や戸口にぶつかることなく、歩き回ることができたといわれている[96]。このことから、身体の影響から連続的に伸びるバーチャル影が周辺視的に捉えられることによって、周囲の状況に対する身体およびバーチャル影の状態が把握されやすくなり、このことが、周囲の状況を捉えるはたらきとしての身体性に効果的に働いたと予想される。

本研究で提案した道具のバーチャル影は以上のような働きを効果的に促すことで身体性を生じさせる手法であると言えよう。

7.2.2. COP 情報呈示のはたらき

本研究で提案した手法は、相手と直接インタラクションが生じる手の動作を共有するだけでなく、手に先行する COP の変化を手の動作に付加して自分と相手の両者に伝達するものである。ここで、手合わせ表現における COP の意味について改めて考えてみることにする。まず 5.3.2 の結果より、COP はイメージや思いの生成に伴っ

第7章 結論

て生じる手の動きに対する先行的な動作である。したがって、手の動作と COP の時間的な関係が双方の間で合致することは、双方の間で手の動作に先立つイメージや思いに関わる情報が共有されていることを意味していると考えられる。本研究で提案した手法は自分と相手の COP 情報を合算して自分と相手の双方に呈示するものであり、これによってこの先行情報が双方で共有されやすくなったと考えられる。そしてその結果、双方が互いの状況を共有するとともに、あたかも一つの身体のように振る舞うことができ、一体感や共存在感が生起するような身体性が生じたのではないかと推察される。

7.2.3. 提案手法のまとめ

7.2.1, 7.2.2 を踏まえてこれら二つの身体性の拡張による創出的コミュニケーションの遠隔支援手法の共通点やそれぞれの特徴についてまとめることにする。

二つの手法に共通していることは、対象との接点だけでなく、その周辺的な情報を統合して用いている点にある。

例えば、道具のバーチャル影において指示行為を行う際に対象との接点となるバーチャル影の先端部に対し、身体の影からこのバーチャル影の先端部まで連続的につながる影を呈示している。手合わせ表現においては、相手との接点となる手に対して、全身の COP の情報を加えている。前者については、図 7.3(a)に示すように影の呈示によって身体とバーチャル影の先端部までの非分離性を高め、空間的な関係性を強化していると考えられる。後者については図 7.3(b)に示すように、COP の情報によって接点となる手に対して、時間的に先行する情報を付加し、これを双方が共有することによって、手と全身の時間的な関係性を双方の間で合致、強化していると考えられる。すなわち、先行的な情報が共有されることによって、表現を創り合う際の同時性が高まっているといえよう。またこのことは、これまでの身体性に関する従来研究は、主に身体性の空間的な側面が注目されてきたが、本研究によって、手合わせ表現においては、手と全身の時間的な関係性（時間差）が双方で合致することによって身体性が生じるという、身体性の新たな側面を見出したと考えられる。

以上のように本研究では、対象との接点だけでなく、その周辺的な情報を統合して呈示することで、身体と対象との空間的、時間的な関係性、言い換えれば、非分離性と同時性を強める手法を提案したといえることができるだろう。そして、これによって

身体が同じ場所に居合わせている時のような関係が、遠隔地間の中で創り出されることで身体性が拡張し、創出的コミュニケーションが支援されるのである。

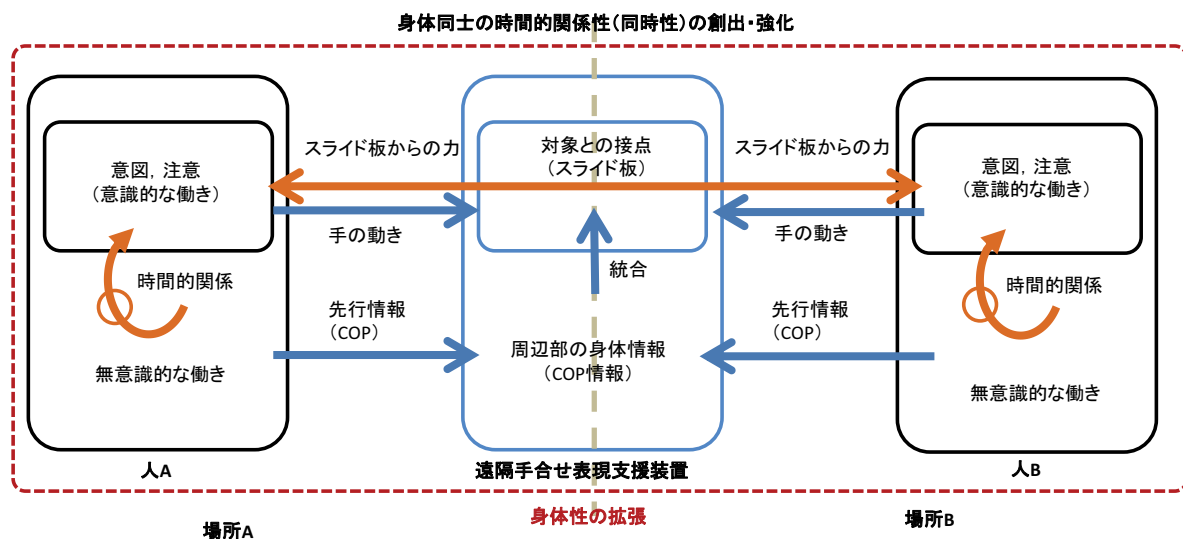
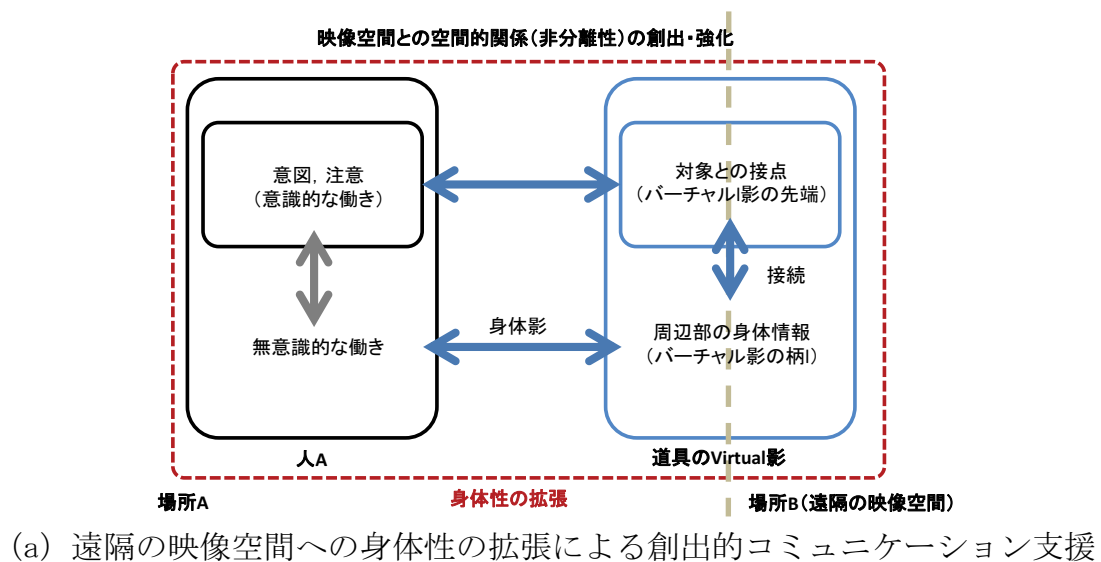


図 7.3 本論文における身体性拡張手法の模式図

Figure 7.3 Diagram of proposed methods in this study

7.3. 今後の課題と展望

最後に本研究において未解決な問題や今後の方向性について述べる。

(1) 影とみなせるバーチャル影のデザイン

本研究では、身体や把持したグリップの影からバーチャル影の先端まで連続して影を呈示することが身体性を生じさせるための要件になることを見出した。一方で、本手法を様々なアプリケーションやプラットフォームに実装、応用することを考えると、どのような条件を満たせば、バーチャル影を影と捉えることができ、身体性が生じるのかをさらに詳しく調べる必要があるだろう。例えば、インターネットを経由して海外との間で提案システムを用いるとき、どの程度の時間遅延まで許容できるかということや、遠隔のテーブル上の映像の解像度はどの程度必要になるのかということが問題となる。またポータブルな端末に本システムを組み込む場合は、その空間的な制約から光源とバーチャル影の幾何的整合性が厳密に保てなくなることが想定され、このような空間ずれの許容範囲も、システムの設計に必要な情報である。また視点を変えれば、バーチャル影を影とみなせる範囲を調べることは創出的コミュニケーション支援システムの設計に指針を与えてくれるだけでなく、人が何を影と見なしているかという、認知科学的な知見にもなり、学術的な意義は大きいように思われる。

(2) バーチャル影による他者との創出的コミュニケーション支援

本研究では、道具のバーチャル影を介して、遠隔の映像空間に身体性を拡張し、創出的コミュニケーションを支援することを実現した。一方で、バーチャル影を介して、遠隔の他者に身体性を拡張する方法については明らかになっていない。本研究で提案した創出的コミュニケーションの支援手法は、遠隔の様子が実画像で送られてくるため、遠隔の相手の表情などを見ながらコミュニケーションを行うことができる。したがって、バーチャル影を介して遠隔の相手にまで身体性を拡張させることができれば、システムの有用性はさらに高まると考えられる。

この問題に取り組むための手掛かりとして、本研究で得られた手合わせ表現における遠隔の他者への身体性拡張の知見が参考になると思われる。手合わせ表現における他者への身体性拡張においては、相手と直接的な接点となる手におけるインタラクションに、それに先行する COP の情報を加えて自分と相手の双方に呈示することが有

効であった。これを参考にすると、バーチャル影同士のインタラクションを実現する機能と、そのインタラクションに先行する各人の身体の情報に双方に呈示する機能を実装することが有効であるという仮説が立つ。この仮説の検証が今後の課題である。また力触覚情報を用いずに遠隔の他者へ身体性を拡張できるかという問題は、創出的コミュニケーション支援の設計原理を構築する上で重要な知見となるだろう。

(3) 創出的コミュニケーションにおけるコンテキスト

手合わせ表現は単なる運動ではなく、ストーリーをもつ表現活動であり、双方の間でコンテキストを創り共有しながら表現が進行していくと推察される。本研究で着目した、手に先行する COP の時間的關係の双方の間での合致は、表現を創り合う際の同時性に関わると考えられるが、創出的コミュニケーションを支援する上では、ストーリーやコンテキストといった時間的な側面にも着目する必要がある。

その手がかりを得るため、上述した床反力中心の手に対する先行時間の時系列変化や合わせた手の動きの時系列的な解析が課題である。例えば、手合わせ表現において、一体感や共存在感が創出される際の床反力中心の手に対する先行時間の時系列変化に着目すると（図 5.14）、単に両者が共に先行しているだけでなく、その先行時間が変化している様子が分かる。また合せた手の動きの周期が周期性をもって変動する様子も確かめられている。このように、手合わせ表現においては、時間に対して、両者の関係がダイナミックに変化していることが示唆され、今後はこの身体動作の時系列変化と身体性の関連について検討していきたい。

(4) 創出的コミュニケーションにおける先行情報の統合手法

手合わせ表現における遠隔の他者への身体性拡張においては、相手と直接的な接点となる手におけるインタラクションに、それに先行する COP の情報を加えて自分と相手の双方に呈示する手法を試みた。その結果、本手法が遠隔の他者への身体性拡張に有効であることが確かめられた。一方で、手の動作情報に COP をどのように統合することが最適であるかは今後さらに検討する必要がある。特に以下の二つの事項について研究を進めたいと考えている。

一つ目は、データの加算の仕方についてである。手の動作に COP のデータをどの程度の割合で反映させることが有効であるかを詳しく調べる必要がある。またこの割

第7章 結論

合の最適値が手合わせ表現中に動的に変化する可能性も考えられ、今後の検討課題である。

二つは、手やそれに先行する COP の情報の量や質の問題である。著者らは 3 次元的に動く力触覚デバイスを用いて、手の動きやそれに先行する手首の動きを統合して伝え合う遠隔手合わせ表現装置を試作した。しかしながらこの装置においては、手や手首の動きがデバイス上で複雑に呈示されるため、これらの動きに常に注意が向いてしまい、うまく表現を創り合うことができないことが分かった。すなわち、遠隔の手合わせ表現においては、やみくもに動作自由度を高めるのではなく、それぞれの動作が各人にとって適切な注意の配分で処理される必要があると考えられ、そのためのシステムの設計について研究を行う必要がある。

(5) 手合わせ表現の初心者支援

本研究では、第1章で述べたとおり、手合わせ表現の熟練者を被験者に加えて研究を行った。その理由は、手合わせ表現を創り合うことができること、またその時の内観を正確に報告できることなどによる。本研究では、このような熟練者が同じ場所で手合わせ表現を行った時と同等の関係性を、遠隔地においてはどのようにしたら支援できるかという観点に立って研究を進めた。一方で手合わせ表現の初心者においては、そもそも手合わせ表現をあまりうまく創れないという問題がある。そこで今後は、このような初心者に対し手合わせ表現を創り合うことを支援する手法について検討したい。その手段として、本研究で開発した遠隔の手合わせ表現装置が活用できるのではないかと考えている。遠隔の手合わせ表現装置は両者の手の間が物理的に離れているため、合せた手の間に通常の手合わせでは起こりえない様々な仕組みを実装できる。例えば両者の力や位置の伝達の程度を変化させたり、熟練者の手合わせと同様の動作となるように外力を与えたりといったことが可能となる。この仕組みを利用して手合わせ表現の支援手法について研究を行いたい。

また、遠隔の手合わせ表現装置は、目の前に相手がいないのにもかかわらず、相手と表現を創り合うことを可能にする装置である。したがって直接触れ合ったり、他者と対面したりすることに心理的抵抗を強く抱く人々に対して、身体表現を創り合う機会を提供できるため、このような観点からも初心者の表現支援が行えるのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] 総務省：平成 23 年通信利用動向調査（世帯編）；(2012).
- [2] Facebook, Inc.: Facebook; <http://www.facebook.com/>.
- [3] 株式会社ミクシィ: mixi; <http://mixi.jp/>.
- [4] Twitter, Inc. : Twitter; <https://twitter.com/>.
- [5] たとえば, Linden Research, Inc : セカンドライフ; <http://secondlife.com/>
- [6] たとえば, スクウェア・エニックス: ドラゴンクエスト X; <http://www.dqx.jp/>
- [7] 荻上チキ: ウェブ炎上—ネット群集の暴走と可能性; ちくま新書 (2007)
- [8] キャス・サンスティーン: インターネットは民主主義の敵か; 毎日新聞社 (2003).
- [9] 株式会社シータス&ゼネラルプレス: SNS でのシェアに関する意識調査; <http://www.c-gp.com/press/2012/pdf/2012032903.pdf> (2012).
- [10] 株式会社ジャストシステム: 大学生の LINE 利用実態調査; <https://www.fast-ask.com/report/report-undergraduate-line-20130620.html> (2001).
- [11] 牟田武生: ネット依存の恐怖; 教育出版 (2004).
- [12] 芦崎治: ネットゲ廃人; リーダーズノート (2009).
- [13] 西垣通: ネットとリアルのあいだ; 筑摩書房 (2009).
- [14] 清水博, 久米是志, 三輪敬之, 三宅美博: 場と共創; NTT 出版 (2000).
- [15] 清水博: 場の思想; 東京大学出版会 (2003).
- [16] Sellen, A.J.: Speech patterns in video-mediated conversations; Proc. of CHI'92, pp.49-59 (1992)
- [17] D. Nguyen, J. Canny: MultiView: Improving Trust in Group Video Conferencing Through Spatial Faithfulness; CHI'07, pp.1465-1474 (1992)
- [18] Kuzuoka, H., Kosuge, T., and Tanaka, M.: GestureCam: A Video Communication System for Sympathetic Remote Collaboration; Proc. of CSCW'94, pp.35-43 (1994)
- [19] Sigurdur Orn Adalgeirsson: Mebot, a robotic platform for socially embodied telepresence; In Proceedings of the fifth ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI-10). ACM/IEEE International, (2010).
- [20] Tadakazu Kashiwabara, Hirotaka Osawa, Kazuhiko Shinozawa, Michita Imai: TEROOS: A Wearable Avatar to Enhance Joint Activities; In

- Proceedings of the 30th International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2012), pp.2001-2004 (2012).M.メルロ＝ポンティ：知覚の現象学；法政大学出版社（1982）.
- [21] ドレイファス,H.：インターネットについて—哲学的考察 Thinking in action；産業図書（2002）.
 - [22] Head H, Holmes G.：Sensory disturbances from cerebral lesions; Brain ,34, pp.102-245. (1911)
 - [23] マイケル ポランニー：暗黙知の次元；ちくま学芸文庫（2003）.
 - [24] 市川浩：精神としての身体；講談社学術文庫（1992）.
 - [25] 市川浩：「身」の構造—身体論を超えて；講談社学術文庫（1993）.
 - [26] マルティン・ハイッデガー：存在と時間；岩波文庫,（1963）.
 - [27] Botvinick, M., & Cohen, J.：Rubber hands 'feel' touch that eyes see; Nature, 391, 756 (1998)
 - [28] B.Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger, Olaf Blanke: Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness; 317, pp.1096-1099, (2007).
 - [29] HH Ehrsson: The experimental induction of out-of-body experiences, Science, 317, p.1048 (2007).
 - [30] 上田祥代：身体拡張に関わるメカニズムの検討：受動的／能動的刺激入力による差異、および、ミラーシステムとの関連性；お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科 人間文化創成科学論叢, Vol.14, p.217 -226 (2012).
 - [31] Armel, K. C., & Ramachandran, V. S.: Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response; Proceedings of the Royal Society, B, Biological Sciences, 270, pp.1499-1506 (2003).
 - [32] Tsakiris, M., & Haggard, P.: The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution; Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance, 31(1), pp.80-91. (2005).
 - [33] Iriki, A., Tanaka, M., Iwamura, Y.: Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons; Neuroreport, Vol. 7, pp.2325-2330 (1996).
 - [34] A. Maravita, A. Iriki：Tool for body (schema), Trends in Cognitive Sciences, Vol.8 No2, pp.79-86 (2004).
 - [35] Short, F., Ward, R.: Virtual Limbs and Body Space: Critical Features for the Distinction Between Body Space and Near-Body Space. Journal of Experimental Psychology; Human Perception and Performance, 35, 4, pp.1092-1103. (2010).
 - [36] Hari, R., & Jousmaki, V.: Preference of personal to extrapersonal space in visuomotor task; Journal of Cognitive, (1996).
 - [37] K. Kilteni, J. M. Normand, M. V. Sanchez-Vives, M. Slater: Extending

参考文献

- Body Space in Immersive Virtual Reality: A Very Long Arm Illusion; PLoS ONE, Vol. 7, Issue 7, e40867 (2012).
- [38] S. Yamamoto, S. Kitazawa: Reversal of subjective temporal order due to arm crossing, *Nature Neuroscience*, Vol. 4, No. 7, pp.759-765 (2001).
- [39] S. Yamamoto, S. Kitazawa: Sensation at the tips of invisible tools, *Nature Neuroscience*, Vol. 4, No. 10, pp. 979-980 (2001).
- [40] S. Moizumi, S. Yamamoto, S. Kitazawa: Referral of tactile stimuli to action points in virtual reality with reaction force; *Neuroscience research: the official journal of the Japan Neuroscience Society*, 59(1), 60-67 (2007).
- [41] A. Tajadura-Jiménez, A. Väljamäe, I. Toshima, T. Kimura, M. Tsakiris and N. Kitagawa: Action sounds recalibrate perceived tactile distance; *Current Biology*, Vol 22, No 13, R516-R517 (2012).
- [42] Gallagher, S.: Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science; *Trends in Cognitive Science*, 4, 14–21 (2000).
- [43] S. J. Blakemore, C. D. Frith, D. M. Wolpert: Spatio-Temporal Prediction Modulates the Perception of Self-Produced Stimuli; *Journal of Cognitive Neuroscience* 11:5, pp.551–559 (1999).
- [44] A. Berti, F. Frassinetti: When Far Becomes Near: Remapping of Space by Tool Use, *Journal of Cognitive Neuroscience* 12:3, pp. 415 – 420 (2000).
- [45] Valeria I. Petkova, H. Henrik Ehrsson: If I Were You: Perceptual Illusion of Body Swapping; *PLoS One*, Volume 3, Issue 12, e3832 (2008).
- [46] Condon, W. S.: An analysis of behavioral organization; *Sign Language Studies*, 13, pp.285-318 (1976).
- [47] Condon, W.S. and Ogston, W.D.: A Segmentation of Behavior; *J. Psychiat. Res.* 5, pp. 221-235 (1967).
- [48] 渡辺富夫, 大久保雅史: コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価; *情報処理学会論文誌*, Vol.39, No.5, pp.1225-1231 (1998).
- [49] T. Watanabe, M. Okubo and H. Ogawa, “An Embodied Interaction Robots System Based on Speech”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.12, No.2, 2000, pp.127-135
- [50] 渡辺富夫: コミュニケーションにおける身体性; *ヒューマンインタフェース学会誌*, Vol.1, No.2, pp.14-18 (1999).
- [51] 三輪敬之, 板井志郎: 力触覚インタフェースによるタイミングの表現と間合いの生成について; *ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌*, Vol.5, No.1, pp.215-223, (2003).
- [52] Itai,S., Miwa,Y.: Creation and co-share of "Maai" by the interface employing the embodiment; *Proceedings of the 2004 IEEE International*

- Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp.193-198, (2004).
- [53] 板井志郎：ソフトエンタテインメント；計測と制御，Vol.51, No.11, pp.1059-1063 (2012).
 - [54] Noy L, Dekel E, Alon U: The mirror game as a paradigm for studying the dynamics of two people improvising motion together; Proceedings of the National Academies of Sciences, USA, 108(52):20947-52 (2011).
 - [55] Brave, S., Ishii, H., and Dahley, A.: Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication; Proc. of CSCW'98, ACM Press, pp.169-178 (1998).
 - [56] 上杉，三輪：異なる空間をつなぎ共存在感を支援する同期運動テーブル；ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌，Vol.5, No.2, pp.197-204 (2003).
 - [57] 上杉，三輪：身体映像表現と実体ツールとのインタラクションによる共存在的コミュニケーションシステム；ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌，Vol.6, No.3, pp.295-305 (2004).
 - [58] S. Wesugi and Y. Miwa: "Lazy Susan" Chair Communication System for Remote Whole-Body Interaction and Connectedness, Proceedings of the Third IASTED International Conference Human-Computer Interaction, pp.93-99, (2008).
 - [59] 山田貴志，渡辺 富夫：遠隔腕相撲インタラクションロボットシステムの開発；日本機械学会年次大会講演論文集，2005(4), pp.353-354 (2005).
 - [60] 和田侑也，田中一品，中西英之：握力・体温・感触を伝える遠隔握手用ロボットハンド，情報処理学会 インタラクション 2012 論文集，Vol.3, 1EXB05, (2012).
 - [61] 石引，三輪：身体影を活用した集団の共存在コミュニケーション；ヒューマンインタフェース学会論文誌，7(4), pp.497-505, (2005).
 - [62] 石引，渡邊，三輪：影を場の統合メディアとする共存在コミュニケーションシステムの開発，ヒューマンインタフェース学会論文誌，7(3), pp.311-318, (2005)
 - [63] Miwa Y., Ishibiki C.: Shadow Communication: System for embodied interaction with remote partners; Proceeding of CSCW 2004, pp.467-476, (2004).
 - [64] 三輪敬之：影システム；「統合学」へのすすめ，晃洋書房，pp.237-260, (2007).
 - [65] 河本：システム現象学—オートポイエーシスの第四領域；新曜社 (2006).
 - [66] Bonfiglioli, C., Pavani, F., Castiello, U.: Differential effects of cast shadows on perception and action; Perception, 33, pp.1291-1304 (2004).
 - [67] Y. Miwa, S. Itai, T. Watanabe, K. Iida, H. Nishi: Shadow Awareness - Bodily Expression Supporting System with Use of Artificial Shadow -;

参考文献

- Information Systems and Applications, incl. Internet/Web, and HCI , Vol.5611, No.912, pp.226-235 (2009).
- [68] F. Pavani, U. Castiello : Binding personal and extrapersonal space through body shadows; *Nature Neuroscience* Vol.7, pp14 - 16 (2003).
- [69] F. Pavani, G. Galfano: Self-attributed body-shadows modulate tactile attention; *Cognition*, 104, pp.73-88 (2007).
- [70] Spence, C., Pavani, F., & Driver, J.: Cross-modal links between vision and touch in covert endogenous spatial attention; *Journal of Experimental Psychology, Human Perception & Performance*, Vol.26, pp1298-1319 (2000).
- [71] A. Maravita., C. Spence., S. Kennett., J. Driver.: Tool-use changes multimodal spatial interactions between vision and touch in normal humans; *Cognition* , Vol.83, pp.B25-B34 (2002).
- [72] みんなのダンスフィールド ; <http://homepage3.nifty.com/inclusive-dance/>
- [73] 西洋子 : インクルーシブダンスの意義 (25 章 障害者とダンス) ; アダプテッド・スポーツの科学—障害者・高齢者のスポーツ実践のための理論, 市村出版, pp.206-208 (2004).
- [74] 西洋子 : 身体によるインタラクティブなコミュニケーション ; 神戸大学総合人間科学研究科博士後期課程博士論文 (2003).
- [75] 西 : 出会いと共振 ; 死生学年報, 東洋英和女学院大学死生学研究所編, LITHON, pp.87-107 (2012).
- [76] 竹内敏晴 : 「出会う」ということ ; 藤原書店 (2009).
- [77] T. Naemura, T. Nitta, A. Mimura, H. Harashima: Virtual Shadows in Mixed Reality Environment Using Flashlight-like Devices; *Trans. Virtual Reality Society of Japan*, Vol.7, No.2, pp. 227-237 (2002).
- [78] Nicholas P. Holmes: Does tool use extend peripersonal space? A review and re-analysis; *Experimental Brain Research*, Volume 218, Issue 2, pp 273-282, (2012)
- [79] Fish, R. Kraut, R. and Chalfonte, B.: The videowindow system in informal communication, *Proc. of CSCW'90*, Heath, C. C., Luff. P. K.: Disembodied Conduct: Communication Thorough Video in a Multi-Media Office Environment; *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing*, pp99-103, (1991).
- [80] Okada, K., Maeda, F. Ichikawa, Y., Matsushita, Y.: Mulyiparty Videoconferencing at Virtual Social Distance: MAJIC design; *Proceedings of CSCW'94*, pp.385-393 (1994).
- [81] Hirata, K., Harada, Y., Takada, T., Aoyagi, S., Shirai, Y., Yamashita, N., and Yamato, J.: The t-Room-Toward the Future Phone, *NTT Technical Review*, Vol.4, No.12, pp.26-33(2006).

- [82] Yamashita, J.,Kuzuoka,H.,Yamazaki,K.,Yamazaki,A.: Agora: Supporting Multi-participant Telecollaboration; Proc. of HCI International 1999, Vol.2, pp.543-547 (1999).
- [83] 山下, 葛岡, 平田, 青柳, 白井, 梶, 原田: 身体の動きをともなう遠隔協調作業における上半身映像の効果; 情報処理学会論文誌, 54, 4, pp.1152-1162
- [84] S. Minatani, I. Kitahara, Y. Kameda, Y. Ohta: Face-to-Face Tabletop Remote Collaboration in Mixed Reality; ISMAR '07 Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp1-4 (2007).
- [85] Ishii, H., Kobayashi, M. and Grudin, J.: Integration of Interpersonal Space and Shared Workspace: ClearBoard Design and Experiments, ACM Transactions on Information Systems, Vol.11, pp.349-375 (1993)
- [86] Morikawa,O., Maesako,T.: HyperMirror Toward Pleasant-to-use Video Mediated Communication System, Proc. of CSCW'98, pp.149-158 (1998).Paulos, E., Canny, J.: Social Tele-Embodiment: Understanding presence; Autonomous Robots vol.11, pp.87-95 (2001).
- [87] 株式会社ソリッドレイ研究所,
www.solidray.co.jp/product/eizou/screen.html
- [88] 菅野夏木, 加藤博一, 川本佳代, 橋啓八郎: 拡張現実感における影の効果; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.333-341 (2004).
- [89] エドワード・ホール: かくれた次元; みすず書房 (2000).
- [90] 木塚朝博, 木竜徹, 増田正, 佐渡山亜兵, バイオメカニズム学会(編集): 表面筋電図 (バイオメカニズム・ライブラリー); 東京電機大学出版局 (2006).
- [91] Clark RA, Bryant AL, Pua Y, McCrory P, Bennell K, Hunt M.: Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board for assessment of standing balance; Gait Posture, Vol. 31, Issue: 3, pp. 307-310 (2010).
- [92] 芦高直哉, 原正之, 反保紀昭, 黄健, 藪田哲郎: 遠隔力感覚コミュニケーションにおける基礎的なシステム,構成法と感覚面からの基本評価;日本機械学会論文集 (C) Vol.75 No.752, pp.1000-1008 (2009).
- [93] Tachi,S.,Kawabuchi,I.,et al.: TELEsarPHONE: Mutual Telexistence Master Slave Communication System based on Retroreflective Projection Technology; SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.1, No.5, pp.335-344 (2008).
- [94] 徳山陽人, 橋本周司: 携帯端末による力覚コミュニケーション; インタラクシオン 2002, pp.41-42 (2002).
- [95] 高橋, 国安, 佐藤, 福島, 古川, 橋本, 梶本: 「接吻」に着目した触覚コミュニケーションデバイス, 情報処理学会 インタラクシオン 2011, (2011).
- [96] メルティン・グッティル, デイビット・ミルナー: もうひとつの視覚; 新曜社 (2008).

参考文献

- [97] 小田浩一：中心視と周辺視の機能的差異；VISION, Vol.12, No.4, pp.183-186 (1999).

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切なる御指導と御激励を賜りました早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 三輪 敬之教授に心よりの感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、数々の有益な御助言と丁寧な御指導を賜りました、早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 山川 宏教授、菅野 重樹教授、宮下 朋之教授、上杉 繁准教授に深く感謝いたします。

本研究を進める上での、貴重なご指導を賜りました東洋英和女学院大学 西 洋子教授に深謝の意を表します。

本研究に対しての多くの御助言、御激励を賜りました早稲田大学 先進理工学部 応用物理学科 橋本 周司教授、岡山県立大学 渡辺 富夫教授に深謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、多くの有益な議論、検討を共にした、早稲田大学 創造理工学部 社会文化領域 板井 志郎助教、トキコーポレーション株式会社 石引 力氏、独立行政法人日本科学未来館 大崎 章弘氏、三菱電機株式会社 飯田 公司氏に心からの感謝を申し上げます。

本研究の共同研究者、研究協力者として多大な御協力をいただきました、早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科(旧理工学部 機械工学科) 三輪研究室の諸先輩方、諸後輩方に深く感謝いたします。

最後に、著者の研究生活を常に支えてくれている家族、友人らに心から感謝申し上げます。

研究業績

研究業績

渡辺 貴文

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表 発行 年月	連名者
論文	Co-existing Communication: Embodied Interaction System Using an Integrated Expression of Remote Partner's Shadow and Video Image	Proceedings of HCI International 2005, CD-ROM	2005/ 7	Chikara Ishibiki Daisuke Matsumoto Yoshiaki Nakajima Yoshiyuki Miwa
論文	“Interactive Spatial Copy Wall” representing bodily actions of remote person in pseudo three dimensions	Proceedings of the IASTED International Conference on Robotics and Applications (RA2006), pp.26-33	2005/ 10	Shigeru Wesugi Nobuyoshi Suzuki Yoshiyuki Miwa
○論文	Virtual Extensible Tool Interface for Three-Dimensional Interaction with Remote Objects	Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2006), pp.787-792	2006/ 9	Shigeru Wesugi Yoshiyuki Miwa
○論文	異なる空間への指示行為が可能な仮想の影による道具インタフェースの開発	情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp.3919-3930	2007/12	上杉繁 三輪敬之
論文	Public Viewing with Shadows: Design of theater-type space where remote actors and audiences can coexist using the shadow as their own agents	Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2008), pp.677-682	2008/8	Koji Iida Shiroh Itai Yoshiyuki Miwa
○論文	影に着目した仮想道具と身体との一体感創出に関する研究	ヒューマンインタフェース学会論文誌	2008/11	上杉繁 三輪敬之
○論文	Electromyography Focused on Passiveness and Activeness in Embodied Interaction: Toward a Novel Interface for Co-creating Expressive Body Movement	Proceedings of HCI International 2009, LNCS, Vol.5612, pp.554-562	2009/7	Norikazu Matsushima Ryutaro Seto Hiroko Nishi Yoshiyuki Miwa
論文	Shadow Awareness -Bodily Expression Supporting System with Use of Artificial Shadow-	Proceedings of HCI International 2009, LNCS, Vol.5611, pp.226-235	2009/7	Yoshiyuki Miwa Shiroh Itai Koji Iida Hiroko Nishi
○論文	Electromyography Focused on Activeness and Passiveness in Embodied Interaction: Toward a Novel Interface for Co-Creating Expressive Body Movement	Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.5, No.1, pp.35-44	2011/1	Norikazu Matsushima Hiroko Nishi Yoshiyuki Miwa

種別	題名	発表・発行掲載誌名	発表 発行 年月	連名者
○論文	Support for Generation of Sympathetic Embodied Awareness: Measurement of Hand Contact Improvisation under Load Fluctuation Stress	Proceedings of HCI International 2011, LNCS, Vol. 6771, pp.508-518	2011/7	Yoshiyuki Miwa Go Naito Norikazu Matsushima Hiroko Nishi
論文	Shadow Awareness: Enhancing theater space through the mutual projection of images on a connective slit-screen	Leonardo, The journal of the International Society for the Arts, Sciences and Technology (SIGGRAPH 2011 Art paper), Vol.44, No.4, pp. 325-333	2011/8	Yoshiyuki Miwa Shiroh Itai Hiroko Nish
○論文	Co-creative Expression -Duality of Embodied Interaction Focused on Generation of Sympathetic Awareness-	Proceedings of SICE Annual Conference 2011, pp.2565-2570	2011/7	Yoshiyuki Miwa
○論文	Duality of Embodiment and Support for Co-creation in Hand Contact Improvisation	Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.6, No 1, pp.1307-1318	2012/12	Yoshiyuki Miwa
論文	Generation Dynamics of Sympathetic Embodied Awareness in Hand Contact Improvisation	Proceedings of IASDR 2013 - 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research pp.5558-5566	2013/8	Yoshiyuki Miwa Shiroh Itai Hiroko Nish
○講演	可動実体モデルと身体映像の遠隔重畳による実在感創出ディスプレイの開発	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004	2004/10	上杉繁 三輪敬之
○講演	仮想道具による身体像拡張の評価手法に関する研究	第 33 回ヒューマンインタフェース学会研究会	2005/5	片山智文 上杉繁 三輪敬之
講演	仮想道具の実在感創出手法に関する研究—仮想影と可変慣性モーメントを統合した“Phantom Pole”の開発—	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2005	2005/9	佐藤大樹 片山智文 上杉繁 三輪敬之
講演	身体行為を立体的に表現する“Interactive Spatial Copy Wall”の開発	第 1 回横幹連合コンファレンス	2005/11	上杉繁 鈴木伸嘉 三輪敬之
○講演	仮想道具による身体像の拡張表現とその評価に関する研究	計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会(SI2005)	2005/12	上杉繁 三輪敬之
○講演	影に着目した仮想道具表現による身体性拡張に関する研究	第 38 回ヒューマンインタフェース学会研究会	2006/5	小川拓樹 三輪敬之
○講演	Shadow Communication System—身体センサとしての影の暗在的働きに関する二三の実験—	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006	2006/9	三輪敬之 石引力 吉山一史
講演	様々な個物の影表現を可能とした共存コミュニケーションシステムの開発	計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会(SI2006)	2006/12	桜井大地 檜出陽介 石引力 三輪敬之

研究業績

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表 発行年 月	連名者
講演	空間共有に仮想影を適用した対面型映像ディスプレイの開発	第1回横幹連合コンファレンス	2007/5	浅野裕紀 上杉繁 三輪敬之
○講演	非線形性を考慮した伸縮型仮想道具との身体的インタラクションに関する研究	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007	2007/9	佐藤大樹 上杉繁 三輪敬之
講演	対面コミュニケーションの脳活動	Neuro2007	2007.9	関口達彦 飯田公司 川畑秀明 板井志郎 三輪敬之
講演	Difference in neural distributions between face-to-face and remote situations in a communicative game	Society for Neuroscience 37th Annual Meeting	2007.11	Tatsuhiko Sekiguchi Koji Ida Hideaki Kawabata Shiroh Itai Yoshiyuki Miwa
講演	影を活用した劇場型共存在空間の設計手法に関する研究	電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎研究会	2008/3	飯田公司 板井志郎 三輪敬之
○講演	仮想道具使用時の筋電図変化に関する研究	電子情報通信学会電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎研究会	2008/3	上杉繁 三輪敬之
講演	インターネット活用した機械システムを学ぶ教育実験の試み	日本機械学会 2008 年度年次大会	2008/8	上杉繁 三輪敬之
○講演	身体的インタラクションにおける受動-能動性に着目した筋電図計測	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008	2008/9	松島典司 瀬戸隆太郎 西洋子 三輪 敬之
講演	コミュニケーションと共創表現～影の存在的非分離性に着目したイメージ創出支援手法の検討～	計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会(SI2008)	2008/12	三輪敬之 板井志郎 西洋子
講演	コミュニケーションと共創表現—影メディアによる身体表現ジェネレータの開発—	第 54 回ヒューマンインタフェース学会研究会	2009/5	渡辺大喜 沖山良太 西洋子 三輪敬之
講演	影の時空的操作による身体表現創出に関する研究	第 54 回ヒューマンインタフェース学会研究会	2009/5	飯田公司 大野洋人 板井志郎 三輪敬之
講演	身体表現における“共振”の発現プロセス	日本体育学会第 60 回記念大会	2009/8	西洋子 松島典司 三輪 敬之
講演	コミュニケーションと共創表現—影メディアの二重性による身体表現の共創出支援—	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2009	2009/9	沖山良太 渡辺大喜 西洋子 三輪敬之

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表 発行年 月	連名者
講演	身体スケール感覚に着目したミニチュア空間体験システムの開発	日本機械学会 2009 年度年次大会	2009/9	加藤雄大 藤原孝亮 三輪敬之
○講演	伸縮型 Virtual Tool との身体的インタラクション計測システムの開発	日本機械学会 2009 年度年次大会	2009/9	瀬戸隆太郎 松島典司 三輪敬之
講演	共振感覚に着目した手合わせ表現過程の計測	第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会	2009/9	松島典司 西洋子 三輪敬之
講演	他動運動時における上腕運動錯覚の速度特性に関する研究	第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会	2009/9	仲村晃 友田達也 上杉繁 三輪敬之
講演	共創的な身体表現に生成する共振感覚	第 61 回舞踊学会大会	2009/12	西洋子 三輪敬之
講演	共振インタフェースの設計を目指して	ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 2010 年 3 月研究会	2010/3	三輪敬之
○講演	タメに着目した Virtual Tool の設計手法に関する研究, 第 61 回ヒューマンインタフェース学会研究会	第 61 回ヒューマンインタフェース学会研究会	2010/5	瀬戸隆太郎 三輪敬之
講演	共振感覚ジェネレーター ー手合わせ表現に着目した力覚呈示装置の開発ー	日本機械学会 2010 年度年次大会	2010/9	内藤剛 三輪敬之
講演	Shadow Media Robot による身体表現の遠隔共創支援システムの開発	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2010	2010/9	宮本旅人 青山一成 三輪敬之
講演	共振感覚ジェネレーター力覚呈示装置を用いた手合わせ表現過程の計測ー	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2010	2010/9	内藤剛 大平翼 三輪敬之 西洋子
講演	スリットスクリーンの提案	第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2010)	2010/12	三輪敬之 板井志郎 渡邊大喜
講演	手合わせ表現における共創的インタラクションの計測	第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2010)	2010/12	大平翼 松島典司 内藤剛 三輪敬之 西洋子
講演	共振感覚に着目したウェアラブル型身体表現計測システムの開発	日本機械学会 2011 年度年次大会講演会	2011/9	辻吉竜 三輪敬之
講演	タメの表現支援：動作感覚のズレに着目した力呈示装置の開発	日本機械学会 2011 年度年次大会講演会	2011/9	岡田阿久里 仲村晃 板井志郎 三輪敬之

研究業績

種別	題名	発表・発行掲載誌名	発表 発行 年月	連名者
○講演	身体表現の共創に関する研究 その 2：身体の二重性に着目した共振創 出プロセスの計測	日本体育学会第 63 回大会	2012/8	三輪敬之 西洋子
講演	身体表現の共創に関する研究 その 3：表現の持続的創出とカオス性について	日本体育学会第 63 回大会	2012/8	三輪敬之 西洋子
講演	共創表現の遠隔支援－身体表現の共創 における潜在的情報の計測と伝達－	ヒューマンインタフェース シンポジウム 2012	2012/9	原知也 三輪敬之 宮本旅人 西洋子
講演	共創表現における場のダイナミクス - 手合わせ表現における共振創出と場の 働きについて-	日本機械学会 第 22 回設計 工学・システム部門講演会	2012/9	三輪敬之 板井志郎 西洋子
講演	共創表現の遠隔支援 -共振感覚に着目 した手合わせ表現デバイスの開発-	日本機械学会 第 22 回設計 工学・システム部門講演会	2012/9	木戸康平 三輪敬之 西洋子 片桐雅二
講演	身体表現の共創 -手合わせ表現におけ る身体動作創出過程の検討-	第 13 回計測自動制御学会シ ステムインテグレーション 部門講演会 (SI2012)	2012/12	西洋子 柳澤裕樹 辻吉竜 三輪敬之
講演	共創表現の遠隔支援-指合わせ表現に 着目した創出的インタフェースの開発	ヒューマンインタフェース シンポジウム 2013	2013/9	吉田直弘 辻吉竜 三輪敬之 西洋子
○その他 の講演	仮想道具による身体像拡張の評価手法に 関する研究	痛み学講座 夏期合同セミナー 2005	2005/9	片山智文 上杉繁 三輪敬之
○その他 の講演	Virtual Extensible Tool Interface on Projecting Shadow Image over Tangible Stick	The 3rd COE-CIR Joint Workshop	2006/9	Shigeru Wesugi Yoshiyuki Miwa
○その他 の講演	Virtual Tool Focused on Shadow for Expansion of Embodiment	The 4th COE-CIR Joint Workshop	2007/9	Yoshiyuki Miwa
○その他 の講演	仮想道具による身体性拡張手法に関する研 究	21 世紀 COE プログラム「超高齢 社会における人とロボットの共 生」第 6 回若手研究者による Workshop	2007/12	
○その他 の講演	共振感覚に着目した手合わせ表現過程のイ ンタラクション計測,	身体性認知科学と実世界応用に 関する若手研究専門委員会 (ECSRA)第 5 回研究会	2009/8	西洋子 松島典司 三輪敬之
○その他 の講演	Co-creation of Bodily Expression Focused on Sympathetic Body Awareness	12th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science	2009/10	Norikazu Matsushima Hiroko Nishi Yoshiyuki Miwa
○その他 の講演	Duality of Embodiment: Measurement of Co-creation Process on Hand Contact Improvisation	OCTOPUS-EVRYON-WSK -TNg 2012 Summer School	2012/6	Yoshiyuki Miwa
特許	画像投影システム、画像処理装置及び画像 処理プログラム	特許出願 2005－146301 特許公開 2006－323127		三輪敬之、他
特許	舞台演出システム	特許出願 2010－163453 特許公開 2012－24172		三輪敬之、他

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表 発行年 月	連名者
展示	Shadow awareness 影と一緒に遊んでみよう	予感研究所 2, 日本科学未来館	2008/7	三輪敬之, 他
展示	自己と向き合う技術-拡張する影との共創表現-Shadow awareness	メディア芸術祭協賛展・先端技術ショーケース'09, 国立新美術館	2009/2	三輪敬之, 他
展示	Shadow Awareness II 「Dual 2010」	ジェノバサイエンスフェスティバル招待展示・ブレパフォーマンス, 早稲田大学大隈記念講堂	2010/8	三輪敬之, 他
展示	Shadow Awareness II 「Dual 2010」,	ジェノバサイエンスフェスティバルパフォーマンス, Palazzo della Nuova Borsa, Genova, Italy,	2010/10	三輪敬之, 他
展示	未来の技術をからだで体験! 最先端のメディア研究	丸の内キッズフェスタ, 東京国際フォーラム	2011/8	三輪敬之, 他