

Title	身体像変容に基づく拡張腕の自在化手法
Sub Title	Embodied manipulation of augmented arms based on body image metamorphosis
Author	佐々木, 智也(Sasaki, Tomoya) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kota)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2016
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2016年度メディアデザイン学 第533号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002016-0533

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2016 年度（平成28 年度）

身体像変容に基づく
拡張腕の自在化手法

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

佐々木 智也

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学) 授与の要件として提出した修士論文である。

佐々木 智也

審査委員：

南澤 孝太 准教授	(主査)
チャリス フェルナンド 特任講師	(副査)
岸 博幸 教授	(副査)

修士論文 2016 年度（平成 28 年度）

身体像変容に基づく 拡張腕の自在化手法

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

従来、義手・義足は身体の欠損した部位の機能や形態を補い、身体能力の補綴を目的としていた。しかし近年、人間の身体をテクノロジーにより強化し、一般的な身体機能よりも高い機能へと拡張する人間拡張が注目されている。人間拡張によって、失ったものを補うのではなく、本来存在しないものを新たに獲得することが可能になると考えられる。

本研究では、生得的に存在しない新たな身体部位を拡張身体部位と呼び、新たな腕である拡張腕を身体に接続し、その獲得を目指す。身体性を有した拡張腕の獲得に向けて、自分の一部であるという感覚（身体所有感）と自分が動かしているという感覚（自己主体感）を生起させて身体像を変容させる。本論文では、拡張腕を有した身体像への拡張手法を提案し、VR を用いたプロトタイプによる詳細設計を行った後、脚の動作に伴う身体図式を再構成して拡張腕を操る Metamorphosis 4 Arms を開発する。

キーワード：

バーチャルリアリティ，身体性メディア，人間拡張，身体像，拡張身体部位

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

佐々木 智也

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2016

Embodied Manipulation of Augmented Arms
based on Body Image Metamorphosis

Category: Science / Engineering

Summary

Originally, the function of prosthesis such as artificial limbs/arms/legs has been mainly to support physical ability. Recently, however, the function as human augmentation, which is to enhance physical ability technologically to more than the natural human performance, is attracting remarkable attention. By use of this, it is considered that we might be not only able to replace missing body parts, but also to obtain new ones and/or abilities.

In this study, we define augmented limbs and augmented arms as the parts not innate to human body, and try to add them to users' body perception. In order to make augmented limbs recognized as actual parts of human body, we transform body image by provoking sense of body ownership and sense of agency. In this thesis, we propose a method to obtain augmented body image with augmented arms, and design details by some prototypes using VR. In the end, we develop Metamorphosis 4 Arms, which reconstructs body schema by the motion of user's legs and enables to manipulate augmented arms.

Keywords:

Virtual Reality, Embodied Media, Human Augmentation, Body Image, Augmented Limbs

Keio University Graduate School of Media Design

Tomoya Sasaki

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 自在に操れる身体部位	1
1.2. 研究目的	4
1.3. 本論文の構成	4
第 2 章 関連研究	5
2.1. 身体拡張の生理学・心理学的アプローチ	5
2.1.1 Rubber Hand Illusion	5
2.1.2 身体像の可塑性	6
2.1.3 道具の身体化	8
2.1.4 身体所有感と自己主体感	9
2.2. 身体拡張の工学的アプローチ	11
2.2.1 指の追加	11
2.2.2 腕の追加	12
2.2.3 テレイグジスタンス	12
2.2.4 高機能義手	14
2.3. 本章のまとめ	14
第 3 章 拡張腕を有した身体像への変容	16
3.1. 拡張腕における身体部位のマッピング	16
3.2. 提案手法	17
3.2.1 脚から拡張腕へ	18
3.2.2 拡張腕の身体所有感	19

3.2.3	拡張腕の自己主体感	19
3.3.	実腕と拡張腕との協調作業	20
3.3.1	拡張腕の動作範囲	20
3.3.2	物体の把握動作	21
3.4.	本章のまとめ	21
第4章	実装	23
4.1.	腕動作と連動した多腕 VR アバタ	23
4.1.1	実験目的	23
4.1.2	MultiArm Avatar	23
4.1.3	腕本数とアバタ初期状態の操作	26
4.1.4	2 本腕のオフセット角度の操作	26
4.1.5	結果と考察	27
4.2.	多感覚統合に伴う 2 本腕への身体像の変化	30
4.2.1	実験目的	30
4.2.2	SplitArms	30
4.2.3	分裂効果による身体像の変化	32
4.2.4	結果と考察	34
4.3.	身体動作の分離と再構成による独立動作	36
4.3.1	実験目的	36
4.3.2	SwingArms	36
4.3.3	拡張腕に対する自己主体感の発生	38
4.3.4	結果と考察	38
4.4.	筋電位を用いたロボットアームの制御	40
4.4.1	システム構成	41
4.4.2	動作検証	41
4.5.	Metamorphosis 4 Arms	43
4.5.1	足指データソックス	43
4.5.2	脚から腕への動作変換システム	47
4.5.3	M4A シミュレーター	51

4.5.4	拡張腕を搭載した M4A コックピッド	51
4.5.5	システムの統合	53
4.5.6	M4A の動作検証	54
4.5.7	考察	62
4.6.	本章のまとめ	63
第 5 章	結論	65
	謝辞	68
	参考文献	69

目 次

1.1	ドクターオクトパス	2
1.2	DUMMY / DUM-E	2
1.3	第3の腕	3
2.1	体外離脱	7
2.2	身体交換	7
2.3	Virtual Arm Illusion	7
2.4	Virtual Body Illusion	7
2.5	道具の使用による身体領域の拡張	8
2.6	The Sixth-Finger	11
2.7	SR Fingers	11
2.8	Supernumerary Robotic Limbs	12
2.9	TELESAR V	13
3.1	身体部位のマッピング	17
3.2	提案手法による拡張腕のスケッチ	17
3.3	身体部位の位置関係	18
3.4	脚から拡張腕への割り当て	19
3.5	腕の動作分類	20
3.6	把握動作の分類	21
4.1	MultiArm Avatar のシステム構成	24
4.2	MultiArm Avatar 使用時のユーザーと VR アバタ	25
4.3	腕2本提示時のアバタ	26

4.4	腕 8 本提示時のアバタ	26
4.5	2 本腕の提示時の実験参加者視点	27
4.6	実験 4.1.4 の結果	28
4.7	SplitArms のシステム構成	30
4.8	SplitArms 使用時のユーザー	31
4.9	SplitArms 使用時のユーザー視点	31
4.10	SplitArms の分裂効果	32
4.11	実験 4.2.3 の手順	33
4.12	実験 4.2.3 の結果	34
4.13	SwingArms のハードウェア外観	37
4.14	SwingArms 使用時のユーザー	37
4.15	SwingArms の動作	37
4.16	SwingArms のユーザーテスト	39
4.17	ウェアラブルロボットアーム	40
4.18	3 自由度のロボットアーム	41
4.19	ロボットアームを装着状態	41
4.20	筋電位計測の実行画面	42
4.21	2 自由度のロボットアーム動作	42
4.22	足指データソックス	44
4.23	足動作の検出	45
4.24	データソックス右足の測定結果	46
4.25	データソックス左足の測定結果	46
4.26	つま先用マーカー	47
4.27	マーカーを装着したユーザー脚	48
4.28	M4A 使用時の脚の配置	48
4.29	マーカーから取得するパラメーター	49
4.30	M4A シミュレーター画面	51
4.31	M4A コックピット	52
4.32	Metamorphosis 4 Arms のシステム構成	53

4.33	M4A を起動し，拡張腕の動作を開始	55
4.34	ユーザーの実腕と拡張腕によるセルフタッチ	55
4.35	ユーザーの足指による拡張腕の手先開閉	56
4.36	実腕から拡張腕へのカップ受け渡しと拡張腕での把持	57
4.37	カップ把持状態で実腕によるカップへのペン挿入	58
4.38	左右両側拡張腕でのカップ把持とペン挿入後	58
4.39	拡張腕の手の甲に対するセルフタッチ	59
4.40	拡張腕の開閉によるユーザー拳へのセルフタッチ	60
4.41	カップ把持による飲む動作の試み	60
4.42	カップ把持の失敗例	61
4.43	足指の状態	62

表 目 次

4.1	MultiArm Avatar のパラメータと状態	25
4.2	マーカーと拡張腕の位置姿勢の変換対応	50

第1章

序

論

「実は先生，拙者は大発明をしたのですぞ．その発明の要旨というのは，いいですか，人間の……人間のデス，人間の腕をもう一本殖やすことである．どうです，すごいでしょ」

海野十三『特許多腕人間方式』[1]

1.1. 自在に操れる身体部位

「猫の手も借りたい」とは，忙しい時は猫のように役に立たない手でも借りたくなるというたとえである．しかし，そういう状況では，できるなら人間の手を借りたいし，それが自分の手であればなお嬉しいのではないか．忙しい場合に限らず，手が足りない，もう少し手が欲しいという状況は幾つか思い当たる．電子工作における半田付けや日曜大工などの作業を行う際である．

SF 映画作品などでは，組み立てや改造などの特殊な作業を行うシーンがあり，人間の作業を補助するためにロボットアームを使用している描写が幾つか見られる．映画スパイダーマン2では，人間の手では操作できない特殊な実験を行うために強靱なロボットアームを装着して制御している（図1.1）．映画アイアンマンでは，スーツ製作作業時の作業者の視界を虫眼鏡を使って補助している（図1.2）．

これらの描写では，作業補助を行うロボットアームは自律的に動作しており，「ロボットの手を借りている」状況である．つまり，作業者にとって，協調作業を行う手は他者である．

もし，自分自身の手がもうひとつ増えたらどうなるのか．アーティストのステラークは，自分の身体に第3の腕を装着し，身体中に取り付けた電極により，筋



図 1.1: ドクターオクトパス [2]



図 1.2: DUMMY / DUM-E [3]

電位を用いてそれを動かした（図 1.3）。アートパフォーマンスではなく，日常生活において手や腕が増えることで，今まで一人では難しかった作業が可能になったり，効率的に行えると考えられる．海野十三『特許多腕人間方式』[1]では，腕を増やすことによる社会への影響が考察される描写がある．



図 1.3: 第3の腕 [4]

では，逆に腕が2本よりも少ない場合は何が起きるだろうか．日常生活の多くの場面で不便を感じる可能性が高い．これまで，そのような身体の欠損した部位や形態を補い，身体能力の補綴を目的として義手・義足の開発が行われてきた．しかし，テクノロジーの進歩により，人工の身体部位を能力を補うためではなく，人間の能力を拡張するために使用できるのではないかと考えられるようになった．このような技術を人間拡張と呼び，稲見 [5] は，このような技術において「自在化」という視点が重要であると指摘している．

自在に操れる身体部位を，身体能力の補綴を目的にではなく，拡張のために操ることができれば，私たちの生活はより豊かになると考えられる．そこで，本研究では，自由自在に操ることができる身体部位の獲得による身体拡張を目指す．

1.2. 研究目的

本研究では，人間が先天的に有していない身体部位を拡張身体部位と呼び，その一つとして，自由自在に操れる拡張身体部位としての一对の腕（拡張腕）の獲得を目指す．拡張腕と人間の身体との間で身体接続に必要な要素を明らかにし，拡張腕の身体化を行う．

1.3. 本論文の構成

本論文は全5章で構成される．本章では，研究の背景と目的を述べた．第2章では，本研究における関連研究として身体拡張の生理学・心理学的アプローチおよび工学的アプローチについて論じる．第3章では，拡張腕を有した身体像への拡張として，提案手法および設計アプローチを述べる．第4章では，提案手法をもとにプロトタイプおよび Metamorphosis 4 Arms の実装について述べ，第5章では，本論文における結論と今後の展望について述べる．

第2章

関 連 研 究

2.1. 身体拡張の生理学・心理学的アプローチ

拡張腕の獲得において、生得的に有していない身体部位において身体接続が可能か否かを生理学・心理学的根拠を基に論じる。

2.1.1 Rubber Hand Illusion

人間の身体領域は可変的であると考えられ、それを示す研究がいくつもある。ここではまず、手に関する身体領域の可塑性について述べる。

Botvinick ら [6] は、実験参加者が自身の手（リアルハンド）とゴムの手（ラバーハンド）を机の上に並べ、リアルハンドが見えないように仕切りを立て、実験参加者がラバーハンドを観察している状態で、筆などを用いてリアルハンドとラバーハンドを同時に撫でることで、まるでラバーハンドが自身の手であるように感じることを発見した。この現象は、一般的にラバーハンドイリュージョン（Rubber Hand Illusion: RHI）と呼ばれ、視覚・触覚・体性感覚の多感覚統合によって生じると考えられている。RHI では、人間の身体は肉体によって定められているのではなく、条件によって空間的に変化し、自身の肉体とは離れた場所においても身体が成立する可能性を示唆している。

RHI が成立する条件は様々研究されている [7]。Ehrsson ら [8]、Shimada ら [9] の研究では、RHI において感覚情報の時間的一致の重要性が高いことを明らかにした。一方で空間的一致性に関しては柔軟であると考えられており、Armel ら [10] は、RHI が生じた状態でラバーハンドをハンマーで叩くと実験参加者は自分の手が叩

かれたような反応を示し、これを発汗による皮膚の電気抵抗値（Skin Conductance Response: SCR）として測定できることを確認した上で、2メートル程の長さのラバーハンドやラバーハンドの代わりに机のみを用いた条件においても同様の反応を示すことを発見した。Ehrsson ら [11] は2本のラバーハンドを用いた条件、Guterstam ら [12] は参加者のリアルハンドを隠さずに行った条件でも RHI を確認した。このように、自身の手が複数見えているという通常の肉体では成立しづらい形態に対しても身体領域が変化することから、生得的に本来有していない手を身体として受け入れることができるといえる。

2.1.2 身体像の可塑性

人間の身体領域を「自分自身の身体について意識的にもつ表象」と定義して、身体像と呼ぶ [13]。2.1.1 節では、手における身体像の可塑性を RHI に関連する一連の研究によって明らかにした。この身体像の空間的拡張性は手に限らず、全身においても作用することを示す。

Ehrsson ら [14] は、椅子に座った実験参加者の後姿をカメラで撮影し、実験参加者に装着した頭部搭載型ディスプレイ（HMD）に映像をリアルタイムで投影し、実験参加者の胸元とカメラの下空間を同時にペンで叩いた（図 2.1）。すると、まるで体外離脱を体験しているようだと言った実験参加者がいたことを確認した。Petkova ら [15] は、図 2.2 に示すように他者の視点をカメラで撮影して HMD で実験参加者に提示することで、自身の身体が入れ替わったような身体交換現象が起こることを発見した。

実環境のみならず、VR 空間内の身体を自分の身体だと感じられることも確認されている。ユーザーの身体とは直接的な連結がないにも関わらず、Slater らの研究では、VR 空間内の腕 [16]（図 2.3）や人型アバタ [17]（図 2.4）を用いた条件下でそれらを自分の身体のように感じられたという報告がある。このように RHI に見られた身体像の可塑性は手に限らず、全身に対しても同様に起こりうるといえる。また、空間的拡張は実環境に限定されず、バーチャルな身体などに対しても起こりうると思われる。



図 2.1: 体外離脱 [14]



図 2.2: 身体交換 [15]



図 2.3: Virtual Arm Illusion [16]



図 2.4: Virtual Body Illusion [17]

2.1.3 道具の身体化

Maravita と Iriki [18] は、ニホンザルに道具を使わせ、脳の頭頂葉にある bimodal ニューロンの活動を調べた。一次皮質などのニューロンは、通常は視覚・触覚・聴覚などの 1 種類の感覚種に由来する情報に対して活動を行う。bimodal ニューロンは、複数の感覚種の統合が行われる中で、視覚と体性感覚の 2 つの感覚種に反応するニューロンである [19]。実験では、サルの手では届かない距離にあるエサを、熊手状の道具を使用してとることを学習させた。レーザーポインタの光による視覚刺激を与えると、学習前はサルの手周辺のみで活動が確認された bimodal ニューロンが、学習後は熊手周辺においてレーザーポインタの光刺激がある場合にも活動が確認された (図 2.5)。これは、道具の学習によって身体感覚が熊手にまで延長されたことを示している。人間にもこのような複数の感覚種に反応する脳の機能は確認されており、道具の使用が身体領域を拡張するといえる。

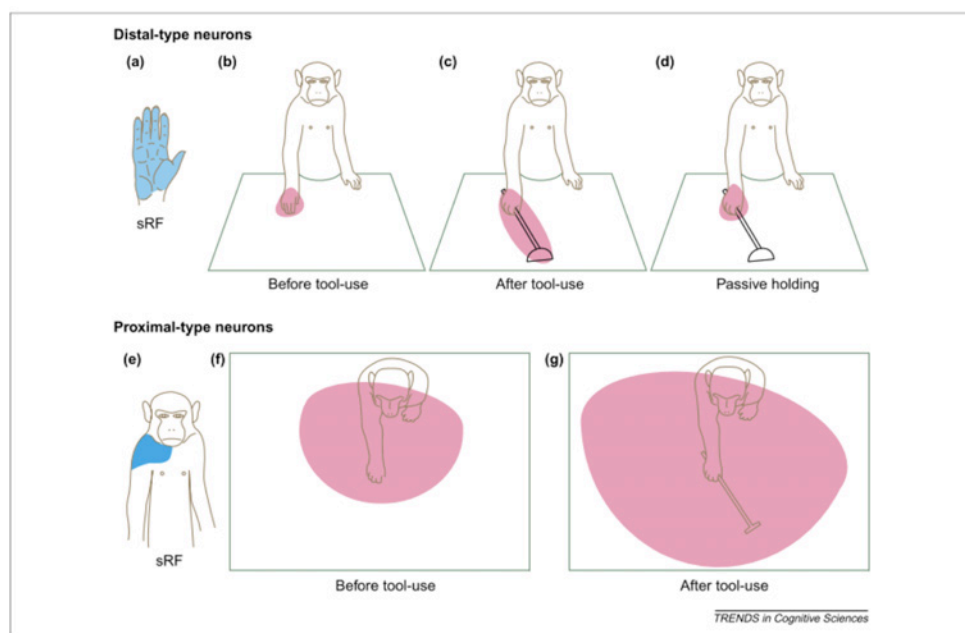


図 2.5: 道具の使用による身体領域の拡張 [18]

2.1.4 身体所有感と自己主体感

2.1.2 節において身体像の可塑性について述べ、2.1.3 節にて、ニホンザルの道具の学習による実験から、脳内の多感覚統合による身体像の拡張可能性を確認した。ここで、人間の高次な表象である身体像と、低次な実在情報としての視覚・触覚・聴覚などの感覚種の間をつなぐ概念として、身体所有感 (Body Ownership) と自己主体感 (Sense of Agency) を導入し、多感覚統合による身体像の形成要素を整理する。

身体所有感とは、それを自分の身体の一部として感じる感覚である。主に視覚・触覚の受動的提示によって生じ、2.1.1 節で述べた RHI や 2.1.2 節の体外離脱はこの感覚によって説明できる。これらの実験条件では身体動作を制限しており、身体所有感の発生そのものが身体像の変化に強く影響を与えていることを確認している。身体所有感には空間的な可変性がある一方で、感覚の成立には対象形状が影響すると考えられている。Tsakiris [20] らは、90 度に回転した手や左右逆の手、木の枝に対して身体所有感が生じないことを明らかにしている。

自己主体感とは、それを自分が動かしたとを感じる感覚であり、主に能動的動作によって生じる。自己主体感の発生にはその行為が内発的か外発的かの行為主の判別が行われるが、これは必ずしも現実即して判断されるものではなく、行為主の錯覚を起こすことがある。Nielsen [21] は、実験参加者がペンで線を描く単純なタスクにおいて、鏡を用いて実験者の手の動きを見せたところ、他人の手であるにもかかわらず自分の手と判断してしまうことを発見した。Franc ら [22] は、実験参加者のジョイスティック操作に対してモニターでフィードバックの角度や時間をずらして提示されると、実際には実験参加者の行為が反映されているにもかかわらず、操作のずれが大きくなると自分自身の行為によるものとは感じなくなったことを発見した。前者が「自分の行為でないにもかかわらず自分が行為主だと感じる」、後者が「自分の行為であるにもかかわらず、自分が行為主だとは感じられない」という行為主の錯覚の例である。

自己主体感においても時間的一致が重要である。Blakemore ら [23] は、ジョイスティック操作で動くロボットアームを用いて実験参加者を刷毛でくすぐる実験を行った。実験参加者らは自分自身でくすぐっても笑わないが、他人にくすぐら

れると笑う人を集めた。実験参加者自身がジョイスティックでロボットアームを操作し、ジョイスティックの入力とロボットの動作との間にディレイを入れると、200 [msec] を超えたところで実験参加者はくすぐったく感じはじめた。ディレイがない場合はくすぐったく感じないことから、この時間差によって自己主体感が失われたといえる。マウスカーソルに対して発生する自己主体感を利用したアプリケーションとして、Watanabe ら [24] は、CursorCamouflage を提案している。画面上に無数のカーソルが表示されている状態で、そのうちの一つがユーザーの身体動作に連動しており、それ以外はランダムに動く。この状態でユーザー以外の他者が画面を見てもどのカーソルをユーザーが動かしているのか認識できないが、ユーザーは自分のカーソルがどれなのか一瞬で判断することができる。しかし、マウスカーソルの動作を遅延させることでユーザーはどのカーソルを操作しているのかわからなくなる。このように、ある行為とその結果の認識を行うまでの時間差が自己主体感において重要である。

複数の感覚種の時間的一致に伴い生起する身体所有感と行為の因果認識によって生じる自己主体感によって、身体像は形成されるといえる。身体所有感の空間的な可変性や自己主体感の行為主の錯覚はある条件下で意図的に引き起こすことが可能であり、これを利用することで、拡張腕を有した身体像の形成が可能になる。

2.2. 身体拡張の工学的アプローチ

新たな身体部位の獲得として、松井ら [25] は、拡張身体部位の身体化には、それらを内包した身体像の境界面変形が必要であるとし、実環境において装具を取り付け、静止状態における身体領域の初期状態問題を取り扱っている。Abdi ら [26] は、VR 環境における第3の手の制御手法の提案を行っており、様々な工学的アプローチが試みられている。本節では、実環境における身体部位の追加によるアプローチと身体部位の操作手法に関して論じる。

2.2.1 指の追加

身体部位を新しく追加する研究として、指の本数を増やす研究がおこなわれている。Prattichizzo ら [27] は、複数のサーボモータを連結させた6本目の指 Sixth-Finger を提案している。Sixth-Finger ではデータグローブを用いてユーザーの手の動きを検出し、指先の位置関係に応じてロボットフィンガーを制御している。Wu ら [28] [29] [30] は、片手で行う作業の補助を目的として2本の指を追加する Supernumerary Robotic Fingers (SR Fingers) を提案している。ユーザーの握り動作を学習させることで、物を掴む動作をロボットフィンガーが補助する。



図 2.6: The Sixth-Finger [27]

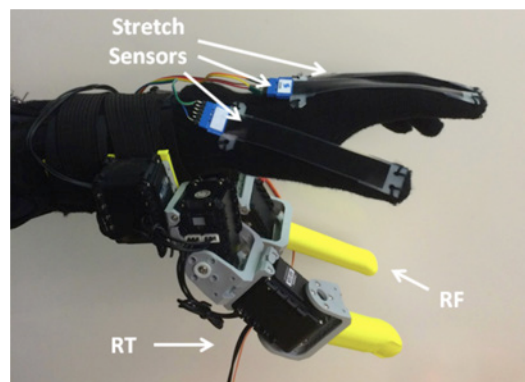


図 2.7: SR Fingers [28]

Leigh ら [31] は、プログラム可能な2本指ロボットを提案している．ユーザーの腕の筋電信号に対して、予め設定したロボットの動作と割り当てることで制御を行っている．腕の動作を指の制御に対応付けているが、予め設定されている動作を行うため、状況に応じてそれぞれの動作を事前に用意しておく必要がある．

2.2.2 腕の追加

新たな身体部位として腕を追加する研究として、Parietti ら [32] [33] は、Supernumerary Robotic Limbs (SRL) を提案している．SRL では、ユーザーの作業支援を目的に2本のロボットアームを腰に装着する．ユーザーの作業時の動作を予め学習することで、ロボットアームがユーザーの動作に対して補助動作を行う．工場での組み立て作業時の部品の保持やロボットアームを地面に接地させてユーザーの姿勢の補助などが想定されている．



図 2.8: Supernumerary Robotic Limbs [32] [33]

2.2.3 テレイグジスタンス

ユーザーの身体動作による身体情報を用いて、身体部位を操作する手法として Tachi [34] は、テレイグジスタンス（Telexistence）を提案している．テレイグジスタンスは、遠隔ロボットを自身の分身として利用することで、時空間の制約を解放しようとする試みである [35]．

Fernando ら [36] は、52 自由度を有したロボットを用いたテレグジスタンスシステム TELESAR V を開発した (図 2.9)。TELESAR V では、ユーザーが HMD およびモーショントラッキング用マーカー、データグローブと触覚ディスプレイを装着する。人型ロボットがユーザーの身体動作に連動して動き、ロボットの視点がカメラを介してユーザーに提示される。同時にユーザーが手を動かすとロボットハンドも同期して動く。ユーザーが自身の手を目の前に移動させると、ロボットハンドも同じ様に移動し、ユーザー視点に対する手と同じ位置関係となる。これにより、目に見えているものがロボットの手であるにもかかわらず、自身の身体として認識することができる。また、ロボットハンドで実際に物に触れると、指先のセンサで触れた情報を検出してユーザーに触覚提示する。このように、ユーザーに対して、視覚と触覚、体性感覚のフィードバックが成立するシステムとなっている。ユーザーとロボットの身体動作と各種感覚のフィードバックが行われることで、ユーザーの身体像がそのままロボットに移動したような現象を生み出すことができる。

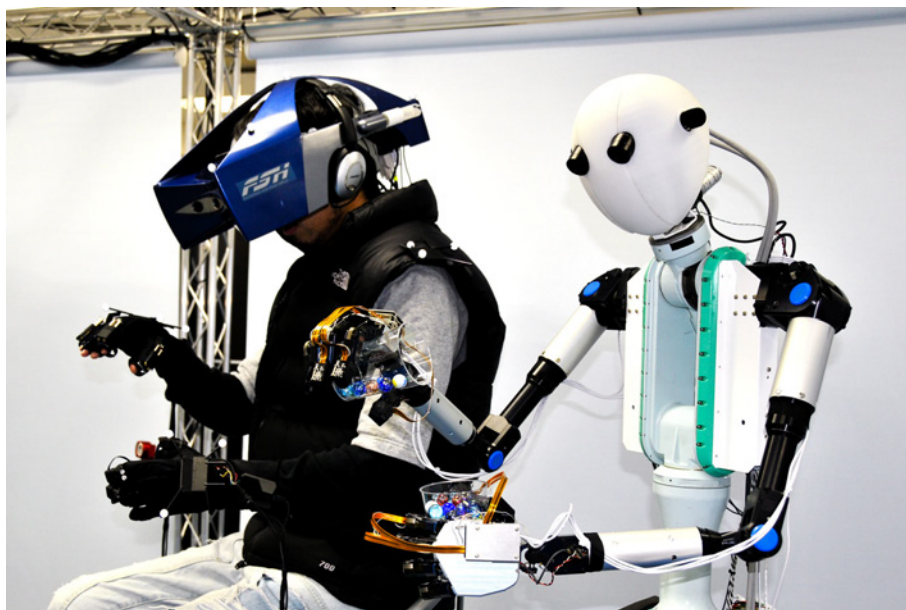


図 2.9: TELESAR V [36]

2.2.4 高機能義手

高機能義手では、身体部位の操作として脳波や筋電位などの生体信号を用いた手法が用いられている。ここで用いられる手法は生体信号の計測法によって、侵襲型と非侵襲型に大別される。前者は、埋め込み電極によって皮下組織で計測が行われ、後者は、表面電極や磁場変化を利用して皮膚表面から計測を行う。侵襲型は運動に関係する情報を直接抽出できる利点があり、Schwartz ら [37] は、サルを対象に大脳皮質電位を利用してロボットアームの制御を行ったが、安全性や倫理的な課題が多い。非侵襲型として、Dario ら [38] の Cyber Hand や、加藤ら [39] などがあり、身体を傷つけることなく安全に計測できるが、運動に有意な情報の抽出が困難であり、パターン認識を用いた運動意図推定が必要となる。加藤ら [40] は、それに加えて個人差や時間的変化に対応した運動推定システムの提案をしている。

2.3. 本章のまとめ

本章では、まず、拡張腕の身体化を目的として、身体拡張が可能と考えられる根拠を RHI を中心に述べ、身体像の可塑性とその変化に必要な条件を明らかにした。身体像の変化は、視覚や触覚などの複数の感覚種の統合により発生し、その空間的一致性よりも時間的一致性が重要である。次に、多感覚統合による身体像の拡張を示す根拠として、ニホンザルの道具の学習について述べた。ニホンザルの脳と同様の機能は人間にも備わっており、人間も道具の使用によって身体化が起こるといえる。そして、多感覚統合と身体像の拡張を結ぶ心理学的概念として、身体所有感 (Body Ownership) と自己主体感 (Sense of Agency) を導入した。身体所有感は、RHI 等に見られる受動的な多感覚統合によって生起する感覚である。自己主体感は、能動的動作とその認識に伴って生じる感覚であり、行為主の判断がその発生に影響するが、この判断は必ずしも現実に行われず。こちらでも行為主が誰かということよりも動作に対する因果の認識における時間的一致性が重要であることを明らかにした。これらの感覚を工学的に操作することで、拡張腕の身体化が行えると考えた。

身体拡張の工学的アプローチとして、まず、新たな身体部位をユーザーに取り付ける試みとして、指の追加と腕の追加に関する研究を挙げた。次に、テレイグジスタンスを取り上げ、ユーザーとロボットの身体動作を一致させることでユーザーの身体像を移動させることができることを確認した。また、ユーザーの生理情報を用いた身体部位の制御手法として筋電義手を取り上げた。

これらを踏まえて3章では、拡張腕の身体化に向けた身体像の拡張手法について述べる。

第3章

拡張腕を有した身体像への変容

3.1. 拡張腕における身体部位のマッピング

拡張腕の身体化に必要な要件を改めて以下に述べる.

- 拡張腕を自分の身体の一部と感じる.
- 拡張腕を自分が動かしたと感じる.

前者は, 拡張腕に身体所有感を, 後者は, 自己主体感を生起させることである. これにより, ユーザーの身体像を拡張腕を含んだ身体像へ変容する.

先行研究における, ある身体部位と別の身体部位間における関連付け (マッピング) について述べる. 図 3.1A は, テレイグジスタンスにおける身体部位のマッピングを示している. テレイグジスタンスでは, ユーザーの手の動作に連動してロボットハンドを動かすため, 同じ部位が一对一で対応した状態となっている. これにより, 例えばユーザーが握る動作を行った場合に, ロボットハンドも握る動作を行うため, 遠隔状態でも物体の把持を行うことができる. 図 3.1B は, 指の追加や腕の追加における身体部位のマッピングを示している. このとき, 追加した部位の動作には, その周辺部位の動作を用いている. Sixth-Finger や SR Fingers では, 指の変化量に応じてロボットフィンガーを操作しおり, SRL では, ユーザーの腕の動きをもとに制御を行っている. これにより, 例えばユーザーが握る動作に対して, ロボットフィンガーで把持の補助を行うことができる.

しかし, 追加した身体部位に新たな機能を与えて, ユーザーの身体部位動作とは異なった動きを行う場合, これらのマッピングは有効ではない. 別の機能を実行するためには, それらの部位がユーザーの身体部位動作とは独立に動くことが

求められる．そこで，ユーザーの腕とは別の身体部位をマッピングすることで，拡張腕を操り，独立した動作を行うことに着目した．

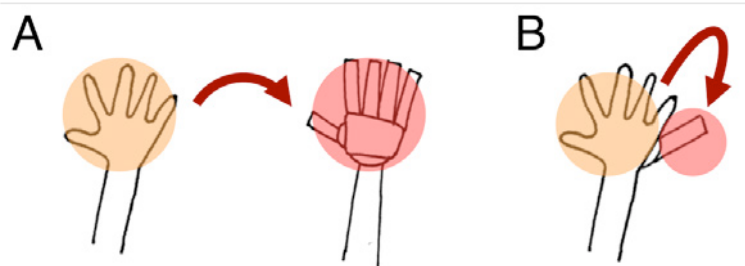


図 3.1: 身体部位のマッピング

3.2. 提案手法

提案手法では，四肢を有するユーザーが，脚の身体動作を分離して拡張腕に割り当て，身体像の変容を行うことで，自分の身体のように自在に操ることのできる一対の拡張腕の獲得である．これにより，拡張腕とユーザー自身の腕との協調作業を行うことができる．図 3.2 に提案手法による拡張腕のスケッチを示す．

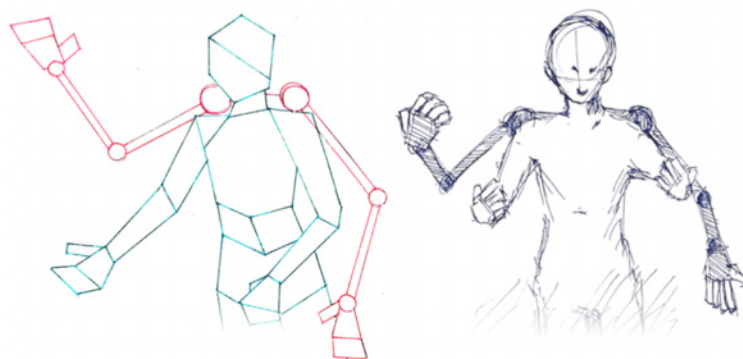


図 3.2: 提案手法による拡張腕のスケッチ

3.2.1 脚から拡張腕へ

拡張腕を有した身体像への変容を行う。そこで、ユーザーの実腕を除く身体部位の中から身体動作を割り当てる部位の選定を行う。図 3.3 に身体部位の位置関係を示す。ユーザーの身体部位を頭部、胴体、腕、手、脚、足に大別した。ユーザーの手および腕は実腕として動作するため、身体部位の割り当てには使用できない。胴体は動作自由度が少ないため除外する。頭部は3自由度の回転に加え、顔面の表情は自由度が高いが、左右にそれぞれに割り当てることができない。そこで、左右一対ある脚および足の動作を拡張腕に割り当てる。

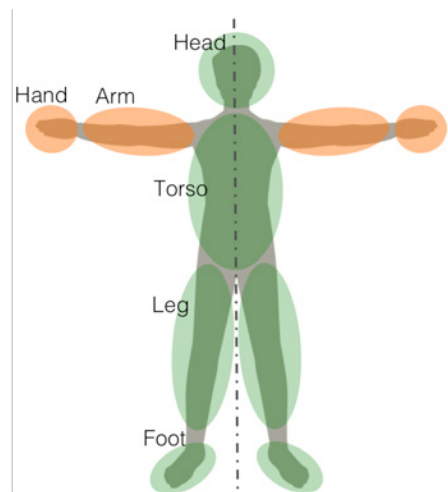


図 3.3: 身体部位の位置関係

図 3.4A に割り当ての概要を示す。左右の脚および足をそれぞれ左右の拡張腕・手に割り当てる。これによって脚の本来の機能が使用できなくなるため、ユーザーは座るなどして脚の自由度を解放する。実際に動作する場合は、図 3.4B に示すようにテーブルなどを併用する。これによって、ユーザー視点では視覚的な脚の情報が遮断されるため、拡張腕の視覚情報を基に身体像の変容が行える。

拡張腕に対して身体所有感および自己主体感を生起させ、身体像を変容するためには、3.2.2 節、3.2.3 節で述べる要件を満たす必要がある。

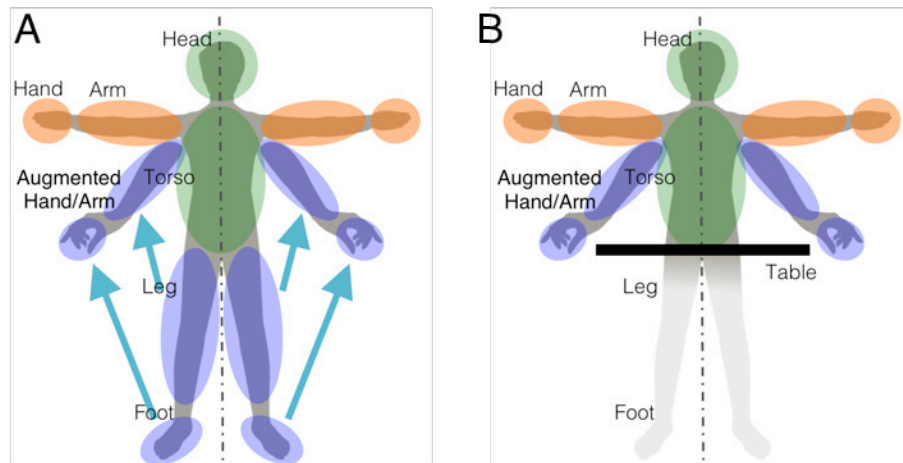


図 3.4: 脚から拡張腕への割り当て

3.2.2 拡張腕の身体所有感

すでに得られている知見から、拡張腕に対する時間同時性を維持した視覚・触覚提示が挙げられる。次に、解剖学的に不自然ではない拡張腕の配置が挙げられる。これは、人間形状からあまりにも乖離している場合、身体所有感が生起しづらいという知見 [20] から導かれる。拡張腕においては、ユーザー視点から見た場合に拡張腕の末端が自分の身体に接している状況が望ましく、実腕では起こりえない関節角の動きは避ける必要がある。また、拡張腕の手は人間と同様5本指を有した形状とする。

3.2.3 拡張腕の自己主体感

自己主体感の生起には、ユーザーの身体動作に対して実時間で応答し、その遅延は 200 [msec] 以下であることが求められる [23]。次に、身体動作方向に対して拡張腕の動作方向が感覚的に一致している必要がある。これは動作が反映されていても角度のずれが大きくなると自己主体感が弱くなるためである。この動作方向に一致に関しては、実験的に明らかにする必要がある。また、拡張腕の手指の動作をユーザーの足指と連動させる。

3.3. 実腕と拡張腕との協調作業

自由自在に操れる拡張腕は、ユーザーの実腕とは別に独立した機能を有することができる。それによりユーザーは実腕と拡張腕による協調作業を行える。実腕と作業するにあたり、拡張腕が満たすべき要件として、その動作範囲と手の作業能力が挙げられる。そこで、3.3.1節で拡張腕の動作範囲について、3.3.2節で把握動作について述べる。

3.3.1 拡張腕の動作範囲

拡張腕の動作範囲は、脚動作とのマッピングによって決まる。大西ら [41] は、ロボットアームの動作を図 3.5 のように分類しており、これにより実際に拡張腕が動作した際に実腕の機能と比較することができる。

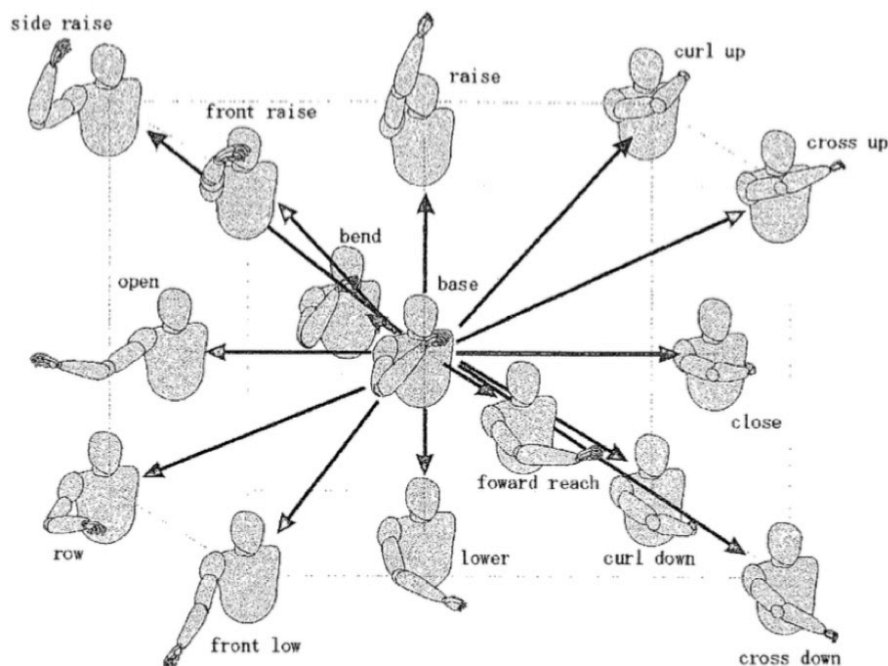


図 3.5: 腕の動作分類 [41]

3.3.2 物体の把握動作

拡張腕における手の作業能力を物体の把持および把握動作で分類する．鎌倉 [42] は、物体の把握動作の実用的な分類として、握力把握系、中間把握系、精密把握系を挙げている．握力把握系は、物体を指と掌で締め付けて持つ型である（図 3.6A）．中間把握系は、握力把握系と精密把握系の間位置し、指側面等を用いて把握を行う（図 3.6B）．精密把握系は、親指先端と他指先端を対立させてつまむ型である（図 3.6C）．

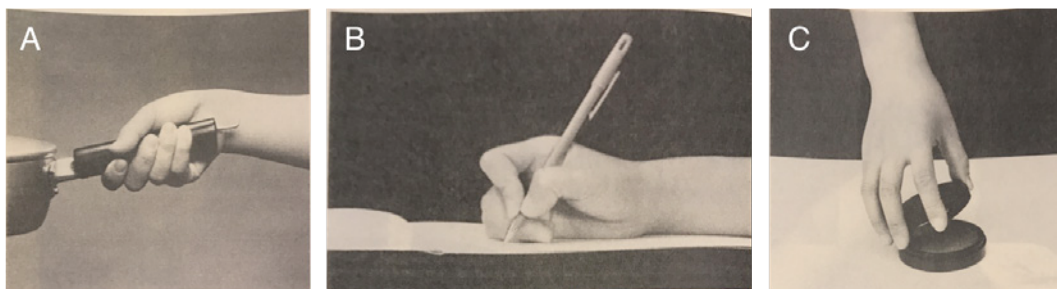


図 3.6: 把握動作の分類 [42]

拡張腕によってこれらの動作の中でどの系統まで達成できたのかによって実腕に対する物体の把握能力の比較が行える．

3.4. 本章のまとめ

本章では、まず、拡張腕の身体化に必要な要件を改めて述べた上で、先行研究における身体部位のマッピングに関して論じた．拡張腕に新たな機能を与え、独立動作を行うためには、従来の身体部位の一対一対応あるいは周辺部位を用いたマッピングは有効ではないため、ユーザーの腕とは異なる部位とのマッピングを行うことを提案した．次に、拡張腕へマッピングする具体的な身体部位の検討を行い、脚動作の割り当てを導いた．脚動作を用いて拡張腕を操る上で身体所有感と自己主体感の生起に要求される要素を整理した．最後に、実腕と拡張腕との協

調作業を満たすための条件として、拡張腕の動作範囲と手先の物体把握能力について示した。

4章では、この提案手法をもとに詳細設計に必要な各要素を明らかにするためのプロトタイプと提案手法の有効性を示すための Metamorphosis 4 Arms の開発・実装を行う。

第4章

実装

4.1. 腕動作と連動した多腕VRアバタ

4.1.1 実験目的

新たに付加する複数の腕が，ユーザー自身の腕動作と連動することで，それら複数の腕を自身の一部として感じられると考えた．そこで，付加する腕の本数の設定および，ユーザー自身の腕と複数の腕を有した身体への変容過程（トランジション）の設計を行うことを目的に，VR空間における全身アバタを用いた MultiArm Avatar を製作して実験を行った．

4.1.2 MultiArm Avatar

MultiArm Avatar は，人型VRアバタの腕を複製し，ユーザーの腕の動作に同期してアバタの複数の腕を同時に動かすシステムである．複製腕はアバタの肩関節部分から指定された角度でオフセットされ，ユーザーの実環境における実際の腕の位置に対して左右または上下方向に展開される．

図4.1にシステム構成を示す．モーショントラッキングには Microsoft Kinect V2を用い，ユーザーの身体動作をVRアバタに反映させる．視覚提示のHMDにはOculus Rift DK2を用いた．Oculus Rift DK2は，ユーザー頭部の動きに連動して映像も変化するためVRアバタへの没入感を高める．触覚提示にはTECHTILE toolkitt [43]とバイブロトランスデューサ Vp2を用いた．これにより，音響信号を利用してアクチュエータを振動させることで触覚提示を行うことができる．これ

らの装置を一台のデスクトップパソコンに接続し、統合開発環境を有した Unity 3D を用いて制作したソフトウェアによって制御を行った。

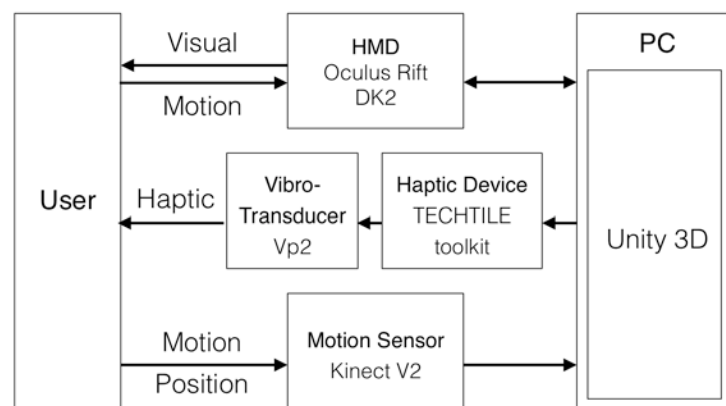


図 4.1: MultiArm Avatar のシステム構成

MultiArm Avatar 使用時のユーザーと VR アバタを図 4.2 に示す。アバタに用いた人型モデルは Unity Technologies Japan が提供するユニティちゃんを用いた。ユニティちゃんは女性キャラクターであるが、本実験では、性別による影響は少ないと考え、人型形状の解像度の高さを優先して使用した。ユーザーの身体動作の内、VR アバタには上半身の動きのみを反映して足は定位置に固定した。これは、自由度を制限して腕の動きに着目するためである。HMD によって視野が狭くなる条件においても全身の動きが確認できるようにアバタ正面に鏡を設置した。また、アバタ前方の手の届く範囲にボール形状のオブジェクトを配置し、これに触れることで触覚提示が行われる。

MultiArm Avatar では、表 4.1 に示した、腕の本数、オフセット角度のパラメータおよび、複製方向、システム起動時のアバタ初期状態を操作してアバタを変化させる。

腕の本数は片腕に同時に表示される複製される数である。腕本数が奇数の場合はユーザーの実際の位置と同じ位置関係に 1 本腕が提示され、それを基準にオフセット角度および複製方向に応じて複製される。偶数の場合は、複製腕の中間位置にユーザーの実際の腕が来るように設定され、ユーザーの実際の位置に相当す

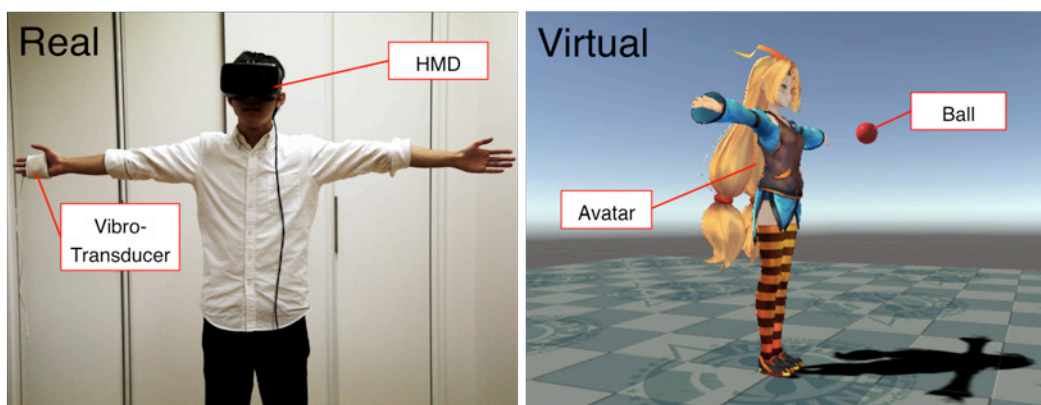


図 4.2: MultiArm Avatar 使用時のユーザーと VR アバタ

表 4.1: MultiArm Avatar のパラメータと状態

パラメータ	状態
腕本数	1 ~ 8 [本]
オフセット角度	0 ~ 40 [°]
複製方向	水平 or 垂直
アバタ初期状態	通常人型 or 多腕状態

る場所には腕が提示されない．オフセット角度は肩関節から複製される腕と腕との間隔であり，実験時は 5 [°] 単位で変化させた．複製方向はオフセット角度によって腕が展開される方向を示しており，水平方向では，ユーザー視点に対して左右に腕が複製され，垂直方向では，ユーザー視点に対して上下方向に腕が展開される．アバタ初期状態とは，ユーザーがシステム起動時に提示されるアバタの状態を示し，通常人型では，左右二本の腕を有した人型状態から始まり，実験者の指示によって後から腕が複製展開される．多腕状態は，システム起動時点でアバタの腕が複数ある状態を示す．以上のパラメータの変化を用いて，以下の実験を行った．

- 腕本数とアバタ初期状態の操作
- 2 本腕のオフセット角度の操作

各実験設計に関しては 4.1.3 節，4.1.4 節で述べる．

4.1.3 腕本数とアバタ初期状態の操作

本実験では，腕本数とオフセット角度をランダムに設定したアバタを用いて，腕を動かす，またはボールに触れるという動作を行い，その際に実験参加者が感じたことをヒアリングにて記録した．アバタ初期状態においても通常人型および，多腕状態をランダムに提示した．本実験においては，各パラメータのすべての組み合わせを試行せず，図 4.3 に示すような腕が 2 本や 3 本などの条件および図 4.4 に示すような腕が 8 本の条件など，変化が大きい条件を選定した．なお，鏡越しの認識が容易なことを優先して，複製方向は全て垂直条件を用いた．



図 4.3: 腕 2 本提示時のアバタ



図 4.4: 腕 8 本提示時のアバタ

4.1.4 2 本腕のオフセット角度の操作

本実験では，実験参加者に対して図 4.5 に示すような 2 本の腕が提示されている際に，オフセット角度に変化によってそれらの腕を自分の身体の一部として感じるのかを検証する．実験手順を以下に示す．

1. 実験参加者は通常人型アバタの状態の実験を開始し，正面のボールに何度か触れる．

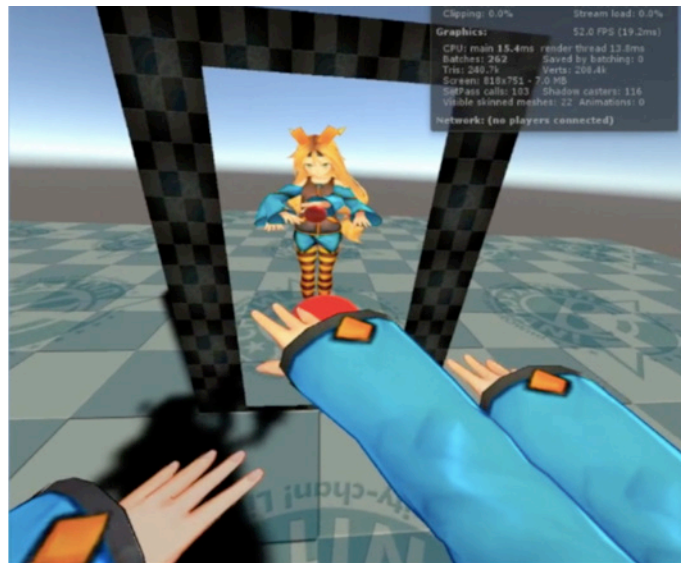


図 4.5: 2 本腕の提示時の実験参加者視点

2. アバタの腕が実験参加者の視野に入っている状態で指定したオフセット角度に応じて二本の複製腕を展開する。
3. この状態で再びボールに触りながら、複数の腕が自身のものであると感じるかを「はい・いいえ」で回答する。
4. 回答後、多腕状態から通常人型状態に戻す。

以上の手順をオフセット角度の条件を 10, 15, 20, 25, 30, 40 [°] と変化させて各 1 回ずつ行った。複製方向は水平で、右腕のみ行った。

4.1.5 結果と考察

4.1.3 節の実験は、20 代の学生数名に行った。ヒアリングでは、腕の本数が少ないかつオフセット角が小さい場合にボールに触れて触覚提示されるとどの腕で触ったのかわからなくなるといった感想や、腕の数が多いまたはオフセット角が大きく、実際の腕の位置とアバタの腕の位置との差が大きい場合には明らかな違和感を覚えるといった意見が得られた。また、システム起動時点で複数の腕が既

に見えている場合よりも、通常人型状態から複製腕が展開される方が身体の一部として認識しやすいというコメントを得た。これは、初期状態として自分の身体形状に近い状態から連続的に変容させることで、複数の腕を有した身体像を受け入れる移行ができていると考えられる。

4.1.4 節の実験は、20 代の学生 5 人 (全て男性) に対して行った。実験結果を図 4.6 に示す。横軸はオフセット角度、縦軸は各条件において複数の腕が自身のものであると感じるかという質問に「はい」と回答した人数である。

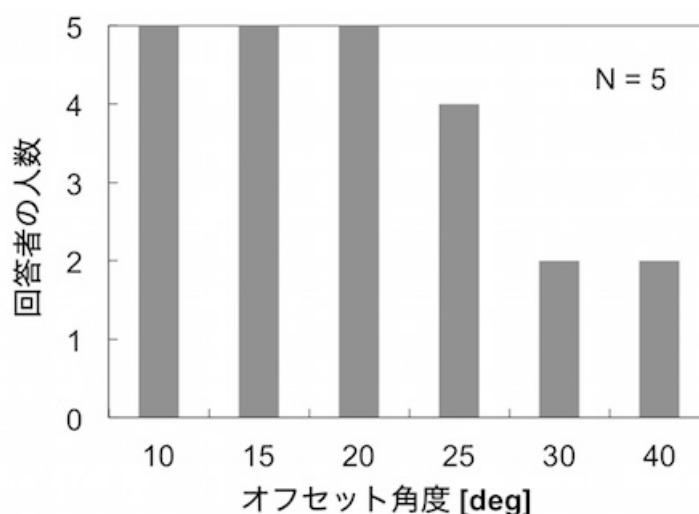


図 4.6: 実験 4.1.4 の結果

実験結果より、10~20 [°] では実験参加者全員が 2 本の腕を自分の身体として認識しているのが、20~30 [°] の範囲で人数に変化が見られた。オフセット角度 40 [°] 以上の条件を行っていないため、本実験では、2 本の腕を自身の一部と感じる上限は明らかではない。

今回、このような結果が出た要因は 2 つ考えられる。ひとつめは、視覚に対する体性感覚との差である。オフセット角度が小さい場合は、視覚的に認識する腕の位置と体性感覚から認識している腕の位置の差が小さいため多感覚統合時の影響が少ない。しかし、角度が大きくなると、これらの差が大きくなるため、自分の身体として感じられなくなると考えられる。ふたつめは、視野の範囲である。本

実験では、HMD を装着しているため、実験参加者は能動的に頭を動かすことで2本の腕を見ることができ、オフセット角度が大きくなると視野内に2本の腕を同時に捉えることが難しくなる。頭の向きと腕の位置によっては一時的に腕が1本しか見えない状況が発生し、これによって視覚的な腕の情報が損なわれるため、複数の腕を自己身体として感じられなくなると考えられる。また、実験参加者から、腕が複製される際に、2本の腕の胴体に近い内側の腕の位置は変化せずに外側の腕が離れていくように感じたとの報告があった。設定上は実環境の腕の位置に対して、各腕が同じ角度だけ左右にオフセットさせているが、胴体に近い腕の変化量が少ないと感じる傾向にあることを発見した。

以上を踏まえて、今後は腕の本数を2本に絞り議論を進める。4.2節では、2本腕条件における視覚と触覚情報のずれによる多感覚統合の影響を確認する。

4.2. 多感覚統合に伴う2本腕への身体像の変化

4.2.1 実験目的

4.1節において、2本の腕の獲得には連続的な身体形状の変化を用いることが有効であることを確認した。ユーザーの身体動作に連動する腕に触覚提示が行われることで、多感覚統合に伴って身体像の変容が起こりやすくなる。本節では、身体形状変化時に触覚提示が操作されることによる身体像への影響を明らかにすることを目的に、VR空間で身体形状変化のトランジションを操作しながら触覚提示を行う SplitArms を製作して実験を行った。

4.2.2 SplitArms

SplitArms は、2本腕への形状変形を分裂効果としてユーザーに提示するシステムである。MultiArm Avatar で用いた通常人型から多腕状態（2本腕）への変形を行いつつ、ユーザーが実環境でオブジェクトを把持できるように改良を行った。

図 4.7 にシステム構成を示す。

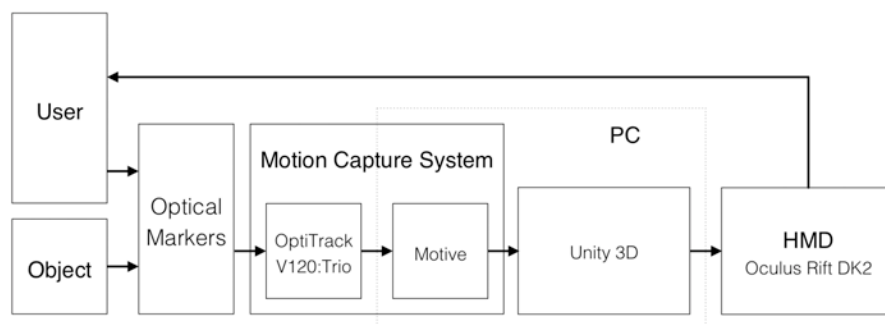


図 4.7: SplitArms のシステム構成

モーショントラッキングに OptiTrack V120:Trio を用い、感覚提示には触覚ディスプレイの代わりにアクリル製の箱を製作し実物体オブジェクトとして使用した。OptiTrack は、光学式マーカを用いて装着する必要があるが、これはアバタの動

作範囲を腕周辺に限定し、高い応答性を実現するためである。また、箱にもマーカーを取り付けることで、VR空間と実空間でのオブジェクトの位置姿勢の同期を行った。視覚提示で使用したHMDはOculus Rift DK2である。SplitArms使用時のユーザーとユーザーの視点を図4.8、図4.9に示す。



図 4.8: SplitArms 使用時のユーザー 図 4.9: SplitArms 使用時のユーザー視点

SplitArms では、ユーザーがオブジェクトを把持した状態で通常人型形状から2本腕形状への視覚的な分裂効果を発生させる。この時、図4.10に示す3通りの分裂効果を発生させることができる。なお、今回は左腕を対象とし、表4.1のオフセット角度および複製方向のパラメータは操作しない。図4.10 Aはオブジェクトを把持した通常人型状態である。SplitArmsの分裂効果によって図4.10 B~D状態に変化する。半透明で示したのはユーザーの実際の腕の位置であり、分裂後2本の腕が左右に展開される。図4.10 Bおよび図4.10 Dは分裂効果時にオブジェクトが左右どちらか一方の腕に追従して移動する。図4.10 Cは腕の分裂に合わせてオブジェクトも複製される。分裂効果が発生時にユーザーはオブジェクトを把持し続けているため、触覚提示されている状態である。

以上のシステムを用いて4.2.3節で述べる実験を行う。

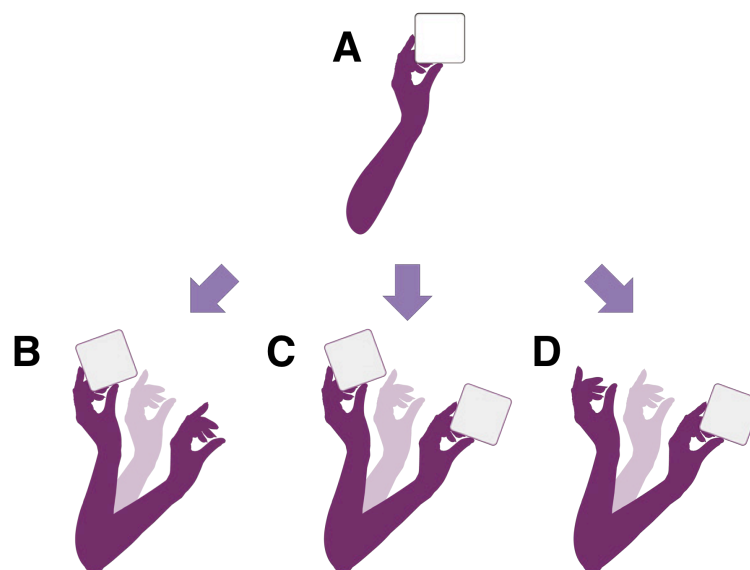


図 4.10: SplitArms の分裂効果

4.2.3 分裂効果による身体像の変化

本実験では、分裂効果後の状態と触覚提示の差が多感覚統合による身体像の形成にどのような影響を与えるのかを評価した。実験手順を図 4.11 および以下に示す。

1. 実験開始時、左手を机の上の初期位置に置き、バーチャルの箱を表示する（図 4.11 A）。
2. 十分な身体所有感を持つため、箱を把持した状態で数字の書かれたカードの上を交互に移動するタスクを行う（図 4.11 B）。
3. 1 分後、数字のカードが消えると同時にタスク止める。箱を把持したまま腕を顔の正面に移動する（図 4.11 C）。
4. 腕分裂効果を用いて 1 本の腕から 2 本の腕へと視覚情報の変容を行った（図 4.11 D）。

腕分裂効果後に口頭の質問によって主観的評価を行った。以下の質問によって (-3) から (+3) までの範囲を持った 7 段階の指標で評価を行った。

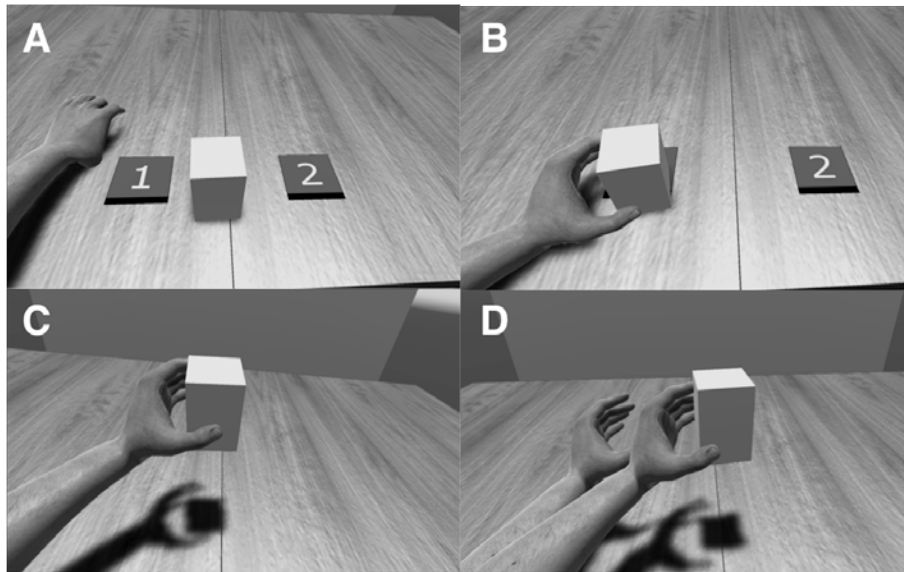


図 4.11: 実験 4.2.3 の手順

- Q1. 映像にある複数の腕を自分の腕のように感じた.
- Q2. 自分の腕が透明になったように感じた.
- Q3. 映像にある複数の腕の動きが自分の動きのように感じた.
- Q4. 自分の腕が移動したように感じた (左側:+3, 右側:-3).
- Q5. より自分の腕だと感じられるのは映像の左側:+3, 右側:-3 の腕.

腕の分裂効果時のオブジェクトを以下の 4 つの条件とし、一度の実験中に 2 回ずつ実施した. これは, 図 4.10 に述べた条件に, オブジェクトを持たない条件を追加したものである.

- 持たない (N) : 箱が無い状態で実験手順を行い, 腕分裂時に箱を持たない.
- 右に移動 (R) : 腕分裂時に箱が右側の手に移動する. (図 4.10C)
- 左に移動 (L) : 腕分裂時に箱が左側の手に移動する. (図 4.10B)

- 箱も分裂 (D) : 腕分裂時に箱も左右両腕に把持されたまま分裂する. (図 4.10D)

4.2.4 結果と考察

本実験は, 19 歳から 28 歳の実験参加者 10 人 (男性 8 名, 女性 2 名) に対して行った. アバタの肌の色によるバイアスを避けるため, 実験中のユーザー視点はモノクロ映像を用いた. 実験結果を図 4.12 に示す. 横軸は質問項目, 縦軸は各項目のスコアである.

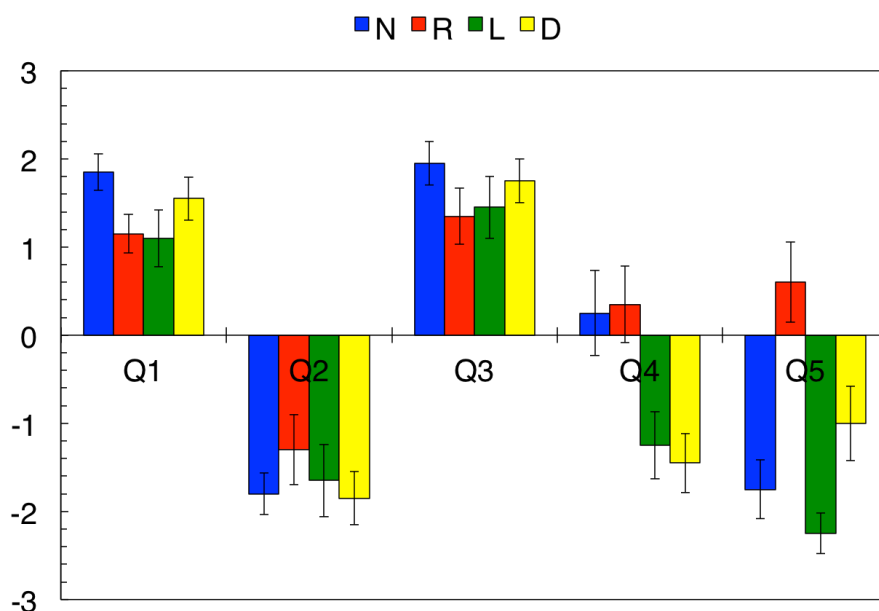


図 4.12: 実験 4.2.3 の結果

アバタの腕自体が自分の腕と感ずるのかを評価する Q1, Q2, Q3 において, 実験条件による有意的な差は見られなかった. 一方で, 腕が分裂した際, あるいは分裂後にどちらの腕が自分のものだと感じるのかという質問である, Q4, Q5 は実験条件による有意差が見られた. 特に, 分裂時に箱が移動する条件によってどちらの腕を自分の腕として感ずるのかに変化が現れた.

実験前の仮説では、分裂時にオブジェクトが移動した側、つまりオブジェクトを把持している腕がより自分の腕であると感じる可能性が高いと予想していたが、Q4においてオブジェクトが右に移動している条件 R において腕が左に移動していると回答している傾向があり、反対に左に移動している条件 L においては腕が右に移動していると回答している傾向が強い。つまり、オブジェクトを把持していない腕を自身の腕と感じており、仮説には反している。この結果からは、オブジェクトを把持している腕はすでに身体一部となっており、一方でオブジェクトを持っていない腕を新たな身体として意識することで強く感じている可能性が考えられる。また、条件 N または条件 D においては右側の腕、つまり胴体に近い腕を自分の身体として感じている傾向が見られ、これは 4.1 節で得られた知見と一致している。

4.3. 身体動作の分離と再構成による独立動作

4.3.1 実験目的

拡張腕を独立して動かすためにユーザーの身体動作の一部を取り出して腕の動作に使用する。そこで、身体動作の分離時における操作感の確認を目的として、VR空間においてユーザーの身体動作によって半独立的に腕の複製と操作を行える SwingArms を製作して実験を行った。

4.3.2 SwingArms

SwingArms は、VR空間上にユーザーの腕および手の動きに同期したモデルを表示し、ユーザー自身の身体動作によって腕の複製・分裂効果の制御を行うことができるシステムである。4.1節、4.2節で得られた2本の腕を身体の一部として感じやすくするための知見を活かし、腕の独立動作に向けて身体動作の分離と再構成を行う。分離に用いる身体動作として、今回は肘の回転動作を扱う。これは、手を含めた腕の自由度は7自由度あり、手先の位置・姿勢を決めた場合に冗長な1自由度が使えると考えたためである。

手先の詳細なモーショントラッキングを行うために Leap Motion を、肘の回転動作を計測するために Myo Armband を用いた。Leap Motion はマーカー等を使わずに手のジェスチャーを 20[msec] 以内で検出できるデバイスである。Myo Armband は筋電位センサ 8ch と 9 軸 IMU センサ（3 軸ジャイロ、3 軸加速度、3 軸磁気）を搭載したデバイスであり、PC と Bluetooth 接続ができるデバイスであり、無線で肘の姿勢検出が可能なため使用した。視覚提示の HMD には Oculus Rift DK2 を用いた。触覚提示には TECHTILE toolkit とバイプロトランスデューサ Vp2 を用い、台の底面に設置した。ユーザーが台に触れたことを検出するためにセンサを配置し、Arduino Uno を用いて PC と接続した。製作したシステムの全容と使用時のユーザーを図 4.13、図 4.14 に示す。

SwingArms では、ユーザー自身の身体動作に連動して腕の複製・分裂効果の提示を行う。ユーザーがセンサの検出範囲内で腕を動かすことで VR 空間の腕モデ

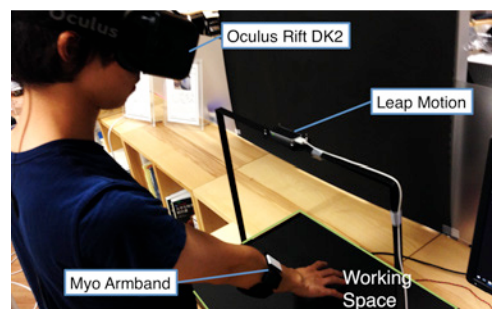
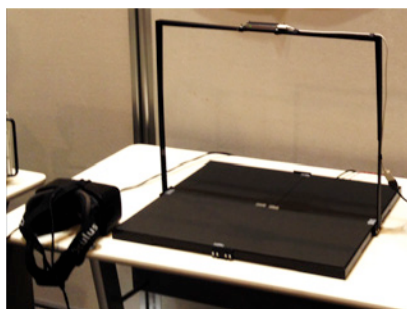


図 4.13: SwingArms のハードウェア外観 図 4.14: SwingArms 使用時のユーザー

ルが同期して動く（図 4.15A）。ユーザーが台に手を触れることで、腕の複製・分裂を行う（図 4.15B）。分裂時のオフセット角度は、効果開始時のユーザーの肘の角度からの傾きに応じて式 4.1 に示す変換によって決定する。腕モデルで VR 空間上に配置されたボールに触れることで台を介して振動刺激による触覚提示が行われる（図 4.15C）。

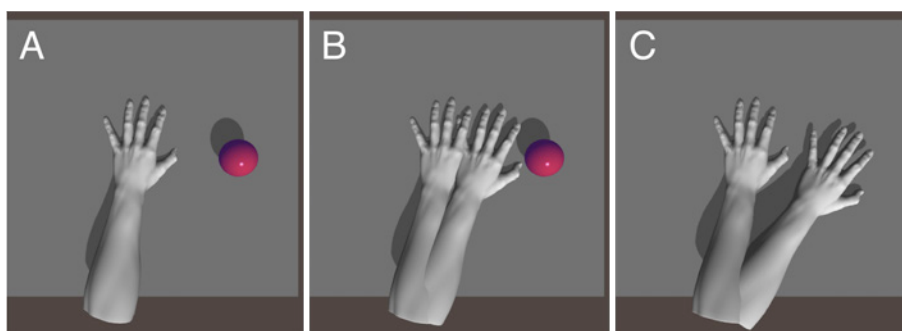


図 4.15: SwingArms の動作

$$\theta = a \arctan(b(x_1 - x_0) + c(y_1 - y_0) + d(z_1 - z_0)) \quad (4.1)$$

式 4.1 の x_0, y_0, z_0 はそれぞれ分裂効果開始時の肘の初期角度, x_1, y_1, z_1 は効果中の肘の角度, a, b, c, d はそれぞれ調整用パラメータである。オフセット角度はユーザーの肘回転方向に合わせて増減するように調整を行った。例えば、肘を正

転（時計回りに回転）した場合は複製腕が右方向に回転し、逆転（反時計回りに回転）した場合は複製腕を左方向に回転する値になるように角度が変換される。

以上のシステムを用いて 4.3.3 節で述べる実験を行う。

4.3.3 拡張腕に対する自己主体感の発生

本実験では、SwingArms による腕の分裂および操作を通して実験参加者が新たに複製された拡張腕に対して行為主体感が発生しているかを観察する。実験参加者には実際にシステムを体験してもらい、その操作性に関してヒアリングを行った。体験の手順を以下に示す。

1. 実験参加者にシステムの操作方法を口頭で説明する。
2. 肘の回転の動きを伝えるために実験者が肘の動作について実演し、同時に実験参加者にも身体動作を行ってもらい動きを確認する。
3. 実験参加者は HMD を装着し、システムの体験を行う。
4. 体験時に操作性についてヒアリング行う。

4.3.4 結果と考察

本実験は、20 代から 40 代の一般人十数名に行った。図 4.16 に実験時の風景の一部を示す。

体験した実験参加者を大別すると、思い通りに分裂の操作ができない人と、最初はどうのように動かすかわからないが一度動き方を理解すると自在に操作する人に分かれた。前者は操作が難しいとの感想が多く、後者は慣れれば動かすことができるという意見が得られた。これは、肘を回転させるという身体動作の難易度が個人差に大きく依存したためであると考えられる。実際に後者の容易に動かせた実験参加者の多くはシステム体験前の肘の回転動作の説明時にすぐに理解した傾向があった。肘の回転方向と拡張腕の回転方向を一致させたことも直感的に動かしやすくなる一要因となったと考えられる。また、拡張腕を動かしている感覚



図 4.16: SwingArms のユーザーテスト

があるかという行為主体感の質問に関しては、腕が分裂する瞬間はとても強いがしばらく動かしていると腕ではなく何か別のパーツのように感じられるといったコメントが得られた。これは、分裂効果によって通常人型から多腕形状に変容する過程で身体像が時間経過に伴って変化しているためだと考えられる。

以上の結果から、身体動作の一部を別の身体部位の動作のために分離し再構成することは可能であるが、個人差に大きく依存することを確認した。また、身体形状が変化する過程で拡張腕を有する身体像への移行は短時間では発生しづらく身体性は弱まる可能性が示唆された。

4.4. 筋電位を用いたロボットアームの制御

実環境で動作する拡張腕を目的としたロボットアームの試作として、図 4.17 に示すようなロボットハンドを先端に取り付け可能な 3 自由度を有したウェアラブルロボットアームの開発を行った。

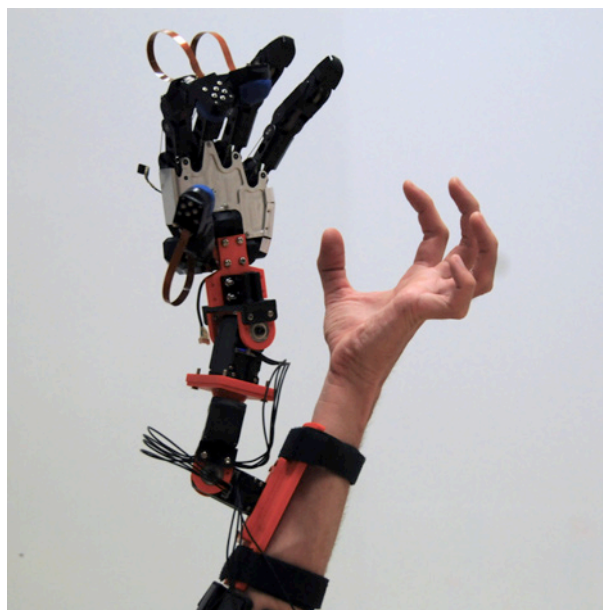


図 4.17: ウェアラブルロボットアーム

4.4.1 システム構成

図 4.18 にハードウェア構成を示す．サーボモータに Herkulex DRS-0101, DRS-0201 を 3 個使用し，外装は 3D プリンタを用いて作成した．サーボモーターの制御は，モーターに内蔵されたコンピューターに対して SparkFun Pro Micro を用いた通信によって行った．腕の取り付けには面ファスナーを用いた．図 4.19 に取り付け状態を示す．

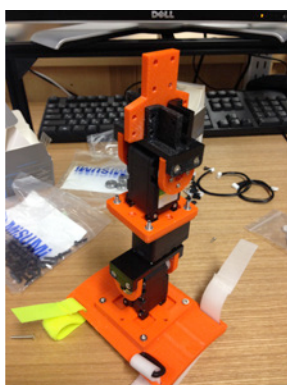


図 4.18: 3 自由度のロボットアーム

図 4.19: ロボットアームを装着状態

Pro Micro と PC をシリアル通信接続し，Processing によって制御命令を送信した．筋電位の計測には，8ch のセンサを有した Myo Armband を用いた．図 4.20 に実行画面を示す．本システムでは，各チャンネルから得られたセンサの閾値を記録し，その閾値を超えた場合にモーターを動かした．

4.4.2 動作検証

試作したシステムの動作確認を行う．先端に紙製のダミーハンドを取り付けた上で，筋電位の計測に対して動作するモーターを 1 つ，2 つ，3 つと増やしてロボットアームの操作を行った．モーターが 1 つの場合は，拳の曲げに対してアーム角度の制御を行い，モーターを意図した通りに制御することができた．図 4.21 にモーター 2 つを動かした場合の例を示す．2 自由度の制御では，それぞれのモーター

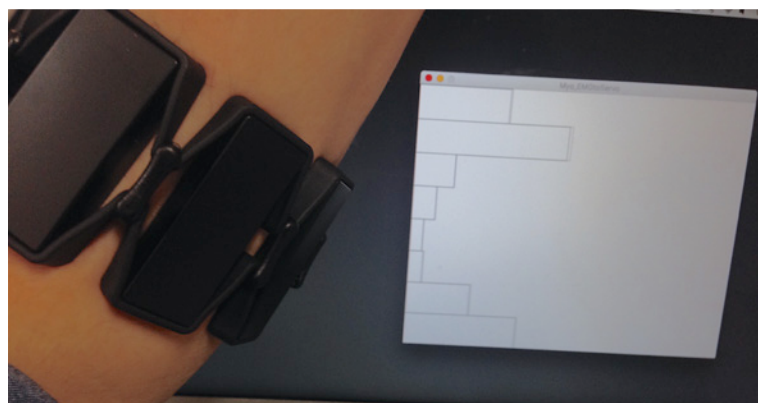


図 4.20: 筋電位計測の実行画面

ターを意図した通りに動かすことが難しく，制御不能状態に陥った．3自由度の制御では，起動時から動作が安定しなかった．また，ロボットアームの動作に用いる筋電位は手先動作の影響を受けるため，拡張腕としてロボットアームを独立操作することが難しい．以上により，拡張腕の動作には，筋電位ではない手法の選択が適切であることを確認した．

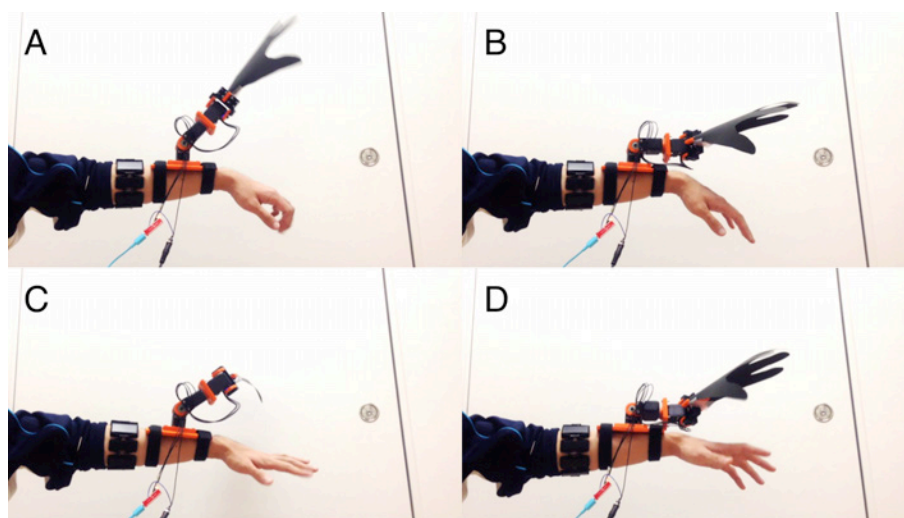


図 4.21: 2自由度のロボットアーム動作

4.5. Metamorphosis 4 Arms

3章で提案した拡張腕を有した身体像への変容手法をもとに、Metamorphosis 4 Arms (M4A) の開発・実装を行う。M4A はユーザーの左右の実腕にそれぞれ一対の拡張腕を付加し、腕以外の身体部位を用いて独立動作可能なシステムである。ユーザーは侵襲的なセンサを用いずに拡張腕を操り、ユーザー自身の腕と協調作業を行うことができる。

M4A 使用時のユーザーは、椅子に座った状態を想定し、右脚を右拡張腕、左脚を左拡張腕にそれぞれ割り当てる。各拡張腕はロボットアームを用いて位置姿勢を合わせた6自由度を有し、腕先端のロボットハンドで把持動作が可能なものとする。

以上を踏まえて、各要素技術の開発・実装を行う。それぞれの詳細を 4.5.1 節, 4.5.2 節, 4.5.3 節, 4.5.4 節, 4.5.5 節で述べる。

- 足指データソックス (4.5.1 節)
- 脚から腕への動作変換システム (4.5.2 節)
- M4A シュミレーター (4.5.3 節)
- 拡張腕を搭載した M4A コックピッド (4.5.4 節)
- システムの統合 (4.5.5 節)

4.5.1 足指データソックス

拡張腕での把持動作を行うため、足指の開閉動作の計測を行う足指データソックスを開発した。足指は手の指ほど自由度が高くないため、本デバイスでは、把持時の開閉動作に機能を絞ってデータの計測を行う。開発したデータソックスを図 4.22 に示す。

足指の可動範囲と今後の拡張性を考慮し、ソックスには5本指形状を使用した。足指の開閉動作は、Spectra Symbol FLEXSENSOR を用いた。これは、曲げた角度によって出力抵抗値が変化する曲げセンサである。抵抗値の計測は Arduino

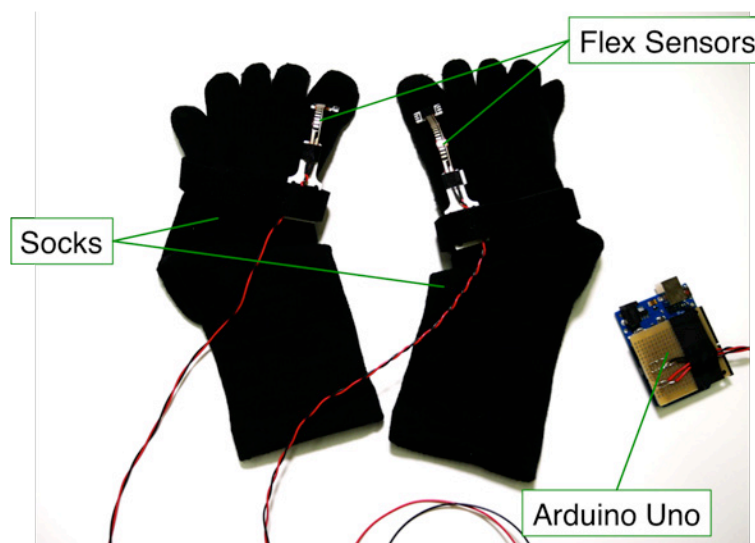


図 4.22: 足指データソックス

Uno を用いてアナログ-デジタル変換を行い、シリアル通信で PC と接続する。曲げセンサの先端を足親指部に配置し、センサの末端を足の甲に配置した。図 4.23B に示すように、足指に力を入れていない位置でセンサが撓んだ状態を基準として、足指を閉じた場合は基準状態よりも曲げ角度が小さく（図 4.23A）、足指を開いた状態では曲げ角度が基準状態よりも大きくなる（図 4.23C）。

製作したデータソックスの動作確認のため、以下の手順で足指開閉を行い値を計測した。各手順で左右それぞれ5回ずつ計測を行った。

1. 足指を初期状態（図 4.23B）で5秒間停止。
2. 足指を閉じた状態（図 4.23A）で5秒間。
3. 足指を初期状態（図 4.23B）に戻して5秒間。
4. 足指を開いた状態（図 4.23A）で5秒間。
5. 足指を初期状態（図 4.23B）に戻して5秒後に終了。

実験結果を図 4.24, 図 4.25 に示す。横軸は経過時間[msec]、縦軸は Arduino Uno で A/D 変換後、平滑化処理を行った値である。左右それぞれの測定データから、

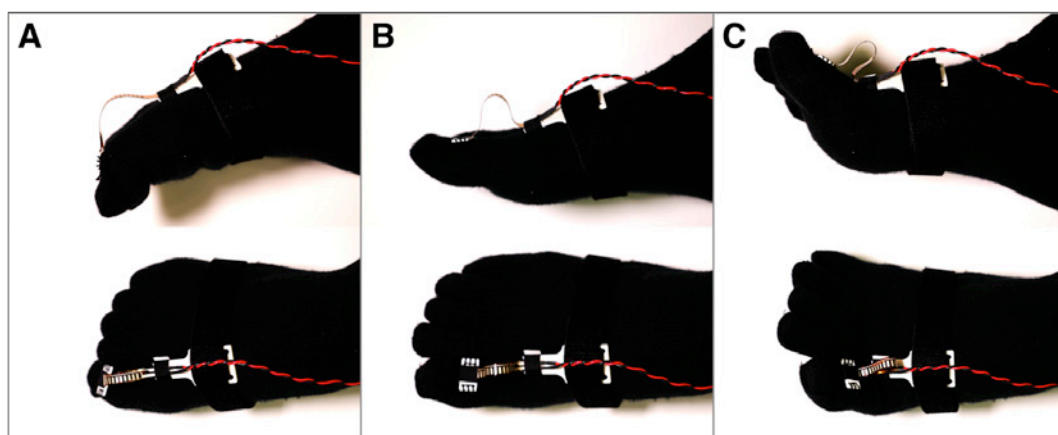


図 4.23: 足動作の検出

開閉状態および初期状態が検出可能であることが確認できる。各状態から次の状態への移行開始タイミングがデータによって異なるのは、時間のカウントと指の開閉を実験参加者の目視によって行ったためであり、これはデータソックスの性能に影響しない。移行開始地点から状態が移行して値が安定するまでの期間には過渡現象が発生している。特に図 4.24, 図 4.25 のそれぞれで最初の初期状態から閉じた状態への移行時に最大で 1 秒程度の発生していることが確認できる。これは、システムの応答性に関わる可能性があるが、値測定が遅延ではないためソフトウェア側で調整が可能であると考えられる。また、左右で初期状態での基準となる値に差があるが、システム起動時にソフトウェア側でキャリブレーションを行うため問題はないといえる。

以上の結果から、足指動作測定用データソックスの動作は概ね性能を満たすといえる。4.5.2 節で述べる動作変換システムと合わせて用いることで、拡張腕を操ることが可能となる。

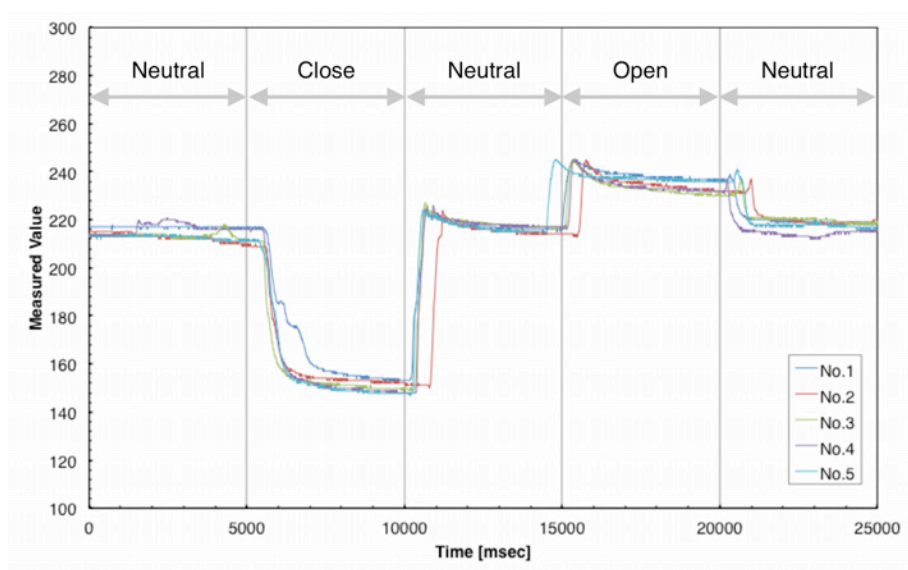


図 4.24: データソックス右足の測定結果

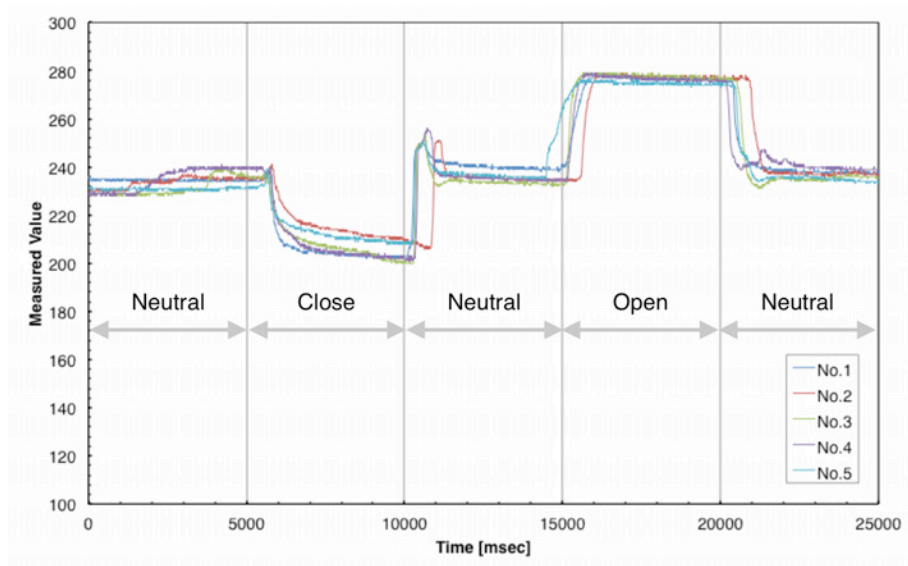


図 4.25: データソックス左足の測定結果

4.5.2 脚から腕への動作変換システム

拡張腕の動作には，位置姿勢を合わせた6自由度のパラメータを決定する必要がある．そこで，脚部位の身体動作を測定して拡張腕の動作へ変換するシステムを開発する．脚部位のモーショントラッキングには，OptiTrack V120:Trioを用いた．左右それぞれのつま先と膝にマーカーを取り付け，位置姿勢の計測を行う．OptiTrackの標準のマーカーは再帰性反射材でコーティングされたボールを3個使用してトラッキングを行う．膝部分はこの標準型を用いたが，つま先は回転などによってマーカーがトラッキング用カメラの死角に移動してしまう可能性が高いため，4つのボールを使用したマーカーを製作した（図4.26）．これにより，つま先の回転によっても最低3つのマーカーがトラッキング用カメラに捉えられるため，安定した動作が可能となる．

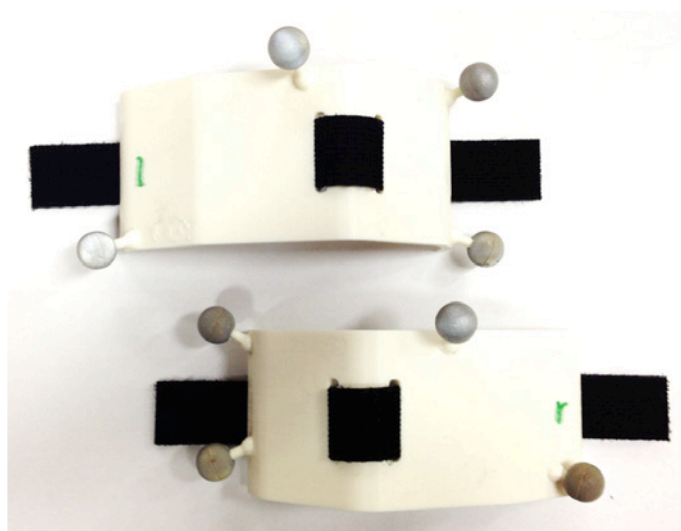


図 4.26: つま先用マーカー

図4.27にマーカーを装着したユーザー脚，図4.28にM4A使用時の脚の配置を示す．ユーザーのつま先にはデータソックスのセンサ部分があるため，マーカーが干渉しない配置となっている．M4A使用時は椅子に座った状態で机での作業が想定されるため，トラッキング用のカメラをユーザー前方上部に設置してモーショントラッキングを行う．

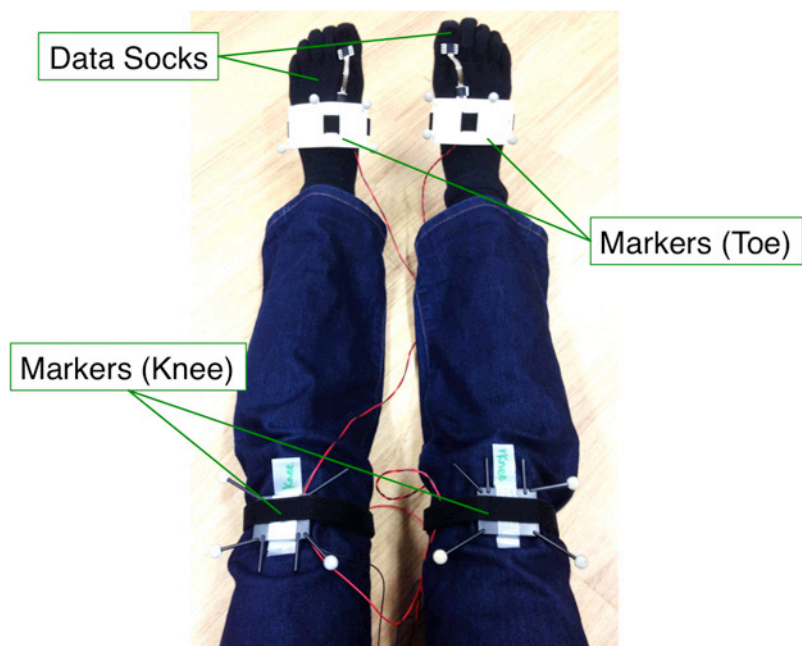


図 4.27: マーカーを装着したユーザー脚

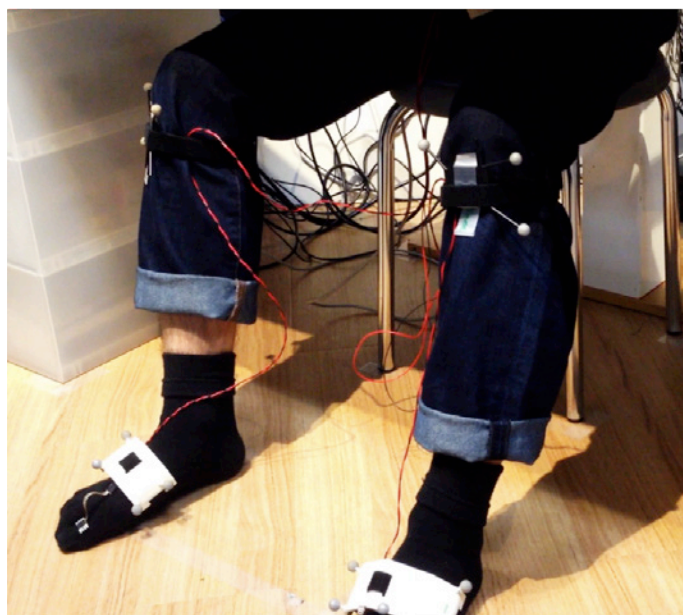


図 4.28: M4A 使用時の脚の配置

モーショントラッキングによってマーカーは位置姿勢の6自由度が計測される。そのため、つま先と膝の2つのマーカーから12の値を得ることができるが、椅子に座っている状態かつ人間の関節の制限から、それぞれの値は独立していない。そこで、図4.29に示すパラメーターを用いる。

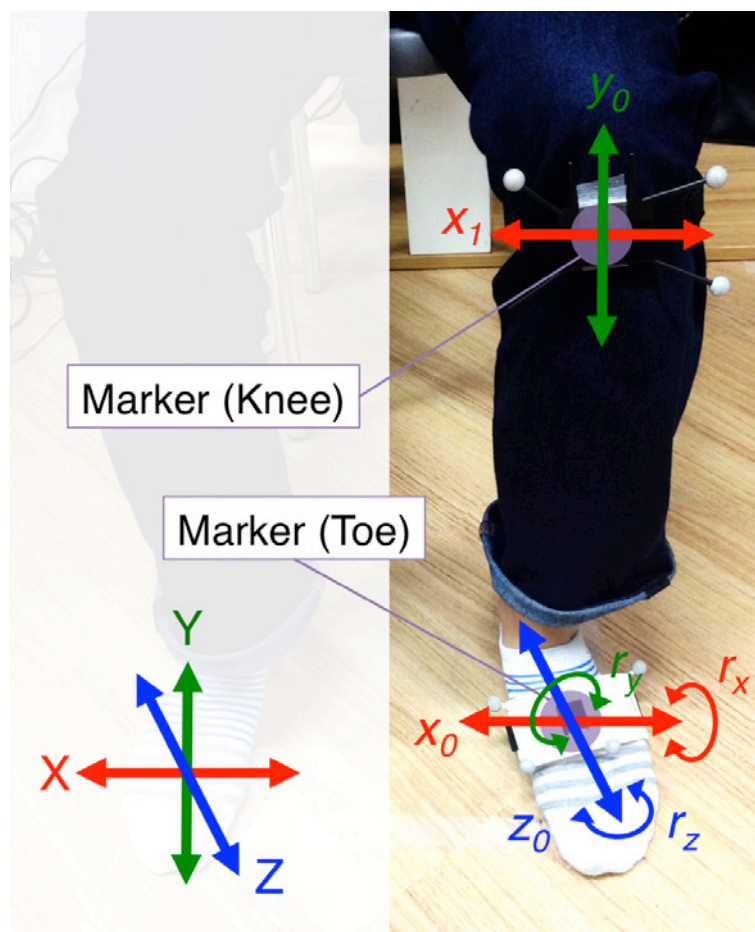


図 4.29: マーカーから取得するパラメーター

脚から腕への動作変換は、表4.2に示す対応関係によって行う。 $x_0, x_1, y_0, z_0, r_x, r_y, r_z$ はそれぞれモーショントラッキングによって得られるマーカーのパラメーターである。 a, b, c, d, e, f, g はそれぞれ調整用パラメーターである。 X_{SA}, Y_{SA}, Z_{SA} は拡張腕の手先位置、 $R_{xSA}, R_{ySA}, R_{zSA}$ は拡張腕の手先姿勢を示す。

X_{SA} の動作は X 軸方向に対して、膝の付け根を中心とした回転動作と足先の動

表 4.2: マーカーと拡張腕の位置姿勢の変換対応

マーカーパラメーター	拡張腕パラメーター
$ax_0 + bx_1$	X_{SA}
cy_0	Y_{SA}
dz_0	Z_{SA}
er_x	R_{xSA}
fr_y	R_{ySA}
gr_z	R_{zSA}

作が独立に得られるため、2つのパラメーターの組み合わせによって動作することとした。これにより細かい X 軸方向の動作時は足先を固定した状態で動かすことができる。また、 X 軸方向は拡張腕の動作範囲としても広くとれるため、つま先と膝が同時に動かすことで遠くの位置に手を伸ばすことが可能となる。 Y_{SA} の動作は、机の上での作業を想定するため、マイナス方向への変化はほとんど必要ないと考えられるため、膝の上方向の動きを用いる。 Z_{SA} の動作は、 X 軸方向に比べて可動範囲が狭く、膝の回転動作は X 軸方向の動作に対応させているため、つま先の値のみを用いる。

拡張腕の姿勢 $R_{xSA}, R_{ySA}, R_{zSA}$ は、つま先の姿勢に対応付けしており、回転方向を一致させることで適切な変換が可能であると考えられる。今回想定される状況においては、行われる作業において主に Z 軸の回転が重要であると考えた。そこで、パラメーター e, f によって X 軸および Y 軸の回転量の変化が小さくなるように調整を行った。なお、実装の際には左右それぞれ独立に動作の変換を行っており、各パラメーターの調整および、動作確認は 4.5.3 節で述べる M4A シミュレーターを用いて行った。

4.5.3 M4A シミュレーター

実環境上の拡張腕の動きを確認し、パラメーター調整等を行うために M4A シミュレーターを開発した。データソックスのソフトウェアおよび脚から腕への動作変換システムは M4A シミュレーター上で実行される。開発は、TELESAR V 用シミュレーター [44] をベースに Unity 3D で実装を行った。Arduino Uno とはシリアル通信、モーショントラッキングシステム用ソフトウェア Motive およびロボットアーム制御用ソフトウェアとは UDP 通信を行う。M4A システム全体の構成は、4.5.5 節のシステムの統合で述べる。図 4.30 に M4A シミュレーターの動作画面を示す。

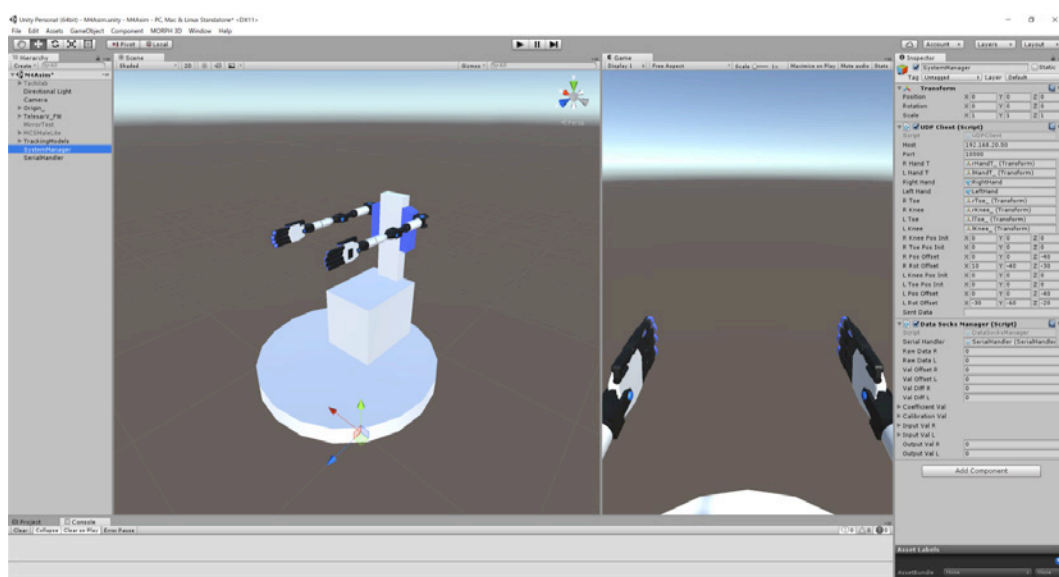


図 4.30: M4A シミュレーター画面

4.5.4 拡張腕を搭載した M4A コックピット

M4A は実環境で動作を行うため、人間形状に近く実時間で動作可能なロボットアームが要求される。そこで、本システムでは、TELESAR V [36] で使用したロボットアームと同じものを用いた。これは、実時間応答可能なロボットアームと

して設計されており，人間と同じスケールおよび人との接触が可能な性能を有している．また，ロボットハンド部分に指の可動に必要なアクチュエーターが全て内臓されているため，ロボットアーム・ハンド単体でも使用することができる．

今回想定されるシチュエーションでは，ユーザーは椅子に座って作業することを前提としているため，ロボットアームを直接人に装着する必要はない．そのため，椅子の背もたれに相当する部位に拡張腕として取り付けを行った．また，先の実験で得られた知見から，拡張腕をユーザーの肩よりも下，ユーザーの視点からより胴体に近い位置にあたるように配置した．肩よりも上に配置した場合，拡張腕がユーザーの視界に入るような位置関係の状態では十分な動作範囲を確保できないと考えたためである．ユーザーと拡張腕の位置関係は個人の体格差に依存するが，今回は座面高さが約 430 [mm]，ロボットアームの肩相当の高さを 780 [mm] に設定した．これにより，ユーザーが座った状態でロボットアームを水平にした伸ばすと脇の下から前方に出る位置関係になる．図 4.31 に M4A コックピットを示す．

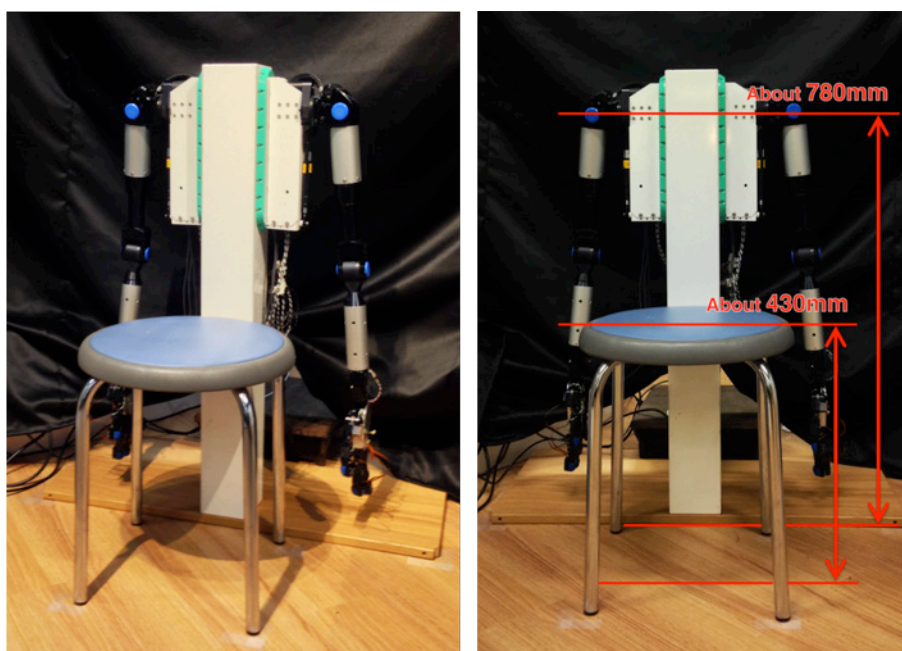


図 4.31: M4A コックピット

4.5.5 システムの統合

4.5.1 節, 4.5.2 節, 4.5.3 節, 4.5.4 節で述べた各要素の統合し, Metamorphosis 4 Arms を実装する.

図 4.32 にシステム構成を示す. システム制御用の 2 台の PC は LAN 接続し, UDP 通信を行っている. PC1 では, Unity 3D 上のプログラムを中心に各デバイスおよびソフトウェアが接続されている. 先に述べた通り, データソックスは Arduino Uno を介してシリアル通信を行う. ユーザーのつま先と膝に装着したマーカークの位置姿勢情報は, モーショントラッキングシステムである OptiTrack V120:Trio と Motive を使用して UDP 通信によって Unity 3D で受け取っている.

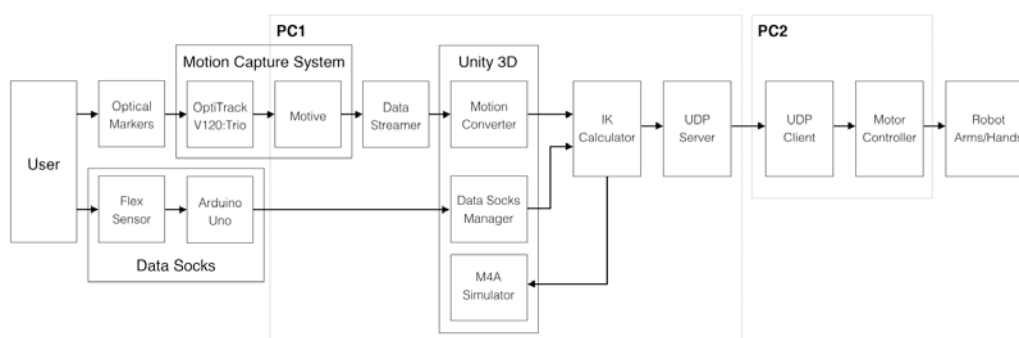


図 4.32: Metamorphosis 4 Arms のシステム構成

Unity 3D 上では, データソックスの値を扱うプログラム, 脚マーカーク情報から腕動作へ変換するプログラム, 拡張腕の状態を表示するシミュレータープログラムが動作している. データソックスマネージャーおよび動作変換プログラムによって手の把持に必要なパラメーターと拡張腕の位置姿勢が計算され, 各値がUDP通信で逆運動学 (IK) 計算ソフトウェアに送られる. IK 計算ソフトウェアはC++で作成されたソフトウェアで, 受診した位置姿勢データから, ロボットアームの各関節間の距離と配置, アクチュエーター毎の動作範囲などのハードウェア固有の値をもとに各関節アクチュエーターの回転角度を計算し, データパケットをUDP通信で送信する. このデータパケットを再びUnity 3D上で受信し, 拡張腕のシミュレーションを行う. 同時にUDP serverというデータパケットを同じネット

ワーク内で共有するソフトウェアを介して PC2 上で動作する UDP client と通信を行う。PC2 では、UDP client によって受信したデータパケットに応じ、モーターコントローラーを介してロボットアーム・ハンドの各アクチュエーターに制御信号を送信する。これらの処理はユーザーの動作からモーターの駆動まで 200[msec] 以内で行われる。以上によって、ユーザーの脚身体動作を測定し、再構成することで拡張腕の動作を行う。

4.5.6 M4A の動作検証

開発した Metamorphosis 4 Arms の動作検証を行う。今回は、拡張腕による動作検証として以下の 2 つのタスクを行う。

- ユーザーの足指による拡張腕の手先開閉。
- 拡張腕とユーザー実腕とのセルフタッチ。
- 拡張腕とユーザー実腕との協調作業による物体の把持。

以上のタスクを 20 代、30 代の男性それぞれ 1 名を対象に行った。図 4.33～図 4.38 にユーザー A、図 4.39～図 4.42 にユーザー B の動作結果を示す。まず、ユーザー A の動作結果を述べる。

動作開始時、実腕と拡張腕が同じような配置となっているため、拡張腕を動かすことでユーザー視点からは通常人型から多腕形状への変化と似たような効果が発生している（図 4.33）。

拡張腕の上下方向の動作範囲を制限しているため、ユーザーの実腕を下に滑り込ませる形で実腕と拡張腕とのセルフタッチを行った（図 4.34）。

ユーザーの足指の開閉動作に伴って、拡張腕のロボットハンドの開閉動作を行った。図 4.35A が足指を開いた状態、図 4.35B が足指を閉じた状態をそれぞれ示している。

ユーザー A は物体としてのカップを把持した後、カップの中へペンを挿入する動作を行った。まず、カップを把持するために手首を回転し、ロボットハンドを開閉する動作を一連の流れの中で行っている（図 4.36A, B）。しかし、ユーザーが

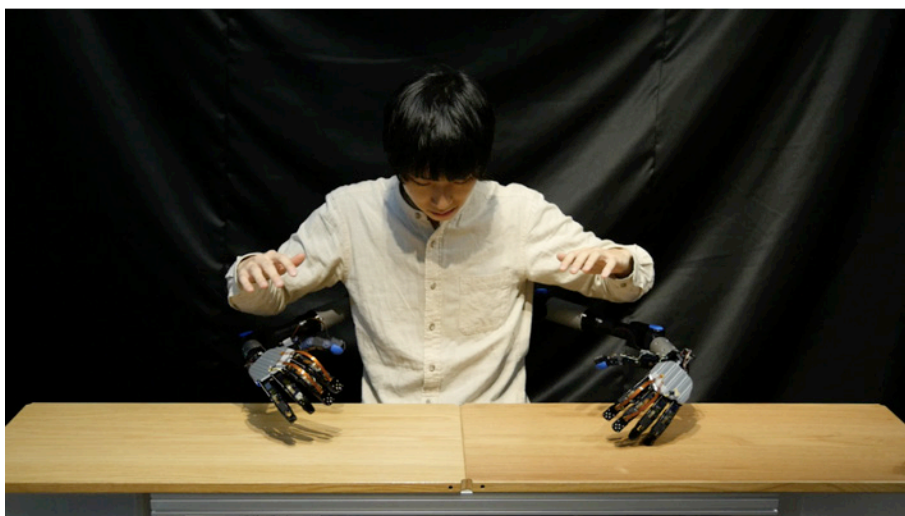


図 4.33: M4A を起動し，拡張腕の動作を開始

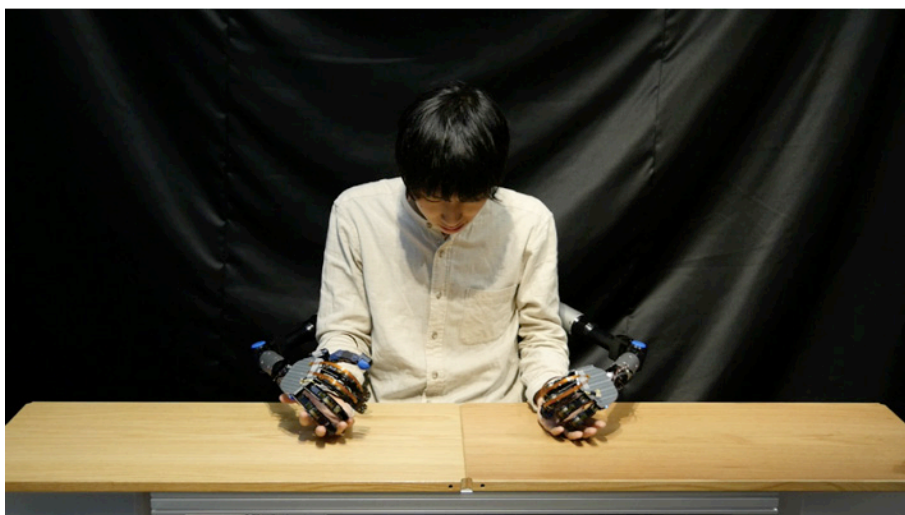


図 4.34: ユーザーの実腕と拡張腕によるセルフタッチ

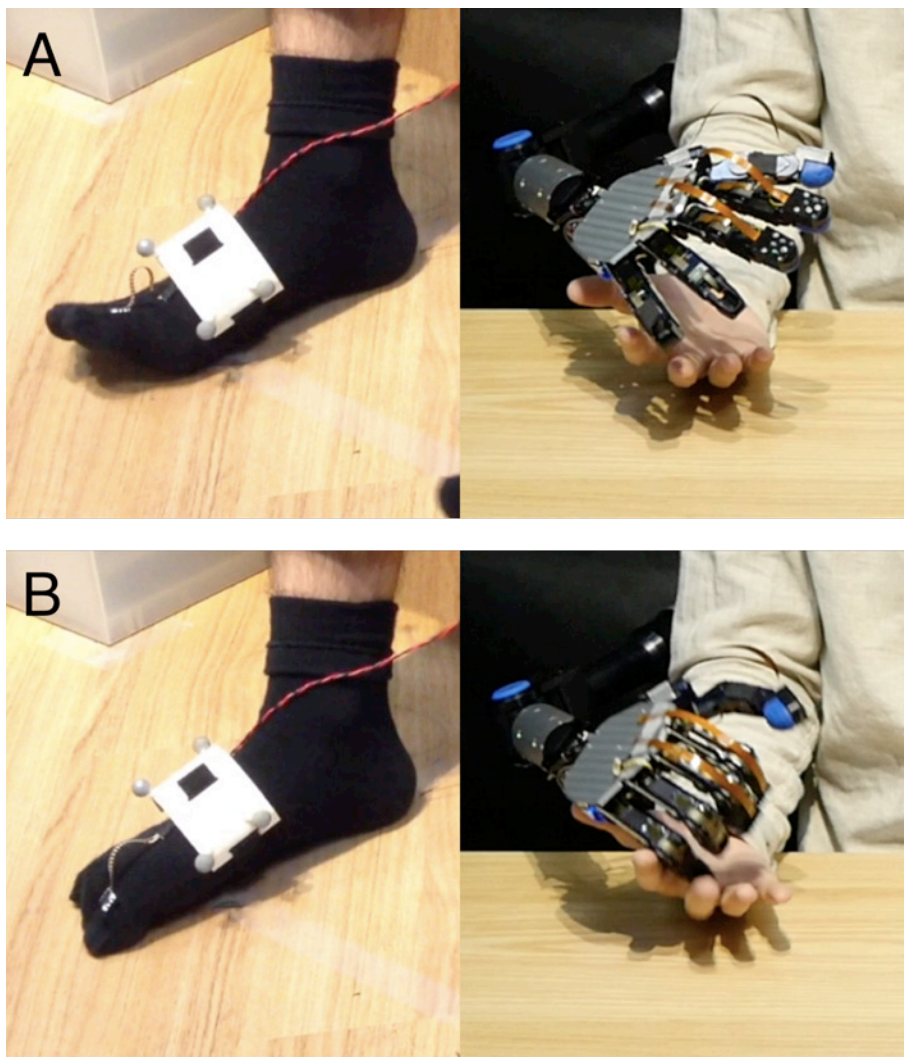


図 4.35: ユーザーの足指による拡張腕の手先開閉

実腕によって位置決めしたカップを拡張腕で把持しようと動かしたが調整がうまく行われず（図 4.36C），最終的に拡張腕の位置にカップを移動させて把持を行った（図 4.36D）。

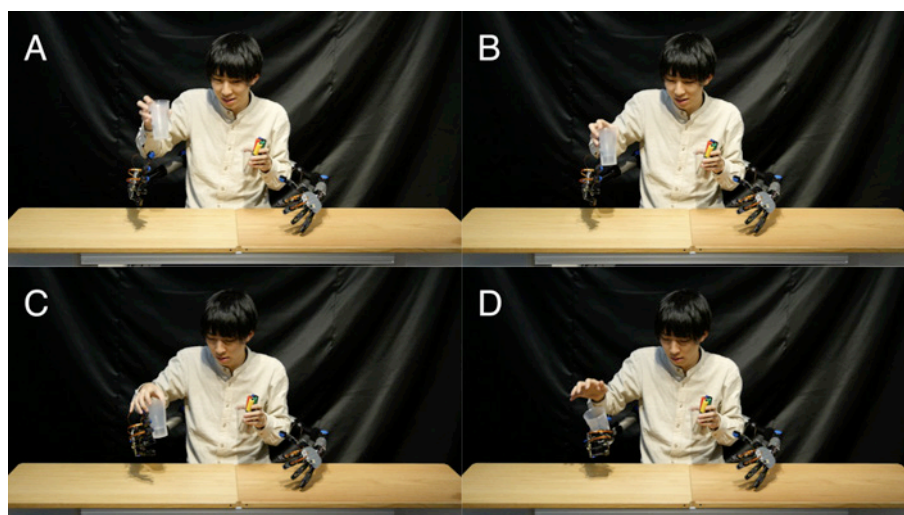


図 4.36: 実腕から拡張腕へのカップ受け渡しと拡張腕での把持

カップ把持時の拡張腕の動作を踏まえて，ペン挿入の位置決めは実腕で行っている（図 4.37B, C）．拡張腕を固定しているため，カップが空中ににある状態でペンの挿入が行えている（図 4.37D）．

拡張腕による位置決めと実腕による位置微調整によって左側でのカップ把持とペン挿入をスムーズに行った（4.38）．ペン挿入後，ユーザー A は左右両側の拡張腕を振る動作によってカップ内のペンを揺らしていた．

以上の一連の動作によって，実腕とは独立動作する拡張腕の実環境での動作を確認した．また，事前にシミュレーター上でのパラメーター調整は行ったが，ロボットアームを用いた最初の試行であり，ユーザー A は学習を行っていないにもかかわらず，図 4.36～図 4.38 に示したカップ把持およびペン挿入の動作を実時間（30 秒以内）で終了していることを確認した．

続いて，ユーザー B の動作結果を述べる．まず，実腕と拡張腕が同じような配置となっている状態でのセルフタッチを行い（図 4.39），次にユーザー拳に対して，拡張腕による開閉動作によってセルフタッチを行った（図 4.40）．セルフタッ

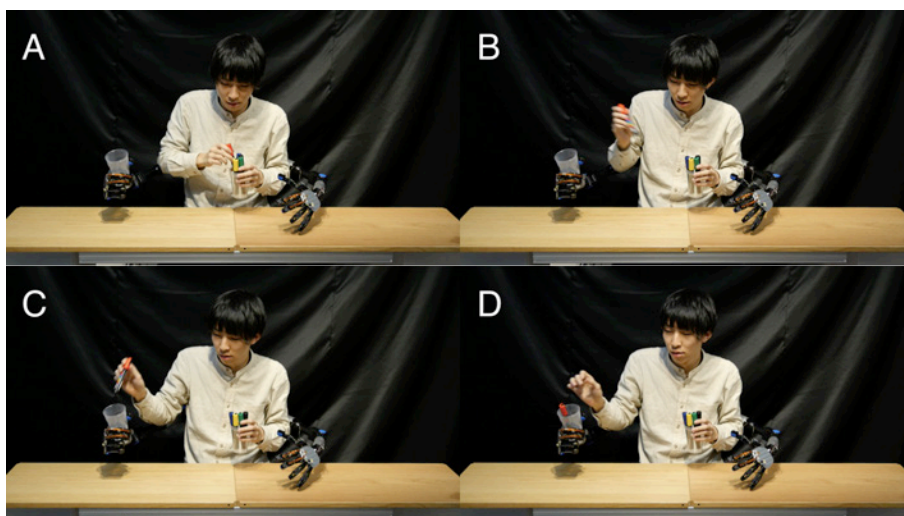


図 4.37: カップ把持状態で実腕によるカップへのペン挿入



図 4.38: 左右両側拡張腕でのカップ把持とペン挿入後

チ時の感想について、ユーザー B は「変」と答えており、この時点では拡張腕の身体化が十分に行われていないことが示唆される。



図 4.39: 拡張腕の手の甲に対するセルフタッチ

ユーザー B は物体としてのカップを把持した後、飲料を飲むような動作を試みた。まず、カップを把持するため拡張腕の手首を回転し、実腕によって位置調整を行った (図 4.41A)。その後、カップを把持した状態でユーザーの口元まで拡張腕を移動させている (図 4.41B, C)。拡張腕の上下方向の移動範囲は制限されているため、ユーザーの脚動作は通常の着席状態に比べて負担の大きい姿勢での動作となっていた。また、最終的にカップを口に運ぶことには失敗している (図 4.41D)。

図 4.41 に示した、物体の把持および移動のタスクでは失敗例も見られた。把持の失敗では、ユーザーがカップの位置調整を行う際にカップと拡張腕との位置関係を把握できずに、ロボットハンドの開閉時にカップを完全に把持できない場合 (図 4.42A, B) や、把持後の移動時に足指を開いてカップを落とす場面 (図 4.42C, D) が見られた。これらの結果から、足指によるロボットハンドの開閉動作と、脚による拡張腕の動作を複合的に行うことが難易度の高いタスクであることを確認した。

ユーザー B もユーザー A と同様、ロボットアームによる拡張腕の操作は初めての試行であったにもかかわらず、物体の把持や移動を実腕との協調作業を含みつ



図 4.40: 拡張腕の開閉によるユーザー拳へのセルフタッチ

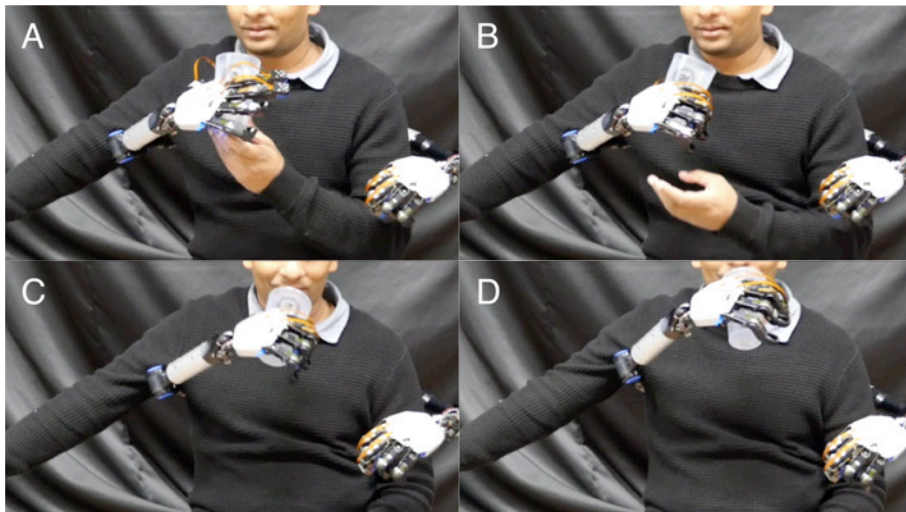


図 4.41: カップ把持による飲む動作の試み

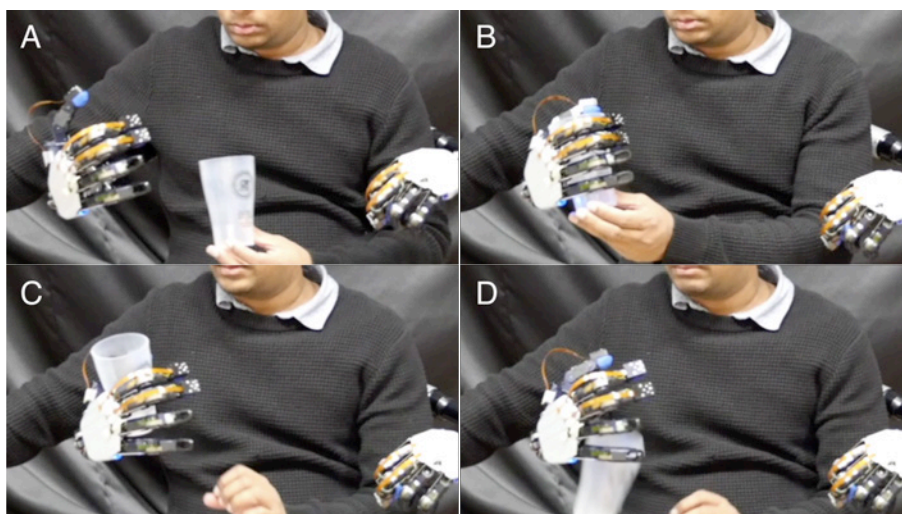


図 4.42: カップ把持の失敗例

つ行えていた. このことから M4A がユーザーの脚動作を用いて拡張腕を動かすシステムとして動作していることを検証できた.

4.5.7 考察

まず、M4Aにおける拡張腕の動作範囲について述べる。3.3.1節で示したロボットアームの動作分類に対して、M4Aでの右側拡張腕の動作範囲として、前方から右側方にかけてをカバーでき、図3.5における左下の領域を満たしている。しかしながら、腕を交差させるような姿勢や真上方向および後方への動作は実現できていない。これは、脚の動作範囲にも依存するが、人間は足を組むなどを日常的な動作として行えるため、動作範囲は拡張可能であると考えられる。

次に、拡張腕の把握能力について述べる。M4Aの動作検証では、カップの把持を行ったため、3.3.2節で示した分類の中で、握力把握系動作が可能であるといえる（図3.6A）。握力把握系は、傘の持ち手や金槌、カバンの取っ手などを握る動作なども含まれており、これらを用いたタスクが行えると考えられる。一方で、精密把握系動作実現に向けた検討として、足指の動作範囲の有効活用が考えられる。M4Aでは、データソックスで曲げセンサを1つ用いて足指の開閉動作を測定した。これは、図4.43Aのような状態の検出である。しかし、足指は図4.43Bに示すような状態も構造的には可能である。これらの自由度を活用することで、複数の指を別々に操ることが可能になり、精密把握系動作を行えると考えられる。

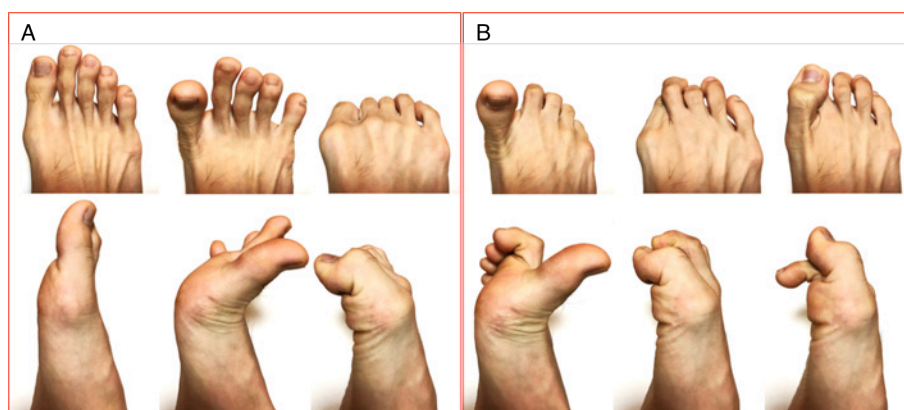


図 4.43: 足指の状態

次に、セルフタッチの有効性について考察する。動作検証時に行ったユーザーの実腕と拡張腕によるセルフタッチは、身体所有感の生起に効果的である可能性

が考えられる。ユーザー A, ユーザー B それぞれがセルフタッチを行うことで、セルフタッチ前後において拡張腕に対する感覚が変わると考えられる。ユーザー B が自身の手をロボットハンドで握るような動作（図 4.40）によって、足指の開閉動作がハンドの開閉に関連付けられ、身体の対応付けが行われると考えられる。Hara ら [45] は、実験参加者が自身の手を棒を用いて触る条件で発生するラバーハンドイリュージョンによって、身体所有感が高まることを明らかにしており、セルフタッチによって拡張腕の身体接続を引き起こすことができると考えられる。

M4A では、拡張腕で触れた際の脚への触覚フィードバック提示を実装できていない。しかし、触覚提示が行われることで、受動的な感覚統合による RHI を実現できる。同時に、セルフタッチを行うことで、脚から拡張腕、実腕への能動的動作の流れとそれに伴う触覚フィードバックが実腕、拡張腕を介して、脚に提示される。

また、拡張腕の身体化に向けては、RHI におけるブラッシング手順と同様に、一定時間の身体接続プロセスが有効であると考えられる。そこで、本研究によって得られた知見をもとに拡張腕の身体化手順を提案する。提案プロセスは、以下の 4 手順である。

1. 2 点間を拡張腕で交互に往復運動する。
2. 2 点間を両手に置き換えて交互にセルフタッチを行う。
3. 1 点において物体の把握動作を繰り返す。
4. 2 点間を物体把握しながら移動し、その往復を行う。

これによって、拡張腕における能動的動作および、感覚フィードバックを介した身体に関連性の認識、複合的な動作を段階を経て学習することができ、拡張腕の身体接続が行えると考えられる。

4.6. 本章のまとめ

本章では、まず、拡張腕を有した身体像への変容を目的に、詳細設計のために VR を用いたプロトタイプを製作した。はじめに多腕形状の身体に対して身体所有

感が生起するのかを確認するため、多腕 VR アバタを用いた実験を行った。実腕と一対の拡張腕を有した条件以外にも複数の腕を提示した条件を行う中で、初期状態における人型形状が身体像の変化に効果的であることを発見した。そこで、人型形状から形状変化する腕を用いたふたつめのプロトタイプによる実験を行った。多感覚統合における身体像の形成と形状変化による身体像の拡張過程において、身体所有感は視触覚統合のみでなく胴体との位置関係にも影響することを発見した。次に、身体動作の分離と再構成をいかに設計するのかを明らかにするためのプロトタイプを製作して実験した。実験では、肘の回転動作を拡張腕の回転に割り当てた。結果は、実験参加者による個人差はあるものの、一度動作を理解すると肘の回転による拡張腕の動作は容易に行われた。これにより、動作方向にある程度の関連性があれば身体動作の再構成が可能であることを確認した。また、実環境における拡張腕の形態について、ロボットアームの試作を通して検証を行った。

以上の知見を踏まえて、Metamorphosis 4 Arms (M4A) の詳細設計と実装を行った。身体動作の再構成に用いる足指データソックスおよび脚から拡張腕への動作変換システムを開発し、M4A シミュレーターで動作確認を行った。次に拡張腕を搭載した M4A コックピッドを開発し、全体のシステムを統合した上で動作検証を行った。動作検証では、実験参加者 2 名は拡張腕とのセルフタッチおよび物体の把持を行った。それぞれ最初の試行にもかかわらず動作を行えている様子を確認した。動作検証を通して M4A において達成した拡張腕の性能について考察し、最後に拡張腕の身体化を行うためのプロセスの提案を行った。

第5章

結 論

本研究では、人間が先天的に有していない身体部位を拡張身体部位と呼び、その一つとして、自由自在に操れる拡張身体部位としての一对の腕（拡張腕）の獲得を目指した。

第1章では、研究背景から、自由自在に操れる身体の一部としての拡張身体部位および拡張腕の獲得を目指すことを明らかにし、その研究目的を示した。

第2章では、拡張腕の身体化を目的として、まず、身体拡張が可能と考えられる根拠を RHI を中心に述べ、身体像の可塑性とその変化に必要な条件を明らかにした。身体像の変化は、視覚や触覚などの複数の感覚種の統合により発生し、その空間的一致性よりも時間的一致性が重要である。次に、多感覚統合による身体像の拡張を示す根拠として、ニホンザルの道具の学習について述べた。ニホンザルの脳と同様の機能は人間にも備わっており、人間も道具の使用によって身体化が起こるといえる。そして、多感覚統合と身体像の拡張を結ぶ心理学的概念として、身体所有感（Body Ownership）と自己主体感（Sense of Agency）を導入した。身体所有感は、RHI 等に見られる受動的な多感覚統合によって生起する感覚である。自己主体感は、能動的動作とその認識に伴って生じる感覚であり、行為主の判断がその発生に影響するが、この判断は必ずしも現実に行われず。こちらでも行為主が誰かということよりも動作に対する因果の認識における時間的一致性が重要であることを明らかにした。これらの感覚を工学的に操作することで、拡張腕の身体化が行えると考えた。

身体拡張の工学的アプローチとして、まず、新たな身体部位をユーザーに取り付ける試みとして、指の追加と腕の追加に関する研究を挙げた。次に、テレグジスタンスを取り上げ、ユーザーとロボットの身体動作を一致させることでユー

ザーの身体像を移動させることができることを確認した。また、ユーザーの生理情報を用いた身体部位の制御手法として筋電義手を取り上げた。

第3章では、2章の議論を踏まえ、まず、拡張腕の身体化に必要な要件を改めて述べた上で、先行研究における身体部位のマッピングに関して論じた。拡張腕に新たな機能を与え、独立動作を行うためには、従来の身体部位の一対一対応あるいは周辺部位を用いたマッピングは有効ではないため、ユーザーの腕とは異なる部位とのマッピングを行うことを提案した。次に、拡張腕へマッピングする具体的な身体部位の検討を行い、脚動作の割り当てを導いた。脚動作を用いて拡張腕を操る上で身体所有感と自己主体感の生起に要求される要素を整理した。最後に、実腕と拡張腕との協調作業を満たすための条件として、拡張腕の動作範囲と手先の物体把握能力について示した。

第4章では、まず、拡張腕を有した身体像への変容を目的に、詳細設計のためにVRを用いたプロトタイプを製作した。はじめに多腕形状の身体に対して身体所有感が生起するのかを確認するため、多腕VRアバタを用いた実験を行った。実腕と一对の拡張腕を有した条件以外にも複数の腕を提示した条件を行う中で、初期状態における人型形状が身体像の変化に効果的であることを発見した。そこで、人型形状から形状変化する腕を用いたふたつめのプロトタイプによる実験を行った。多感覚統合における身体像の形成と形状変化による身体像の拡張過程において、身体所有感は視触覚統合のみでなく胴体との位置関係にも影響することを見出した。次に、身体動作の分離と再構成をいかに設計するのかを明らかにするためのプロトタイプを製作して実験した。実験では、肘の回転動作を拡張腕の回転に割り当てた。結果は、実験参加者による個人差はあるものの、一度動作を理解すると肘の回転による拡張腕の動作は容易に行われた。これにより、動作方向にある程度の関連性があれば身体動作の再構成が可能であることを確認した。また、実環境における拡張腕の形態について、ロボットアームの試作を通して検証を行った。

以上の知見を踏まえて、Metamorphosis 4 Arms (M4A) の詳細設計と実装を行った。身体動作の再構成に用いる足指データソックスおよび脚から拡張腕への動作変換システムを開発し、M4A シミュレーターで動作確認を行った。次に拡張

腕を搭載した M4A コックピッドを開発し，全体のシステムを統合した上で動作検証を行った．動作検証では，実験参加者 2 名は拡張腕とのセルフタッチおよび物体の把持を行った．それぞれ最初の試行にもかかわらず動作を行えている様子を確認した．動作検証を通して M4A において達成した拡張腕の性能について考察し，最後に拡張腕の身体化を行うためのプロセスの提案を行った．

本研究において，身体像変容に基づく拡張腕の獲得の手法を提案し，Metamorphosis 4 Arms の実装によってその有用性を示した．本手法における身体化のプロセスは，拡張腕に限らず，指や脚など別の拡張身体部位に対しても適用可能である．今後の人間拡張におけるアプローチの一つとして本研究が貢献できれば幸いである．

謝 辞

本研究の指導教員であり、幅広い知見からの確な指導やご指摘をしていただきました南澤孝太准教授に心から感謝いたします。研究の方向性について様々な助言や指導をいただきましたチャリスフェルナンド特任講師に心から感謝いたします。研究以外に、講義などで数多くの助言を賜りました岸博幸教授をはじめ、KMDの先生方に心から感謝いたします。私がKMDを選び、今後の進路を決めるきっかけをくださった稲見昌彦教授に心から感謝いたします。

研究活動、リアルプロジェクトとして Reality Media, Embodied Media の一員として活動できる幸運に恵まれたことを感謝いたします。仲谷さん、神山さん、金箱さん、Ben さん、Liwei, Roshan からは、研究者や研究員として様々な洞察をいただきました。Ph.D 学生の Yamen さん、黒木さん、花光さん、柴崎さん、武田さんには、研究活動とリアルプロジェクトの両面でお世話になりました。前田さん、なぎさん、だいやさん、小西さん、すぎもっちゃん、葉月さん、梁さん、拓郎さん、ばるさん、しみさん、それ以外にも多くの学生と同期として共に KMD の生活を過ごせたことに感謝いたします。ここに書ききれない先輩、後輩、共同研究メンバーの皆様にも同様に感謝いたします。

これからの人生において、KMD で皆様から学んだことを活かし、発展させ、世界を変える一助になるように精進していきたいと思います。ありがとうございました。

参 考 文 献

- [1] 海野十三. 海野十三全集 第7巻 地球要塞. 三一書房, 1990.
- [2] Avi Arad, Laura Ziskin (Producers), and Sam Raimi (Director). *Spider-Man 2*. Columbia Pictures, 2004.
- [3] Avi Arad, Kevin Feige (Producers), and Jon Favreau (Director). *Iron Man*. Paramount Pictures, 2008.
- [4] Stelarc. Third Hand. <http://stelarc.org/> Accessed: 2016/12/14.
- [5] 稲見昌彦. スーパーヒューマン誕生！ 人間はSFを超える. NHK 出版, 2016.
- [6] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756–756, 1998.
- [7] 本間元康. ラバーハンドイリュージョン: その現象と広がり. 認知科学, Vol. 17, No. 4, pp. 761–770, 2010.
- [8] H Henrik Ehrsson, Charles Spence, and Richard E Passingham. That's my hand! activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb. *Science*, Vol. 305, No. 5685, pp. 875–877, 2004.
- [9] Sotaro Shimada, Kensuke Fukuda, and Kazuo Hiraki. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PloS one*, Vol. 4, No. 7, p. e6185, 2009.
- [10] K Carrie Armel and Vilayanur S Ramachandran. Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proceedings of*

- the Royal Society of London B: Biological Sciences*, Vol. 270, No. 1523, pp. 1499–1506, 2003.
- [11] H Henrik Ehrsson. How many arms make a pair? perceptual illusion of having an additional limb. *Perception*, Vol. 38, No. 2, pp. 310–312, 2009.
- [12] Arvid Guterstam, Valeria I Petkova, and H Henrik Ehrsson. The illusion of owning a third arm. *PloS one*, Vol. 6, No. 2, p. e17208, 2011.
- [13] 森岡周. リハビリテーションのための脳・神経科学入門 改訂第2版. 協同医学出版社, 2016.
- [14] H Henrik Ehrsson. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1048–1048, 2007.
- [15] Valeria I Petkova and H Henrik Ehrsson. If i were you: perceptual illusion of body swapping. *PloS one*, Vol. 3, No. 12, p. e3832, 2008.
- [16] Mel Slater, Daniel Pérez Marcos, Henrik Ehrsson, and Maria V Sanchez-Vives. Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 2, p. 6, 2008.
- [17] Mel Slater, Bernhard Spanlang, Maria V Sanchez-Vives, and Olaf Blanke. First person experience of body transfer in virtual reality. *PloS one*, Vol. 5, No. 5, p. e10564, 2010.
- [18] Angelo Maravita and Atsushi Iriki. Tools for the body (schema). *Trends in cognitive sciences*, Vol. 8, No. 2, pp. 79–86, 2004.
- [19] 入来篤史. 道具を使うサル. 医学書院, 2004.
- [20] Manos Tsakiris and Patrick Haggard. The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 31, No. 1, p. 80, 2005.

- [21] Torsten Ingemann Nielsen. Volition: A new experimental approach. *Scandinavian journal of psychology*, Vol. 4, No. 1, pp. 225–230, 1963.
- [22] Nicolas Franck, Chl   Farrer, Nicolas Georgieff, Michel Marie-Cardine, Jean Dal  ry, Thierry d’Amato, and Marc Jeannerod. Defective recognition of one’s own actions in patients with schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, Vol. 158, No. 3, pp. 454–459, 2001.
- [23] Sarah-Jayne Blakemore, Daniel Wolpert, and Chris Frith. Why can’t you tickle yourself? *Neuroreport*, Vol. 11, No. 11, pp. R11–R16, 2000.
- [24] Keita Watanabe, Fumito Higuchi, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Cursorcamouflage: multiple dummy cursors as a defense against shoulder surfing. In *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, p. 6. ACM, 2012.
- [25] 松井和輝, 古川正統, 安藤英由樹, 前田太郎. 生得的でない身体部位追加のための身体像の伸展. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No. 3, pp. 243–252, 2015.
- [26] Elahe Abdi, Etienne Burdet, Mohamed Bouri, and Hannes Bleuler. Control of a supernumerary robotic hand by foot: An experimental study in virtual reality. *PloS one*, Vol. 10, No. 7, p. e0134501, 2015.
- [27] Domenico Prattichizzo, Monica Malvezzi, Irfan Hussain, and Gionata Salvetti. The sixth-finger: a modular extra-finger to enhance human hand capabilities. In *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 993–998. IEEE, 2014.
- [28] Faye Wu and Harry Asada. Bio-artificial synergies for grasp posture control of supernumerary robotic fingers. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, Berkeley, USA, July 2014.
- [29] Faye Y Wu and H Harry Asada. “hold-and-manipulate” with a single hand being assisted by wearable extra fingers. In *2015 IEEE International*

- Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6205–6212. IEEE, 2015.
- [30] Faye Y Wu and H Harry Asada. Implicit and intuitive grasp posture control for wearable robotic fingers: A data-driven method using partial least squares. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 1, pp. 176–186, 2016.
 - [31] Sang-won Leigh and Pattie Maes. Body integrated programmable joints interface. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3719–3722. ACM, 2016.
 - [32] Federico Parietti, Kameron Chan, and H Harry Asada. Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 141–148. IEEE, 2014.
 - [33] Federico Parietti and H Harry Asada. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: body stabilization and guidance by bracing. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1176–1183. IEEE, 2014.
 - [34] Susumu Tachi. *Telexistence*. World Scientific Publishing Company, 2009.
 - [35] 舘暲. テレイグジスタンス. 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 215–221, 2015.
 - [36] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Design of telesar v for transferring bodily consciousness in telexistence. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 5112–5118. IEEE, 2012.
 - [37] Andrew B Schwartz, X Tracy Cui, Douglas J Weber, and Daniel W Moran. Brain-controlled interfaces: movement restoration with neural prosthetics. *Neuron*, Vol. 52, No. 1, pp. 205–220, 2006.

- [38] P Dario, MC Carrozza, A Menciassi, S Micera, M Zecca, G Cappiello, F Sebastiani, C Freschi, Polo Sant' AnnaValdera. On the development of a cybernetic hand prosthesis. In *Third IARP International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, IARP2002, Tsukuba, Japan, Dec*, pp. 11–12. Citeseer, 2002.
- [39] 加藤龍, 横井浩史. 個性適応機能を有する筋電義手の開発: fMRI を用いた義手適用効果の検証 (〈特集〉医療・福祉ロボット). 医科器械学, Vol. 77, No. 11, pp. 767–775, 2007.
- [40] 加藤龍, 横井浩史. 適応機能を有する運動意図推定システム: 高機能ロボットハンドと日常生活支援 (〈特集〉生体信号計測の人工知能分野への応用). 人工知能学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 326–333, 2008.
- [41] 大西謙吾, 宮川浩臣, 田島孝光, 斎藤之男. 人間形ロボットハンドの高機能化に関する研究ハンド・アームの動作分類を用いた接触覚センサベース制御. バイオメカニズム, Vol. 16, pp. 155–165, 2002.
- [42] 鎌倉矩子. 手のかたち 手のうごき. 医歯薬出版株式会社, 1989.
- [43] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Techtile toolkit: a prototyping tool for designing haptic media. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, p. 22. ACM, 2012.
- [44] Mhd Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Virtual telesar-designing and implementation of a modular based immersive virtual telexistence platform. In *System Integration (SII), 2012 IEEE/SICE International Symposium on*, pp. 595–598. IEEE, 2012.
- [45] Masayuki Hara, Polona Pozeg, Giulio Rognini, Takahiro Higuchi, Kazunobu Fukuhara, Akio Yamamoto, Toshiro Higuchi, Olaf Blanke, and Roy Salomon. Voluntary self-touch increases body ownership. *Frontiers in psychology*, Vol. 6, , 2015.