

博士論文

人間機械統合
身体システムの構築機序の研究

荒井 謙

Research on the construction mechanism of body systems by humans-machine integration

Abstract

The purpose of this thesis is to create a system that integrates artificial body parts (Supernumerary Robotic Limbs; SRLs) and innate body parts based on the knowledge of cognitive neuroscience and robotics, to capture the changes in body cognition through learning experiments, and to describe a body system in which humans and machines cooperate with each other.

In Chapter 1, as an introduction, I take a multifaceted view of the relationship between humans and tools/technology. The motor learning associated with the use of tools and their embodiment is introduced, an overview of supernumerary robotic limbs for human-machine integration is presented and its challenges are discussed. The purpose of this paper is to elucidate the transformation of body cognition in the human-machine integrated body system from learning to wear the supernumerary robotic limbs to constructing and examining the design theory in the supernumerary robotic limbs. The structure of this thesis and its position in the research field are also clearly stated.

In Chapter 2, I organize the body cognition related to the human-machine integrated body system. Starting with cybernetics, which unifies control and information communication between humans and machines, the physicalization of tools and the accompanying changes in body cognition are explained. In addition, motor learning based on the feedback error learning model and bodily self-consciousness generated by multisensory integrated processing of multimodal body information is discussed, and body cognition in the human-machine integrated body system is defined.

In Chapter 3, I discuss learning to wear an extra-limb robotic arm (VR extra-limb) that operates in a VR environment. The system developed in this study allows the user to view the avatar and the extra-limb robotic arm from a first-person perspective, and the extra-limb robotic arm moves in response to the movement of the toes. When the robot arm touches a ball in the VR space, tactile stimuli are returned to the toes and multimodal body information is presented. I investigated the physical cognition change accompanying

the embodiment of the robot by providing a ball-touching task to promote the learning of wearing the robot arm. The results showed that the wearer adapts to the operation of the extra-limb robotic arm based on the analysis of the time required for the ball-touch task. In addition to the acquisition of a sense of body possession, a sense of agency, a sense of self-position, and body image, which are indicators of the physicalization of the robotic arm after learning to use the robotic arm, the "Supernumerary Limbs Sensation," which refers to the sensation of having more limbs than one's own limbs, was also assessed by subjective evaluation scores. (Supernumerary Limbs Sensation), which refers to the sensation of having more limbs than one's natural limbs, was captured from the subjective evaluation scores. The response time to visual and tactile feedback was measured in the cross-modal matching task, and the response time changed significantly before and after the use of the supernumerary limb robot arm, indicating the possibility that the self-neighborhood space, which is the integrated cognition of visual and tactile information around the robot arm, was generated. In addition, I examined the correlation between the changes in each body's cognition before and after learning to wear the robot arm and found that there was a positive correlation between the self-neighborhood space and the sensation of the extra limb.

In Chapter 4, I describe learning to wear the artificial extra finger that can move independently. The artificial extra finger (6th Finger) used in this study is triggered by EMG signals from the left forearm, which is not normally used and is not affected by the movements of the finger. In addition, the entire left hand is covered with a black glove to maintain visual consistency. Two types of motion conditions were prepared: the Sync condition (with tactile stimuli), in which the wearer moves according to the wearer's plan, and the Async condition (without tactile stimuli), in which the wearer moves randomly. Brain activity was measured by fMRI before and after the wearing task, and body cognition was examined from the standpoint of cognitive neuroscience. The results showed that the sense of bodily possession, the sense of agency, and the acquisition of body image, which are indices when the artificial extra finger is embodied during the Sync condition, were captured from the subjective evaluation scores. The results also showed a trend toward higher brain activity in the primary somatosensory and motor cortices during the Sync condition compared to the Async condition. In addition, the correlation analysis between subjective evaluation scores and changes in brain activity revealed a negative correlation between the sense of bodily possession of the artificial redundant finger and changes in brain activity related to the thumb. These results suggest that the embodiment of the artificial extra finger may alter the brain activity related to the primitive representations of body parts in the primary sensorimotor cortex.

In Chapter 5, I describe the learning process of wearing an octopus-arm VR avatar with hyper-redundant degrees of freedom. The octopus arm VR avatar created in this study has 31 degrees of freedom, far more than the 7 degrees of freedom of the innate upper limb, and is linked to the movement of the right arm. I investigated the physical and cognitive changes that accompany the learning of wearing the avatar through a box-touch task. This experiment was positioned as a preliminary validation, and its main purpose was to examine the perceptual and cognitive changes in the body for features that are far removed from the innate body. As a result, after the participants learned to wear the octopus arm VR avatar, their sense of position expanded compared to before the learning, and I observed a tendency for the body image to change. In addition, the motion analysis of the body measured during the learning task showed that the body tended to contract when the octopus-arm VR avatar was worn, indicating that the body image tended to change. Body perception, which is an indicator of the ability to physicalize the avatar, tended to increase as a subjective evaluation score, but the difference from the control condition was not observed and was limited. However, I did find a softer body sensation (Softer Body Sensation) associated with the Proteus effect.

In Chapter 6, I discuss and examine body cognition and motor learning in the human-machine integrated body system, using the findings from Chapters 3 to 5 as a general discussion. The design theory of the supernumerary robotic limbs was discussed based on the human-machine coupling model, which is a control strategy for the supernumerary robotic limbs. Based on the results of the discussion from sensory, perceptual, and motor perspectives, I proposed a mechanism for the construction of a human-machine integrated body system. In addition, the differences between the embodiment of tools and the human-machine integrated body system are discussed. Finally, the limitations and future prospects of this thesis are discussed as well.

In Chapter 7, I conclude this paper and summarize future developments.

概要

本論文は付加的に供与される人工身体部位（余剰肢ロボティクス）と生得的身体が統合されたシステムを認知神経科学やロボティクスの知見に基づいて制作し、その装用学習実験から身体認知の変容を捉え、ヒトと機械が協調する身体システムを描写することを目的としている。

第一章では、導入として人間と道具・技術の関係を多面的に捉える。道具の使用に伴う運動学習や、その身体化について紹介し、人間-機械の統合を図る余剰肢ロボティクスの概説とその課題を論ずる。そして、余剰肢ロボティクスの装用学習から人間機械統合身体システムにおける身体認知の変容の解明と、余剰肢ロボティクスにおける設計論の構成・検討を図ることを本論文の目的であることを述べる。また、本論文の構成と研究分野における位置付けを明示する。

第二章では、人間機械統合身体システムに関わる身体認知の整理を図る。ヒトと機械の制御と情報通信を統一的に扱うサイバネティクスをはじめとして、道具の身体化や、それに伴う身体認知変容を説明する。また、フィードバック誤差学習モデルによる運動学習や、マルチモーダルな身体情報の多感覚統合処理により生起する身体的自己意識を論じ、人間機械統合身体システムにおける身体認知を定義する。

第三章では、VR 環境下で動作する余剰肢ロボットアーム（VR 余剰肢）の装用学習について述べる。本研究で開発したシステムは、一人称視点でアバタと余剰肢ロボットアームを視認することができ、足先の動きに応じて余剰肢ロボットアームが動作する。また、VR 空間において余剰肢ロボットアームでボールを触った際に足先に触覚刺激が返され、マルチモーダルな身体情報が提示される。ボールタッチ課題による装用学習を設けて身体化の促進を図り、それに伴う身体認知変容を調べた。結果、ボールタッチ課題の所要時間の解析結果から装用者が余剰肢ロボットアームの操作に適応することを示した。また、余剰肢ロボットシステムの装用学習後、余剰肢ロボットアームを身体化できた際の指標となる身体所有感、行為主体感、自己位置感覚、身体イメージの獲得に加えて、生得四肢より多く四肢を持つ感覚を指す「余剰肢感覚（Supernumerary Limbs Sensation）」を主観評価スコアより捉えた。クロスモーダル一致課題にて視覚・触覚フィードバックに対する応答時間を計測したところ、応答時間が余剰肢ロボットアームの装用前後に大きく変化したことからロボットアーム周辺の視覚と触覚の情報統合認知である自己近傍空間が生起した可能性を示した。加えて、装用学習前後におけるそれぞれの身体認知の変容の相関を調べたところ、自己近傍空間と余剰肢感覚との間に正の相関があることが明らかとなった。

第四章では、独立動作可能な人工余剰指の装用学習について述べる。本研究で使用した人工余剰指（6th Finger）は、通常では使用されない左前腕部の共収縮による筋電信号をトリガー

に動作するため、生得手指の動作による影響を受けない。また、左手全体を黒い手袋で覆うことで視覚的な統一性を保持している。動作条件として、装用者の企図に応じて動作する Sync 条件（触覚刺激あり）と、ランダムに動作する Async 条件（触覚刺激なし）の 2 種類を用意し、それぞれの条件で音楽に合わせたタッピング課題を装用学習として課した。また、装用学習前後では fMRI 撮像により脳活動を計測し、認知神経科学の立場から身体認知を調べた。結果、Sync 条件時に人工余剰指を身体化できた際の指標となる身体所有感、行為主体感、身体イメージの獲得を主観評価スコアより捉えた。fMRI を用いた脳活動変容解析では、Sync 条件時に生得母指・示指・小指において第一次体性感覚野・運動野にて Async 条件と比較して脳活動が高くなる傾向を捉えた。また、主観評価スコアと脳活動変容での相関分析から人工余剰指への身体所有感と親指に関する脳活動変化において負の相関がみられた。これらより人工余剰指の身体化が一次感覚運動野における身体部位の原始的な表象に関わる脳活動を変容させる可能性を示唆した。

第五章では、超冗長自由度をもつタコ腕型 VR アバタの装用学習について述べる。本研究で作成したタコ腕型 VR アバタは生得上肢が持つ 7 自由度を遥かに超える 31 自由度を持ち、右腕の動作と連動する。ボックスタッチ課題による装用学習を設け、それに伴う身体認知変容を調べた。本実験は予備検証的な位置付けであり、生得的身体とかけ離れた特徴に対する知覚・認知変容を調べることを主な目的とした。結果、タコ腕型 VR アバタの装用学習後には位置感覚が学習前より広がる結果となり身体イメージの変容する傾向を捉えた。また、装用学習課題中に計測した生得身体の運動解析から、タコ腕型 VR アバタの装用時には運動が縮小する傾向がみられ、身体図式が変容する傾向を捉えた。アバタを身体化できた際の指標となる身体認知については主観評価スコアとして高くなる傾向があったものの統制条件との差分がみられず限定的であった。しかし、プロテウス効果に伴う身体が柔らかくなったような感覚（Softer Body Sensation）を捉えた。

第六章では、全体考察として第三章から第五章にて得られた知見を横断的に用いて、人間機械統合身体システムにおける身体認知および運動学習を議論・考察した。余剰肢ロボティクスの制御戦略である人間機械協調モデルを元に余剰肢ロボティクスの設計論について検討した。また、感覚-知覚-運動それぞれの点から考察した結果から、人間機械統合身体システムの構築機序を提案した。加えて、道具の身体化と人間機械統合身体システムの相違点について考察した。さいごに本論文における制限・限界と今後の展望について述べた。

第七章では、本論文の結論を述べ、今後の展開についてまとめる。

目次

第 1 章	序論：ヒトと道具・技術	1
1.1	身体機能拡張技術により不可能を可能に	1
1.2	問題提起と本研究の目的	7
1.2.1	本研究のアプローチと論文構成	8
1.2.2	本研究の主対象および位置付け	9
第 2 章	人間機械統合身体システムに関わる身体認知の整理	11
2.1	サイバネティクスによる人間-機械のシステムの解釈	11
2.2	人間機械統合身体システム	14
2.3	身体認知と道具の身体化	15
2.3.1	道具の身体化	15
2.3.2	自己意識からみた身体認知	20
2.3.3	身体認知のまとめ	29
2.4	適応・学習を可能にする神経可塑性	30
2.5	ロボティクスにおける身体性	34
第 3 章	生得身体と連動する付加的身体部位の装用学習	36
3.1	システム概要	38
3.2	実験方法	39
3.3	実験結果	43
3.4	考察	48
3.5	まとめ	52
第 4 章	独立動作する付加的身体部位の装用学習	53
4.1	システム概要	53
4.2	実験方法	55
4.3	実験結果	58
4.4	考察	60
4.5	まとめ	62

第 5 章	超冗長自由度系身体部位の装用学習	64
5.1	システム概要と実験方法	65
5.2	実験結果	71
5.3	考察	72
5.4	今後の展開	74
5.5	まとめ	76
第 6 章	人間機械統合身体システムの総合考察および設計論の検討	77
6.1	余剰肢ロボティクス各種の身体認知変容	77
6.2	人間機械統合身体システムに対する総合考察	79
6.2.1	身体認知の描写	79
6.2.2	人間機械統合身体システム制御の状態遷移	81
6.2.3	人間機械統合身体システム構築のための必要条件	82
6.2.4	人間機械統合身体システム制御のダイナミクス	83
6.2.5	余剰肢ロボティクス設計の検討	84
6.2.6	人間機械統合身体システムによる認知・知覚への影響	85
6.2.7	人間機械統合身体システムの構築機序（提案）	87
6.2.8	人間機械統合身体システムと道具の身体化の違い	87
6.2.9	自律制御可能な機械との統合	88
6.3	今後の展望と応用	88
第 7 章	結言	90
	謝辞	92
	参考文献	93

目次

1.1	アーティストによる切り絵作品	1
1.2	運動学習における 3 段階	3
1.3	GE Hardiman	4
1.4	上肢の補綴例	5
1.5	余剰肢ロボティクスの例	6
1.6	Human-Machine coupling system	7
1.7	本論文の構成	9
1.8	本研究の主対象および位置付け	10
2.1	サイバネティック・ループ	12
2.2	Cyborg and Space のイメージ例	13
2.3	Man-Machine Interface(MMI)	14
2.4	余剰肢ロボティクスの認知科学的な分類	16
2.5	マカクサルにおける道具の使用による行動変容	17
2.6	フィードバック誤差学習モデル	18
2.7	オブザーバーモデル	19
2.8	ルビンの壺	20
2.9	Narrative Self と Minimal Self	21
2.10	ラバーハンド錯覚実験の様子	22
2.11	コンパレータモデル	23
2.12	体外離脱錯覚 (Out-of-Body Illusion)	24
2.13	自己受容求心性神経接続	25
2.14	Ian Waterman	26
2.15	ヒトの自己近傍空間例	26
2.16	身体化感覚における判別と感知	27
2.17	身体的自己意識を説明するための脳領域図	29
2.18	経験的・発達の・臨床的観点からみた Minimal self	31
2.19	人間機械統合身体システムと身体認知の関係性	31
2.20	神経可塑性の各レベルにおける説明図	32

vi 図目次

2.21	Penfield が描いた Homunculus	32
2.22	体性感覚野と運動野における神経情報処理	33
2.23	Kolasinski による体性感覚運動野における生得各指の脳活動変容の調査	34
2.24	サブサンプシオン・アーキテクチャ	35
3.1	VR 余剰肢のシステム図	37
3.2	余剰肢ロボットアームの装用学習実験の概要図	39
3.3	装用学習タスクであるボールタッチ課題の所要時間	44
3.4	IE-CCE score	45
3.5	Embodiment Questionnaire Results	46
3.6	Correlation between the change in IE-CCE under the same-side condition and the change in response to the embodiment score Q3 before and after learning	47
3.7	Correlation between the changes in response to the embodiment score Q1 and Q4 before and after learning	47
4.1	独立動作可能な人工余剰指	54
4.2	指関節の力学モデル	55
4.3	人工余剰指の装用学習実験の環境概観	56
4.4	fMRI 撮像中における各生得指に対する脳神経活動を取得するための課題（検証タスク）	57
4.5	人工余剰指に対する身体化に関する主観評価アンケート結果	59
4.6	HCP Pipeline による前処理	60
4.7	装用学習前後のコントラスト画像を用いたグループ解析:Sync/Async 条件間比較	60
4.8	脳活動変容と身体化指標における相関	61
4.9	Third Thumb	62
5.1	設計・使用した VR 腕型アバタ	67
5.2	設計・使用したタコ腕型アバタの配置	67
5.3	運動タスクシステム構成	68
5.4	指先・手首の位置感覚の測定	69
5.5	主観的な身体的感覚に関するアンケート結果	71
5.6	指先・手首の位置感覚の変化率	72
5.7	運動タスク中の関節の平均移動量	73
6.1	余剰肢ロボティクス各種の身体認知変容まとめ	78
6.2	生得身体における身体動作制御	79
6.3	余剰肢ロボットを用いた身体動作制御	80

6.4	VR 余剰肢における身体動作制御	81
6.5	6th Finger における身体動作制御	81
6.6	タコ腕型 VR アバタにおける身体動作制御	82
6.7	人間機械統合身体システムの状態遷移図	82
6.8	装用学習初期における運動学習状態	84
6.9	装用学習後期における運動学習状態	84
6.10	身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル	85
6.11	VR 余剰肢における身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル	86
6.12	6th Finger における身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル	86
6.13	タコ腕型 VR アバタにおける身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル	86
6.14	人間機械統合身体システムの構築機序（提案）	87

表目次

2.1	身体イメージと身体図式の比較	20
2.2	身体認知の特徴	30
3.1	VR 余剰肢ロボットアーム装用学習実験における主観評価アンケート	42
4.1	人工余剰指に対する身体化を評価するための主観評価アンケート	58
5.1	VR アバタに対する身体化に関する主観評価アンケート	70

第 1 章

序論：ヒトと道具・技術

1.1 身体機能拡張技術により不可能を可能に

人間は道具を巧みに操ることにより生得的な身体機能では難しい作業を可能とし、そして、問題を解決してきた。例えば、切り絵作家はペーパーカットナイフを巧みに操り、作品を作成している (図 1.1)。ナイフを使用せずに生得的な手で作成するのは難しいため、道具を上手に使用している例と言える。他の例では、足に不自由があり足取りが覚束ない場合は、松葉杖や杖を操ることで自身のバランスを支え歩行を可能にしている。また、工場の生産ラインでは、作業効率化を図るために治具を作成し、不便さを解消している。これらの例が示すように、人間は道具を巧みに操り、時には作ることで、不自由さや問題を解消し、目的を達成している。

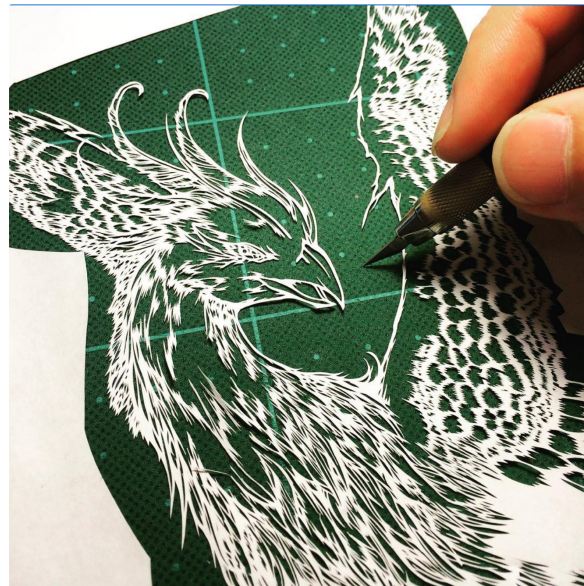


図 1.1: アーティストによる切り絵作品
切り絵作家 Jun 氏の Instagram より引用 ^{*1}

^{*1}https://www.instagram.com/p/BDcuRflhzJD/?utm_source=ig_web_copy_link

2 第1章 序論：ヒトと道具・技術

ホモ・ファーベル 人間の本質は、工作人（ホモ・ファーベル; Homo Faber）と定義されるように「何か（モノ・コト）を創造し、それらを使用することにある」と言われている [1]. フランスの哲学者である Henri Bergson は自身の著書である「L'Évolution créatrice（英題：Creative Evolution, 邦題：創造的進化）」において「工作人」を次のように説明・定義した.

“ It is of man’ s essence to create materially and morally, to fabricate things, and to fabricate himself. Homo Faber is the definition I propose … ”

この一節は、著書の主題である創造的衝動による持続的な進化（elan vital; 生命の躍動）の中で人間の本質に対する説明として取り上げられている．ここで該当する”モノ・コト”は道具やそれらを作成・操作するための技術なども含む．

技術の習得と認知の変容

運動学習・制御 身体機能拡張技術を効果的に活用するには、少なからずとも我々は抵抗なく技術を取り扱えることが前提となる．そのためには運動学習により技術・道具の使用に適応する必要がある、これにより細かな調整や機微な動作が可能となる．運動学習の過程に関する概念的説明として、Fitts と Posner による 3 段階説がある [2]（図 1.2）.

- (1) 認知段階（cognitive stage）
- (2) 連想段階（associative stage）
- (3) 自律段階（autonomous stage）

(1) 認知段階は、学習初期に該当し、意識的に身体動作を学ぶ段階を指す．この時の認知負荷は比較的大きく、身体動作のひとつひとつを確認しながら、認知的な情報処理を行うこととなる．パフォーマンスが大きく向上する一方で、パフォーマンスは不安定となることが特徴である．(2) 連想段階では、目的動作のために適切な調整をする状態であり、意識的な身体動作が依然必要となる．また、(1) 認知段階と比較して、学習スピードは鈍化する．身体動作を一度見直し、再度、身体動作を組み直す作業も必要となる場合もある．(3) 自律段階では、運動習得の最終段階であり、多くの時間・練習が必要となることが多い．すべての運動がほぼ自動化され、認知負荷も最小化されるため、他の情報・行動に対して注意を払うことができる状態となる [3]（フロー状態に入るともいう）．一方で、自律段階では、反応的に動作するため修正が認知段階・連想段階とは異なり難しくなる．身体機能拡張技術が問題なく活用できるときには、図 1.2 の左矢印に示した認知負荷は抑制されていくこととなる．

道具の身体化 道具の使用に十分に適用できた時、ヒトの知覚は変容し、道具を身体の一部のように扱えるようになることができると認知科学の分野にて知られており、これを道具の身体化（Tool Embodiment; Tool-Body Assimilation）という [4, 5, 6, 7]．認知科学だけでなく、神経科学の観点からも多く検討されており、有名な例として、入来らはマカクサルに道具の使用方法を学習させ、その時の脳活動の変容を検証・報告している [8, 9, 10, 11]．哲学の分野においては、Maurice Merleau-Ponty は道具の身体化を次の様に説明している [12]

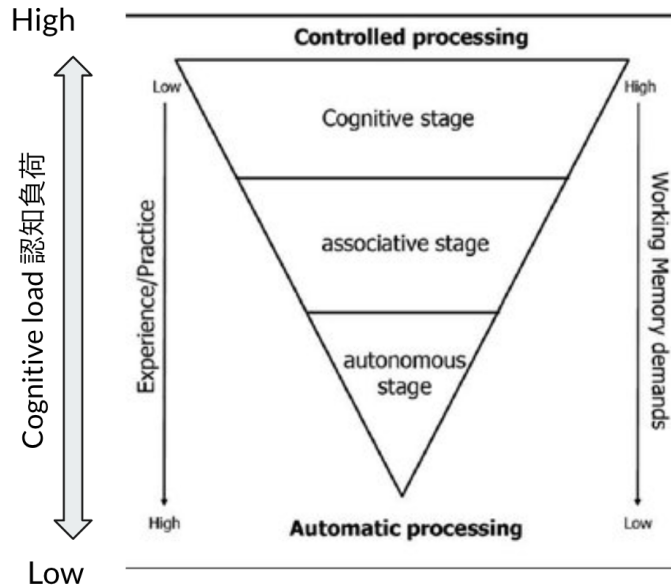


図 1.2: 運動学習における 3 段階 [2] より引用. Fitts と Posner による運動学習段階を説明する図. 練習・経験の軸とワーキングメモリの要求（認知負荷と言え換えられる）の軸，それぞれから捉えている．逆三角形となっているのは運動動作の修正可能かどうかの余地を示している．

”盲人が杖を繰り返し使用することにより盲人が持つ自己の身体への心象が杖を含めるようになり，身体的補助具として機能する”

身体機能拡張技術を十分に活用出来るときには，Merleau-Ponty の言葉にある通り，技術・道具は自己身体の一部として取り込むことが考えられる．

余剰肢ロボティクス 身体機能拡張として四肢を付加することを目指した余剰肢ロボティクス（Supernumerary Robotic Limbs; SRL）は，感覚-運動インターフェースを介して余剰肢ロボットを身体へと統合を図っている [13]．余剰肢ロボティクスの制御には様々な手法があり [14]，四肢の動きとの連動（Limb mapping） [15]，筋電信号（EMG; Electromyogram）との連動 [16] などが挙げられる．ブレインマシンインターフェースを用いた操作方法もあるが数は多くない．Hussain らによれば余剰肢ロボティクスの特徴を下記のように挙げている [13]．

- ウェアラブルかつ生得四肢と協調して環境やタスクと相互作用する
- 感覚-運動インターフェースを介して人体との統合を図る
- ユーザーが感覚-運動能力の自然な拡張としてロボットを効果的に感じる

これらを踏まえると，余剰肢ロボットシステムは生得的な四肢と同様に操作者の企図に応じて随意に動作することを期待していると考えられる．次に人間からみたロボティクスの活用用途について列挙し，人間-ロボティクスの関係性を整理する．

4 第1章 序論：ヒトと道具・技術

強化 enhancing 生得的な身体能力では不可能なレベルの怪力を機械による実現を試みるアプローチを指す。その一例として、ゼネラル・エレクトリックは1965年に陸軍と海軍との共同プロジェクトにて人間の力を25倍に増幅する動力式外骨格である Hardiman を開発した（図1.3）[17]。人間が操作し、システムの動作・運動は外骨格が担う形式を取る。開発者のひとり

は、下記の様にコメントしており、人間と機械の共生・融合を検討していることが読み取れる。

“Man and machine can be combined into an intimate, symbiotic unit that will perform essentially as one wedded system,”



図 1.3: GE Hardiman ^{*1}

代替 substituting 生得身体部位の置き換えにより、目的に応じた動作の実現、または、欠損部位の代替を図るアプローチを指す。例えば、事故などにより四肢を欠損してしまったケースでは、補綴（Prosthesis）により欠損部位の代替を図る。欠損により固有受容感覚が失われた場合、姿勢・位置を知ることが難しくなるため、エンドエフェクタの情報をフィードバックする方法が多く検討されている。Marasco が開発した義肢は上肢欠損者に体性感覚を想起させる機構を持っており、装用者はエンドエフェクタからのフィードバック信号を得ることができる [18]（図 1.4）。

^{*1}<https://www.ge.com/news/sites/default/files/Reports/uploads/2016/02/04150209/ge-hardiman-1-copy.jpeg>

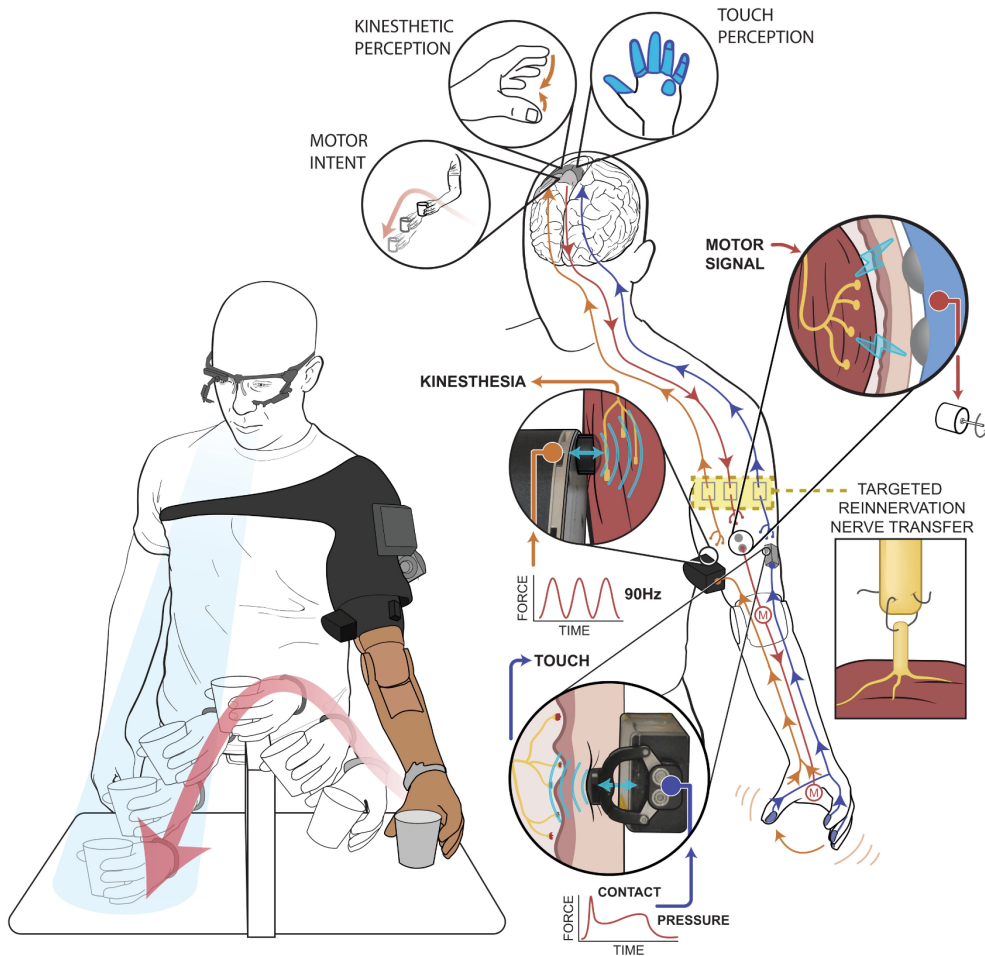


図 1.4: 上肢の補綴例 [18] より引用。触覚、運動感覚、動作意図を同時に統合したニューロ・ロボティクスの人間統合型双方向性上肢義足システム。複雑な運動感覚による手の知覚を活性化させることを目指している。

追加 adding 生得四肢のように扱える身体部位の追加により身体機能の拡張を図るアプローチを指し、余剰肢ロボティクスが主に該当する。エンドエフェクターの設計には、人が持つ骨格筋と類似した”Rigid-type”と超冗長自由度系の柔軟な動作をする”Soft-type”の2種類がある [14]。Rigid-type の一例に Bonila と Asada らは人間の肩に固定するウェアラブルロボットがある。Robot-on-the-shoulder と呼ばれるロボットアームが事前に動作を学習し、頭上空間での作業支援をしている [19] (図 1.5-左)。また、Soft-type での一例として、Hussain は慢性脳卒中患者が麻痺肢の失われた手指機能を補うために設計された装着型ロボット義手である Soft-SixthFinger を開発した [20] (図 1.5-右)。本デバイスは前頭筋（眉毛周辺）を収縮させることでデバイスを制御することができる。

上記にてロボティクスと生得身体との関係性を整理した。余剰肢ロボティクスが付加的な身体部位を供与する物であり、従来までの強化型や代替型の機能拡張とは種類が異なることが明

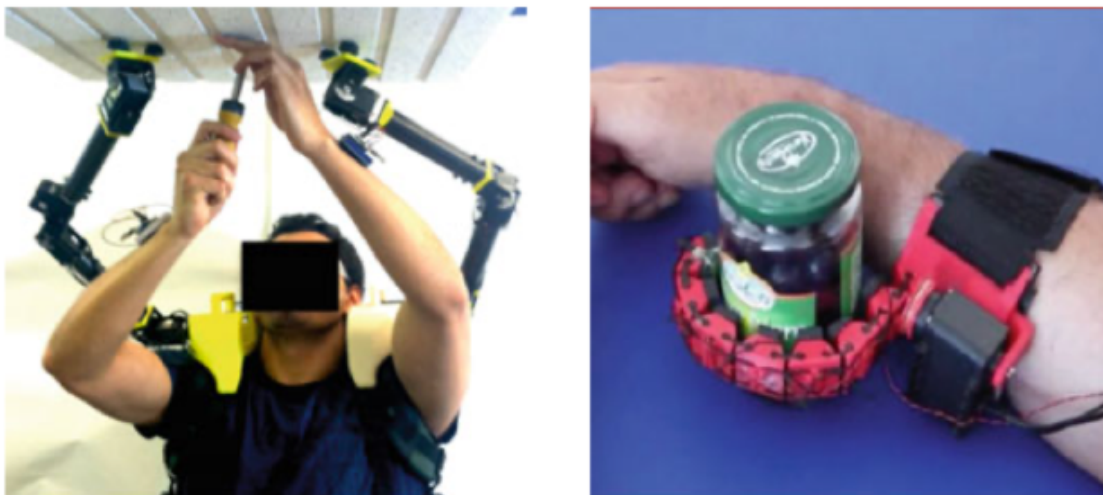


図 1.5: 余剰肢ロボティクスの例 左図は Bonila, Asada らが開発した Robot-on-the -shoulder システムを指す [19]. 右図は Hussain らが開発した脳卒中患者のための Soft-SixthFinger デバイスを指す [20].

らかとなった。続いて、余剰肢ロボティクスの制御方法について取り上げる。

余剰肢ロボットシステムの制御戦略として Human-Machine-coupling system (人間機械協調システム) が提案されている [21, 22, 23] (図 1.6)。本制御戦略モデルは 3 段階に分けられており、上位層 (Intention Recognition) では脳や筋骨格の生体信号から人間の動作を検出する。加えて、余剰肢ロボティクスのエンドエフェクタ (ここでは SRL が該当する) の情報を取り込むことでフィードバック制御を図り、次の中間層へ信号を伝達する。中間層 (Assistant Planner) では、上位層から伝達された信号を動作信号へ変換し、次へ伝達する。伝達された動作信号はエンドエフェクタからのフィードバック信号を参照し、動作の調整を図る。下位層 (Controller) では、伝達された動作信号を元にアクチュエーターを動作させる。上位層・中間層から伝達された動作信号に対し遅延なくアクチュエーターへ情報伝達することが必要となるため、高精度な追従動作が求められる。アクチュエーターからの信号はエンドエフェクタおよび装用された身体部位へ伝達される。エンドエフェクタの状態は常にトラッキングされており、システム調整時に使用される。なお、Man-Machine interface に関する明確な言及は見当たらなかった。一方、ヒトの身体側では、余剰肢ロボティクスを装用した身体部位および環境との相互作用から動作情報を感覚器 (ここでは目や皮膚が該当) から情報を取得し、知覚・認知を介して次の動作への参照信号として活用される。本モデルの説明では身体認知のあり方やその変容については特に詳細に示されていない。このように制御戦略のモデル化が試みられている一方で、明確な設計指針はなく模索状態にあるといえる。

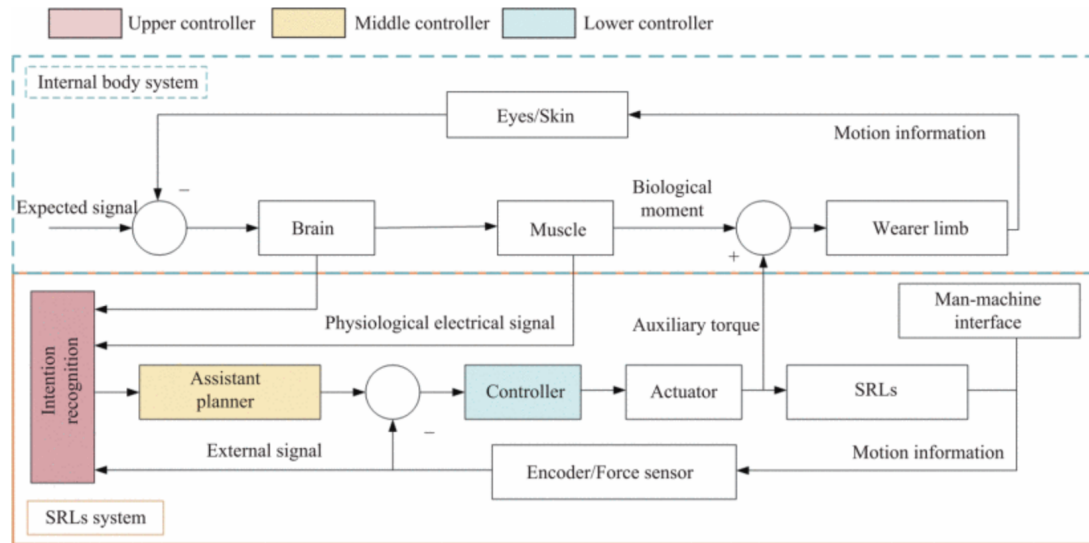


図 1.6: Human-Machine coupling system (人間機械協調システム) [21] より引用. 上段の青い点線で囲われた領域が人間の情報処理機構を指し, 下段のオレンジ色実線で囲われた領域が余剰肢ロボティクス (SRL) のシステムを指す. SRL 内部では, 上位層 (Intention Recognition), 中間層 (Assistant Planner), 下位層 (Controller) の3段階に制御プロセスが分かれている. 人間と相互作用するのは入力のための上位層と出力時の副次的影響を受けるエンドエフェクタ周辺となっている.

1.2 問題提起と本研究の目的

余剰肢ロボティクスは生得身体との統合を図ることを目的としており, 自分の身体のように扱えることが重要となるが, その身体認知は十分に調査されていない. 'We feel well as long as we do not feel our body' [24] といわれるように身体に対する意識・注意が向かない状態であれば, 身体の状態および動作に抵抗を感じないと言われている. つまり, 身体動作時における認知作業負荷が抑えられている状態 (認知的透明性) [25] を生成することができれば, 外来部位についても自分の身体のように扱えるとも解釈できる. 事実, 認知作業負荷が高い状態にある時には, 操作のクオリティや精度に支障が生じることが知られている [26]. 余剰肢ロボットシステムの設計面を配慮し, 認知負荷が抑制することができれば, 操作者にとってシステムは Seamless に動作し, システムが身体の一部のように扱える状態となると考えられる. しかし, 従来の余剰肢ロボティクスの研究においては, システムを身体の一部として扱えるかどうかについては十分に調べられていない.

道具の身体化の議論において「代替・転写」や「延伸・縮小」する知覚変化の検討は多く報告されてきた一方で, 「付加」する知覚変化を検討した先行研究は少ない. また, 付加された身体部位に関する知覚について検証した先行研究については現象論的検討が主だっており, いずれの付加的身体部位は随意的動作はしない. 例えば, ラバーハンド錯覚の拡張した余剰手錯

覚 (Supernumerary hand illusion) ではゴム製の手 (ゴム手) を付加することで余剰肢を付加することを試みているが、ゴム手は随意動作はしない [27, 28, 29]. 余剰手錯覚実験の結果、生来の手に対する所有感を失うことなくゴム製の手に対しても所有感を覚えることが報告されている。また、神経科学において余剰肢がないにも関わらず余剰肢を知覚する症例が確認されており、中枢神経系の障害により余剰幻肢 (Supernumerary Phantom limbs) が生じると報告されている [30]. これらの先行研究は、四肢の「付加」に対する知覚・現象を言及しているが「付加」を目指した機能拡張に対する身体認知の変化を解明しているものではない。身体部位の付加による機能拡張を目指す余剰肢ロボティクスの分野においても、余剰肢を含めた身体表現を獲得できているかについては、十分に評価されてはいない。

余剰肢ロボティクスの制御戦略にて紹介したように、その制御方法はモデル化が試みられているものの、評価指針や方針は議論の余地がある。余剰肢ロボティクスのアプローチは Bonila や Hussain らによる先行例にあったように用途に応じた提案はあるが、タスクパフォーマンスの改善およびその評価で終始している。人間と機械・システムの統合という観点で、その設計指針や方法を検討し、余剰肢ロボティクスのシステム設計指針となるものが打ち出すことができれば、研究分野のさらなる発展や、異なる視点やアプローチを議論を促進する可能性がある。

そこで本研究では、付加的に供与される人工身体部位 (余剰肢ロボティクス) と生得的身体が統合されたシステムを認知神経科学やロボティクスの知見に基づいて制作し、その装用学習実験から身体認知の変容を捉え、人間-機械統合身体システムである余剰肢ロボティクスの設計論について議論・検討する。

1.2.1 本研究のアプローチと論文構成

本研究では余剰肢ロボットシステムを3種類用意し、それぞれの装用学習実験から身体認知の変容を捉える。

生得身体と連動する付加的な身体部位の装用学習 (VR 余剰肢) [既存動作従属型 × ヒト型] 本研究で開発したシステムは、一人称視点でアバタと余剰肢ロボットアームを視認することができ、足先の動きに応じて余剰肢ロボットアームが動作する。また、VR空間において余剰肢ロボットアームでボールを触った際に足先に触覚刺激が返され、マルチモーダルな身体情報が提示される。ボールタッチ課題による装用学習を設けて身体化の促進を図り、それに伴う身体認知変容を調べた。

独立動作する付加的な身体部位の装用学習 (6th Finger) [既存動作独立型 × ヒト型] 本研究で使用した人工余剰指 (第6指) は、通常では使用されない左前腕部の共収縮による筋電信号をトリガーに動作するため、生得手指の動作による影響を受けない。また、左手全体を黒い手袋で覆うことで視覚的な統一性を保持している。動作条件として、装用者の企図に応じて動作する Sync 条件 (触覚刺激あり) と、ランダムに動作する Async 条件 (触覚刺激なし) の2種類を用意し、それぞれの条件で音楽に合わせたタッピング課題を装用学習として課した。ま

た、装用学習前後では fMRI 撮像により脳活動を計測し、認知神経科学の立場から身体認知を調べた

超冗長自由度系身体部位の装用学習（タコ腕型 VR アバタ）[既存動作従属型 × 非ヒト型] 本研究で作成したタコ腕型 VR アバタは生得上肢（片側）が持つ 7 自由度を遥かに超える 31 自由度を持ち、右腕の動作と連動する。ボックスタッチ課題による装用学習を設け、それに伴う身体認知変容を調べた。ここでは予備検証的な位置付けとして生得的身体とかけ離れた特徴に対する知覚・認知変容を調べることを主な目的とした。

本研究で使用する余剰肢ロボットシステム 3 種類の装用学習を通じて、身体認知の変容を捉え、余剰肢ロボティクスにおける人間機械統合身体システムを検討する。装用学習実験の手法や詳細のすべては統一されていないが、帰納的かつ実験的にその解明を試みる。そして、総合考察として余剰肢ロボティクスの制御戦略である人間機械協調モデルを見直し、人間機械統合身体システムにおける身体認知と運動学習を検討する。図 1.7 に本論文の構成を示す。

第 1 章：ヒトと道具・技術 / 目的・構成

第 2 章：人間機械統合身体システムに関わる身体認知の整理

第 3 章：従属 × ヒト型



第 4 章：独立 × ヒト型



第 5 章：従属 × 非ヒト型



第 6 章：人間機械統合身体システムの総合考察および設計論の検討

第 7 章：結言

図 1.7: 本論文の構成

1.2.2 本研究の主対象および位置付け

図 1.8 に本研究の主な対象と関連研究からみた位置付けを示す。道具の身体化に伴う身体認知を付加的な身体部位となる余剰肢ロボティクスから検討する。また、余剰肢ロボティクスの装用学習を通じて、人間機械統合身体システムにおける身体認知と運動制御・学習を捉えることを試みる。道具の身体化だけで考えれば、入来らが行ったマカクサルに道具の身体化に伴う脳神経活動の変容などが関連する [8]。余剰肢ロボティクスだけで考えれば、Bonilla が開発した

Robot-on-the-shoulder などが関連する [19]. 運動制御・学習については, Wolpert・川人らによる内部モデルによる運動制御の説明が関連する [31]. それぞれの分野との境界・重複している研究などを考えると, 道具の身体化と余剰肢という観点でみれば, Arvid らによる余剰手錯覚がある [27]. 余剰肢ロボティクスと運動制御・学習からみれば, 余剰肢ロボティクスにおける人間機械協調モデルが関連する [22]. 運動制御と道具の身体化(身体認知)からみれば, Marasco らによる体性感覚フィードバックにより補綴の操作を学習する研究が関連する [18]. 本研究で主な対象としている領域は先行研究と部分的な重なりはあるものの, 完全に一致するものはみられない.

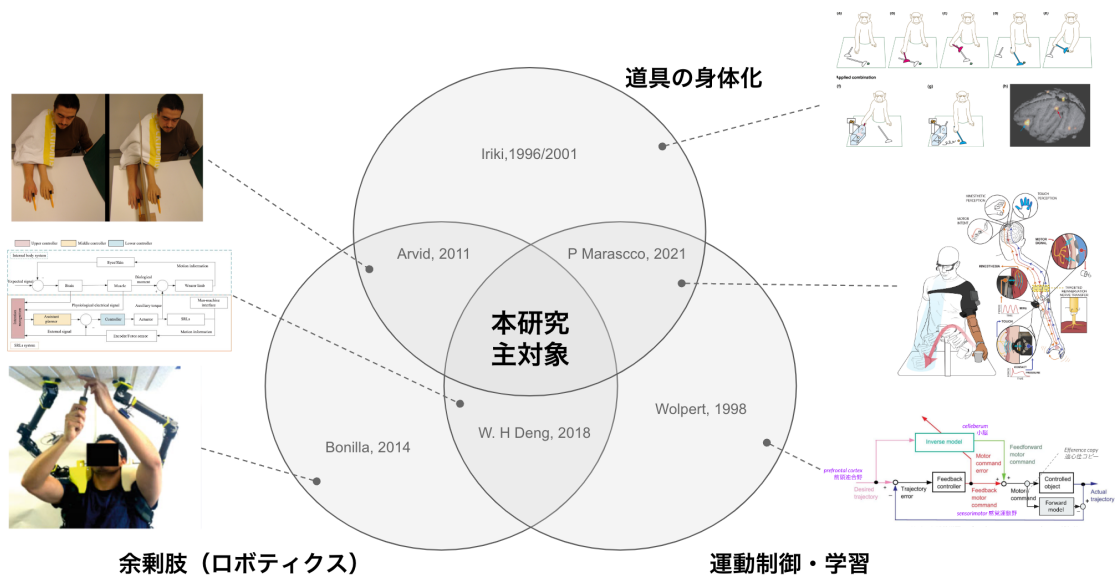


図 1.8: 本研究の主対象および位置付け

第 2 章

人間機械統合身体システムに関わる 身体認知の整理

2.1 サイバネティクスによる人間-機械のシステムの解釈

サイバネティクスとは 生物と機械における制御と通信を統一的に扱うフレームワークを指し、Norbert Wiener により提唱された [32]. サイバネティクスは通信工学と制御工学を融合した理論であり、学際的な研究領域であることが主張されている. 制御工学では、入力と出力の関係を表す伝達関数から、その入出力システムの挙動を描写しており、その安定性を評価をすることを目的としている. 一方の通信工学では、Shannon の情報理論 [33] にて説明される情報の通信方式や符号化方式を扱うものである. 特にサイバネティクスにおいては、アナログやデジタルなどを分け隔てなく扱い、各要素間の関係性および系を説明するために用いられる.

サイバネティック・ループ (図 2.1) はフィードバック制御として知られており、サイバネティクスが自律的なシステムであることを裏付けるものである. ある機能を持ったシステムが目的に応じて行動・作用をした際に発生した反作用を取り込むプロセスを指す. このプロセスを複数回行うことで徐々に調整・制御がなされ、目的を達成することができる. 例えば、道具の使用に慣れる過程についても同様のことがいえる. はじめは、その使用方法について知ることから始まり、少しずつ慣れていくと器用に使えるようになる. これはサイバネティック・ループを介したフィードバック誤差の収束として説明される一例といえる. この例にみられたように、フィードバック誤差の収束は適用 (adaptation) や学習 (Learning) における説明で取り上げられる.

サイボーグ サイバネティクスの応用例として、人間の身体機能を地球外環境の要件に合わせて変化させるために自律制御を拡張する人工生物システムである ”Cyborg” が Kline および Clynes らにより執筆された “Cyborgs and Space” [34] にて提案された (図 2.2). Cyborg の言葉は **Cybernetic Organism** の略称であり、自律制御可能 (Cybernetic) な生体器官 (Organ) を持つ生命体として定義されている. 自律制御可能な人間-機械システムとして

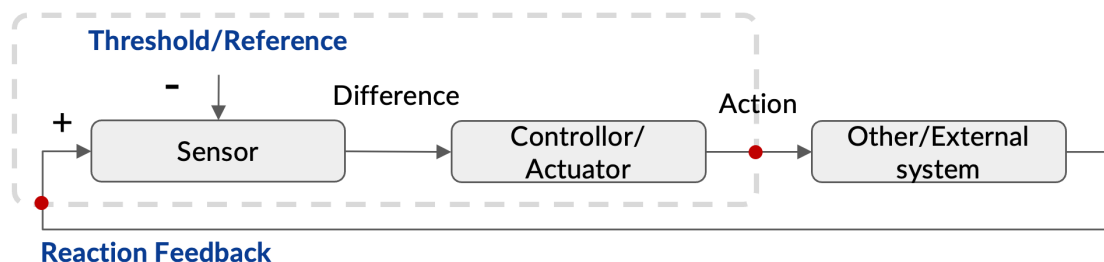


図 2.1: サイバネティック・ループ ある機能を持ったシステムが目的に応じて行動・作用する。続いて、その反作用を取り込み、徐々に調整され目的が達成される。図中の言葉で述べれば、Threshold/Reference と Reaction Feedback の比較照合により誤差が評価され、その収束が図られる。点線部位は人間・生物側の内部を指し、赤い点は外界との相互作用するポイントを示している。

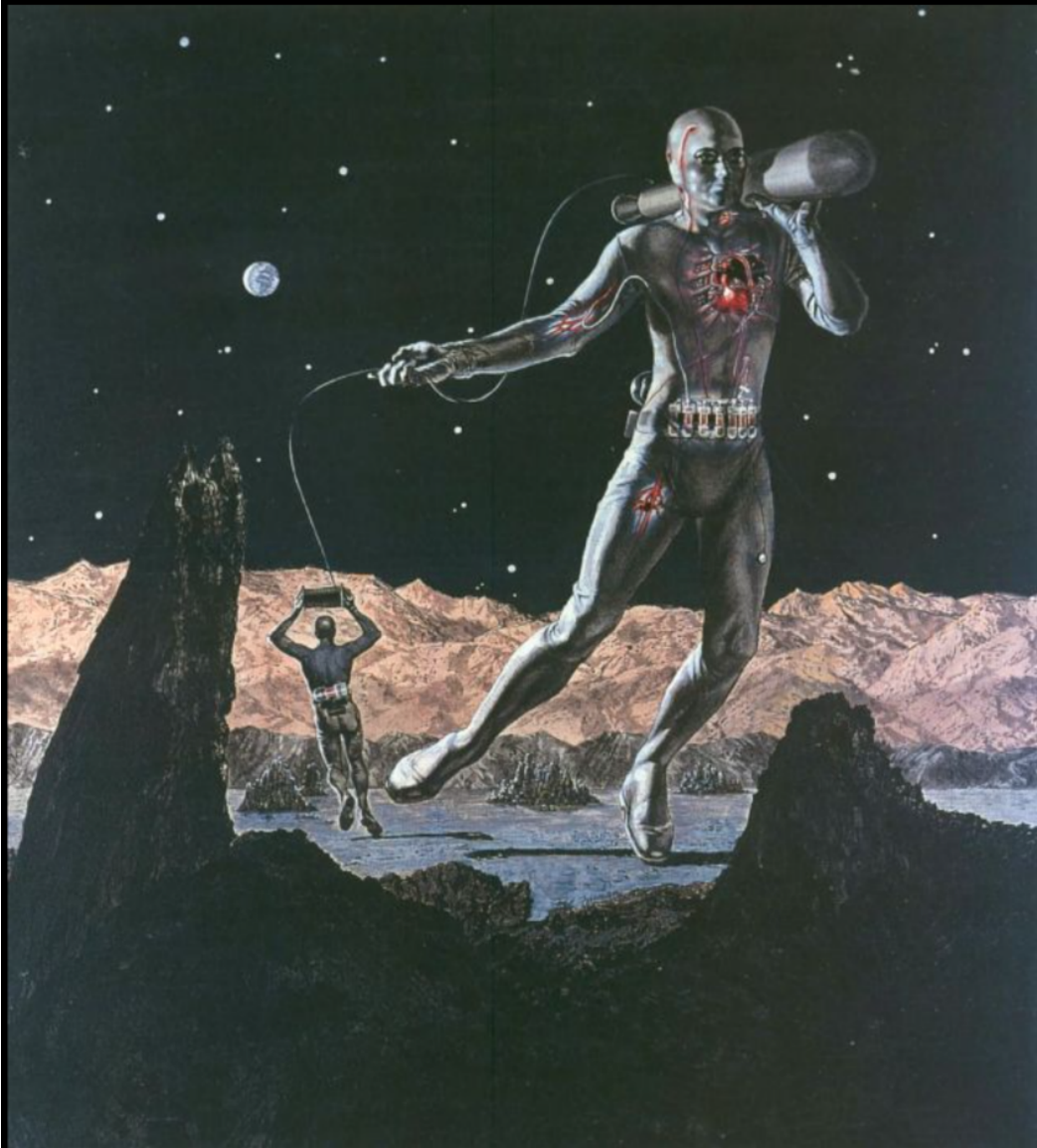
必要な要件として、人間が生得的に持つ恒常性制御と協調することが挙げられる。恒常性（ホメオスタシス）は、内部環境を一定の状態を保ち続けようとする性質を指し、体温や血圧、体液の浸透圧、ウイルスの排除、創傷の修復など生体機能全般を指す [35]。Cyborg 自体はコンセプト提案であるが、関連した実用例として心拍に問題があり脈拍不安定の患者への治療処置となる心臓ペースメーカーなどがある。

サイバネティクス・ループ（図 2.1）では、“Sensor”を外部と内部から伝達された情報処理要素として説明している。視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚といった五感は外界に対するセンサとして働き、身体深部感覚や体性感覚といった姿勢や筋肉の動作を検知する内界センサとしても働く。これらの信号を分類処理することで知覚し、最終的には知覚された情報の解釈として認知がなされる [36]。つまり、Sensor は実際には感覚/センシング（Sensing）、知覚（Perception）そして認知（Cognition）を担っている。感覚・知覚・認知された情報を元に運動情報が更新され（Controller）、実際の動作（Actuator）へつながれる。

ここまで示したように、サイバネティクスは身体とそれを取り巻く外部環境をひとつのシステムとして統一的に捉えるフレームワークと考えることができる。人間-機械統合身体システムにおいては、道具・技術も同様にこのフレームワークとして記述できることが期待される。機械と統合された際にヒトの感覚・知覚・認知・運動は影響を受けることとなるが、それらがどのように変容していくのかを次項でみていく。

*1<https://cyberneticzoo.com/bionics/1960-cyborg-kline-and-clynes-american/>

1960 – Cyborg – Kline and Clynes (American and Austrian)



Painting by FRED FREEMAN, originally appearing in the July 11, 1960 issue of LIFE Magazine.

図 2.2: Cyborg and Space のイメージ例 ^{*1} 発刊当時に LIFE magazine にて掲載された Cyborg and Space が実現したときの様子を示している。手前にいる Cyborg は宇宙空間でも正常に生命活動を行うため技術が施されている。

2.2 人間機械統合身体システム

本論文では、人間機械統合身体システム（Man-Machine Integrated Body System）は「人間-機械がひとつの身体システムとして機能する」ものを指す。前節のサイバネティクスにて述べたように、感覚・認知・運動が情報連携する身体システムが生得的な身体だけではなく、機械・技術・道具も含めてひとつの系として機能することとなる。人間-機械に介在し相互作用を可能にする Man-Machine Interface（MMI）は人間-機械統合に着目点として挙げられ [37]（図 2.3）、マルチモーダルな感覚器（多感覚）を介した機械との対話により人間-機械の統合が可能になるといわれている [38]。

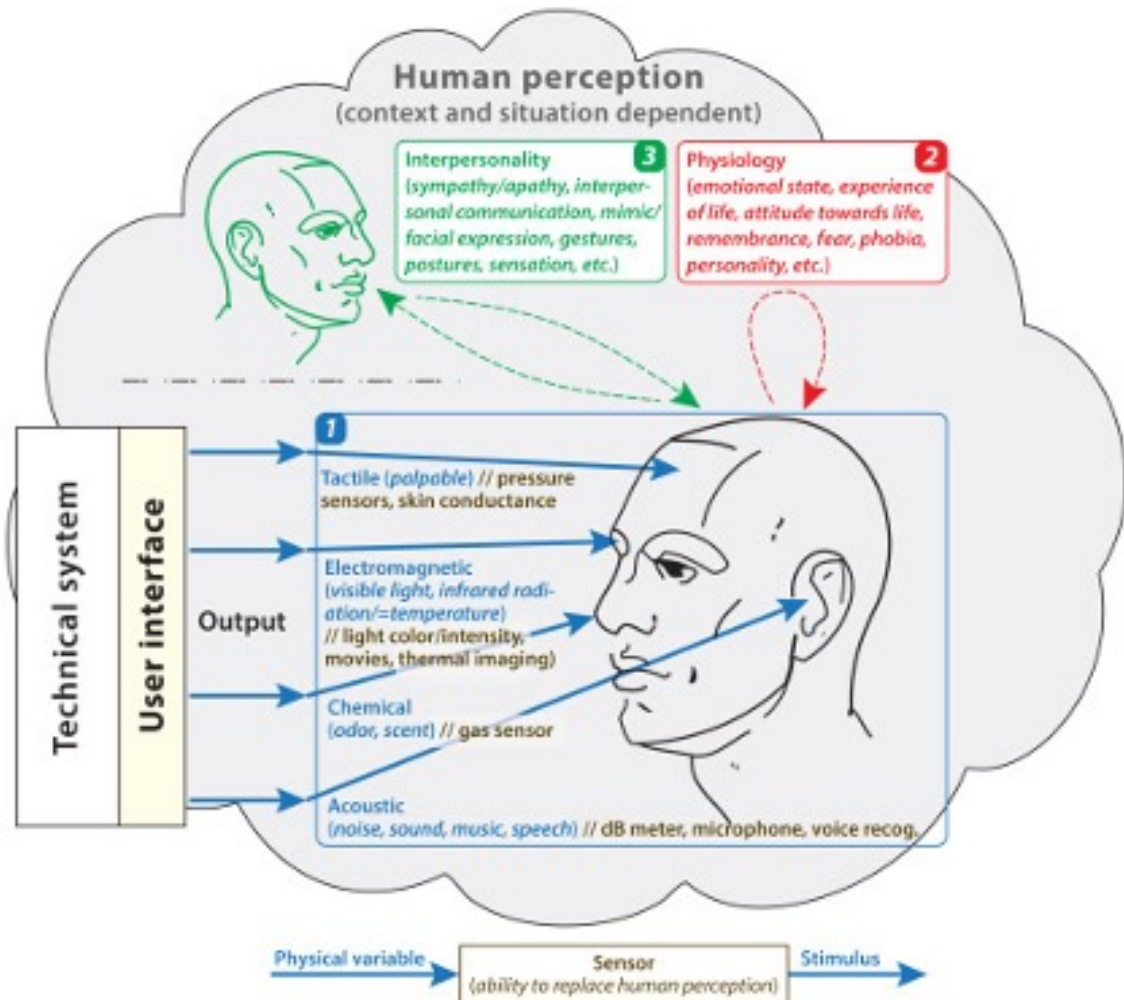


図 2.3: Man-Machine Interface(MMI) [37] より引用。人間-機械に介在し、相互作用することで人間と機械の間で情報交換を可能にしている。

なお、本論文にて取り扱う人間機械統合身体システムは余剰肢ロボティクスを主な対象としている。前章にて紹介したように、余剰肢ロボティクスは生得身体との統合を図るものであり、マルチモーダル感覚器を含む感覚-運動インターフェースを介して、生得四肢と協調して

タスクを行う。そのため人間機械統合身体システムを検討する上で具体的な対象となる。余剰肢ロボティクス装用時に影響を受ける身体認知の変容を知ること、人間機械身体システムにおける情報連携の実態を捉えることができると考えている。

ここで、ひとつの作業仮説として、機械が生得身体と統合された時、機械は身体化 (Embodiment) された、と解釈することとする。Vignemont による身体化は下記のように定義され [39]、まさに人間機械統合身体システムが指すものと合致する。

“ E is embodied if some properties of E are processed in the same way as the properties of one’s body “

本作業仮説の導入より、人間機械統合身体システムである余剰肢ロボティクスを認知科学的な視点での再分類を試みる。

余剰肢ロボティクスの認知科学的な分類のひとつとして、既存の身体動作と独立しているか、または従属しているかを着目する。余剰肢ロボティクスの制御方法は生体信号または生得身体動作とのマッピングによるものであり、既存の身体動作に連動したものである [40]。先行研究 [15, 16, 19, 41, 42] では、いずれも既存の身体動作から得られる情報・信号を検出することで余剰肢ロボティクスを操作している。一方、既存の身体動作から独立した新たな身体動作より得られる信号により動作する 6th Finger を本論文では取り扱う [43]。6th Finger では先行研究とは異なる身体認知がみられていることから、既存の身体動作に従属したケースから区別して取り扱うこととした。

余剰肢ロボティクスの認知科学的な分類のもうひとつの見方として、ヒト型か非ヒト型かに着目する。余剰肢ロボティクスの設計機構は、ヒトの骨格筋と類似した剛体型 (Rigid-type) か、超冗長自由度もった動作が可能な変形型 (Soft-type) の二分される [40]。VR アバタの設計においては生得身体とは異なる際の身体認知や操作性は Homucular Flexibility として議論されている [44]。余剰肢ロボティクスにおいても同様に生得身体とは異なるケースとして議論する必要があると考える。

これまでの2つの視点より余剰肢ロボティクスを再分類したものが図 2.4 となる。先行研究のシステムに加えて、本論文にて取り扱う VR 余剰肢、タコ腕型 VR アバタおよび 6th Finger をテーブルに加えた。次節以降では、余剰肢ロボティクスおよび人間機械統合身体システムにて取り扱うこととなる身体認知について整理を図る。

2.3 身体認知と道具の身体化

2.3.1 道具の身体化

前章・前節にて「身体化」について触れてきたが、身体認知を深掘りするために身体図式 (Body Schema) および身体イメージ (Body Image) について着目していく。

身体図式 (Body Schema) とは 運動や姿勢などの感覚信号から生成された知覚モデルであり、身体の動作や運動におけるガイドとして活用される。元は Head や Holms らが提唱した




		ヒト型 (Rigid-type)	非ヒト型 (Soft-type)
既存動作・活動	従属型	 (B L Bonilla, et. al., 2014)	 (I Hussain, et. al., 2016)
	独立型	 6th Finger Project	

図 2.4: 余剰肢ロボティクスの認知科学的な分類 ヒト型および非ヒト型の分類と、既存身体動作から独立しているか従属しているかによる分類の2つの視点で区分している。既存身体動作従属型かつヒト型では VR 余剰肢および Shoulder-on-the-arm[19] が該当し、既存身体動作従属型かつ非ヒト型ではタコ腕型 VR アバタおよび Soft-SixthFinger[20] が該当する。既存身体動作独立型かつヒト型では 6th Finger[43] が該当する。

体位図式 (Postural schema) から端を発し、そこから由来して自己身体認知の暗黙の枠組みのひとつの概念として扱われている [45]。身体の状態や姿勢の情報をまとめた身体図式は、身体部位をどのように動かすかを直感的に知るための潜在的な基準となり、また道具の使用によって更新される。これを調べた一例として、Maravita と入来らはマカクサルに道具使用に対する報酬タスクを課すことで、身体動作範囲が広がり行動に変化が生じ、併せて、その認知や神経活動が変容することを報告している (図 2.5)。身体図式は潜在的な基準となる、と述べているように無自覚 (non-awareness) に機能する点はひとつ特徴である。

身体図式は、身体内部に閉じておらず、身体周囲の環境との関係から、身体各部位の動作を組織化 (統合) して、所望の動作を可能にしている [46]。俯瞰的な視点に立てば、身体図式の主体には自己だけでなく環境や外在的なものも含まれ、匿名的に機能することから前人称的 (pre-personal) といえる。身体動作の基準として機能する身体図式 (Body Schema) と外在的にある道具の関係性を知ることは、その身体化に対する理解を深める上で重要となる。

内部モデル (Internal model) とフィードバック誤差学習 身体-環境間の運動的相互作用を予測的に表現する脳内運動制御を説明する内部モデル [47] は、身体図式と併せて議論される。内部モデルを理解する上で重要なのが、運動学習の過程を描写するフィードバック誤差学習モデル [31] である (図 2.6)。前頭連合野において運動企図や運動イメージから行動が決定され、そこから生じた企図された軌道 (desired trajectory) が小脳にあるとされる逆モデル (Inverse model) へ伝達される。逆モデルは伝達された軌道情報をフィードフォワード運動指令 (Feedforward Motor command) へ変換し、一次運動野へ伝達する。伝達された運動指令 (Motor Command) を元に各身体部位 (Controlled Object) は動作する。運動指令から生成された遠心性コピー (Efference copy) は順モデル (Forward model) へ伝達されており、こ

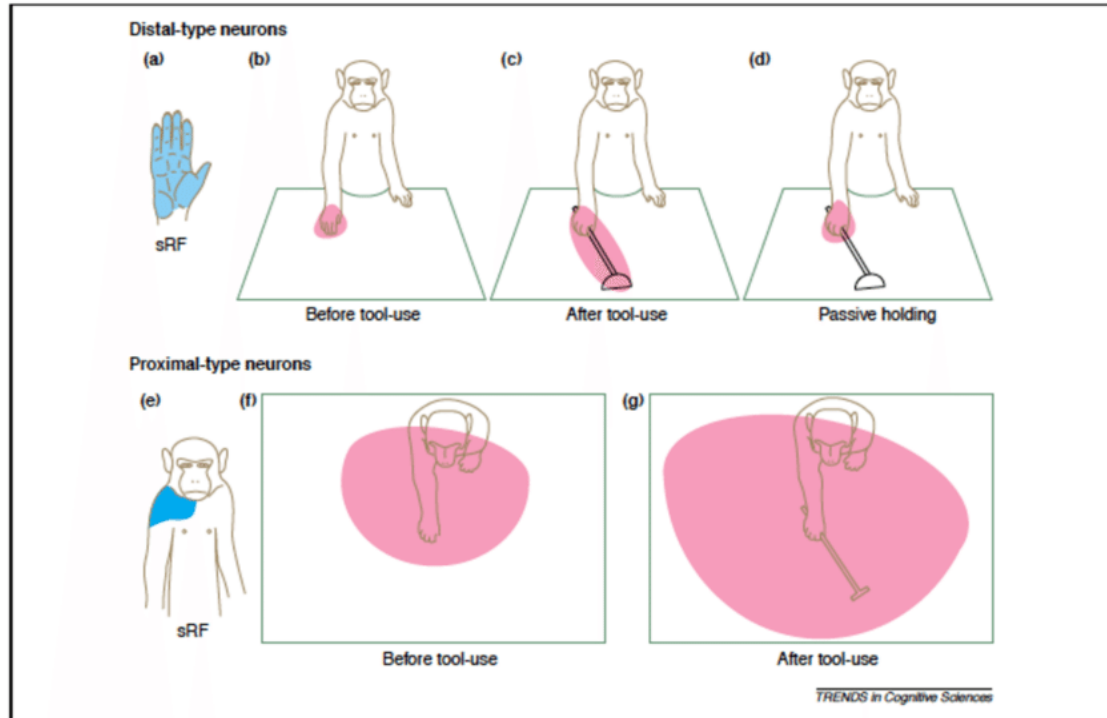


図 2.5: マカサルにおける道具の使用による行動変容 [8] より引用。 上段 (b) は道具の使用前の右手の体性感覚野賦活対応領域（ピンク色）が示されており、道具の使用後である上段 (c) ではその領域が拡大している様子がわかる。

れを元に運動を通じて得られる感覚を予測する。身体動作より身体-環境間の相互作用が生じ、順モデルにおいて予測された感覚情報と実際の運動を介して得られた感覚情報を比較照合することで予測誤差を学習する。誤差修正のための情報が次の動作情報を修飾し、フィードバック制御（Feedback controller）へ入力され、運動指令エラー（Motor Command Error）およびフィードバック運動指令（Feedback Motor Command）が生成される。運動指令エラーは逆モデルを更新し、次の身体動作時の運動指令へ反映されていく。また、フィードバック運動指令はフォードフォワード運動指令と合わせて一次運動野へ情報伝達され、次の運動指令が調整されていく。この一連の働きは動的かつ時系列に発生しており、予測誤差を最小化するように、つまりは企図通りに身体動作できるように運動学習が進む。これらの全体を指し示するのが内部モデルであり、その中で運動学習を進めているのがフィードバック誤差学習である。フィードバック誤差学習は運動学習・制御だけでなく、道具の使用についても適応することができ、同様に予測誤差が最小化されるように学習が進む。

フィードバック誤差学習では感覚と運動それぞれのフィードバック信号を活用して予測誤差最小化を図る過程から運動学習を説明をした。さらなる理解のために観測器モデル（Observer Model）[48] を説明する。観測器モデルは、順モデルにより感覚運動機構の遅延を補償し、感覚信号・運動信号それぞれにおけるノイズを除去し身体状態の推定精度の改善を図る過程を示したものである。神経系が身体部位の位置や姿勢や向きを推定する（図 2.7）。図 2.7 における

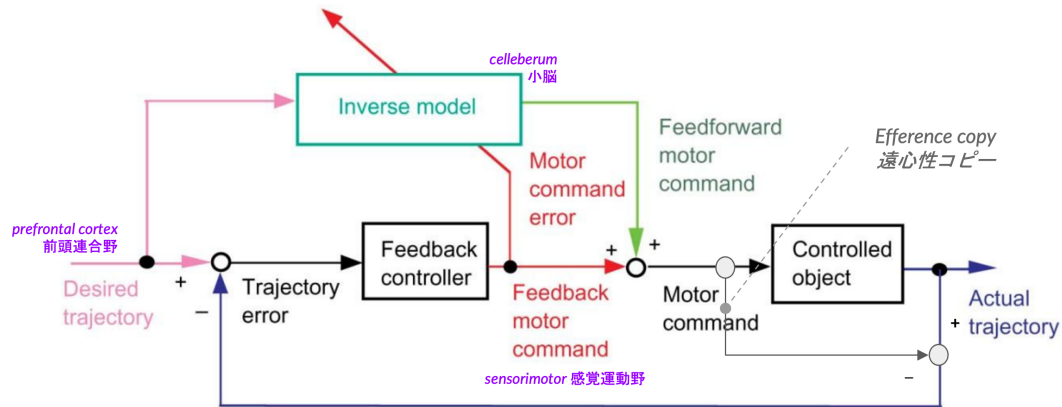


図 2.6: フィードバック誤差学習モデル Wolpert・川人らにより提唱された内部モデル [31] にて運動学習を説明する上で用いられた動的モデル。一部，順モデルを組み込む様に編集し，順モデル（予測）と逆モデル（運動制御）をひとつのダイアグラムにて説明できる様に試みた。

1, 2, 3 の状態遷移をを描く上で，順動力学的モデル・順感覚モデル・ゲインがそれぞれ感覚信号・運動信号を介して連動している。順動力学的モデルが内部モデルにおける逆モデルに相当し，順感覚モデルが順モデルに該当，ゲインがフィードバック制御に相当する。不確実性が小さくなっていく，つまりは予測誤差最小化による運動学習が進むといえる。

身体イメージ (Body Image) とは 視覚情報から構築された脳内にある自己の身体に関する空間的な心象であり，知覚的判断を行うため使用される [49]。自己の身体を対象とした認知であり，身体像は一人称として扱われる。一定の注意を求められる複雑な動作などでは，特定の部位や全体を意識の志向対象としてイメージすることで，その後の動作が遂行される。言い換えれば，このイメージがなければ応じた動作はできない。実在的か想像的かに関わらず，自己の身体は外在する物体と共に環境下に置かれており，メタ視認されたようなものとなる。そのため，パイアールは身体イメージ (Body image) を「世界中心の空間協調システム (系)」として説明している [50]。これに対し，身体図式 (Body Schema) は「身体中心の空間協調システム (系)」として説明されている。

知覚における「図と地」の関係で考えた時，身体像 (Body Image) は，ある環境（背景；地）に対して浮かび上がる心象（図）として捉えられる。「図と地 (Figure and Ground)」は心理学分野で用いられ，ルビンにより提唱されたゲシュタルト心理学の重要概念であり，「ルビンの壺」などの多義図形による説明が広く知られている [51]。

図 2.8 では，黒色に着目すれば壺があるように知覚できるが，一方で，肌色に着目すれば人が向かい合っているように見える。このようにひとつの事象を捉えるにあたり，多義的となるのは，知覚から浮かび上がった認知をどちらに置くかによるためである。この点で考えると，道具・技術は身体イメージにおいては「図」「地」のいずれにもなり得る可能性があり，使用者をそれを意識的に捉えるかどうかといえる。

前段では，視覚に特化した例を示したが，より抽象的に考えれば，ある領域内に 2 種類の

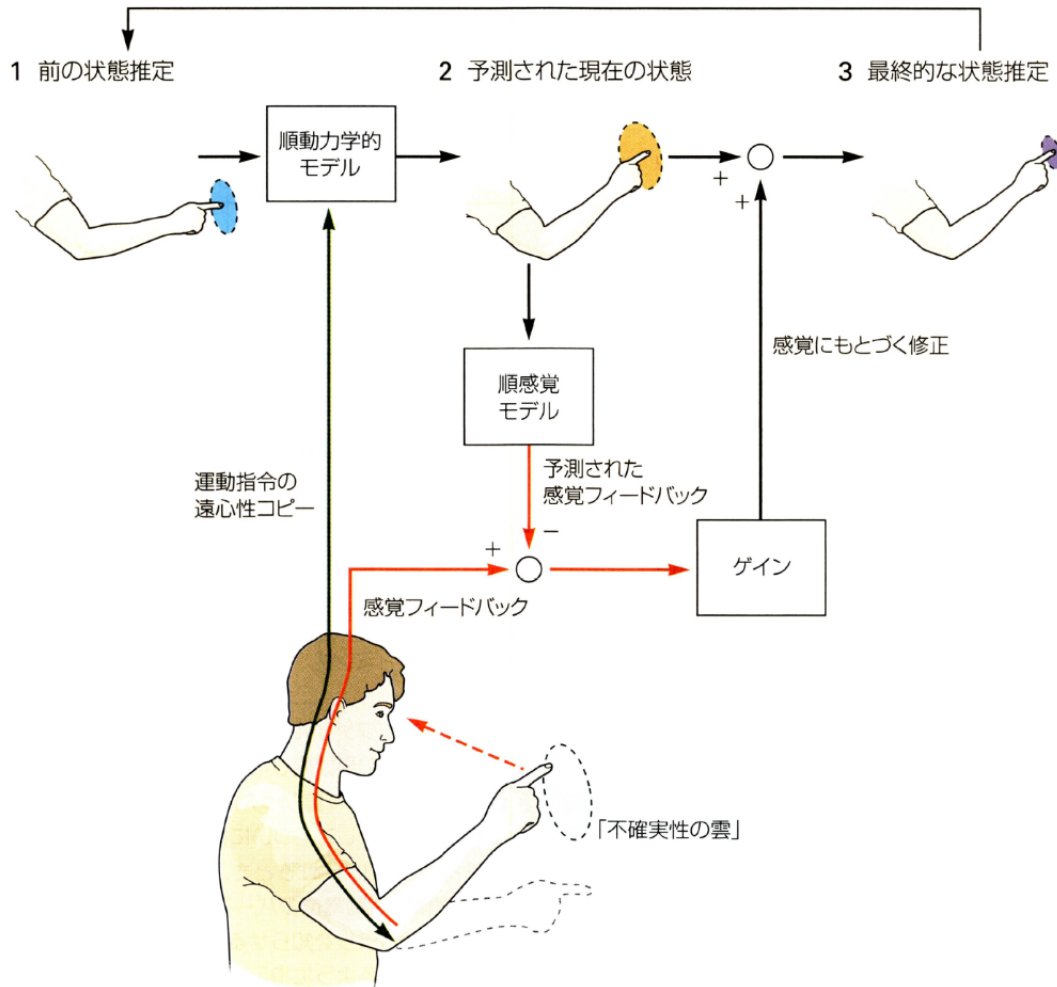


図 2.7: オブザーバーモデル [48] より引用。腕を動かしている間に指の位置がどのように推定されるかを示す。前に推定された指の位置の分布 (1) が、新しい推定 (2) の基礎となる。この推定には、運動指令の遠心性コピーと動力学的モデルが用いられる。新たに推定される指の位置の分布 (不確実性の雲) は、前の推定より大きい。このモデルは、次の指の位置での感覚フィードバックを予測し、予測と実際の感覚フィードバックとの誤差を使って、現時点での指の位置の推定を修正している。この修正は、感覚の誤差を状態の誤差に変換すると共に、遠心性コピーと感覚フィードバックの相対的な信頼性を決定する。その結果、現時点での指の位置の最終的な推定 (3) の不確実性は小さくなる。この推定は、次の運動にとっての「前の状態推定」となり、一連の操作は何度も繰り返される。

物体が存在するとき、ひとつは形・意味が浮き出し、他方は背景として捉えられるかによるということである。この時、背景から分離して知覚される部分 (形) を「図」といい、背景となるものを「地」という。この関係は視覚だけでなく、聴覚などの他の知覚に対しても適用される。ここまでに挙げた身体図式 (Body Schema) と身体像 (Body Image) の特徴・属性を田中がまとめた表を参考に記載する [52]。

これまでに紹介・説明をしてきた身体図式 (Body Schema) および身体イメージ (Body

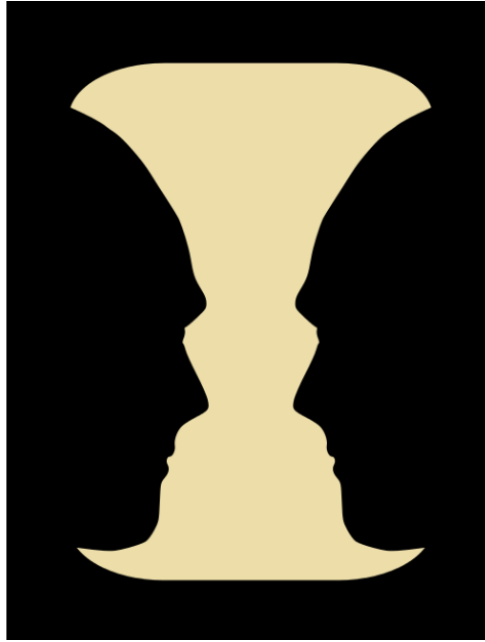


図 2.8: ルビンの壺^{*1} 多義図形として有名. 図と地の関係性を説明する際に使用される.

表 2.1: 身体イメージと身体図式の比較 [52] より引用.

属性	身体イメージ (Body Image)	身体図式 (Body Schema)
対称性	意識の志向対象となる 意識的、自覚的; awareness	意識の志向対象とならない 無意識的、無自覚的; non-awareness
人称性	一人称的 (自己の身体)	前人称的 (匿名的)
空間性	世界中心の空間座標	身体中心の空間座標

Image) は, 運動と知覚の両視点から身体認知の解釈を試みている. この解釈は生得的な身体だけではなく, 外在的な道具や環境からの影響により更新され得ることを留意したい [53, 54]. 続いて, 道具の身体化に対する認知・知覚を身体図式および身体イメージ以外の捉え方で見直すことで身体認知への理解を深める.

2.3.2 自己意識からみた身体認知

Shawn Gallagher は, 自己意識を”身体を介した経験”として説明し, そこから Minimal Self (最小の自己) と Narrative Self (物語および経験的に認識される自己) を定義した [55] (図 2.9). Minimal Self は, 即時的な経験の主体として説明され, ある瞬間にある時の自己を指す. また, 自己意識の最小単位としても説明され, 身体所有感 (Sense of Ownership; SoO; Body Ownership) と行為主体感 (Sense of Agency; SoA) により構成されると論じた. 一方, Narrative Self は, 過去・現在・未来の時間軸上に一貫して経験される自己意識を指す.

^{*1}https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Face_or_vase_ata_01.svg

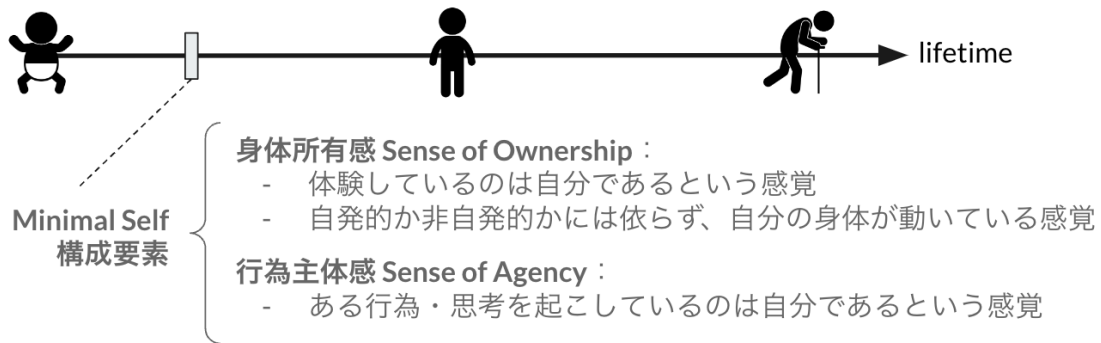


図 2.9: Narrative Self と Minimal Self Narrative Self は経験から構築された自己意識を指しており、一方、Minimal self ではある瞬間のスナップショットとして説明される。

道具の身体化を議論する上で、認知科学の分野では、道具を含む Minimal self を構築、つまりは道具や技術に対して身体所有感または行為主体感を覚えたかどうかにより、道具の身体化における身体認知の説明を試みている。

身体所有感 (Sense of Body Ownership; Body Ownership) とは ヒトがある対象物を自分の身体と同じような知覚および情動反応を示す状態となることを指す [39]。これはモノや道具の身体化の基本的要素のひとつだとされている。身体所有感の代表例としてラバーハンド錯覚 (Rubber Hand Illusion; RHI) がある [39, 56, 57, 58, 59]。ラバーハンド錯覚の実施図例を図 2.10 に示す。視覚的に隠された自分の手と、側に置かれたゴム製の手を同時にブラシなどで繰り返し触られた際、次第にゴム製の手を自分の手であるかのように感じる現象を指す。この時、被験者は自身の感覚・知覚がゴム手へ転写されたような錯覚を覚える。ゴム手に限らずスライムを用いた錯覚例も報告されている [60]。視覚・触覚刺激によるマルチモーダル錯覚の一例としても説明される。この錯覚現象は一時的であり、マルチモーダル刺激を終えてからある程度時間が経過すると、効果は消失する。ラバーハンド錯覚実験でみられるように身体所有感は可塑的に変容することがわかる。

行為主体感 (Sense of Agency) とは 「ある行為により生じた結果は自身によるものである」と感じる状態を表す [61, 59, 62]。例えば、自身の手が動くという行為を考えた時、仮に第三者にその手を動かされた場合には「自分自身で」その手を動かした感覚を得られない。結果、行為主体感が生じない。一方で、自身の意志に沿って、自分でその手を動かした場合には、自分自身で手を動かしているため、行為主体感が生じる。こちらの例からわかるように「行為主の判別」が行為主体感においては必要となる。そのため主観的感覚とも言われる [63]。

行為主体感の成立過程の説明として取り上げられるのがコンパレータモデル (Comparator Model) である [64, 65]。自身の運動に先立って運動結果を予測しており、実際の結果と予測が一致した際に運動主体感を得るというものである (図 2.11)。運動の計画時と遂行中に得られる情報から推論することを想定しており、このため 推論的 (predictive) な処理を必要とす



図 2.10: ラバーハンド錯覚実験の様子 被験者は生得的な手腕を隔壁された場所に配置し、一方、その視野にはゴム手をものを見るように実験者に促される。この時、感覚・知覚において齟齬が起きないように視覚・触覚刺激がゴム手と生得手腕間で同期させることで重要となる。*1

る [66, 67]. 内部モデルにおいても説明したが、順モデル・運動制御信号・遠心性コピーについて再びコンパレータモデルに沿って説明する。順モデル (Forward model) は、運動の結果、観測されるであろう感覚情報を予測するモデルを指す。運動指令 (motor command) は身体運動を生み出すために用いられるとともに、脳内で複製され順モデルへの入力としても用いられる。この時の複製信号を遠心性コピー (efference copy) と呼ぶ。運動の結果、身体外部・環境 (environment) にて生じた事象から実際の感覚信号が生体へ伝わる。予測信号と実測信号が合流するポイントがコンパレータとなり、比較照合がなされる。この時、参照される指標が予測と結果の不一致度を予測誤差 (prediction error) である。コンパレータモデルにおいて、予測誤差 (prediction error) がゼロに近づいた時、運動主体感が発生するとしている。

ここで注意したいのは、内部モデルは運動制御・学習を説明するためのものであり、コンパレータモデルは行為主体感を説明するためのものであり用途が異なる。コンパレータモデルは推論的に予測された感覚信号 (predicted sensory outcome) と知覚された感覚信号 (actual sensory outcome) がハイライトされている一方で、内部モデルは運動制御や運動企図なども含めて説明している。その点でいえば、コンパレータモデルは内部モデルに包含されているといえる。

*1<https://www.ppk.elte.hu/en/content/proprioception-but-not-cardiac-interoce\ption-is-related-to-the-rubber-hand-illusion.t.39384>

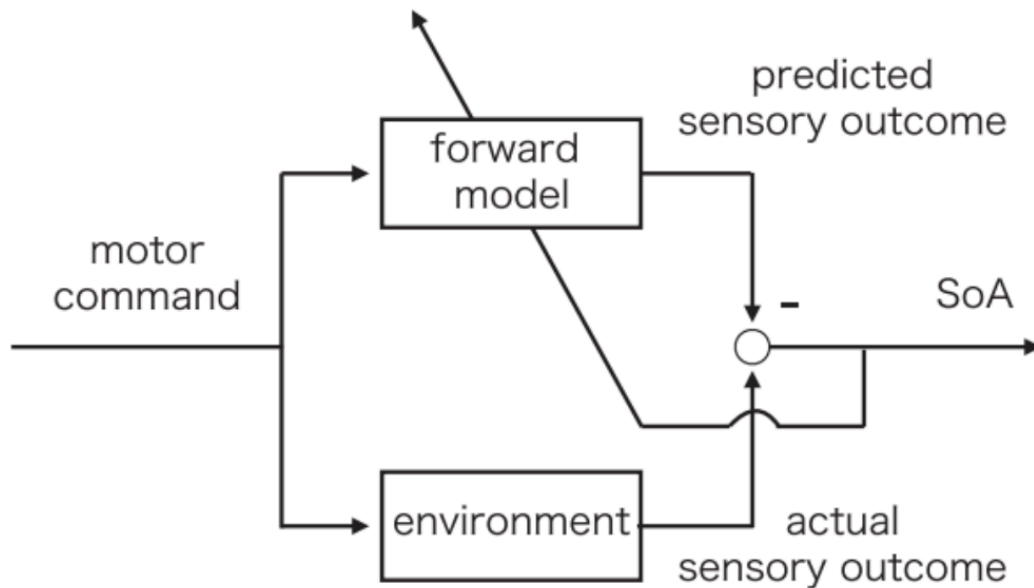


図 2.11: コンパレータモデル [67] より引用. 運動企図 (Motor Command) は筋骨格やエンドエフェクタを動作して外界 (Environment) へ作用する信号のフローと, 動作時に起こる感覚フィードバックの予測するための順モデル (Forward model) へ伝達されるフローの 2 つの伝達経路を辿る. それぞれから実測 (Actual Sensory outcome) と予測 (Predicted sensory outcome) が比較器にて照合され誤差を検知する. 検知された誤差は順モデルの更新に使用され, 次回以降の動作時に活用される. 行為主体感 (Sense of Agency) は比較器において予測と実測が合致し, 予測できる範囲内に動作できた際にそれを覚えると説明している.

ここまで Gallagher が提唱した Minimal self の構成要素である身体所有感および行為主体感について説明した. しかし, 身体化に関わる身体認知には, これらの 2 つ以外の認知についても議論されているために, 次以降にて関連事項を説明していく.

自己位置感覚 (Sense of Self-Location, Feeling of Presence) とは 自分が空間のどこにいるかという感覚を指す. 日常生活を送る上で, 自身の身体の物理的にある位置が他にあるような感覚を覚えることは少ない. しかし, VR 技術を用いた没入空間などにおいては, 自己の身体位置に対する感覚は曖昧になる. これを検証・説明する錯覚実験に体外離脱錯覚 (Out-of-Body Illusion/Experience aka. Full-Body Illusion) がある [68, 69] (図 2.12). 実験被験者は HMD を装着し, 自分の身体の背部に設置されたカメラからの映像を確認する. つづいて, 実験者が実験被験者の胸部に対して一定のリズムにて刺激を与える. この時, 実験被験者の背部に設置されたカメラに向かって模擬的に胸部への刺激を与えるふりをする. これにより視覚・触覚を用いたマルチモーダル刺激が実験被験者へ与えられる. 一定の刺激が与えられた後, 実験被験者は背部に設置されたカメラの位置に自身の身体があるような感覚を覚える. 自己位置感覚が背部へシフトするような現象を捉えている. これは視覚情報と空間情報の統合処理にて生起するといわれている [70].



図 2.12: 体外離脱錯覚 (Out-of-Body Illusion) [71] より引用. [68] にて取り上げられた実験映像を描写している.

固有受容感覚 (Proprioception) とは 身体の一部の姿勢や動作を知覚するための感覚を指す. 身体動作により活性化された筋肉や関節, 皮膚の受容器にて得られた信号から姿勢や状態を検知することができるため, 身体運動の制御に重要な役割を果たしているといわれている [72]. この時の感覚信号は求心性フィードバック信号 (抹消から中枢) であり, 運動制御・学習にて取り上げた内部モデルにおける感覚信号の参照信号として活用される (図 2.13). また, 身体の姿勢や動作の情報を取得できることから身体イメージの構築にも貢献するともいわれている [73].

Ian Waterman の例 Ian Waterman は, 19 歳のときにインフルエンザ感染により, 彼は固有受容感覚や皮膚感覚を失った (図 2.14). これらの感覚を失ったことで, 彼は自分の動きを完全に調整することができなくなった. 筋肉を強制的に収縮させることはできても, その動作を目的に合わせて動作させる能力は失われており, 立つことも歩くことはできても, 自分の体の不自由さに苦しめられた. 何年にもわたるトレーニングの結果, 彼は視覚的なコントロールのもとで自分の体を動かすことを再び学ぶことができた. これは, 固有受容感覚を失った際に

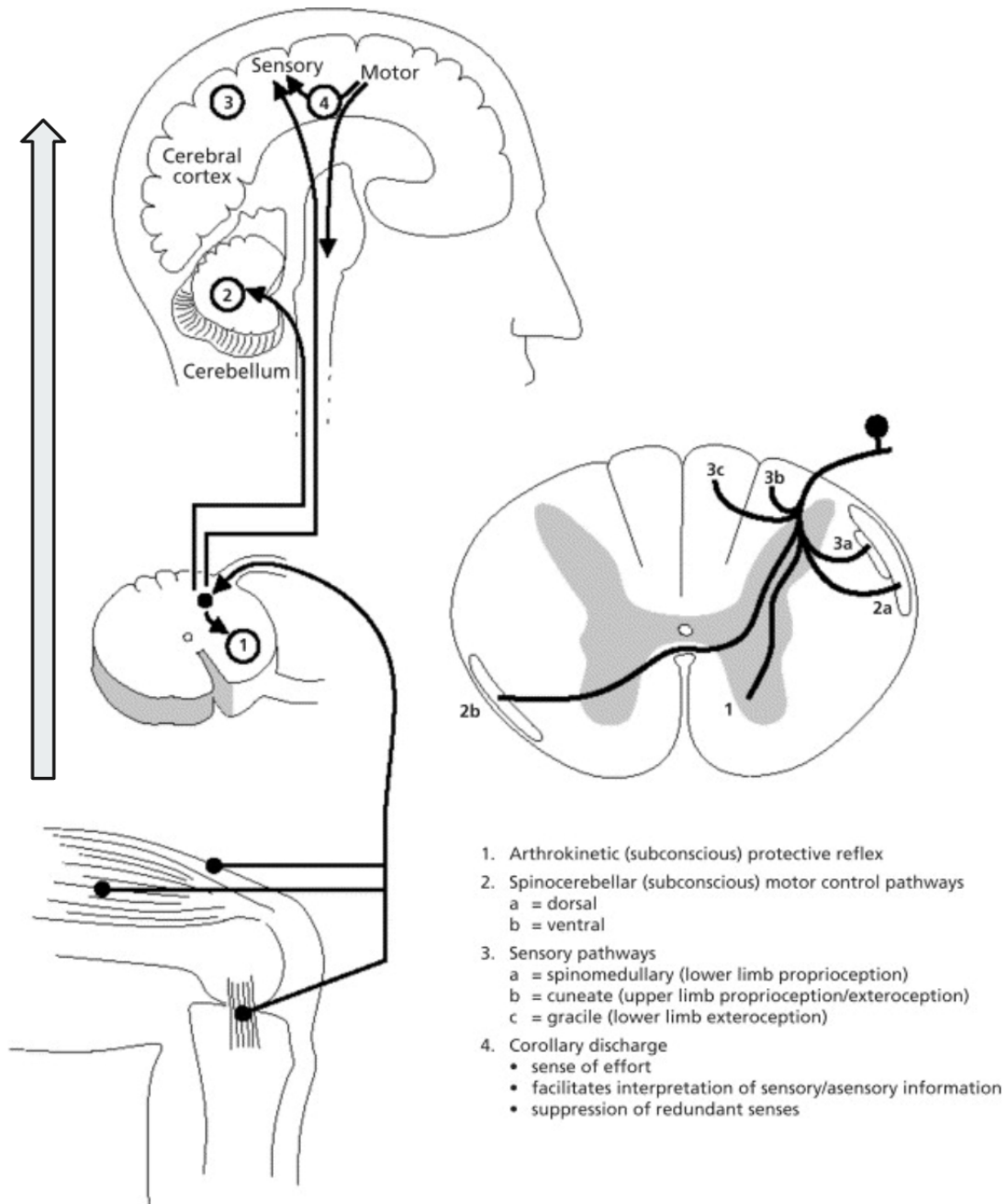


図 2.13: 自己受容求心性神経接続 [74] より図を引用. 末梢神経から中枢神経系へ信号が伝達され, 各身体部位の状態が脳内にて知覚・認知される. 左側の矢印は末端から中枢までの方向を示している.

は, 視覚情報を用いて機能の代替・回復を図った一例である [75].

自己近傍空間 (Peri-Personal Space) とは 身体の近傍を取り巻く空間であり外部刺激を直接的に感じることでできる範囲を指す [76] (図 2.15). ヒトは視覚・触覚・聴覚などの複数の感



図 2.14: Ian Waterman 本人の写真。首から下の感覚が機能していないため、手に対する外部刺激を視認することで再度、その刺激を学習しようと試みている様子。^{*1}

覚モダリティの統合により、それを知覚する。脳内空間表現は3次元的なものになるといわれており、高次認知知覚として知られている [77, 78, 79, 80]。身体化された道具の周辺にも生じるとも言われており [8, 81]，空間相互作用する Heat map (PPSff = PPS-based Force Field；自己近傍空間力場) となり身体図式へ影響することが報告されている [82, 83]。

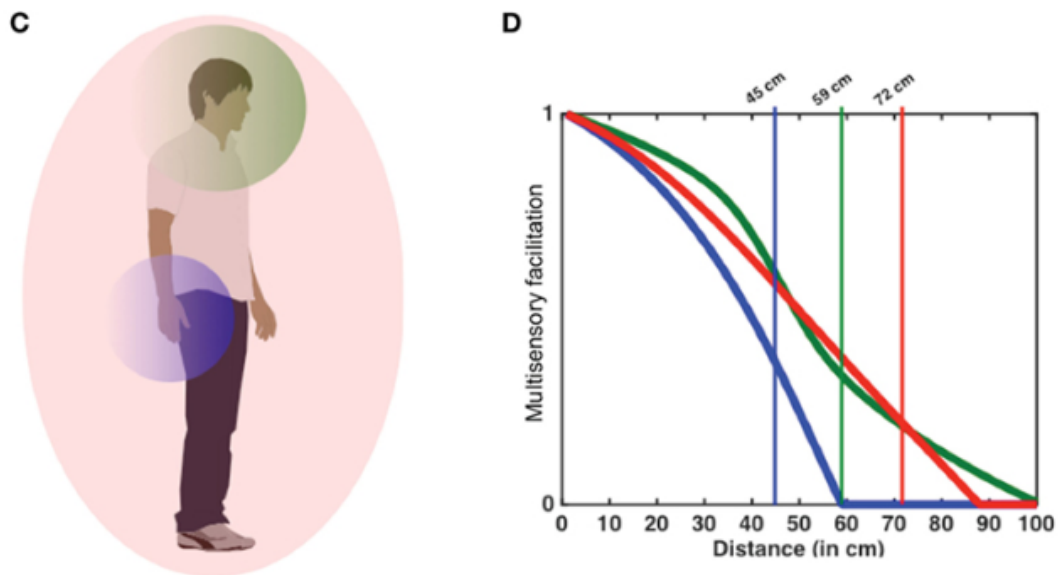


図 2.15: ヒトの自己近傍空間例 身体部位からの距離に応じて視覚・触覚刺激に対する応答感覚が変化する。

^{*1}<https://advanced2b.files.wordpress.com/2013/05/ian05.jpg>

身体化感覚の区別 身体化の概観を得るために関連する感覚（身体化感覚）を前節までに列挙したが，Matthis らは身体化感覚をさらに判別（Judgement）と感知（Feeling）の2種類で区別して説明している [62]（図 2.16）．身体化感覚における Judgement は主に企図や経験や社会的通念などの情報を参照し，明示的（Explicit）な情報，つまりは認知された情報として扱われる．一方の Feeling は固有受容感覚（Proprioception）や運動-感覚予測（Efference copy）などの内部感覚，そしてマルチモーダル感覚や自己近傍空間（Peri-personal Space）の情報を参照する．暗黙的（Implicit）な情報といわれ，認知神経科学的な説明としては認知される前の感覚・知覚された状態の信号に類する．加えて，Judgement および Feeling とともに相互作用し補足的に機能する．それぞれの区別が明示的または暗黙的とあることから，神経科学的解釈として Bottom-up および Top-down の関係にあると説明されている．

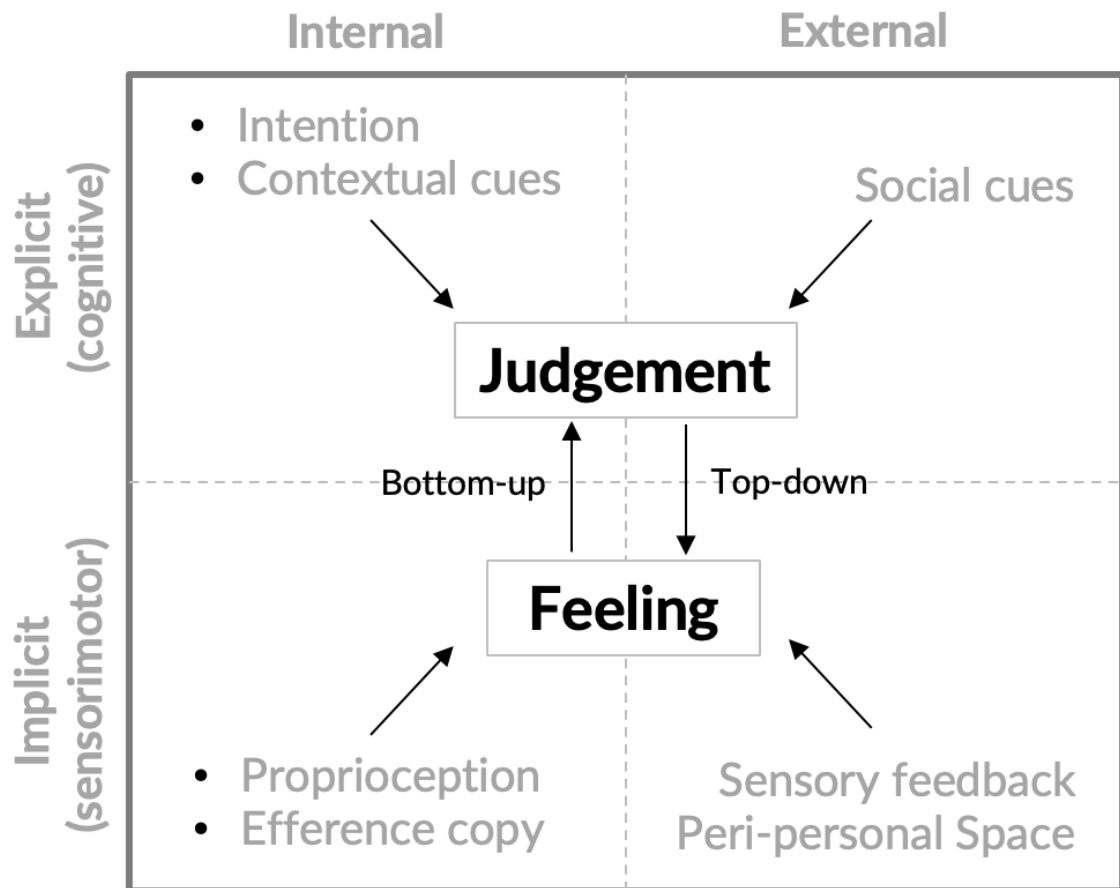


図 2.16: 身体化感覚における判別（Judgement）と感知（Feeling）

身体化の種類 身体化はその構築過程により区別されるとされ，Giummarra や Vignement らは「感覚-運動統合による Motor Embodiment」と「感覚間統合による Perceptual Embodiment」の2種類が存在すると説明している [39, 84]．

Motor Embodiment は，身体動作を伴う場合に生起する身体化を指す．内部感覚である固

有受容感覚をはじめとして、運動時のフィードバック誤差学習などが関連する。その計測指標としては、行為主体感や身体図式、固有受容感覚などが挙げられる。そのため Haggard らによるコンパレータモデル [66, 67] などがその例として挙げられる。

Perceptual Embodiment は、多感覚統合知覚により生起する身体化を指す。主にマルチモーダルなフィードバック刺激による影響が関連する。その計測指標には、身体所有感や身体イメージ、自己近傍空間などが挙げられる。身体動作を伴わないラバーバンド錯覚 [39, 56, 57, 58, 59] などが例として挙げられる。ただし、身体動作時にも多感覚統合は起こるため、Perceptual Embodiment は Motor Embodiment 時にも発生することが考えられ、それらの関係性は排他的ではない。

次に自己身体と他者を明確に分けて議論するために再び自己意識を取り上げる。Gallagher は自己意識を”身体を介した経験”としたが、Stanford Encyclopedia of Philosophy によれば下記のように定義される [85]。

”It is the conscious recognition of one’s own acts or states as belonging to or originating in oneself”

自己意識は多義的であり、さまざまな議論・検討がなされているが、本論文ではこれら2つの意味を合わせ「自己身体を介して得られた体験により構築されたものは他者から区別される」ものとして取り扱っていく。ここで定義した自己意識に沿った概念としてあるのが、次に述べる Blanke らが提唱した身体的自己意識である。

身体的自己意識 (Bodily Self-Consciousness; BSC) とは 身体を介した体験からマルチモーダルな身体情報として多感覚統合処理と関連して説明される身体意識を指す [86]。体験・経験から着想を得たという観点でいえば、Gallagher が述べた Minimal Self / Narrative Self と類似しているが、身体的自己意識が主に着目しているのは神経科学的解釈である。マルチモーダルな感覚統合処理や高次認知処理を必要とすることから、身体的自己意識は前頭葉・頭頂葉にある連合野に着目している (図 2.17)。また、身体的自己意識を説明する上で重要な制約として下記の4つが挙げられている [86]。

1. 身体化感覚 (身体所有感・行為主体感・自己位置感覚により構成)
2. 固有受容感覚 (体の動きや位置、姿勢などを感じる感覚)
3. 身体イメージ (視覚情報から構築される自己身体の心象イメージ)
4. 自己近傍空間 (身体周囲において知覚可能な空間)

なお、これらは帰納的に列挙されたものであり身体的自己意識の必要条件となるが、十分条件として論じられていない。

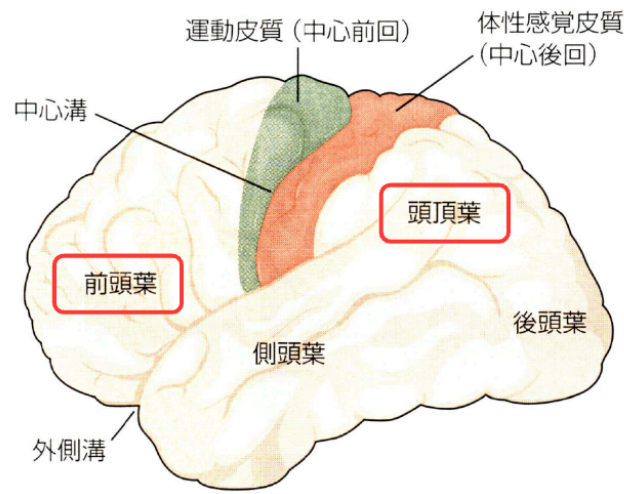


図 2.17: 身体的自己意識を説明するための脳領域図 [48] より図を引用。連合野について赤線でハイライトしている。

2.3.3 身体認知のまとめ

身体認知は脳・身体・環境を構成要素として説明しており、自己の身体を介した経験・体験を通じた感覚-運動系の信号から構成されることを示した。これまでに説明を試みた身体認知に対する構成要素の特徴を表 2.2 にまとめた。構成要素は相互作用しており、入力信号もさまざまにある。また、ここで列挙されたものは現時点で判明しているものであり、未だ議論の余地を残している。今泉、浅井、宮崎らは経験的・発達の・臨床的観点から Minimal self とそれに関わる感覚運動信号や相互作用関係を包括的に図 2.18 にまとめを試みているが、身体認知を統合的なモデルを構築して論ずることの難しさが窺い知れる。

人間機械統合身体システムに関わる身体認知の整理 ここで整理のために、人間機械統合身体システムと相対する認知科学的作業仮説となる身体化感覚 (Sense of Embodiment; SoE) と身体化の種類、そして、身体的自己意識 (Bodily Self-Consciousness; BSC) の関係性を図 2.19 に示した。人間機械統合身体システムは余剰肢ロボティクスを主な対象としているが端的には人間-機械が感覚-認知-運動それぞれが情報連携してひとつの身体システムとして機能する系として考えている。それに対応する認知的解釈である身体化を切り口として身体化感覚と Motor/Perceptual Embodiment を取り上げた。加えて、自己身体と他者を区別するフレームとして身体的自己意識による議論・検討をすることで、機械である余剰肢ロボティクスが自己身体の一部として機能し得るかを評価・考察する。ここで挙げた捉え方のフレームワークは本論文における根幹を成すものである。

表 2.2: 身体認知の特徴

身体認知の構成要素	特徴	依存する他の構成要素	構成のための入力信号
身体イメージ	脳内にある自己の身体に関する空間的な心象 知覚的判断を行うため使用	身体図式	視覚情報
身体図式	運動や姿勢などの感覚信号から生成された知覚モデル 身体の動作や運動におけるガイドとして活用	身体イメージ 内部モデル 固有受容感覚	固有受容感覚
内部モデル (フィードバック誤差学習)	身体と環境との運動的相互作用を予測的に表現する 脳内における運動制御モデル (感覚運動信号の予測誤差の最小化による運動学習)	身体図式 フィードバック誤差学習 順モデル 逆モデル	運動企図・イメージ 予測誤差信号
順モデル	運動の結果、観測されるであろう感覚情報を予測するモデル	内部モデル フィードバック誤差学習	遠心性コピー
逆モデル	運動企図から生起する運動制御信号	内部モデル フィードバック誤差学習	運動企図・イメージ
Minimal Self	即時的な経験の主体としての自己意識	身体所有感 行為主体感	経験・体験に伴う刺激全般
身体的自己意識	身体を介した体験からマルチモーダルな身体情報として 多感覚統合処理を関連して説明される身体意識	身体所有感 行為主体感 自己位置感覚 固有受容感覚 自己近傍空間	経験・体験に伴う刺激全般
身体所有感	ある対象物を自分の身体と同じような知覚および情動反応を示す状態	Minimal self 身体的自己意識	経験・体験に伴う刺激全般
行為主体感	「ある行為により生じた結果は自身によるものである」という感覚	Minimal self 身体的自己意識 順モデル	遠心性コピー 感覚信号の予測誤差
自己位置感覚	自分が空間のどこにいるかという感覚	身体的自己意識	マルチモーダル刺激 没入体験
固有受容感覚	身体の一部の姿勢や動作を知覚するための感覚	身体図式 身体的自己意識	身体動作 筋骨格からの求心性信号
自己近傍空間	身体の近傍を取り巻く空間であり外部刺激を直接的に感じることのできる範囲	身体的自己意識	経験・体験に伴う刺激全般

2.4 適応・学習を可能にする神経可塑性

身体認知についてこれまで取り上げてきたが、これを可能にしているのが神経機構が持つ特徴である神経可塑性である。これにより外部刺激・環境に適応することが可能となり、目的動作にむけた学習が可能となっている。

神経可塑性とは 反復的かつ協調的なプロセスを通じて脳機能を向上させる神経機構を指す。本来、可塑性 (Plasticity) とは、弾性 (Elasticity) に相対する用語である。弾性とは、ゴムボールをある方向から一定の力で押さえ込むときに生じる反力 (元に戻ろうとする力) が生じることを指す。一方で、可塑性とは、力を取り除いても変形したままの状態が維持される性質を指す。この可塑性がヒトの神経機構に対しても生じることが Hebb により報告された (Hebb theory, Hebb's rule) [87]。Hebb の言葉をここに引用する。

“neuroplasticity” is defined as to refer to increased neuronal activity leading to stronger neuronal connections

これはシナプス可塑性の定義であり、さまざまレベルで確認できる [88] (図 2.20)

構造的可塑性 (Structural Plasticity) とは、シナプス活動により調整され樹状突起の形態変

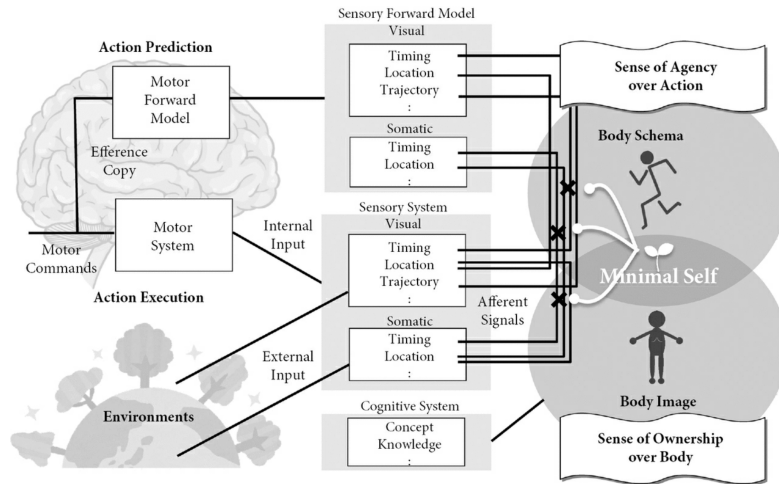


図 2.18: 経験的・発達の・臨床的観点からみた Minimal self 身体と行為への意識が自己の感覚を構築する。この統一的な自己（図中にある芽）は、身体所有感と行為主体感の相互作用の中で発達する。身体と行為の間の感覚運動ループは、精神的または身体的な障害後でも維持され、ここでは局所的な相互作用の不全（図中における×）が Minimal self によって改善される。

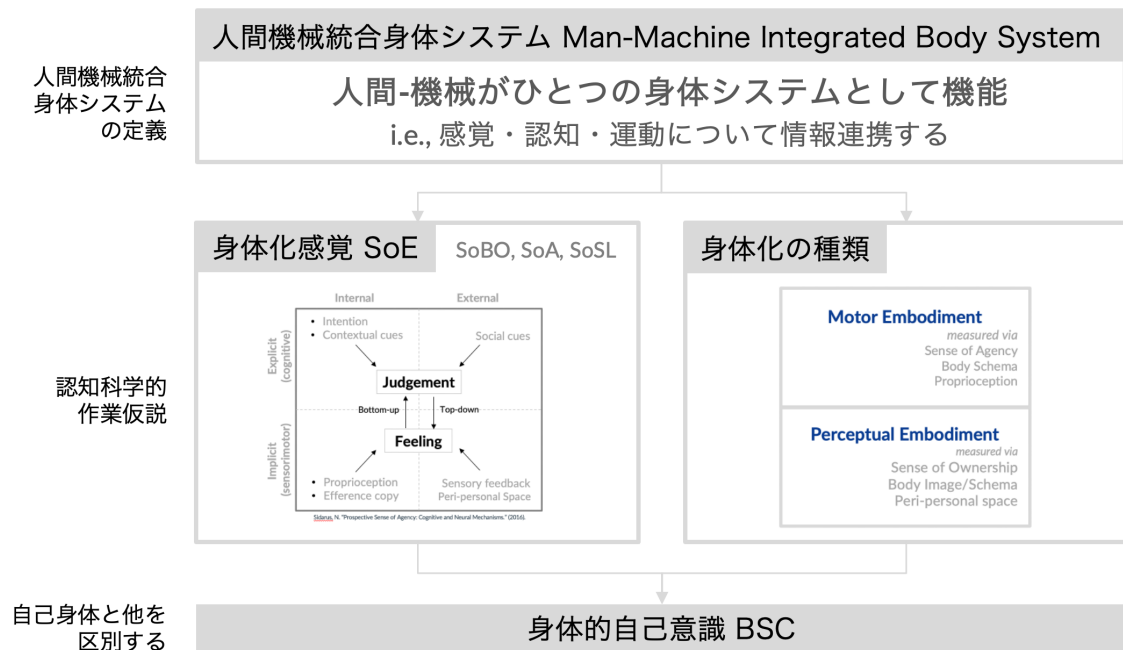


図 2.19: 人間機械統合身体システムと身体認知の関係性

化がみられる。機能的可塑性 (Functional Plasticity) とは、神経回路の制御に影響し、恒常性維持などに変化がみられる。神経ネットワーク可塑性 (Network plasticity) とは、学習・記憶・認知などを通じて適応的に変容する。ネットワーク構造の変化として Structural Plasticity と説明されることもあるが、ここでは混同しないように神経ネットワーク可塑性として扱う。身体と行為を通じて構成された学習や身体認知は、神経可塑性のひとつである神経ネットワーク

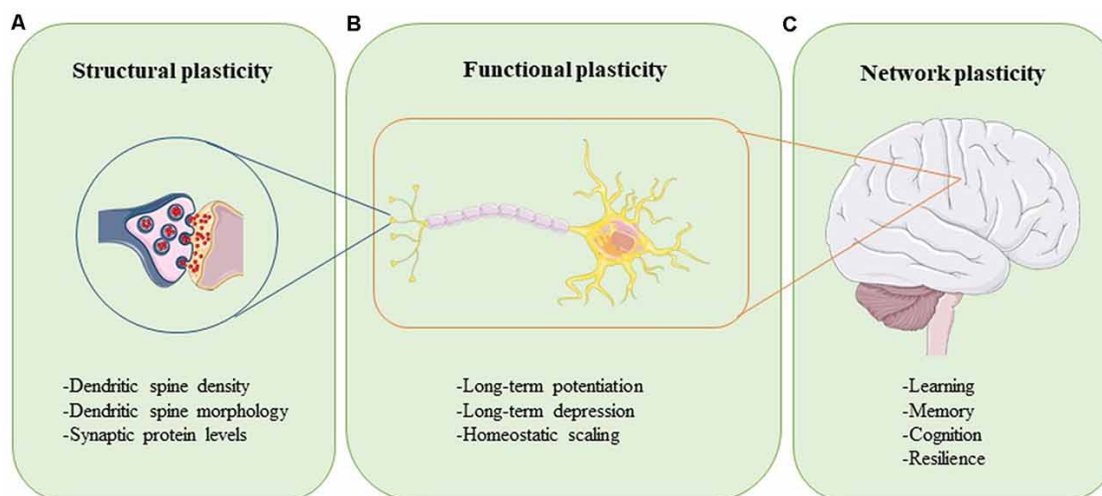


図 2.20: 神経可塑性の各レベルにおける説明図 [88] より引用. (A) 構造的可塑性とは、樹状突起スパインの密度・形状・シナプスタンパク質プロファイルの変化など、シナプスで生じる形態的变化を指す. (B) 機能的可塑性は、神経回路の制御に影響し、長期増強・長期抑圧・恒常性維持のためのスケーリングなどのプロセスが含まれます. (C) ネットワーク可塑性は、学習・記憶・認知・回復力を調節する. 健康な脳機能を維持するためには、すべてのレベルの可塑性が適切に機能し、注意深く統合されることが必要となる.

可塑性によって主に実現される. なお、前に記載したサイボーグは機能的可塑性における身体システムへの介入といえる.

体部位局在性と感覚・随意運動情報処理 身体活動部位と一次体性感覚・運動野の各領域は一对一对応することが知られている. 脳外科医の Penfield は手術部位を特定するために、ヒトの脳皮質を電気刺激させることで、一次体性感覚運動野と体部位との対応関係をまとめた [89]. そのときに描かれたのが、Homunculus であり「脳の中のこびと」として知られている (図 2.21). Homunculus における各身体部位は、物理的身体の大きさとは異なるスケールで表現されており、脳皮質上における相当領域の面積から大きさが決められている. 例えば、親指は大きく長く、顔や舌といった身体部位も異常に大きい. また、もうひとつの特徴として挙げられるのは、物理的に身体部位が隣接している配置関係が脳皮質上においても同様に配列されている (図 2.22).

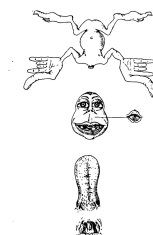


図 2.21: Penfield が描いた Homunculus .

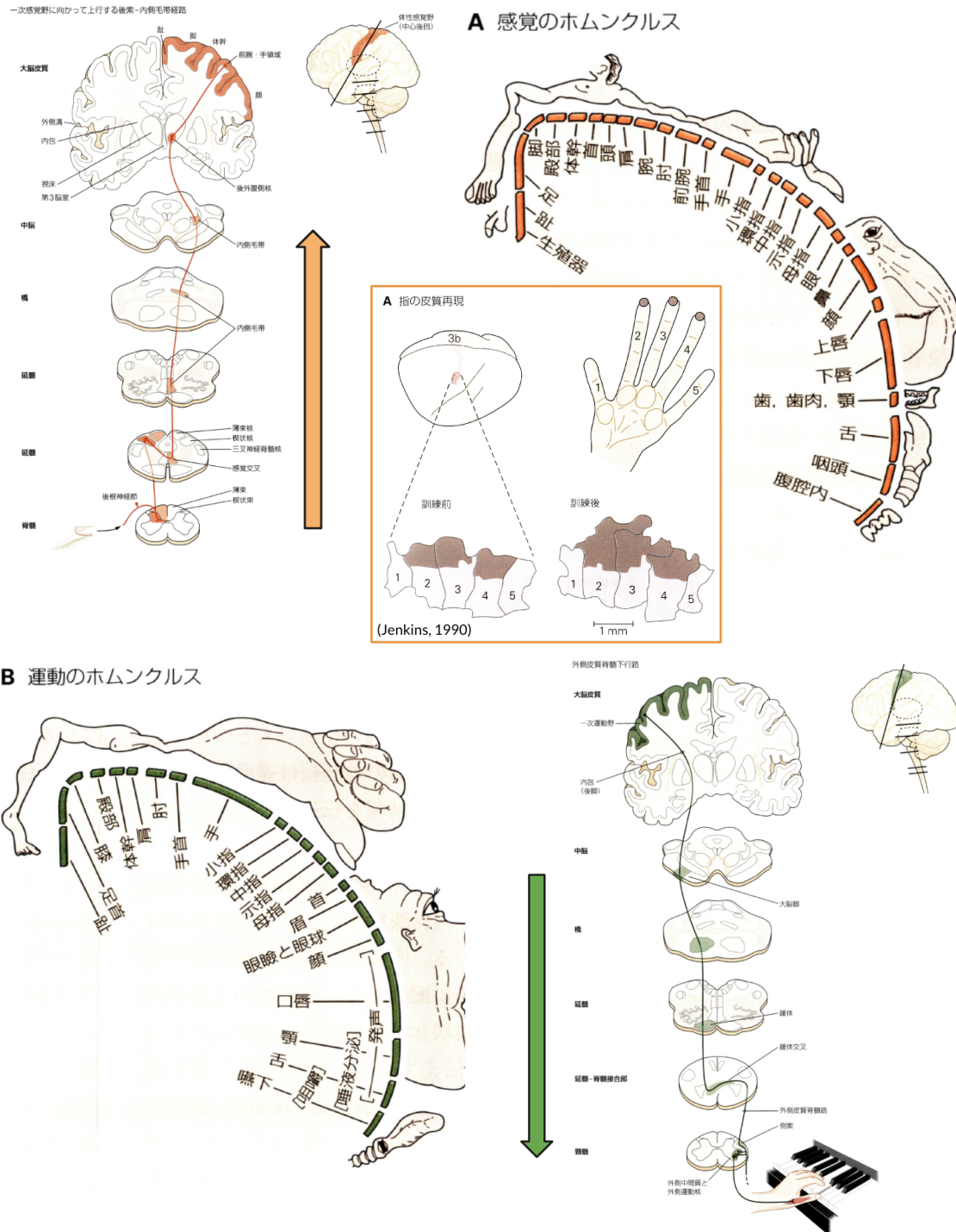


図 2.22: 体性感覚野と運動野における神経情報処理 [48] より引用。A が体性感覚野と求心性感覚信号の対応を示す。また、マカサルの例であるが、体性感覚野において生得指と対応するマップが補足として示されている。B では運動野とそれに関連する神経活動の経路を示している。

神経可塑性により、身体特徴・状態と行為に応じて体部位局在性も変容する。Kolasinski らは、実験参加者の示指と中指をテープで巻き付け、1本の指として擬似的に扱えるように固定した。この固定は24時間後には解かれ、その直後に各生得指の脳神経活動を fMRI(機能的MRI; functional MRI; functional Magnetic Resonance Imaging) により撮像した。同様の流れを4週間に渡って実施したところ、薬指に関する脳神経活動において変容がみられた(図2.23) [90]。

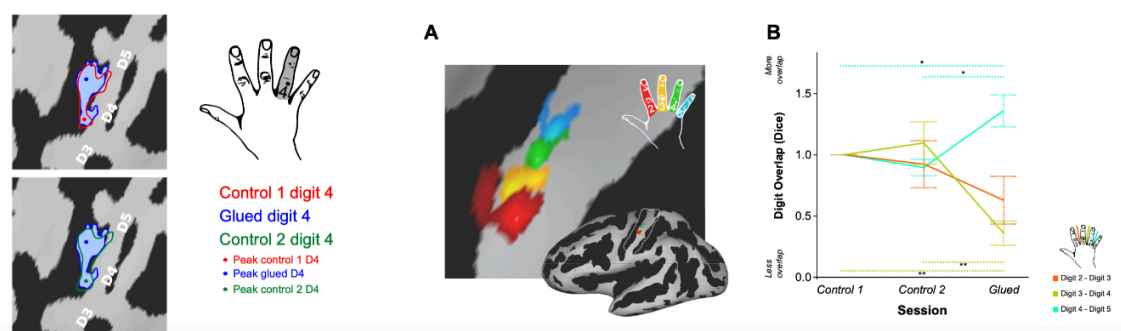


図 2.23: Kolasinski による体性感覚運動野における生得各指の脳活動変容の調査 Somatotopy 上における Peak-to-Peak 上のシフトはみられていないが、多変量解析による次元縮退から薬指の配置が小指側に近づく、中指から離れていく様子がみられた。

2.5 ロボティクスにおける身体性

ロボット・人工知能における「身体性」 ロボットや人工知能分野では、身体と知能は相互補完および作用することによって成立すると言われている [91]。身体が外部環境とのインターフェースまたはエージェントとして機能し、その相互作用によって生じる振る舞いにこそ知能的な動作となるというスタンスを取る。これらは「身体性」の存在を重要視した考え方であり、知能を検討するには知能を見るだけでは不足であるという見方になる。

設計的な観点からみても身体性を考慮すると簡単になるタスクが多くある。ロボットあるいは生体のセンサが身体の適切な場所に配置されていれば、そのセンサ配置によりセンサ信号の前処理は簡易かつ適切に実施できるため信号処理における負担軽減につながる。また、骨格筋システムの材料的特性が十分に利用されれば、たとえ神経システムによる制御がゆっくりでも、総合などの素早い運動を実現することができる。エージェントである身体が環境と物理的相互作用することによって、異なるセンサ信号間に重要な情報を含んだ関係性（相関）が生み出される例である。これらのことを考慮すると、脳を理解するためには脳内活動だけを着目してはそれを理解することはできず、脳と身体と環境の相互作用、つまりはシステム全体を考慮しなければならない、といえるだろう。

Brooks は振る舞いに基づいた設計論として提唱したサブサンプリング・アーキテクチャ(図2.24)の中で “being-in-the-world” を強調した [92, 93]。この俯瞰した物の見方は Martin Heidegger による影響を受けており [94]、下記の引用文が印象的であり、その考え方に触れる

ことができる。

“we function in the world simply by being part of it”

「身体性」は設計上、重要なフレームワークとなり、全体を俯瞰・統合したシステムとして扱われることで重要となる。道具・技術の在り方についても、単体ではなく周囲を含めた系で検討しなければならない。

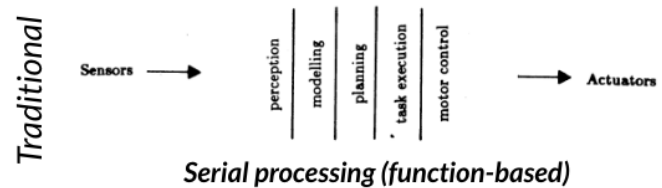


Figure 1. A traditional decomposition of a mobile robot control system into functional modules.

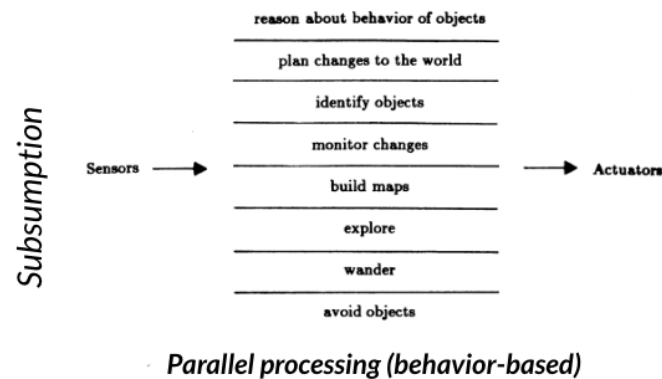


Figure 2. A decomposition of a mobile robot control system based on task achieving behaviors.

図 2.24: サブサンプション・アーキテクチャ 上段には従来・旧来型のシーケンシャルなシリアル情報処理として、センサ信号から知覚 (Perception) し、モデル化 (Modeling)、計画 (Planning)、タスク決定 (Task execution)、運動制御 (Motor control) の処理を経て、最終的にエンドエフェクタの動作が可能となっている。機能的な情報処理のあり方としては理解しやすいものである。一方、下段に描かれているサブサンプション・アーキテクチャではセンサ信号に応じて、あるべき振る舞いが決められ、実行へ移される。

第3章

生得身体と連動する付加的身体部位 の装用学習



本実験では VR 環境下で動作する余剰肢ロボットシステムを開発し、その装用により、余剰肢ロボットアームが自分の身体の一部として捉えられるようになるのか、また、どのような知覚変化が起こるのかを評価した。余剰肢ロボットアームの装用学習タスクの前後においてクロスモーダル一致課題（Crossmodal Congruency Task; CCT）に関わる反応時間を計測した。クロスモーダル一致課題は、自己近傍空間での視覚と触覚の統合について調べるために多く用いられてきた指標である [77, 95]。本課題では、参加者は視覚妨害刺激を無視しながら、触覚刺激の提示位置（上下）の識別判断を行う。本研究では、クロスモーダル一致課題を用いて余剰肢に対する身体近傍空間、すなわち、代表的な身体知覚の特徴である視触覚の強い統合が生起したかを CCE（Crossmodal Congruency Effect）スコアとして評価している。これに加え、余剰肢ロボットアームの身体化に関わる主観評価をアンケートとして収集した。

実験の結果、学習前後で CCE スコアが有意に異なることが認められ、主観評価において余剰肢ロボットアームを身体化したという結果が得られた。特に驚くべきことに、学習前後の CCE スコアの変化量と自分の腕が増えたと感じた主観評価スコアの変化量に正の相関が見られた。

本実験では、VR 環境下での評価となるが、身体部位の付加による機能拡張を目指した余剰肢ロボットシステムの身体化および自己近傍空間が生起した可能性を提示し、参加者が自分の生来の身体部位とは異なる新たな身体部位を得た感覚が生起された可能性を報告する。その考察として、余剰肢ロボットシステムの設計評価の方向性の提示や、余剰身体部位の付加という要素が加わったことによる認知科学における身体化を細分化して議論する重要性を示唆した。

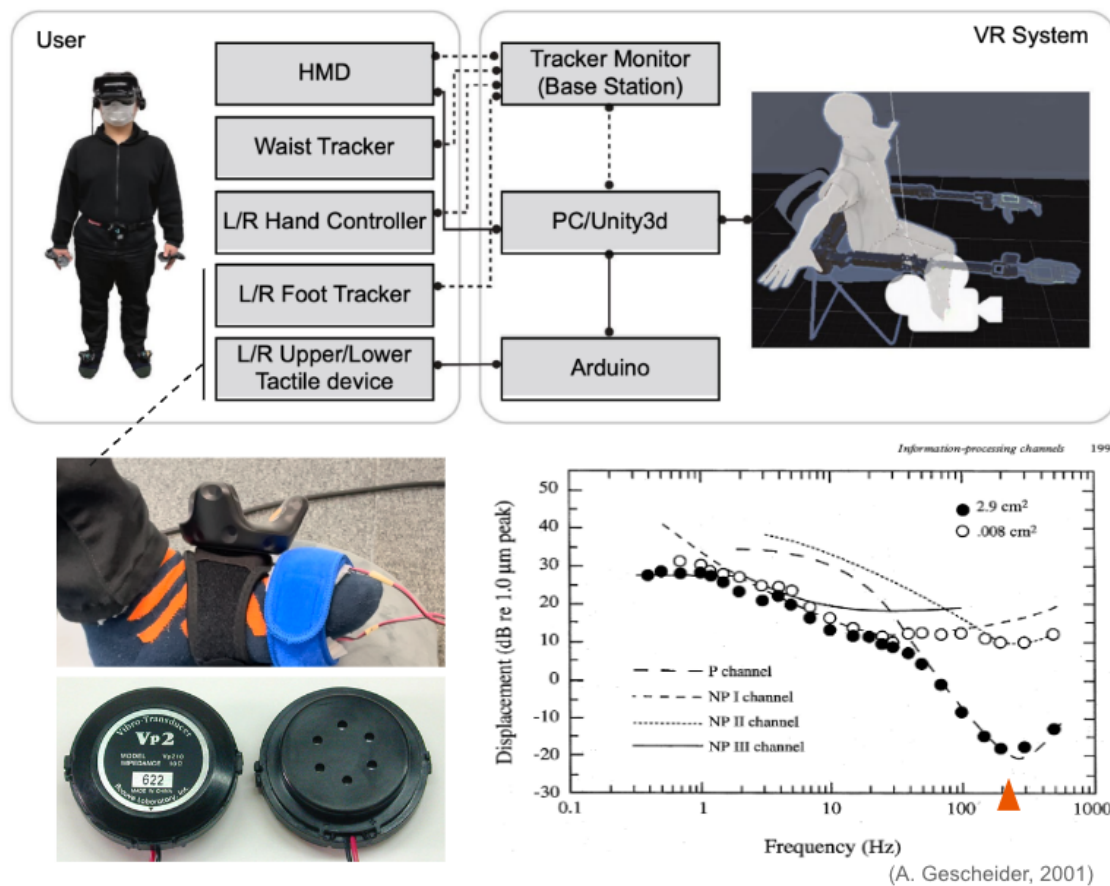


図 3.1: VR 余剰肢のシステム図 上本実験で使用したシステムの構成要素とその関係を示したシステム図であり、実線は有線接続、点線は無線接続を示す。システム図左下に示すのは実験参加者の両足先に取り付けられた VIVE Tracker と振動子である。振動子は足の甲と裏それぞれに配置されている。システム図右下に示すのは人間の振動検出感度が高い周波数帯域を示しており、パチニ小体のプロットに着目して 200Hz 付近が感度が高いことを示している。

3.1 システム概要

本実験で VR 環境下で動作する余剰肢ロボットシステムは、佐々木らが開発したシステムの設計を参考に Limb Mapping 型を採用し [15], 足先に装着したトラッカーと連動して余剰肢ロボットは VR 空間内において動作するように設計されている (図 3.1 を参照). ロボットアームは、肩関節、上腕、肘関節、下腕、手首関節、エンドエフェクタの 7 自由度で構成された. 各関節は人間の腕と同様の動きをするように、可動域に拘束条件を加えている. HMD に搭載されたトラッキングポイント、VALVE INDEX コントローラー、および、腰と足先に装着した VIVE トラッカーの合計 6 点に連動してアバターは動作し、また、足先の VIVE トラッカーの動きはアバターの足だけではなく、ロボットアームにも連動する. ロボットアームの挙動は後述するタスクで必要な範囲で動作するよう設計しており、VIVE トラッカーの情報はエンドエフェクタまでの距離情報と合わせてロボットアームの上下左右の移動・回転における Inverse Kinematics の到達目標位置に設定した. これによりロボットアームの随意的動作が可能となる. なお、ロボットアームの手部と連動している足の動作方向は必ずしも一致しておらず、操作位置によってはアバターから見て前方にロボットアームの手部部を伸ばすために連動している足を逆方向に動作する必要がある.

システム装用者は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD: VALVE INDEX, 解像度 2880x1600 の立体映像を提示) を介して仮想空間に置かれたことを視認した. 仮想空間は、Unity3D (FPS=60 に固定) を用いて構築され、Windows PC (Razer BLADE15: Intel Core i7-9750H 2.6GHz, 16GB RAM, NVIDIA RTX2080) 上で動作させた. 仮想空間内では、装用者が一人称視点でアバターの手足を含んだ身体およびロボットアームを確認できるように配置した (図 3.2 の (b) を参照).

仮想空間内に提示されるボールに対してロボットアームで触れる際には触覚フィードバックを与えるように Arduino を用いて Unity と振動子を連動させた. 振動子は超小型バイブプロトランスデューサ (Acouve Lab 社製 Vp210) を採用し、人間の振動検出感度が高い周波数帯域にある 200Hz を振動周波数として設定した [96] (図 3.1 下段). ロボットアームの手の甲に対し被験者の足の甲が対応し、同様にロボットアームの掌に対して被験者の足の裏が振動する. 左右を含め合計 4 つの振動子が被験者の足に装着されることとなる. なお、タスク課題中には、外界由来の音を遮断するためホワイトノイズを流し続け、聴覚刺激が一定となるように統制を図った.

クロスモーダル一致課題時には、刺激に対する反応を可能な限り早く正確に収集するため、バーチカル型のエルゴノミクスデザインマウス (Delux 社製 M618-PLUS, ポーリングレート: 500Hz, USB 有線接続) を用いた.

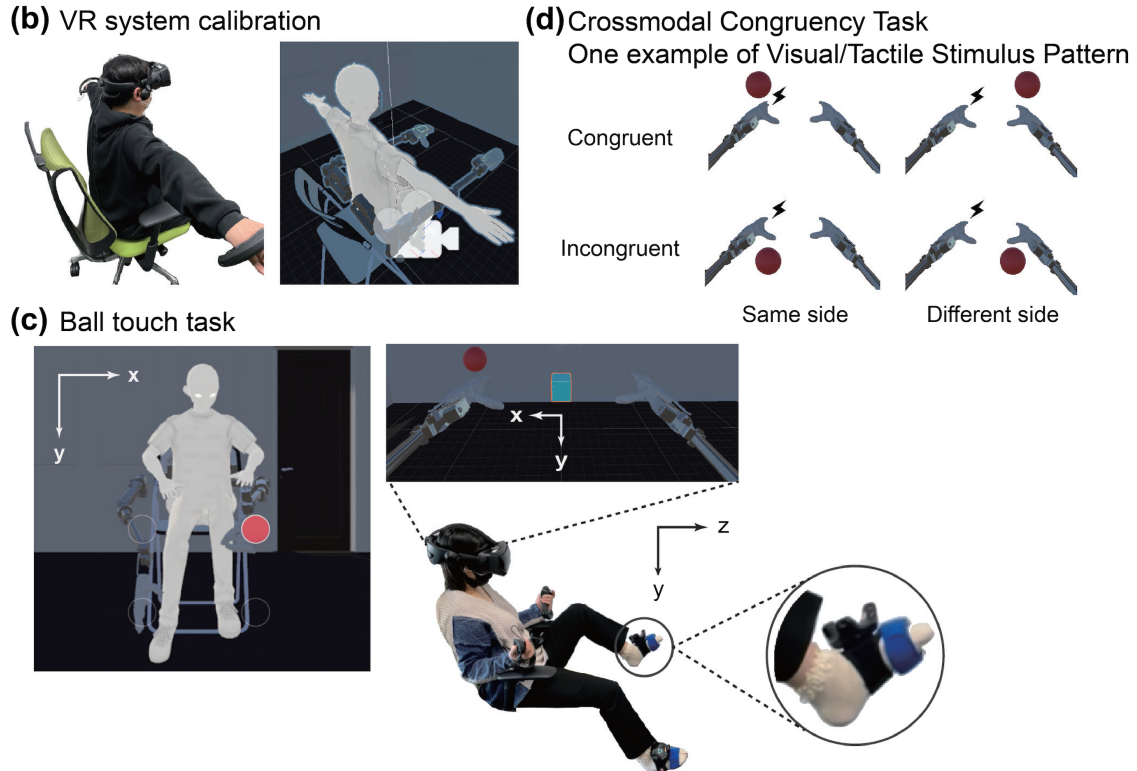


図 3.2: 余剰肢ロボットアームの装用学習実験の概要図 (b)VR システムのキャリブレーションにより、現実空間と VR 空間の対応を示す。(c) ボールタッチタスクの 1 人称視点と 3 人称視点の様子を示している。被験者がボールに触れるとボールは生得的な足の位置に対応する位置まで振動する。(d) 視覚触覚刺激条件の一例としてクロスモーダル一致課題 (CCT) がある。この例では触覚刺激が左足の甲に、視覚刺激が左右のロボットアームの手の甲と掌に伝達されるようにした。

3.2 実験方法

実験手続 本実験には健康な被験者を性別および利き手・利き足を問わず有償ボランティアとして募集し、16 名（うち女性 2 名、21 歳から 27 歳の年齢幅であり平均 22.9 歳）が実験に参加した。うち 1 名はシステム機材トラブルのために実験を中止する必要があったため解析データ対象から除去したため、15 名分のデータを解析として用いた。先行研究にて Aspell らがクロスモーダル一致課題（クロスモーダル一致課題）を実施した結果（ $F_{1,12} = 11.3$ ）を参考にし [97]、望ましい検出力（power）を 0.8 と視覚触覚刺激の昇降条件や位置、また学習効果を考慮した効果量（ $F = 11.3$ ）と有意水準（ $\alpha = 0.05$ ）に基づいて算出したサンプルサイズは 14 名であり必要なサンプル数を満たしていた [98]。実験参加者全員は、正常または正常に補正された立体視力を持つこと事前に確認した。東京大学先端科学技術研究センターの倫理委員会による承認を得た後に遂行され、実験参加前には、被験者全員より書面によるインフォーム・コンセントを得た。以下に述べるすべての実験手順は、同じ倫理委員会により承認され、ヘルシンキ宣言の原則とガイドラインに則って実施された [99]。

実験環境セットアップ はじめに、仮想空間内に被験者を意図通り配置するためにキャリブレーションを実施した。続いて、Experimental Setup にて言及した必要な機材を被験者に装着させていった。準備が出来次第、被験者はロボットアームの装用を練習・学習することなくクロスモーダル一致課題に取り組んだ。その直後には、身体化に対する主観評価などに関連したアンケートに回答した。ここでアンケートに回答するために、一度、HMD を脱着した。アンケート回答後には、順応タスクとしてボールタッチ課題に取り組んだ。一連の順応タスクが終了した直後、すぐにクロスモーダル一致課題に再び取り組み、アンケートへ回答した。最後には実験全体の感想などを収集するためにインタビューを実施した。いずれの項目の詳細については後述する。特に時間制限を設けていなかったが、全被験者いずれにおいても準備から実験終了まで約1時間半程度で終了した。

方法：身体化に関する主観評価アンケート クロスモーダル一致課題の直後に実施されるアンケートとしてVR 余剰肢ロボットアームの身体化に関わる質問紙へ回答するように促した。被験者は質問項目に対して、-3（強く反対する）から+3（強く同意する）までの7段階のリッカート尺度で評価するように求められた。Body Ownership（身体所有感）、Supernumerary Limbs Sensation（余剰肢感覚）、Sense of Agency（行為主体感）、Sense of Self-location（自己位置感覚）、Appearance in VR（外見；身体イメージ関連）、Response（情動反応）の6種類の質問項目を用意した（表3.1を参照）[100]。本実験系では従来のラバーハンド錯覚などの実験パラダイムと異なり、身体部位の代替ではなく付加を図っているため、Q3「まるで自分の腕が2本より多いように感じた It seemed as if I might have more than two limbs/arms」については、身体所有感に対する解釈が異なる。ここでは、任意に動作させることのできる余剰身体部位に対する余剰肢感覚（Supernumerary Limbs Sensation）に関する主観評価として収集した。

方法：クロスモーダル一致課題 クロスモーダル一致課題（CCT; Crossmodal Conguency Task）では、参加者は視覚妨害刺激を無視しながら、触覚刺激の提示位置（上下）の識別判断を行うものである。視触覚刺激提示位置の一致・不一致条件でそれぞれの反応時間を計測し、その差分をスコアリングする [101, 102, 103]。クロスモーダル一致課題時には、被験者はHMD越しで終始にわたって注視点を見るように指示され、触覚刺激が提示された直後に回答するよう求められた。足先に装着した振動子が足の甲に刺激提示されたときにはマウスの上部側のボタンを、足裏に刺激提示された場合には下部側のボタンにて回答しなければならない。視覚刺激提示の直後に触覚刺激提示がなされるわけだが、視覚および触覚刺激の間のレイテンシー（stimulus onset asynchrony; SOA）は $33.3msec$ となるように設計し、実験中に記録したログよりシステム遅延は最大 $16.7msec$ となることを確認した（i.e., 実際の SOA は $33 \sim 55msec$ であった）。なお、SOA が $100msec$ 以下の場合、多感覚統合（Multisensory Integration; MSI）が CCE スコアに寄与し、SOA がこの範囲外にある場合、主に外因性の注意やプライミング効果により CCE スコアは左右されることが知られてる [101, 104, 69]。キューが出された1秒後に視触覚刺激は提示され、触覚刺激からマウスのクリックによる応答

までの時間を反応時間 (Reaction Time ; RT) として記録した。次のキューが提示されるのは被験者の応答から 3 秒後、再度、提示されるようにシーケンスを組んだ。

視触覚刺激の組み合わせは、触覚刺激される足の (右・左) に対して視覚刺激が (同側・反対側) および (Congruent・Incongruent) を満たすように条件が決まるため、全部で 8 パターン存在することとなる。これらの刺激提示の順番はランダムとなっており、1 セッションあたり 6 セット分の組み合わせ提示がなされた。1 セッションごとに休憩が設けられ、特に必要なければ即時に次のセッションへ移行した。全部で 4 セッション計画され、ロボットアームの装用前後それぞれで被験者は合計 192 trials (8 patterns x 6 sets/session x 4 sessions) 取り組んだ。Crossmodal Congruency Effect (CCE) は、Incongruent および Congruent 試行時の反応時間の差分から算出することができる。なお、応答によっては誤った回答が含まれてしまうため、これらを考慮するために特定の条件の平均反応時間から正答率を割った Inverse Effect (IE) を CCE の計算時には同時に指標として用いた [80, 105]。

方法：余剰肢ロボットアームの装用を学習するためのボールタッチ課題 時間制限を設けず、ロボットアームの装用を学習するセッションを設けた。それぞれロボットアームの可動領域内にて上下左右に概ね定まった場所にボールが提示され、被験者は上部に出現したボールはロボットアームの手の甲にて、下部に出現したボールはロボットアームの掌でタッチするように求められた。タッチするとボールは消え、同時に触覚刺激が対応した部位の足に提示された。その後、すぐにボールは異なる場所に提示され、この一連のタスクを合計 400 回、被験者は取り組んだ。被験者の疲労を考慮して 100 回おきに休憩を設けた。なお、それぞれの場所におけるボール出現頻度は等しく 100 回ずつとなるようにしており、出現順番はランダムに定められた。次のボールを触るまでの時間を計測しており、また、左右の足先のトラッカーの位置も記録した。なお、クロスモーダル一致課題とは異なり、視点などの制限は特にせず、ボールタッチの回数をカウントする表示がボールとは異なる場所に提示された。

表 3.1: VR 余剰肢ロボットアーム装用学習実験における主観評価アンケート. 実験参加者は 7 リックカート尺度で主観評価に回答した。質問は身体所有感 (Sense of Body Ownership), 余剰肢感覚 (Supernumerary Limb Sensation), 行為主体感 (Sense of Agency), 自己位置感覚 (Sense of Self-Location), 外見 (Appearance), 情動反応 (Response) の 6 種類を用意した。

Types	Q#	Questionnaire
Sense of Body Ownership	Q1	I felt as if the virtual robot limbs/arms were my limbs/arms
	Q2	It felt as if the virtual robot arms /limbs I saw were someone's one
Supernumerary Limb Sensation	Q3	It seemed as if I might have more than two limbs/arms
Sense of Agency	Q4	It felt like I could control the virtual robot arms as if they were my own arms
	Q5	The movements of the virtual robot arms were caused by my movements
	Q6	I felt as if the movements of the virtual robot arm were influencing my own movements
	Q7	I felt as if the virtual robot arms was moving by itself
Sense of Self-Location	Q8	I felt as if my arms were located where I saw the virtual robot arms
	Q9	I felt out of my body
Appearance	Q10	It felt as if my real arms were turning into the 'virtual' robot arms
	Q11	At some point, it felt as if my real arms were starting to take on the posture or shape of the virtual robot arms that I saw
	Q12	At some point, I felt that the virtual robot arms resembled my own real arms, in terms of shape, skin tone, or other visual features.
	Q13	I felt like I was wearing different clothes from when I came to the laboratory
Response	Q14	I felt that my own arms could be affected by the virtual robot arms

3.3 実験結果

本実験系における解析対象となる従属尺度として、余剰肢ロボットシステムへの順応タスクにおける運動解析、クロスモーダル一致課題において収集した反応時間に対する CCE スコア、余剰肢ロボットに対する身体化感覚のアンケートスコア、CCE スコアと身体化感覚のアンケートスコアの相関関係の 4 つに着目した。

結果：余剰肢ロボットアームの装用を学習するためのボールタッチ課題 被験者は、VR 環境下で余剰肢ロボットシステムの装用に順応するためにボールタッチ課題に取り組んだ。ここでは特に時間制限を設けずに、上下左右にランダムに表示されるボールを余剰肢ロボットアームの先にある手部で触れることが被験者に求められた。ボールタッチ課題は 1 セットあたり 100 回を 4 セット分用意し、1 セットが終了するごとに休憩を設けた。

なお、連続して同じ場所にボールが出現してしまう場合や、タスクに対して過剰に時間を要したケースを除去するために 0.5 秒以下および 10 秒以上タスク遂行に掛かったものについては解析対象より除去した。タスク当初 (1 セット目) ではボールタッチをするためにロボットアームを意図通りに動作させるために時間がかかる傾向にあったが、後半になるにつれて、その操作に慣れてきた様子が確認できた。ボールタッチに関する処理時間をセットごとに解析した Boxplot を図 3.3 に掲載した。結果、1 セットあたりタスクを完了するための所要時間の平均時間は 3.7 分 (+/- 0.8 分) であった。各セットごとの平均所要時間は、1 セット目は 4.5 分 (+/- 1.1 分)、2 セット目は 3.6 分 (+/- 0.5 分)、3 セット目は 3.4 分 (+/- 0.4 分)、最終セットである 4 セット目は 3.3 分 (+/- 0.3 分) であった。

各セットごとの平均時間に対して、対応ありノンパラメトリック順位和検定である Friedman の方法を適用したところ統計的有意差 ($\chi^2(3) = 28.6, p < 0.001$) が確認された。さらに Bonferroni 補正を施した Pairwise Wilcoxon 順位和検定による多重比較を実施したところ 3 セットおよび 4 セット同士の比較以外の組み合わせにおいて統計的有意差がみられた。各セットごとの adjusted p-value は次の通りである "1st set vs. 2nd set" < 0.001 , whereas those of "1st set vs. 3rd set" < 0.001 , "1st set vs. 4th set" < 0.001 , "2nd set vs. 3rd set" < 0.001 , "2nd set vs. 4th set" < 0.001 , and "3rd set vs. 4th set" $= 0.81 > 0.05$).

結果：クロスモーダル一致課題 クロスモーダル一致課題を用いて余剰肢ロボットアームに対する身体近傍空間、すなわち、視触覚の強い統合が生起したかについて、学習タスク前後で評価した。視覚妨害刺激が余剰肢ロボットの周辺に提示される中、足先に提示された触覚刺激に対する応答時間 (Reaction time; RT) および正確さを解析対象データとして収集した。なお、応答によっては誤った回答が含まれてしまうため、これらを考慮するために各条件ごとの正答率を RT で割った値 (IE; Inverse Effect) をもとに統計解析および CCE スコア計算に用いた [80, 105]。また、反応時間が 1500 msec より大きい試行は先行研究を踏襲し操作エラーとして除外した [95]。

IE-RT の平均値は、反復測定三元分散分析 (3-way repeated measures ANOVA) を用

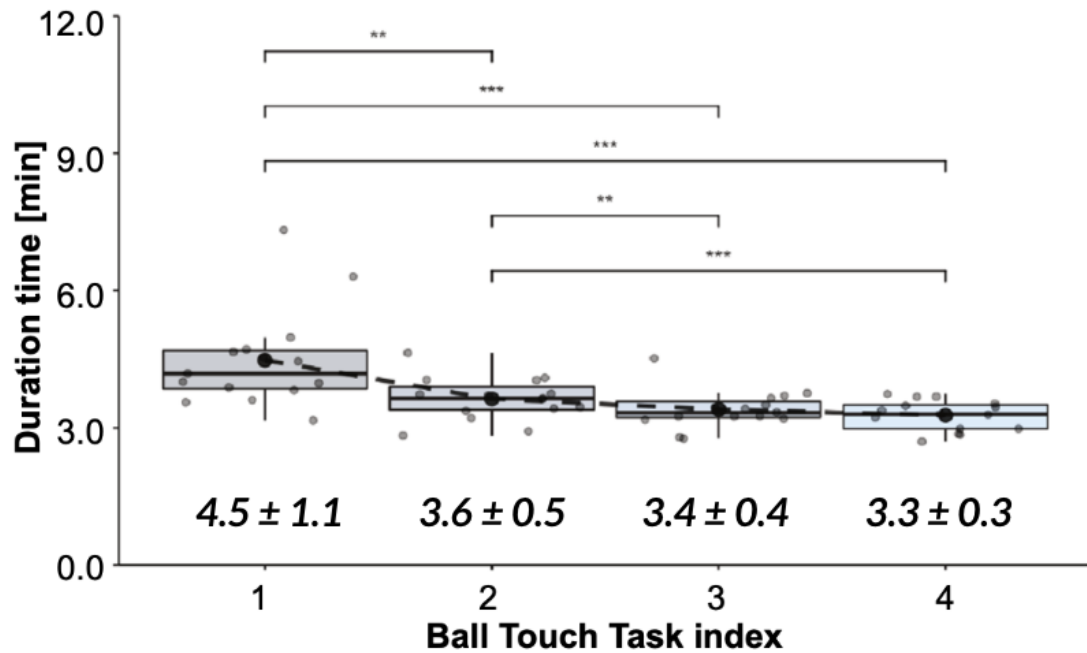


図 3.3: 装用学習タスクであるボールタッチ課題の所要時間 丸印は被験者の結果であり，箱ひげ図は各セットの分布の特徴を示している． * ... $p < 0.05$, ** ... $p < 0.01$, *** ... $p < 0.001$

いて分析した．ANOVA デザインの 3 つの因子は，刺激提示位置の上下一致性（一致する／一致しない），刺激提示位置の左右側面一致性（同じ／異なる），システムの装用学習前後（学習前／学習後）とした．結果，上下一致性（一致する／一致しない）の主効果がみられ ($F(1, 14) = 46.797$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.770$)，また 3 要因の交互作用が確認された ($F(1, 14) = 4.907$, $p = 0.044 < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.260$)．

RT の平均において 3 要因交互作用が認められたため，IE-CCE スコアおよび学習前後の影響を調べるための Post-hoc 解析を実施した．IE-CCE (Crossmodal Congruency Effect) スコアは Incongruent および Congruent 試行時の反応時間の差分から算出することができる．これにより，CCE スコアの平均値に対して反復測定二元分散分析 (Two-way repeated measure ANOVA) を適用した．ANOVA デザインの 2 つの因子は刺激提示位置の左右側面一致性（同じ／異なる），システムの装用学習前後（学習前／学習後）とした．結果，システムの装用学習前後（学習前／学習後）の主効果が確認され ($F(1, 14) = 6.237$, $p = 0.026 < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.308$)，加えて，2 要因の交互作用 ($F(1, 14) = 6.823$, $p = 0.021 < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.328$) が確認された．

CCE スコアの平均において 2 要因交互作用が認められたため，刺激提示位置の左右側面一致性（同じ／異なる）および余剰肢ロボットシステムの装用学習前後（学習前／学習後）の 4 水準それぞれの CCE スコア間での Bonferroni 法による多重比較補正を施した Pairwise T-test を実施することで，その影響を調べた．結果，同側面条件下において学習前後の CCE スコア ($adj.p = 0.027 < 0.05$)，および学習後の側面（同じ／異なる）の CCE スコア

($adj.p = 0.013 < 0.05$) において統計的有意差が確認された。他の条件においては統計的有意差は認められなかった (図 3.4)。つまり、同側に視触覚刺激が提示された場合のみ、余剰肢を使用して学習した後に CCE スコアが有意に上昇したということになる。

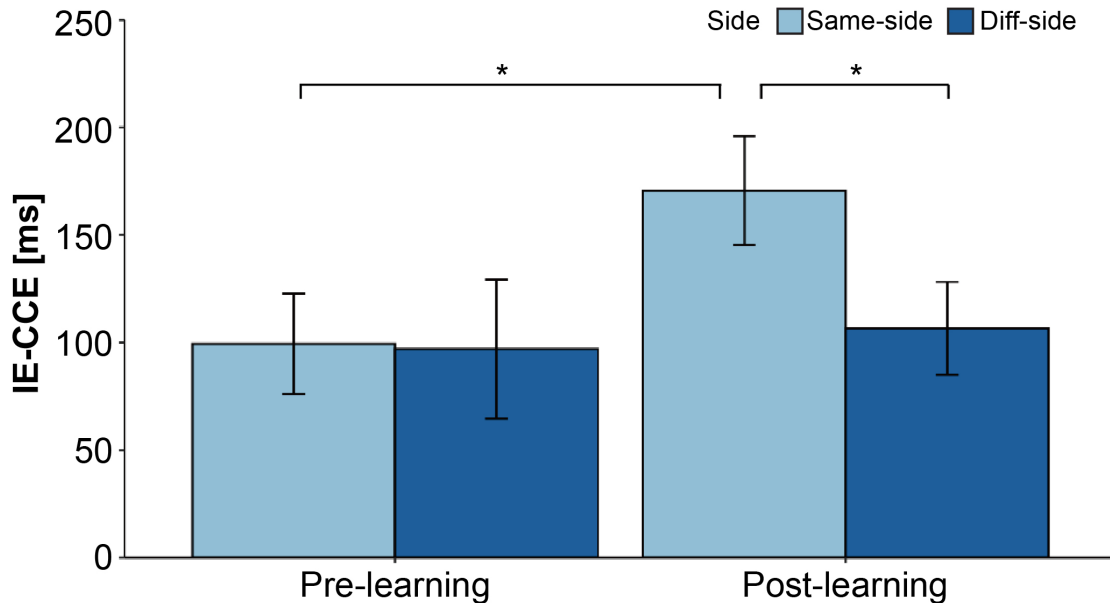


図 3.4: IE-CCE スコア IE-CCE を学習前後それぞれで表示し、同側条件と対側条件での結果を比較した。エラーバーは各条件における被験者間のばらつきを表す。Pairwise 比較にて統計的に有意な差がみられた組み合わせについてはアスタリスク (*) にて示した。* ... $p < 0.05$

結果：身体化に関する主観評価 人工余剰肢に対する身体化感覚に関する変化を評価するためのアンケートは順応タスクの前後で実施されており、各タイミングで被験者間で平均をとることで Wilcoxon-Mann-Whitney 法による統計評価を実施した。結果、Q1 VR 空間に提示されたロボットアームが自分の腕であるように感じた ($p < 0.001$)、Q2 VR 空間に提示されたロボットアームが他人の腕であるように感じた ($p < 0.001$)、Q3 まるで自分の腕が 2 本より多いように感じた ($p < 0.001$)、Q4 VR 空間に提示されたロボットアームが自分の腕のように扱えると感じた ($p < 0.001$)、Q5 VR 空間に提示されたロボットアームは自分の身体動作に応じて動いているように感じた ($p < 0.001$)、Q6 VR 空間に提示されたロボットアームの動きが自分の動作へ影響しているように感じた ($p < 0.001$)、Q8 まるで VR 空間内のロボットアームがある位置に自分の腕であるかのように感じた ($p < 0.001$)、Q11 時々、自分の実際の腕が VR 空間に提示されたロボットアームの形や姿勢になっていると感じた ($p = 0.020 < 0.05$) において統計的有意差が認められた (図 3.5)。傾向として、学習後に身体所有感 (Q1, 2, 3)、行為主体感 (Q4, 5, 6)、自己位置感覚 (Q8) を覚える傾向にあった。

結果：身体化に関する主観評価アンケート結果とクロスモーダル一致課題結果の相関分析 統計的有意差が認められた学習前後の各側面条件にある CCE スコアと人工余剰肢に対する身体性の主観評価の関連性に着目した。ここでは、変化量に着目し、学習前後で各条件におい

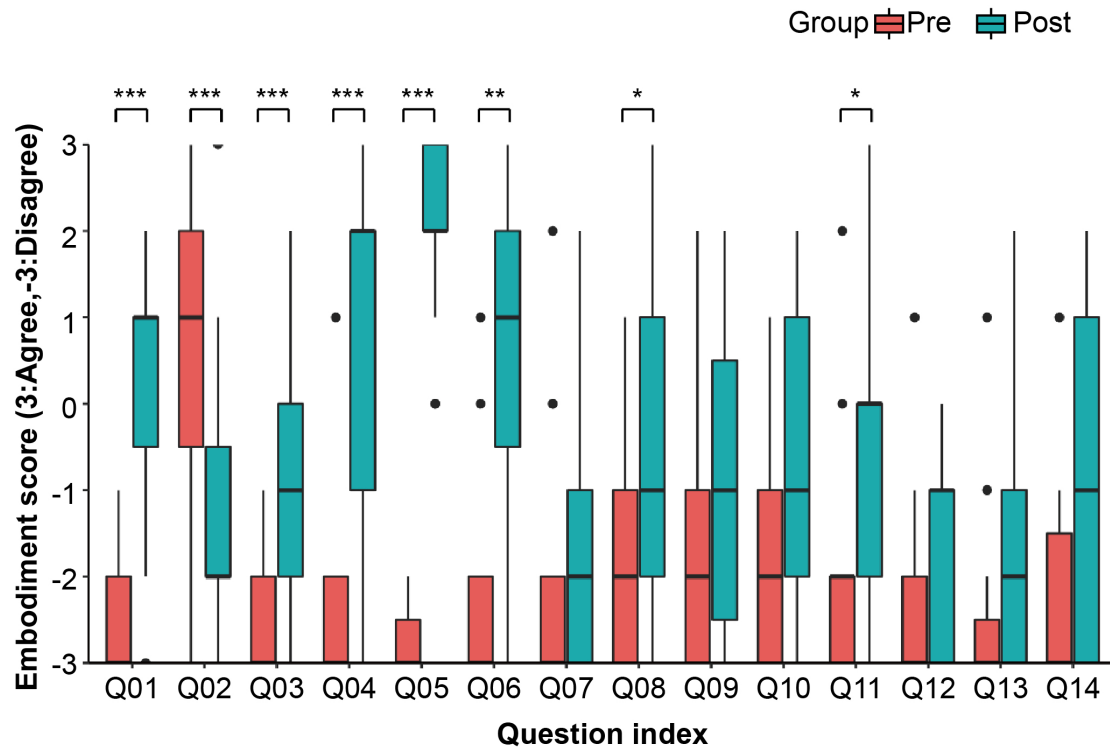


図 3.5: 身体化感覚スコア比較結果 学習前後の各段階での各質問に対する回答は 7 リッカート尺度を用いて収集した。各条件について棒グラフで示した。また、各条件について箱ひげ図として示した。アスタリスク (*) は、学習前と学習後の条件間で統計的に有意な差を示す。* ... $p < 0.05$, ** ... $p < 0.01$, *** ... $p < 0.001$

て差分を取り、相関分析を実施した。なお、今回、被験者は 15 名と相関分析をするために必要な正規性を満たすサンプルサイズがなかったため、ブートストラップ法により仮想的に正規性を満たすことで分析をおこなった。結果、同側条件下における CCE スコアと余剰肢感覚と思われる主観評価 Q3（まるで自分の腕が 2 本より多いように感じた It seemed as if I might have more than two limbs/arms）の変化量には正の相関がみられた（adjusted $R^2 = 0.41$, $F(1, 1998) = 1380$, $p < 0.001$ ）（図 3.6）。また、余剰肢の身体所有感を指す Q1（VR 空間に提示されたロボットアームが自分の腕であるように感じた I felt as if the virtual robot limbs/arms were my limbs/arms.）と余剰肢に対する行為主体感 Q4（VR 空間に提示されたロボットアームが自分の腕のように扱えると感じた It felt like I could control the virtual robot arms as if they were my own arms）それぞれの変化量には正の相関がみられた（adjusted $R^2 = 0.32$, $F(1, 1998) = 937$, $p < 0.001$ ）（図 3.7）。

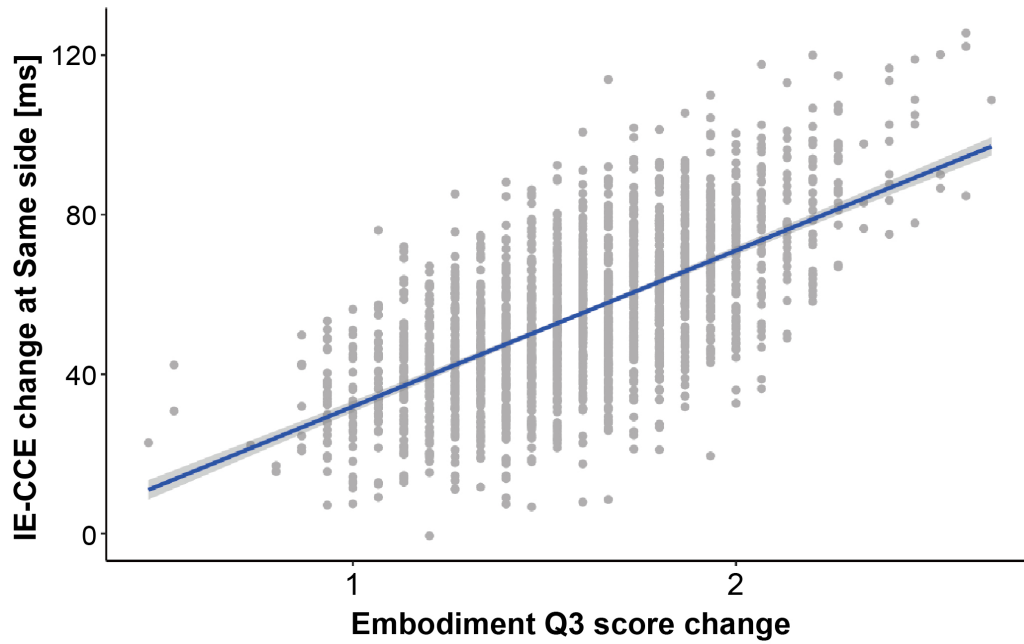


図 3.6: 同側条件下における IE-CCE の変化と学習前後の身体化感覚スコア Q3 の変化との相関 ドットはブートストラップ法により再標本化された点を示し、回帰直線の影は線形近似した直線の 95% 信頼区間を示す。

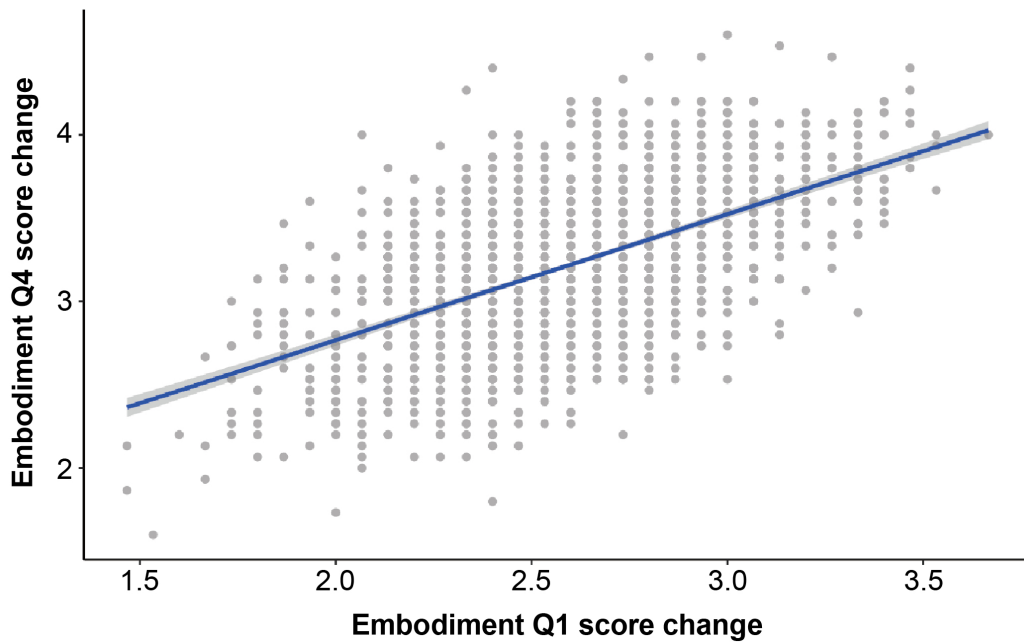


図 3.7: 学習前後における身体化感覚スコア Q1 および Q4 の変化に対する相関 ドットはブートストラップ法により再標本化された点を示し、回帰直線の影は線形近似した直線の 95% 信頼区間を示す。

3.4 考察

本研究では、余剰肢ロボットシステムの身体化を明らかにするために VR 環境下での実験を行い、順応タスクにおける所要時間、余剰肢操作学習前後の CCE スコア、身体化感覚のアンケートスコア、またそれらの相関関係の4つに着目して解析した。結果、ボールタッチ課題時における各セットごとの所要時間を比較した際、セットを重ねるごとに所要時間が短くなり、最終の2セット間の所要時間には有意差は確認されなかった。課題取り組み当初では余剰肢システムの操作を覚えるために時間を要したが、後半にて学習が進み所要時間が3セット目において飽和したと考えられる。クロスモーダル一致課題では、同側面条件下における学習前後および学習後の側面（同じ／異なる）での CCE スコアに異なる傾向がみられ、余剰肢に対する視触覚統合による認知的変化が確認できた。また、余剰肢ロボットに対する身体化感覚の7-Likert scale によるアンケートスコアから、余剰肢に対する身体所有感、余剰肢操作に対する行為主体感、VR 空間に配置された余剰肢に対する自己位置感覚が余剰肢操作学習後に有意に増加することが確認された。さらに CCE スコアと余剰肢に対する身体化感覚の主観評価それぞれの相関を調べたところ、同側条件下における CCE スコアと余剰肢感覚と思われる主観評価の変化量に正の相関がみられ、余剰肢の身体所有感と余剰肢に対する行為主体感それぞれの変化量においても正の相関がみられた。

VR 環境下での上肢の操作に慣れるための十分な装用学習課題であった 1セットあたりのボールタッチ課題の所要時間は最終2セット間では統計的有意差がみられなかったことから、本課題により被験者は余剰肢操作に慣れることができたと思われる。また、余剰肢操作学習後に実施したインタビューでは「操作自体は楽しかった」「2,3,4セット目など後半での操作では特に意識することなく、また心的負荷なく、余剰肢を操作できた」「体が覚えていった感覚がある」「後半はテンポが掴めてきたのでリズムゲームのように取り組めた」「最初は自身の手を動かして余剰肢を操作しようとしてしまっていたが、次第に足での操作に慣れていった」「短時間での集中した操作のため疲労をあまり覚えなかった」といったコメントが得られており、課題をシンプルかつ短時間に設計したことによる効果が出ていた。休憩時間も含めて約17～18分程度の学習時間となっていたことも、これらのコメントが得られたことを裏付ける結果ともいえる。一方で、「余剰肢の動きと、その操作のための身体動作が反しているため戸惑いを覚えた」と余剰肢ロボットの設計に対するコメントもあった。その他には「VR 体験自体が初めてであり少し疲労した」と VR 環境下での操作に対するコメントもあった。これらのコメントがあったものの、最終2セットの後半においては所要時間が飽和した結果となっていた。

VR 環境下での余剰肢ロボットアームへの身体化評価 認知科学的観点からみた余剰肢に対する身体化指標である (1) 余剰肢に対する身体所有感、(2) 余剰肢操作に対する行為主体感、(3) VR 空間に配置された余剰肢に対する自己位置感覚、いずれにおいても学習前後の身体性に関する主観評価の変化から余剰肢ロボットシステムは身体化されたと思われる結果が得られた。質問項目 Q1 (VR 空間に提示されたロボットアームが自分の腕であるように感じた I

felt as if the virtual robot limbs/arms were my limbs/arms.) と Q2 (VR 空間に提示されたロボットアームが他人の腕であるように感じた It felt as if the virtual robot arms /limbs I saw were someone else's) は共に身体所有感に対する評価ではあるが、相反する質問となっている。いずれも反比例する統計的有意差が得られたことから被験者は (1) 余剰肢に対する身体所有感を覚えたと考えられる。質問項目 Q4 (VR 空間に提示されたロボットアームが自分の腕のように扱えると感じた), Q5 (VR 空間に提示されたロボットアームは自分の身体動作に応じて動いているように感じた), および Q6 (VR 空間に提示されたロボットアームの動きが自分の動作へ影響しているように感じた) はいずれも統計的有意な大きなスコアの増加がみられ、一方、質問項目 Q7 (VR 空間に提示されたロボットアームが自動に動いているように感じた I felt as if the virtual robot arms was moving by itself) には統計的有意差がなかったことから学習後には被験者は (2) 余剰肢操作に対する行為主体感を覚えたといえる。質問項目 Q8 (まるで VR 空間内のロボットアームがある位置に自分の腕があるかのように感じた I felt as if my arms were located where I saw the virtual robot arms) においては統計的有意なスコアの増加がみられたことから被験者は (3) VR 空間に配置された余剰肢に対する自己位置感覚を覚えたと考えられる。余剰肢に対する身体化感覚の主観評価のそれぞれ変化量の相関分析から、余剰肢の身体所有感と余剰肢に対する行為主体感の変化量においても正の相関がみられた。これらの結果を鑑みると、学習後において余剰肢を身体化できたと考えられる。

一方で、質問項目 Q10 (自分の腕がロボットアームになったように感じた It felt as if my real arms were turning into the 'virtual' robot arms) および Q12 (時々、VR 空間に提示されたロボットアームが、形や肌の色、その他の視覚的特徴において自分の実際の腕と似ているように感じた At some point, I felt that the virtual robot arms resembled my own real arms, in terms of shape, skin tone, or other visual features.) のいずれにおいても余剰肢操作学習後において統計的有意差はみられなかった。

余剰肢感覚 本実験系では質問項目 Q3 (まるで自分の腕が 2 本より多いように感じた It seemed as if I might have more than two limbs/arms) に関しては取り扱いが先行研究とは異なる。ラバーハンド錯覚やアバターに対する身体所有感での評価においては、本項目はネガティブな要素 (つまり身体所有感を覚えられない) として捉えられている [49]。しかし、本実験パラダイムでは生得的な腕とミラーリングしたアバターと同時に余剰肢ロボットアームが提示されていることから解釈は異なり、余剰肢感覚 (Supernumerary Limbs Sensation) が生起しているかを測るものとなる。余剰肢操作学習後には統計的有意なスコアの増加がみられたことから被験者は余剰肢感覚を覚えた可能性があるといえる。

VR 環境下での余剰肢ロボットアーム周辺の自己近傍空間の生起可能性 クロスモーダル一致課題 (CCT) の結果から余剰肢に対する視触覚統合による知覚変化が確認できたことから余剰肢周辺に自己近傍空間 (PPS) が生じた可能性がある。クロスモーダル一致課題では、一般的に、視覚妨害刺激および触覚刺激が一致した (高さが同じとなる) 時には、一致しない (高さが異なる) 場合と比較して応答時間が早くなり、応答精度が高くなることが知られている。

なお、この視触覚相互作用（視触覚統合）は、視覚妨害刺激が身体近傍に提示された際の特有の特性であり、身体から遠い位置に視覚妨害刺激が提示された場合には、その特性は薄れる。本研究では、余剰肢に対する身体近傍空間、すなわち、視触覚の強い統合が生じたかを評価しており、同側面条件下において学習前後の CCE スコアおよび学習後の側面（同じ／異なる）の CCE スコアにて統計的有意な増加がみられた。この結果は、学習後に視触覚統合が余剰肢ロボットアーム周辺に強く出ていると解釈でき、自己近傍空間（PPS）が生じている可能性を示唆している。これは統計的解析だけではなく、実験後に実施した被験者へのインタビューから「学習後にはクロスモーダル一致課題において視覚・触覚が異なると混乱するケースが多々あった。視覚刺激が特に邪魔に感じた」とコメントも得られており、余剰肢操作学習による視触覚統合への影響が窺い知れる。

VR 余剰肢ロボットアームへの身体化 本実験における学習では、余剰肢ロボットアームの操作学習をするために能動的行為を促した課題となっており、従来のラバーハンド錯覚課題などにあるような受動的な行為および刺激をベースとしたものとは異なるパラダイムを持っている。また、余剰肢ロボットアーム自体は生得的な腕とは独立した任意の動作が可能である点も異なる。そのため、先行研究にあったラバーハンド錯覚の拡張した余剰手錯覚（Supernumerary hand illusion）[27, 28] と比較すると、余剰肢に対する行為主体感（Sense of Agency）に対する評価も可能となり、Shawn Gallagher が提唱した Minimal Self[55] に対して、より直接的な評価が可能となっている。ボールタッチ課題における所要時間が後半のセットになるにつれて飽和したことは、余剰肢ロボットアームの能動的な操作により身体図式（ボディスキーマ）の更新が促進され、余剰肢ロボットアームの動作計画が安定化したことを裏付ける結果といえるかもしれない。

余剰肢ロボットアームの身体化に対する認知科学的解釈における説明変数として自己近傍空間と余剰肢感覚の同時生起が新たに確認され、生来の身体部位とは異なる新たな身体部位を得た感覚が生起された可能性がある。CCE スコアと余剰肢に対する身体化感覚の主観評価それぞれの相関を調べたところ、同側条件下における CCE スコアと余剰肢感覚の主観評価の変化量に正の相関がみられた。これは余剰肢感覚（Supernumerary Limbs Sensation）と自己近傍空間（PPS）の生起には相関関係があることを示唆している。受動的な刺激により生起されるラバーハンド錯覚で説明されてきたゴム手に対する身体性の「代替・転写」とは異なり、本研究では随意運動可能な余剰肢ロボットアームの学習操作により身体化したことにより生起した身体性の「付加」、つまりは、余剰肢感覚（Supernumerary limbs Sensation）を余剰肢感覚と自己近傍空間の同時生起により説明できた可能性がある。また、自分自身の身体であるということを示す認知表象として身体的自己意識（Bodily Self-Consciousness; BSC）[50] があるが、その必要条件として、身体化に関する知覚および自己近傍空間が挙げられている。これらの相関が観測されたことは身体的自己意識の文脈においても、余剰肢ロボットシステムを自己身体として取り入れたことが考えられる。

余剰肢ロボティクスにおける認知的透明性 新たな身体部位となる余剰肢ロボットシステムの動作において認知的負荷の抑制（認知的透明性）を図ることは重要な要件となり得る。余

剰肢ロボットシステム全体の制御戦略として Human-Robot Coupling system[22, 23] が提案されている。本システムでは、操作者の企図を認識するためのコンポーネントや期待する通りのフィードバックを返す機構などが設けられている。しかし、Man-Machine Interface の認知科学的要素がシステム中において、どのようにあるべきかについては言及されていない。一方で、認知作業負荷が高い状態にある時には、動作精度に支障が生じることが懸念されており [106]、これを考慮すれば認知的負荷は抑制されていることが望ましい。これに応じて Man-Machine Interface において認知的負荷を考慮して設計されるのが望ましいと考えられる。

本研究で検証した指標や評価パラダイムが今後の余剰肢ロボットシステムの設計評価にて活用できる可能性がある。今回、我々が開発した VR 空間内に配置された余剰肢ロボットシステムに対して、CCE スコアを用いた自己近傍空間 (PPS) の生起可能性の検討や、余剰身体ロボットシステムの身体化に対する主観評価などを使用することで、余剰肢ロボットシステムが身体化し得るか、その知覚・認知変化に着目して検討した。これは数ある余剰肢ロボットシステムの一例に対して評価したともいえる。その他の余剰肢ロボットシステムの身体化可能性の検討や評価をする上で、同様の評価を適用することで身体化の容易さを比較できるかもしれない。

要追検証：生得的四肢と余剰肢ロボットアームの協調タスクの評価 今回、生得四肢と余剰肢ロボットシステムの協調動作によるタスク評価をしていないため、身体図式の変容に関する更なる議論をするためには追加検証が必要となる。先行研究では、ラバーハンド錯覚の系においてゴム手を身体イメージおよび身体図式へ組み込むことができると謳っているが、身体図式にはどちらか一方の四肢のみ（ゴム手か生得手か）を組み込むことができるとしており、とりわけ身体図式においては排他的な関係が報告されている [28]。対して、本研究にて開発した VR 空間下余剰肢ロボットシステムは、生得四肢についてはアバターとして提示しつつも余剰肢ロボットアーム自体は生得腕とは独立した任意の動作が可能となっており、身体所有感・行為主体感・自己位置感覚の 3 要素から余剰肢ロボットアームの身体化の可能性を示唆した。これを踏まえると、我々の余剰肢ロボットシステムはラバーハンド錯覚の実験および評価系とは明らかに異なる。しかし、生得四肢との協調動作での評価を実施していないため、身体図式が排他的に変容するのか、または、生得四肢と余剰肢ロボットアームが共に組み込まれた身体図式が構築されるかまでは言及できない。

要追検証：余剰肢ロボットアームと連動する足の知覚変化の調査 余剰肢感覚の生起をより深く議論するためには余剰肢ロボットシステムの装用による足の知覚変化についても評価する必要がある。本論文では、生得四肢とミラーリングしたアバターと同時に余剰肢ロボットアームが提示されているため、生得四肢の身体所有感・行為主体感は保持されていると仮定して議論を展開している。これを元に、身体化に関する主観評価の質問項目 Q3（まるで自分の腕が 2 本より多いように感じた It seemed as if I might have more than two limbs/arms）に関しては取り扱いが、ラバーハンド錯覚やアバターの身体化などを対象とした先行研究での実験パラダイムとは異なることを理由に、余剰肢感覚として解釈している。これを、さらに厳密に

言及していくためには、生得足における知覚変化を評価することで、余剰肢感覚とマッピングされた生得四肢における知覚との関係性を描写することができると考えている。

3.5 まとめ

本研究から得られた知見は、余剰肢ロボットシステムの身体化評価に限定されず、認知科学における道具の身体化に関する議論をさらに細分化できる可能性を示唆している。従来、ナイフやハサミ、杖といった道具を用いた際の「代替・転写」や「延伸・縮小」する知覚変化がハイライトされてきた。しかし、身体部位の追加および機能的付加を可能にする余剰肢ロボットシステムの登場により、「付加・減少」する知覚変化を捉えられるようになると我々は考えている。本論文で報告した余剰肢感覚や余剰肢所有感覚などの可能性を示唆したことは、「付加」する知覚変化を捉えた一例といえる。「代替・転写」や「延伸・縮小」だけでなく「付加・減少」も含めて道具の身体化における知覚変化を検討することができるため、認知科学的議論において細分化を図ることができる可能性がある。これに伴い、神経科学などの研究分野においても応じて議論することが可能となる。

今後の展望として、先述した生得四肢と余剰肢ロボットシステムの協調動作実験や、余剰肢ロボットアームにマッピングされた生得四肢における知覚変化などの追加検証に加えて、神経科学的アプローチによる知覚の変容を捉えることが必要となると考えている。先行研究として余剰指に対する神経表現の評価があるが[42]、余剰肢として付加する部位によって神経表現がどのように異なるかについては不明である。また、余剰肢ロボットシステムの装用学習タスクや装用時間など検討しなければならない項目は多く考えられる。また、今回報告した余剰肢感覚や余剰肢所有感覚がどのような機序・動態を持っているのかを認知神経科学の立場で調査していくことは、人間の持つ可塑性限界の探究や余剰肢ロボットシステム設計などにおいても重要になると考えている。

本研究では、VR空間に提示した余剰肢ロボットアームの装用を通じて、参加者が自分の生来の身体部位とは異なる新たな身体部位を得た感覚が生起された可能性を示唆した。余剰肢ロボットアーム周辺に生起されたと考えられる自己近傍空間および新たな身体分位を得た感覚（余剰肢感覚）には相関がみられ、これを元に余剰肢ロボットシステムの身体化可能性を説明した。これは余剰身体部位の付加による機能拡張を目指す余剰肢ロボットシステムにおける認知的透明性を実現する上で重要な設計要素となり得ることを示した。さらには、道具の身体化における知覚変化を細分化し、認知科学的議論を促進できる可能性を示唆した。

第 4 章

独立動作する付加的身体部位の装用学習



本研究では、先行研究 [43] を参考にして小指の側面に独立制御可能な人工指を追加することで、新たに人工指に対応した脳内身体表現が獲得されるかを検証することを目的としている。

4.1 システム概要

本研究では株式会社 Exiii design との協力の元、設計開発された小指型身体拡張デバイス（人工余剰指）を用いた（図 4.1）。人工指は 3D プリンタで生成された指部品、モータ駆動を伝えるリンク機構部分および固定用のベルトによって構成されている。リンク機構に突起状の刺激ピンが取り付けられることで、指の運動に対する体性感覚フィードバックを装着面である左手小指側の側面に返すように設計されている。この刺激ピンはリンク機構から着脱可能なも

のである。人工指は指の屈曲と連動した触覚フィードバックを与えられる刺激ピンが付属したものとピンの無いものの2種類のデバイスが用意され、装用者の企図に応じて動作する同期条件では指の運動に対するフィードバックとして触覚フィードバックを与え、マルチモーダルな刺激をとなるようにデザインした。一方、装用者の企図に応じない非同期条件では触覚フィードバックを与えていない。



図 4.1: 独立動作可能な人工余剰指

人工指の制御には先行研究 [43] を参考に、生得手指の動作にはない左前腕の屈筋群、伸筋群を同時に収縮させ (共収縮) させることで、人工余剰指が屈曲するシステムを採用した。生得手指は屈筋を収縮、伸筋を弛緩させることによって屈曲するが、屈筋、伸筋を同時に収縮 (共収縮) させることで身体運動は発生しない。つまり、日常生活では、この筋収縮パターンは利用されないため他の運動器官から独立した指の制御が可能となる (i.e., Null space の活用)。人工指は、前腕屈筋群 (橈側手根屈筋、尺側手根屈筋)、前腕伸筋群 (橈側手根伸筋、総指伸筋) の計 4 箇所配置された表面筋電位センサの信号をトリガー信号として制御される。筋電位センサは Delsys Trigno Wireless EMG System (Delsys, Inc) を用い、 2000Hz でサンプリングした。計測した筋電信号は Arduino Mega 2560 に入力後、Simulink によって信号処理し、人工指の制御信号を生成した。

共収縮時に人工余剰指である人工示指型余剰指を屈曲させるため、指関節の力学的モデル (図 4.2) に基づき、屈筋群、伸筋群の筋電位の振幅の最小値を比較する制御方法を採用した [43]。指の関節トルク τ は屈筋群、伸筋群の収縮力 F_1 , F_2 と、屈筋群、伸筋群と関節間距離 l_1 , l_2 を用いると、屈曲方向のトルクが $F_1 l_1$, 反対方向のトルクが $F_2 l_2$ であるため、 $\tau = F_1 l_1 - F_2 l_2$ と計算される。指の屈曲状態は τ の値が正で屈曲、0 で静止、負で伸長となる。 $\beta = l_2/l_1$ とすると、生得指の屈伸時、屈筋群と伸筋群は相反関係にあり、どちらか一方

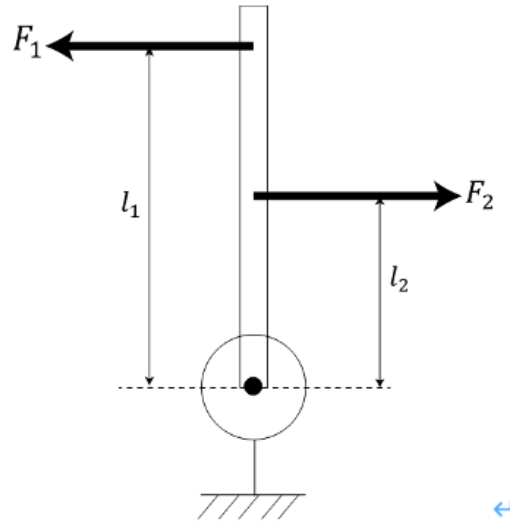


図 4.2: 指関節の力学モデル図 指関節の力学モデル. 屈筋群の収縮力を F_1 , 伸筋群の収縮力を F_2 , 指の関節から屈筋群までの距離を l_1 , 伸筋群までの距離を l_2 とすると, 指関節にかかるトルク τ は $\tau = F_1 l_1 - F_2 l_2$ と表される. このとき τ は, 指の屈曲時 $\tau > 0$, 伸長時 $\tau < 0$, 静止時 $\tau = 0$ となる

が弛緩状態となることから, F_1, F_2 の一方は 0 に近い値となるため $\min(F_1, \beta F_2)$ も 0 に近い数値となる. 人工指の屈曲を割り当てた共収縮時は $\min(F_1, \beta F_2)$ が屈伸時より大きな数値となる. 筋の収縮力と筋電位の振幅の絶対値は比例するため F_1, F_2 に対応する筋電位の振幅絶対値 V_1, V_2 を用いて, 評価値 $\min(V_1, \beta V_2)$ が閾値を上回った際に人工指を屈曲 ($y = 1$), 下回った際に人工指を伸長 ($y = 0$) させるようデジタル信号を出力した. これにより人工指は 1 自由度で動作する.

4.2 実験方法

本実験では, 人工余剰指を装用学習をするためのタッピング課題と, その前後で脳神経活動の変容を検証するための fMRI 撮像, そして, 最後にはインタビューと人工余剰指に対する身体化を問う主観評価アンケートを実施した.

実験参加者 本実験には健康な被験者を男性および右利きの有償ボランティアとして募集し, 16 名 (20 歳から 34 歳) が実験に参加した. 実験参加前には, 被験者全員より書面によるインフォーム・コンセントを得た. これは電気通信大学および生理学研究所の倫理委員会の倫理審査を受けたものである.

方法: 装用学習のためのタッピング課題 人工余剰指の装用学習として先行研究 [43] を元にタッピング課題を用意した. 音楽の拍に合わせて点灯するタッチスクリーン上のキーをタッチするリズム課題を実施した (図 4.3). キーは親指を除く, 示指から人工指の指に対応する位置に表示される. 被験者は左手小指側の側面に人工指を装着し, 上から左手全体を覆う手袋を装

着した。タスク中はヘッドフォンから音楽を流した。キーはランダムに点灯するため、被験者はどのキーが点灯するか予測できない仕様になっている。楽曲は比較的知られており、かつ、リズムとしても合わせやすい二曲を用意した。各楽曲ごとに10試行ずつリズム課題を行い、装用学習を促した。



図 4.3: 人工余剰指の装用学習実験の環境概観

方法：脳神経活動を調べる fMRI 撮像 本実験では、高分解能かつ高い SNR が期待できる 7T MRI (生理学研究所, MAGNETOM 7T, Siemens Healthineers, Erlangen, Germany) を用いた。人工余剰指の身体化を検証するタスクを人工余剰指の装用学習前後に設けることで、装

用学習に伴う脳活動変容を捉えるようにデザインした（図 4.4）。なお、MRI 撮像室には磁気を帯びたデバイスを持ち込むことはできないため、生得左手五指（人工指は除く）に対して検証タスクを実施している。手指の随意運動には一次運動野および一次体性感覚野の両野を合わせた感覚運動野が密に関係する。そこで本実験では撮像した全脳のうち、手指に対する脳活動の変化を調査できるよう感覚運動野における脳活動の変化に着目した。

fMRI の撮像パラメータは次の通りである。 $TR = 2000ms$, $TE = 25ms$, $FA = 65^\circ$, Number of slices = 52, Voxel size = $1.2 \times 1.2 \times 1.2mm^3$, FOV = $192mm \times 192mm$ また、タッピングタスクの指示として提示する視覚刺激はディスプレイによって提示した。ディスプレイの解像度は 1024×768 に設定し、ディスプレイの横幅は $82mm$ 、視距離は $48.2cm$ であった。

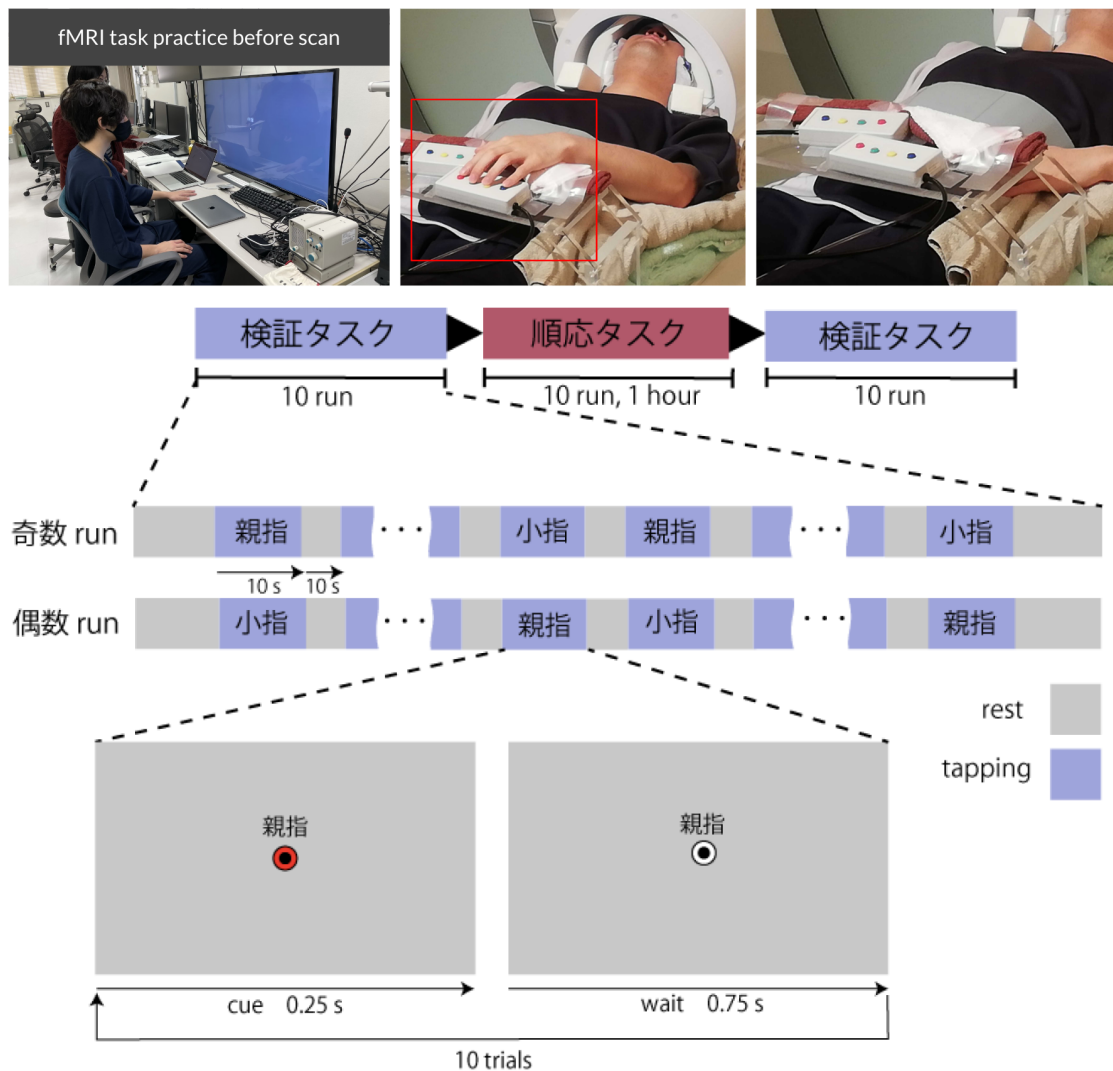


図 4.4: fMRI 撮像中における各生得指に対する脳神経活動を取得するための課題（検証タスク）

表 4.1: 人工余剰指に対する身体化を評価するための主観評価アンケート

分類	番号	質問内容
行為主体感	Q1	人工指を操作する課題中、人工指が動かしたい時に動いた
身体イメージ	Q2	人工指を操作する課題中、6本指の手が正常に見え始めた
行為主体感	Q3	人工指を操作する課題中、人工指を動かすことは、実際の指を動かすくらい容易なことだった
身体所有感	Q4	人工指を操作する課題中、人工指を自分の手の一部だと感じた
行為主体感	Q5	人工指を操作する課題中、人工指を自分で動かしていると感じた
身体所有感	Q6	人工指を操作する課題中、人工指は自分の指だと感じた
身体イメージ	Q7	人工指を外した後、自分の手は（狭くなった/普通だった/広くなった）
統制条件	Q8	音楽ゲームを普段からよくプレイする
統制条件	Q9	人工指を操作する課題中、人工指以外の全ての指はリズムに合わせて曲げられていた
統制条件	Q10	人工指を操作する課題中、指先の全てのLEDがよく見えていた

方法：人工余剰指に対する身体化を問う主観評価アンケート 装用学習後に実施される fMRI アンケートとして人工余剰指の身体化に関する質問紙へ回答するように促した。被験者は質問項目に対して、-3（強く反対する）から +3（強く同意する）までの7段階のリッカート尺度で評価するように求められた。先行研究 [43] を元に身体所有感、行為主体感、身体イメージ関連、統制条件の4種類の質問項目を用意した（表 4.1 参照）。なお、実験手続きに不備があったため、13 名分の実験参加者の結果となる。

4.3 実験結果

結果：人工余剰指に対する身体化を問う主観評価アンケート 各質問項目ごとに Sync/Async 条件間にて得られたスコア値に対して Wilcoxon 符号順位検定により統計解析を実施した。結果、Q1 人工指を操作する課題中、人工指が動かしたい時に動いた ($p < 0.01$)、Q2 人工指を操作する課題中、6本指の手が正常に見え始めた ($p < 0.05$)、Q3 人工指を操作する課題中、人工指を動かすことは、実際の指を動かすくらい容易なことだった ($p < 0.01$)、Q4 人工指を操作する課題中、人工指を自分の手の一部だと感じた ($p < 0.05$)、Q5 人工指を操作する課題中、人工指を自分で動かしていると感じた ($p < 0.01$)、Q6 人工指を操作する課題中、人工指は自分の指だと感じた ($p < 0.01$)、Q9 人工指を操作する課題中、人工指以外の全ての指はリズムに合わせて曲げられていた ($p < 0.01$) において統計的有意差が認められた。傾向として、行為主体感 (Q1, Q3, Q5)、身体イメージ (Q2)、身体所有感 (Q4, Q6) いずれにおいても Sync 条件が身体化条件にあてはまる傾向を示した。

結果：脳神経活動を調べる fMRI 撮像 脳活動解析には、AFNI を用いて各指に対応する脳活動変容の統計解析を実施した [107, 108, 109]。いずれのデータセットも、前処理として HCP Pipeline により解剖画像 (3T MRI, T1WI) に対するアラインメントやノイズ除去などを

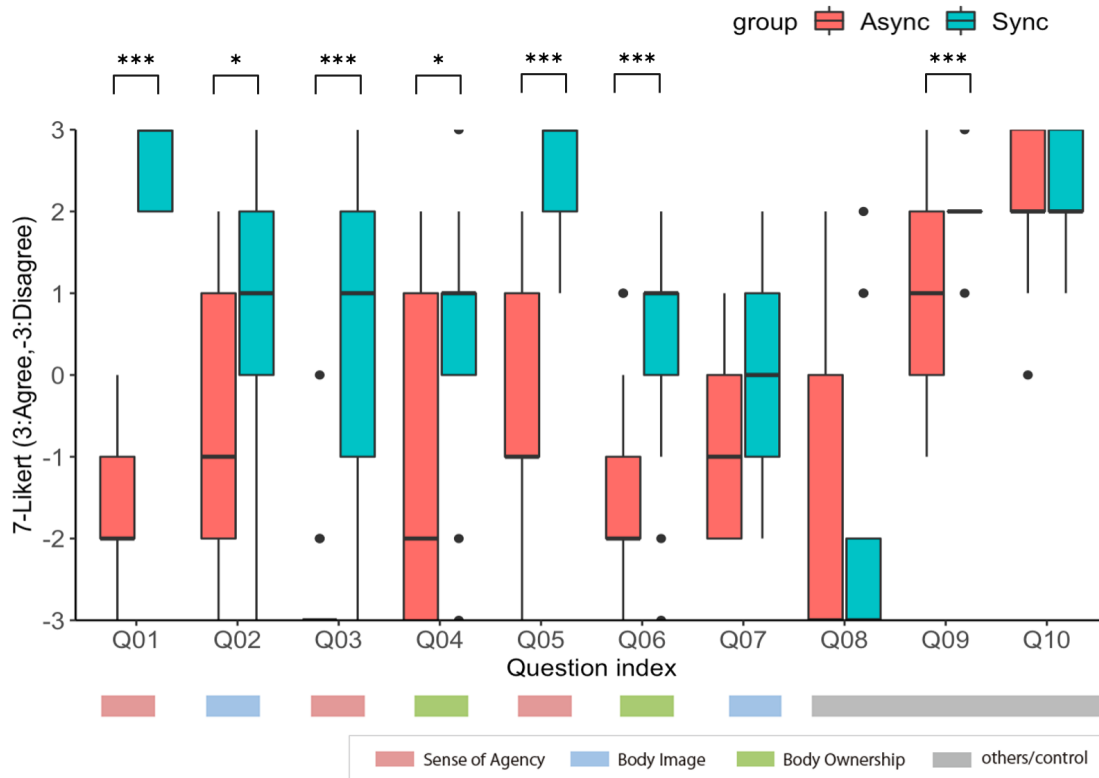


図 4.5: 人工余剰指に対する身体化に関する主観評価アンケート結果 各質問項目で条件間にてスコア値の Wilcoxon 符号順位検定による統計評価を実施. 行為主体感 (Sense of Agency), 身体イメージ (Body Image), 身体所有感 (Body Ownership), 統制条件およびその他 (Other/Control) を各設問に対して明示した. * ... $p < 0.05$, ** ... $p < 0.01$, *** ... $p < 0.001$

施した (図 4.6) [110]. グループ単位での解析には, 時間的相関を考慮した制限付き最尤法 (REML; Restricted maximum likelihood) による一般化最小二乗法 (GLSQ; General Least Square) を元に, t 値を一般化して正確に推定する混合効果メタ分析法 (3dMEMA; Mixed Effects and Meta Analysis) を使用した [111]. 各実験参加者 (Lv1) の解析では一般線形モデル (GLM; General Linear Model) では, 3D REML fit の手法を採用した. なお, 装用学習により脳活動は変容していると仮定し, ここでは装用学習前後間で脳活動コントラストを GLM を解く際に得ている. ここで得られた装用学習前後間の脳活動コントラストを用いて, Sync/Async 条件間比較をグループレベルで実施している. その結果が図 4.7 である. 一次感覚運動野領域で親指・薬指・小指の Sync 条件にて大きい値を示した.

結果：身体化に関する主観評価アンケート結果と脳活動変容の相関分析 人工余剰指への身体所有感 (Q6) と親指に関する脳活動変化において負の相関がみられた (図 4.8). なお, 分布の正規性を仮定した評価であり, 統計的に有意に相関がみられた例のみを抽出している. 人工余剰指への身体所有感を覚えるほど, 親指の脳活動が減少する傾向がこの相関結果より類推される.

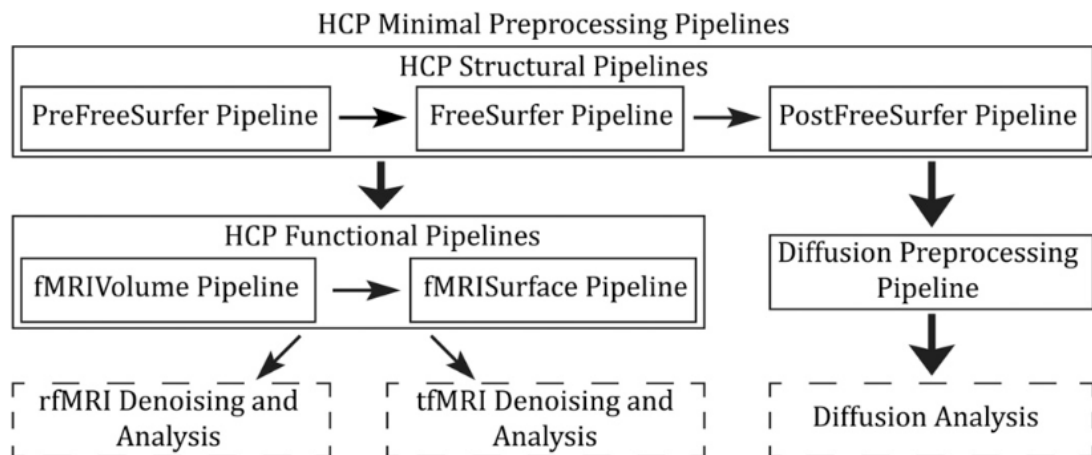


図 4.6: HCP Pipeline による前処理

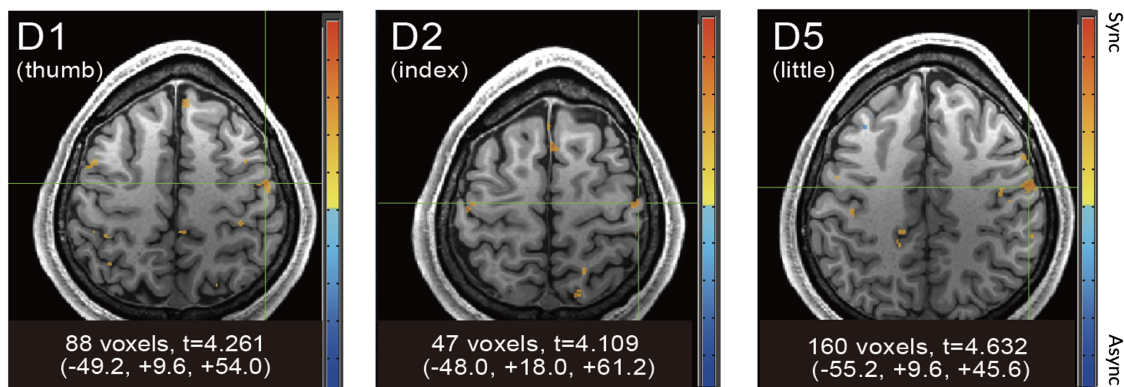


図 4.7: 装用学習前後のコントラスト画像を用いたグループ解析: Sync/Async 条件間比較 D1(親指), D2(示指), D5(小指)において Sync 条件が統計的に有意に高くなる傾向が見られた. 3D Mixed-Effects Multilevel Analysis[111] により解析. Uncorrected- $p < 0.01$, クラスタサイズの閾値は 20 ボクセル以上とした.

4.4 考察

独立動作可能な人工余剰指に対する身体化可能性 独立動作可能な人工余剰指に対する主観評価アンケート結果より示唆されたように, Sync 条件において身体化条件である行為主体感・身体イメージ・身体所有感が確認された. これは先行研究 [43] での行動実験での結果と同様の傾向を示している. 先行研究では, 主観評価に加えて運動解析により固有受容感覚ドリフトが確認されている. Sync 条件にて身体化が促進した要因としては, Async 条件と比較してマルチモーダル刺激(視覚・触覚・固有受容感覚)として情報が多く, 身体化が促進された傾向がみられたと考えられる.

装用学習時間が約 1 時間程度であったにも関わらず, 身体化できた可能性を示唆できた点については他の関連研究との差分を考慮する必要がある. Tamar Makin の研究グループでは,

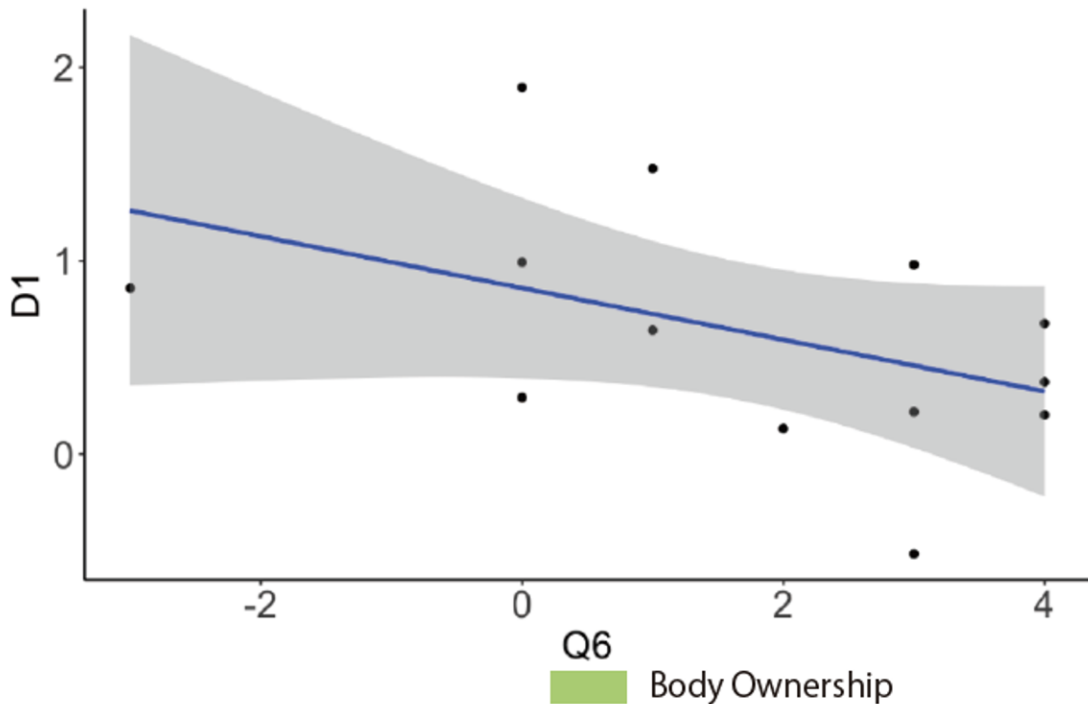


図 4.8: 脳活動変容と身体化指標における相関 D1 における Sync-Async 条件間脳活動コントラストと 6th Finger に対する身体所有感スコアのコントラストに負の相関がみられた。

両足の親指の動きと連動して動作する Third Thumb (図 4.9) を設計・開発し、同様に身体化および脳活動変容を調べている [112, 42]。Tamar らの研究では、装用学習に生得的身体との協調運動タスクに加えて、数種の動作パターンを装用するため、1 日あたり約 1.5 時間の装用学習を 5 日実施する。また、その 5 日間の装用学習期間では、1 日あたり 3 時間ほど自由に動作させるようタスクを課している。複数の身体との連携をすることで操作するという点と視覚的外見の齟齬が長時間装用による学習を必要としている可能性がある。一方、我々の使用している 6th Finger は約 1 時間ほどの装用学習で済む簡便さを持ち、1 自由度のみの動作である。また、視覚的齟齬を抑制するために手袋をさせており、Tamar らのアプローチと比較して複雑な操作は必要としない。これらの差分となる要素が装用学習時間の短縮をもたらした可能性がある。

人工余剰指の身体化に伴う脳神経活動の変容可能性 脳活動変容の結果より、Sync 条件では一次感覚運動野における親指・示指・小指にて脳活動が高くなる傾向がみられたことから、身体化により生得手指の脳活動を変容させる可能性があることが示唆された。体部位局在の観点では、生得指のマッピングが変容された可能性はみられなかった。これは Kolasinski が報告した生得指の運動制限により変容した脳活動変容と傾向は類似する [90]。今回の解析では多変量解析を実施していないため、多次元スケーリング (Multidimension Scaling; MDS) などを適用することで、生得指における脳活動変容が生じているかどうかを検証する必要がある。

身体化に関する主観評価アンケート結果と脳活動変容の相関分析より、人工余剰指への身体

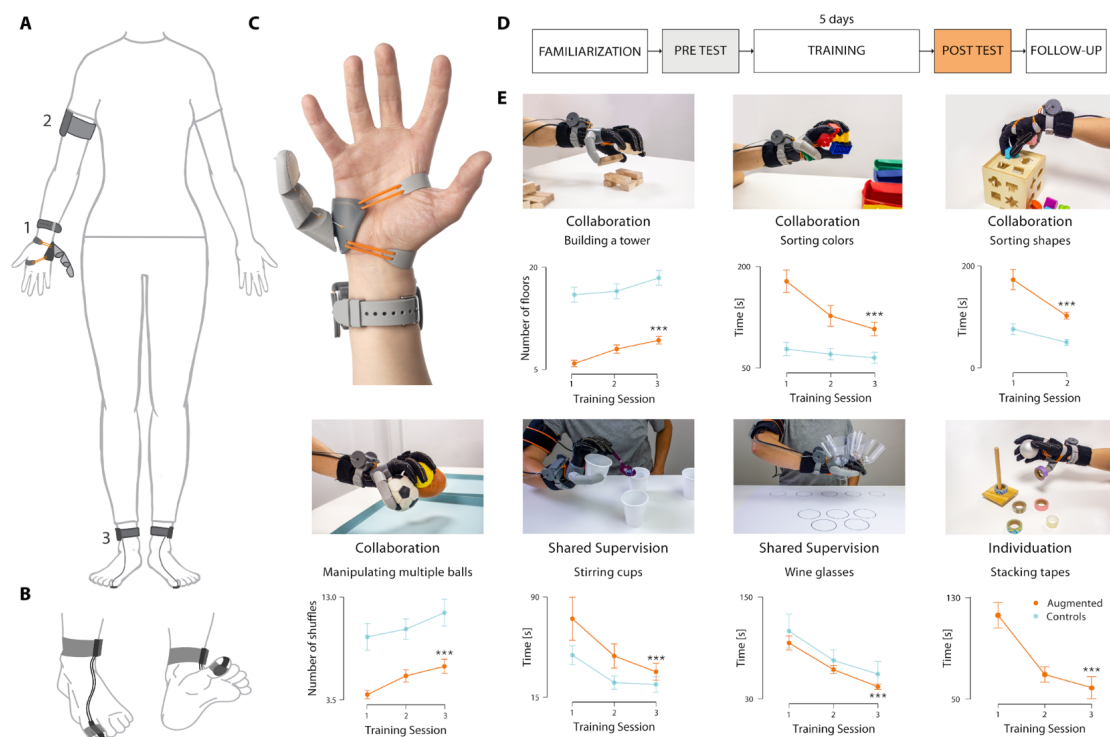


図 4.9: **Third Thumb** [42] より引用. (A ~ C) **Third Thumb** は、3D プリンターで作られたロボットの親指であり、手のひらの側面に装着し、2つのモーター（リストバンドに固定）で作動する．屈曲・外転を独立して制御することが可能であり 2 自由度を持つ．腕に巻いた外部バッテリーから電源を供給され、参加者の両足母指の裏側に固定した 2 つの力センサにより無線で制御する．(D ~ E) には装用学習に関する情報を示す．

所有感と親指に関する脳活動変化において負の相関がみられた．これは人工余剰指に対する身体化が進むにつれて、生得指における脳活動が人工余剰指側へエネルギー的に遷移したことが推測される．脳活動変容単体での解析でもみられたように独立動作可能な人工余剰指の身体化は、相関解析から裏付けられた結果ともいえる．一方で、Sync 条件における生得母指の脳活動変容は高くなる傾向を示していることから、生得指に対する脳活動全体は人工余剰指の身体化に伴い高くなっている点と齟齬が生じている．この点は今後、詳細な解析により明確にすることが求められる．

4.5 まとめ

本研究では、独立動作可能な人工余剰指の装用学習による身体化および、それに伴う身体認知の変容を調査した．身体化に関する主観評価の比較では、人工余剰指に対する身体所有感・行為主体感・身体イメージにおいて制御可能条件が有意に上回る結果となった．また、脳活動コントラストのグループ解析では、親指・薬指・小指に関する一次感覚運動野にて制御可能条件が大きい値を示した．相関分析では、人工余剰指への身体所有感と親指に関する脳活動変化、および、人工余剰指への行為主体感と薬指に関する脳活動変化において負の相関がみられ

た．これらの結果より，人工余剰指の身体化は一次感覚運動野における身体部位の原始的な表象に関わる脳活動を変容させる可能性が示唆された．

第 5 章

超冗長自由度系身体部位の装用学習



本研究では超冗長自由度系の身体を装用学習する時の身体部位の事前評価として、軟体動物の外見をしたアバタ装用による知覚・行動の変容(プロテウス効果)や、身体イメージ・身体図式などの身体認知の変容に注目する。人間とは異なる身体特性をもつアバタの装用体験では、そのアバタの身体特性に紐づく、生来の身体では覚えられない感覚体験を引き起こすことがプロテウス効果として報告されている。例えば、ドラゴンアバタや頑強な見た目をしたロボットアバタを装用した際に高所への恐怖が薄れるという効果が報告されている [113]。ここで我々は人間とは異なる身体特性を持つ動物の外見をしたアバタを装用することが知覚や行動、身体認知に影響を与える要因として以下 2 点に着目した。

- (1) 物理空間における人の身体とは異なる特性の外見の獲得
- (2) 人が過去の経験からその動物に対して持つ身体特性や行動特性に対するイメージ

これら 2 つの要因が知覚や行動、身体認知の変容にどのように関わるかは、詳細には分かって

いない。

そこで本研究では、人間の身体特性とは大きく異なる柔らかい身体特性を持ち、一般的にその特性を人がイメージしやすい動物としてタコに着目し、上の2つの要因がどのように知覚や行動、身体認知に影響を及ぼすかを調査した。人間の腕・手指は骨格で規定された範囲内で身体動作をしているが、タコ腕部は自由度の制限はなく、非常に柔軟に動作することが知られている。この柔らかな身体特性を人間が獲得した際には、生得的な身体特性では難しい新たな感覚体験を達成できる可能性が見込まれる。

人間と身体特性が大きく異なるタコ腕の外見を持つアバタの装用を想定した際、上記に挙げた2つの要因は下記のように具体化できる。

- (1') 腕・手・指等の身体部位の区分がない人間とは異なる外見的特性
- (2') 軟体動物らしい柔らかさ等のイメージ

これらの要因の影響を検証するために、(1')(2')の要因を両方持つタコ腕型アバタ、(1')のみの要因を持つ箱腕アバタ、両方の要因を持たないヒト腕型アバタを用意し、装用時の行動変容と、装用後の手の大きさや柔らかさといった身体認知に関する変容を調べた。その結果、両方の要因を持つタコ腕型アバタ装用時においてのみ参加者は柔らかい身体感を得ていたことが確認された。また、(1')の要因を持つタコ腕型アバタおよび箱腕アバタを装用した後に指先から手首までの長さの感覚が延伸していることが分かった。これらの結果から、人間とは異なる外見的身体特性を持つアバタの装用による知覚や行動、身体認知の変容の可能性を議論する。

5.1 システム概要と実験方法

実験参加者 19歳から39歳の有償ボランティア14名（男性12名、女性2名、平均24.3歳）が実験に参加した。しかし、そのうち2名は実験時のトラブルにより分析対象から除いた。全参加者は正常または正常に補正された立体視力を持ち右利きだった。実験は東京大学ライフサイエンス研究倫理支援室による承認を得た後に実施され、実験参加前には被験者全員より書面によるインフォームド・コンセントを得た。また、すべての実験条件・手順は、同倫理支援室により承認を受けて実施された。

実験環境 実験プログラムはUnity3Dを用いて作成された。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)はVIVE Pro 2(片目解像度2448 × 2448ピクセル、視野角120度、リフレッシュレート90Hz)を使用し、参加者への視覚情報の提示と参加者の頭部運動のトラッキングを行った。上肢運動のトラッキングには、右肘のトラッキングにVIVE Tracker、右手指のトラッキングにUltraLeapを用いた。なお、右肩関節などトラッキングを行っていない部位はFinal IKを用いて補完し、動作させた。実験シーンの作成および再生には、OSにWindows 10 Home、CPUに11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11800H @ 2.30GHz 32GB、GPUに

NVIDIA GeForce RTX 3080 Laptop GPU を搭載した PC を使用した。

実験条件 アバタの外見が参加者の身体知覚や行動に与える影響を検証するために、右肩から右人差し指にマッピングされて動く3種類の腕アバタの外見条件（タコ腕型アバタ、箱腕アバタ、ヒト腕型アバタ）を用意した（図 5.1）。アバタの形状・動作部位は観察の容易さや直感的な動作のマッピング等を考慮し設定した。各条件のアバタは参加者の上肢運動と連動して動き、参加者は後述する運動タスク中に、一人称視点からアバタを観察できた。また、腕アバタ部以外の身体部位は全ての条件において VR 空間上に表示されなかった。

この際、アバタの外見以外の要素が参加者の身体知覚や行動に影響を与えることをできるだけ防ぐために、参加者の右肩から人差し指の先端までの各関節とアバタのボーンのマッピングや、指先に対応するメッシュの先端位置、衝突判定は全ての条件で等しくなるように調整した。各腕アバタの大きさは肩から指先まで約 71cm とし、参加者は実際の腕とほぼ同じ位置・大きさで操作できていた（図 5.2）。タコ腕型アバタ条件では、タコ腕の身体的特徴を模擬した外見をしたアバタが提示された。タコ腕型アバタは腕の根元から先端にかけて徐々に細くなる形状をしており、腕の内側には吸盤があり、全体に細かな斑点の模様がつけられていた（図 5.1 a）。箱腕アバタ条件は、「(1') 腕・手・指等の身体部位の区分がない人間とは異なる外見的特性」のみを満たす条件として設定された。箱腕アバタは各関節間をつなぐ部位が箱型の抽象的なオブジェクトによって表現されていた（図 5.1 b）。また、タコ腕型アバタと同様に腕の根元から先端にかけて徐々に細くなっていた。これは、タスクで使用する指先の当たり判定の位置を参加者に視覚的にわかりやすくするためであった。ヒト腕型アバタは、統制条件として用意され、人の上肢を模した生得的な身体に近い外見であった（図 5.1 c）。ヒト腕型アバタでは、人差し指以外の各指の運動についても参加者の運動と連動していた。ただし、実験中は人差し指以外の指は軽く握りこみ動かさないようにすることが求められた。

タスク 参加者は各アバタの外見条件につき 1 セッションずつ、計 3 セッションのアバタ装用による知覚・行動や身体認知への影響を測るための実験セッションに参加した。各セッションは、VR 空間上に設置された箱に触る運動タスクによる上肢運動の測定、指先・手首の位置感覚の測定、主観的な身体感覚に関するアンケート調査で構成された。

運動タスク アバタの装用による行動変容を評価するため、参加者に VR 空間内に繰り返し提示される箱に触れる運動タスクを課した（図 5.3）。具体的には、正面の床からの高さ 1m の位置を中心とする、右上、左上、右下、左下の 4 つの位置のいずれかに表示される赤色の箱に腕型アバタの先端で触れる課題を参加者に課した。また、参加者は箱が上側に現れた場合は箱の下面に、下側に現れた場合は箱の上面に触れる必要があった。各条件におけるセッションでは、参加者は 100 試行のタスクを含むブロックを 2 回、計 200 試行の運動タスクを実施した。なお、赤色の箱の提示位置は試行ごとにランダムに決定され、各位置に 50 回ずつ出現するように調整されていた。

運動タスクの間、各種モーショントラッカーによって計測された実験参加者の肘から人差し指にかけての各関節の位置・回転を 90Hz のリフレッシュレートで記録した。また、指先のト

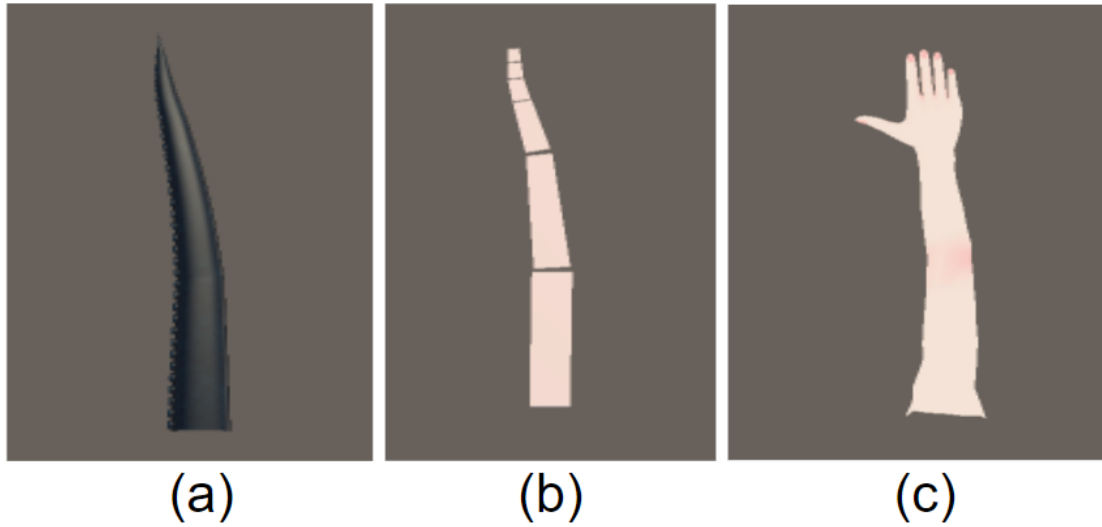


図 5.1: 設計・使用した VR 腕型アバタ: (a) タコ腕型アバタ (b) 箱腕アバタ (c) ヒト腕型アバタ

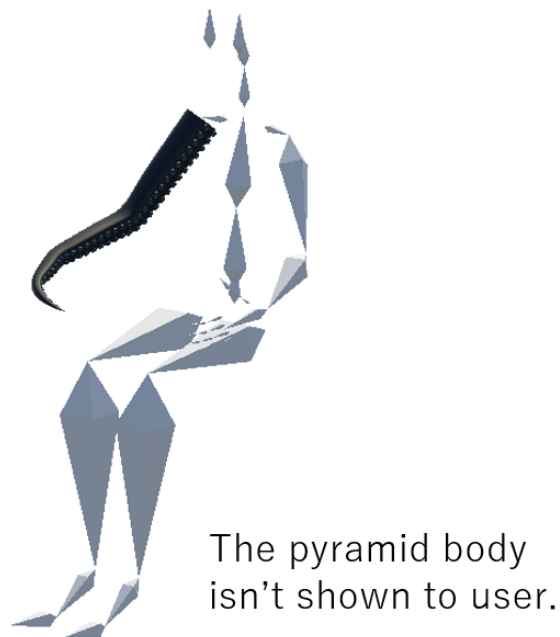


図 5.2: 設計・使用したタコ腕型アバタの配置 VR アバタ操作者の右腕部分に重複する形で配置した。

ラッキング精度の安定化のために、参加者は常に人差指以外の指は軽く握りこむようにし、手の甲を常に上側を向くようにすることを指示された。

指先・手首の位置感覚の測定 アバタの装用による指先・手首の位置感覚の変化度合いを評価するために、参加者が主観的に感じる指先・手首の位置感覚の測定を行った。具体的には、参加者は衝立によって隠されている自身の右上肢の人差指先端及び手首の橈骨茎状突起の奥行方向の位置を、左手に持ったレーザーポインタで指し示した(図 5.4)。この時、身体部位を直接

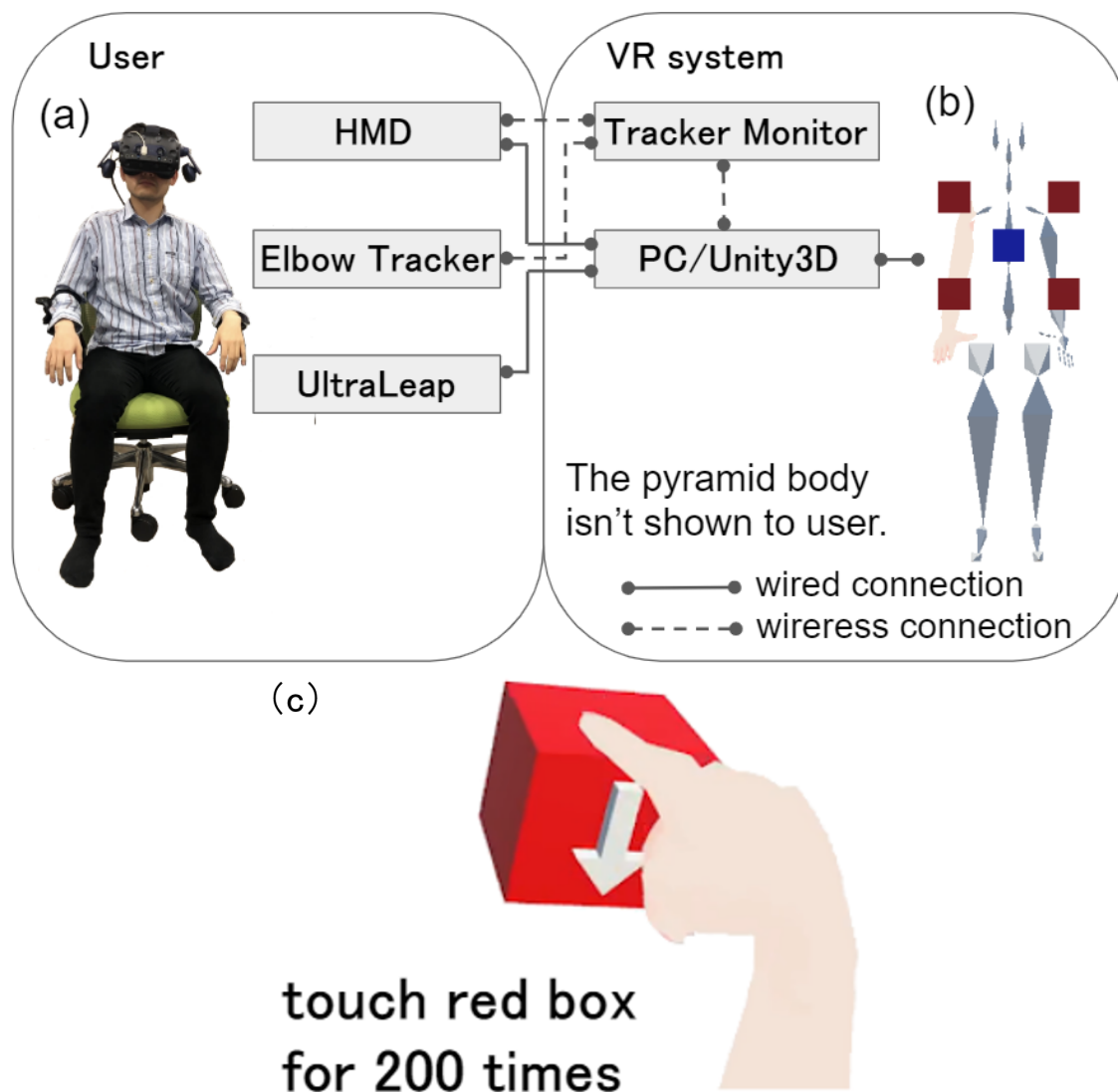


図 5.3: 運動タスクシステム構成: (a) 現実空間の参加者, (b) VR 上のアバタ及びタスク中の箱の配置, (c) 1 人称視点から見た映像.

レーザーポインタ指し示すのではなく, その部位から衝立に垂線を下した, 衝立平面上での奥行位置を指し示すように明示的に指示された.

指先・手首の位置感覚の測定は実験開始前にも実施し, その際の計測結果と各セッションの運動タスク後の計測結果の変化率を計算することで各部位の位置感覚の変化度合いを評価した.

主観的な身体感覚に関するアンケート アバタ装用タスク後, 各腕型アバタに対する身体感覚を評価するために表 5.1 に示すアンケートを実施した. 参加者は, 各質問に対して 7 段階のリッカート尺度 (1. まったくあてはまらない ~ 7. とてもあてはまる) で回答するように求められた. アバタの身体化に関する先行研究例を参考に [100], 身体イメージや柔らかさに関す

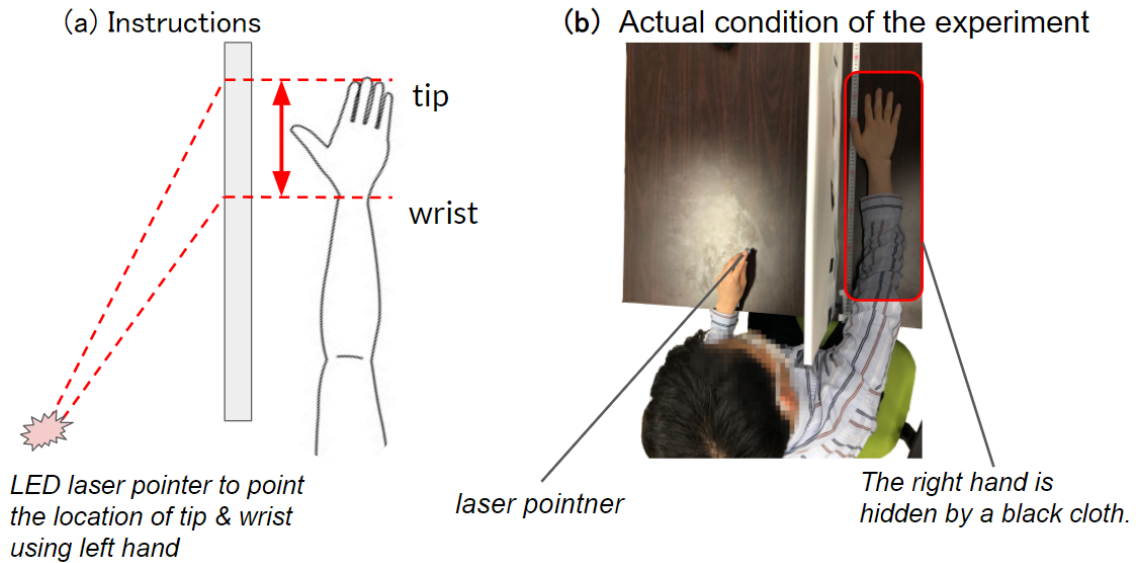


図 5.4: 指先・手首の位置感覚の測定

る質問項目を用意した。Q0-5 は身体イメージ，Q6-8 はアバタに対する身体所有感，Q9-12 はアバタの動作に対する行為主体感，Q13-14 はアバタに対する自己位置感覚，Q15-19 は外見や反応について，Q20 は主観的な身体の柔らかさに対する質問項目としてそれぞれ用意した。

実験手続き 実験は，以下のような手続きで進行した。

1. 実験準備・トレーニングセッション
2. 実験セッション (各アバタ条件，途中休憩を挟む)
3. インタビュー

各アバタ外見条件での実験セッションの順序は参加者毎にランダムに決定され， $3! = 6$ 通りの順序にそれぞれ 2 人ずつ割り振ることにより参加者間でカウンターバランスをとった。1 回目と 2 回目の実験セッションでは，アンケート終了後に 3 分間の休憩をはさみ，次のセッションに移行した。3 回目の実験セッション後に，各アバタ外見条件の感想や実験を通じた感覚・知覚に関するインタビューを実施し，実験を終了した。

実験準備・トレーニングセッション 実験セッションの開始前に，実験の統制をとるための操作や，実験前測定が行われた。まず，実験開始前に，瞳孔間距離 (IPD) を測定し，HMD の IPD を測定した値に調整した。また，運動タスクにおける実験環境を統制するため，右腕を肩の高さで水平に伸ばした際の参加者の右人差指先端が床から 1m の高さとなるように椅子の高さを調節した。続いて，実験セッション前の右手首および右人差指先端に対する位置感覚の計測を行った。その後，参加者は HMD を装着し，トレーニングセッションに参加した。このトレーニングセッションでは，参加者はヒト腕型アバタを用いた実験セッションと同じ運動タスクを 10 試行行うことで，実験システムの操作方法に慣れることができた。

表 5.1: VR アバタに対する身体化に関する主観評価アンケート

Index	Questionnaire
Q0	自分の腕全体（肩から指先）が長くなったと感じたか？
Q1	自分の手首から先が長くなったと感じたか？
Q2	自分の肩から肘までの長さが長くなったと感じたか？
Q3	自分の腕全体（肩から指先）が短くなったと感じたか？
Q4	自分の手首から先が短くなったと感じたか？
Q5	自分の肩から肘までの長さが短くなったと感じたか？
Q6	VR 空間に提示されたバーチャルアームが自分の腕であるように感じたか？
Q7	VR 空間に提示されたバーチャルアームが他人の腕であるように感じたか？
Q8	まるで自分の腕が 2 本より多いように感じたか？
Q9	VR 空間に提示されたバーチャルアームが自分の腕のように扱えると感じたか？
Q10	VR 空間に提示されたバーチャルアームは自分の身体動作に応じて動いているように感じたか？
Q11	VR 空間に提示されたバーチャルアームの動きが自分の動作へ影響しているように感じたか？
Q12	VR 空間に提示されたバーチャルアームが自動に動いているように感じたか？
Q13	まるで VR 空間内のバーチャルアームがある位置に自分の腕があるかのように感じたか？
Q14	自分自身の所在が自分の身体の外にあるように感じたか？
Q15	自分の腕がバーチャルアームになったように感じたか？
Q16	時々、自分の実際の腕が VR 空間に提示されたバーチャルアームの形や姿勢になっていると感じたか？
Q17	時々、VR 空間に提示されたバーチャルアームが、形や肌の色、その他の視覚的特徴において自分の実際の腕と似ているように感じたか？
Q18	実験当初と比較して別の服を着ている感覚を覚えたか？
Q19	VR 空間に提示されたバーチャルアームによる影響が自分自身の腕に及んでいるように感じたか？
Q20	自分の腕が柔らかくなったように感じたか？

実験セッション 実験セッションの最初に運動タスクが行われた。セッションにおける最初の試行開始前に、そのセッションで用いるアバタを 1 分間自由に動作させ、自身の右腕と右人差指（ヒト腕型アバタの場合は全ての指）の動きに連動して動くことを確認した。各試行開始前に、初期位置として、VR 空間上の正面の床からの高さ 1m の位置に青色の箱が提示され、参加者はその箱をアバタの先端で触れるように要求された。参加者が青色の箱に 0.5 秒間触れ続けると、試行が開始され、青色の箱が消えると同時にターゲットとなる赤色の箱が出現した。参加者がアバタ先端が赤色の箱に触れると、効果音と共に箱が消え、初期位置を示す青色の箱が再度出現した。参加者が再び青色の箱に触れることで次の試行に移行し、この手続きを 1 ブロック分（100 試行）繰り返し実行した。1 ブロック目が終了すると、1 分間の休憩をはさみ、2 ブロック目を同様の手続きで実行した。

運動タスク終了後、参加者は HMD を付けたままの状態、実験者による誘導のもと、右腕を伸ばした状態で机の上に置いた。この時、右人差指先端が参加者がいる側の机の端から 60cm の奥行位置になるように、参加者の腕の位置を実験者が調整した。その後、実験者が衝立によって参加者の顔の位置から右腕が視認できないことを確認したのちに HMD を取り外した。その後、参加者は右人差指先端および右手首橈骨茎状突起の位置を左手に持ったレーザーポイ

ンタで指示した。参加者が指示した位置は、衝立の右側に設置されたメジャーを用いて、参加者側の机の端を原点とする奥行方向の位置として計測・記録された。

指先・手首の位置感覚の測定後、参加者は主観的な身体感覚に関するアンケートに回答した。

インタビュー インタビューでは、参加者は各アバタ外見条件についての装用後の感想を自由に回答した。

5.2 実験結果

主観的な身体的感覚に関するアンケート結果 図 5.5 は各腕型アバタ装用タスク後の主観的な身体的感覚に関するアンケート結果を示している。各質問における 3 条件間の差を分析するためにフリードマン検定 ($\alpha = .05$) を実施したところ、Q13「まるで VR 空間内のバーチャルアームがある位置に自分の腕があるかのように感じたか？」($\chi^2(2) = 6.65, p = 0.036$)、Q17「時々、VR 空間に提示されたバーチャルアームが、形や肌の色、その他の視覚的特徴において自分の実際の腕と似ているように感じたか？」($\chi^2(2) = 6.89, p = 0.032$)、Q20「自分の腕が柔らかくなったように感じたか？」($\chi^2(2) = 7.72, p = 0.021$) において統計的有意差が認められた。そこで、これら 3 つの質問に対する下位検定として、ホルムの方法による p 値の補正を施したウィルコクソンの符号順位検定によって多重比較を行った。その結果、Q13 ではタコ腕型アバタと箱腕アバタの間でのみ有意差が認められた ($adj.p = 0.023$)。また、Q20 ではタコ腕型アバタとヒト腕型アバタの間で有意差が認められ ($adj.p = 0.047$)、タコ腕型アバタと箱腕アバタの間では有意差は認められなかったものの有意傾向であった ($adj.p = 0.093$)。Q17 においては多重比較において有意差は確認されなかった。

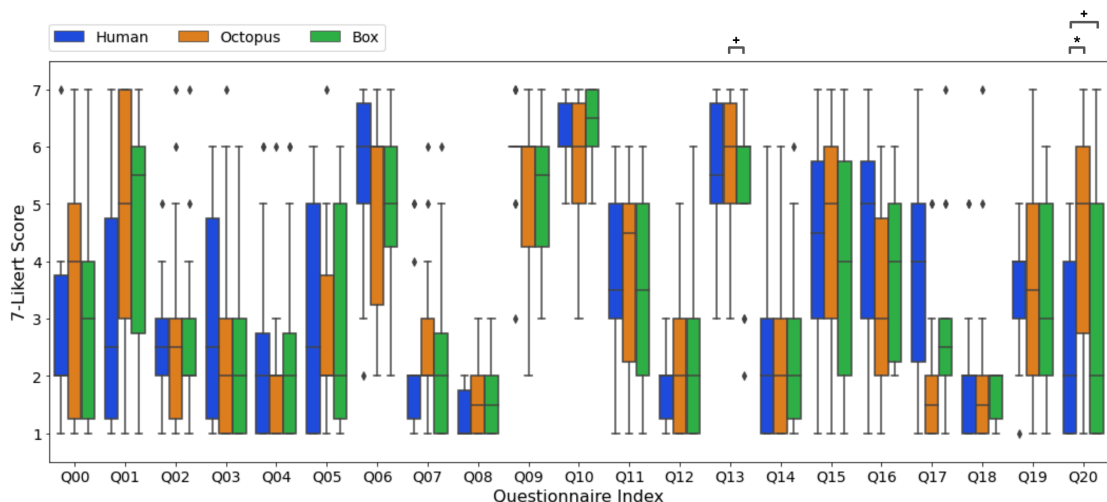


図 5.5: 主観的な身体的感覚に関するアンケート結果 * $p < .05$, + $p < .10$.

指先・手首の位置感覚の測定結果 各腕型アバタの装用により、指先・手首の位置感覚や手首から指先にかけての領域の大きさの感覚がどのように変化したかを調べるために、指先・手首

の位置および手首から指先までの距離の3つに着目した。図5.6)は実験開始前の計測結果に対する各条件の運動タスク後の計測結果の変化率を計算してプロットしたものである。これらの変化率についてフリードマン検定を用いて条件間で比較した。結果、指先・手首の位置については有意差は認められなかったものの(指先: $\chi^2(2) = 4.50, p = 0.105$. 手首: $\chi^2(2) = 3.87, p = 0.144$), 手首から指先までの距離に有意差が認められた($\chi^2(2) = 11.17, p = 0.004$)。そこで、手首から指先までの距離に変化率についてホルムの方法によるp値の補正を施したウィルコクソンの符号順位検定による多重比較を行った。その結果、ヒト腕型アバタとタコ腕型アバタの間で有意差($adj.p = 0.048$)が認められ、ヒト腕型アバタと箱腕アバタの間では有意差は認められなかったものの有意傾向($adj.p = 0.054$)であった。

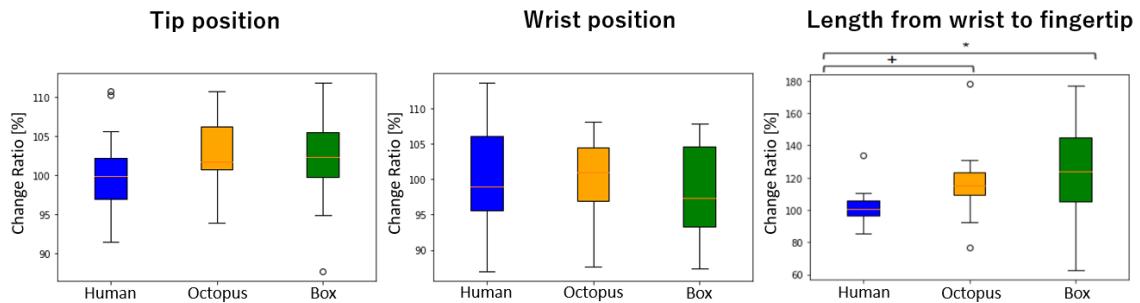


図 5.6: 指先・手首の位置感覚の変化率 (左) 指先位置, (中央) 手首位置, (右) 手首から指先までの距離。* $p < .05$, + $p < .10$ 。

運動タスク測定結果 各条件において運動タスク中に上肢をどのように動かしていたかを評価するために、肘・手首・指先の3カ所について、タスク中の移動量(初期位置から移動を開始し、再度初期位置に戻るまでの軌道の長さ)の200試行の平均値をセッション毎に計算した。図5.7はその各部位の平均移動量をプロットしたものである。これらの移動量についても、フリードマン検定を用いて条件間で比較した。その結果、肘の平均移動量については有意差が確認され($\chi^2(2) = 8.17, p = 0.017$), 手首の移動量では有意差は確認されなかったものの有意傾向であった($\chi^2(2) = 5.17, p = 0.076$)。指先の移動量については有意差は確認されなかった($\chi^2(2) = 2.167, p = 0.339$)。そこで、肘と手首の移動量について、ホルムの方法によるp値の補正を施したウィルコクソンの符号順位検定による多重比較を行った。その結果、肘ではヒト腕型アバタとタコ腕型アバタの間でのみ有意差が確認された($adj.p = 0.007$)。また、手首ではどの条件間においても有意差は確認されなかったものの、ヒト腕型アバタとタコ腕型アバタの間でのみ有意傾向であった($adj.p = 0.081$)。

5.3 考察

アバタの外見による柔らかい身体感の提示 主観的な身体感覚に関するアンケート結果より、タコ腕型アバタの装用により参加者の身体イメージが変容し、柔らかい身体感を意識的に感じていることが示唆された。Q20「自分の腕が柔らかくなったように感じたか?」では、アバタ

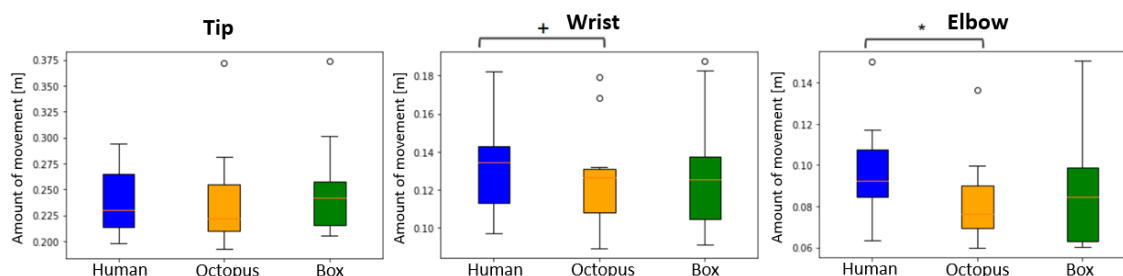


図 5.7: 運動タスク中の関節の平均移動量 (左) 指先, (中央) 手首, (右) 肘. * $p < .05$, + $p < .10$.

装用後に実験参加者が自身の腕を柔らかく感じたかどうかについて主観評価を問いている。特にヒト腕型アバタ装用後においては低いスコアとなっていたが、タコ腕型アバタの装用後には統計的に有意に高いスコアとなった。箱腕アバタの装用後のスコアはヒト腕型アバタと比較して、少し高いスコアとなる傾向がみられていたが、統計的有意差は確認されなかった。本実験で使用したアバタは、いずれのボーン構造も共通となるように設計していることから、ヒト腕型アバタ、箱腕アバタが持たず、タコ腕型アバタのみが持つ「(2') 軟体動物らしい柔らかさ等のイメージ」による影響が原因として考えられ、タコ腕型アバタ装用時にはプロテウス効果のはたらきによりヒト腕型アバタと比較して柔らかい身体感を得ることができたと解釈できる。箱腕アバタは(2')を持たないため、柔らかい身体感が誘起されなかったと考えられる。

また、インタビュー時には、タコ腕型アバタに対して「動作が滑らかに感じた」「関節位置が無いように感じた」「くねくねと曲がっていた」と言ったコメントが得られており、参加者がタコ腕型アバタにおいて柔らかい身体感を得ていることがコメントからも確認できた。

アバタの外見の錯覚的な影響による腕・手の長さの知覚の変化 人差指先端・手首位置の位置感覚計測結果から、箱腕アバタではヒト腕型アバタと比べ手首以降の長さの感覚が統計的に有意に変化し、タコ腕型アバタにおいてはヒト腕型アバタと比べ手首以降の長さの感覚が変化する可能性が示唆された。アバタ装用前から装用後の人差指先端・手首の位置感覚に対する変化率は、アバタの外見条件間で統計的有意差は確認されなかった。しかし、手首から人差指先端までの距離を手首以降の長さの感覚として、同様にアバタ装用前からの変化率を計算し、条件間で比較した場合には、ヒト腕型アバタの装用後に対して箱腕アバタの装用後には統計的に有意に長さの感覚が広がる結果となった。これは位置感覚計測位置が手首位置は腕側へ推移し、人差指先端は奥行き方向へ延伸する傾向がみられており、これらの総和として顕在化したと解釈できる。他方、タコ腕型アバタの装用後ではヒト腕型アバタの装用後に対してわずかに延伸する傾向がみられた。これは位置感覚計測位置が手首位置ではあまり推移しない一方で、人差指先端は奥行き方向へ延伸する傾向がみられており、これが影響していると考えられる。箱腕アバタおよびタコ腕型アバタは、いずれも「(1') 腕・手・指等の身体部位の区分がない人間とは異なる外見的特性」を付与しており、これが錯覚的に作用し、各関節についての位置感覚が遷移する・あいまいになるといった身体図式の変容を誘起した可能性が考えられる。

手首以降の長さの感覚の変化に関し、アンケート結果から、Q1「自分の手首から先が長くなったと感じたか？」では、タコ腕型アバタ・箱腕アバタではヒト腕型アバタとの中央値の比

較からは高いスコアを回答する傾向が確認されており、箱腕アバタ・タコ腕型アバタ装用時の手首以降の長さの感覚の延長に対応している結果に見られた。しかし、被験者間で回答値にばらつきが大きく、各アバタ間のスコアに有意差は確認されなかった。これは、意識的な範囲では、手首以降の長さが延長した感覚には個人差が大きく、人によってはあまり感じられなかったためであると考えられる。タコ腕型アバタ・箱腕アバタにおいて手首以降の長さが延長した感覚を意識的に感じていた参加者では、手首以降の身体イメージの変容が生じていたと考えられる。

アバタの外見の影響による行動変容 運動タスクの測定結果から、タコ腕型アバタを装用している際はヒト腕型アバタを装用している際とは上肢の運動が部分的に異なる傾向が確認された。具体的には、運動タスク中の肘の移動量がタコ腕型アバタ装用時にはヒト腕型アバタの装用時と比較して統計的に有意に小さくなっており、手首の移動量に関しても有意傾向であった。このような傾向の違いは、箱腕アバタとヒト腕型アバタとの比較では確認されなかった。このことから、タコ腕型アバタが持つ「(2') 軟体動物らしい柔らかさ等のイメージ」が、アバタ装用時の行動変容を誘起した可能性があると考えられる。

また、行動変容はタコ腕型アバタのみで確認された一方、手首以降の長さの感覚の変化は箱腕アバタで統計的に有意に確認され、タコ腕型アバタでは変化の可能性が確認されていた。これから、行動変容は手首以降の長さの感覚の変化に影響を及ぼされたのではないと考えられる。

また、行動変容に関するアンケート結果からは参加者の行動の意識的な変化は確認されなかったため、アバタの外見は意識的でなく無意識的に参加者の行動に影響を及ぼしていると考えられる。具体的には、Q11「VR空間に提示されたバーチャルアームの動きが自分の動作へ影響しているように感じたか？」ではタコ腕型アバタとヒト腕型アバタで有意差が確認されおらず、タコ腕型アバタの外見が自分の行動に大きく影響を受けているという意識はあまりなかったと考えられる。これらのことから、タコ腕型アバタが持つ「(2') 軟体動物らしい柔らかさ等のイメージ」が、参加者の無意識的な行動変容を誘起した可能性があると考えられる。

ただし、今回確認された行動変容は部分的なものであり、本実験の解析結果からは具体的などのような行動変容が生じていたかは明らかでない。また、本実験では指先の移動量に関しては、どの条件間においても有意差が認められなかった。この理由として、本実験にて課した運動タスクは、指先で条件間で統制された位置に出現するターゲットに触れるタスクであったことや、指先・手首を大きく動作させる必要のないタスク設定になっていたことなどが原因として考えられる。

5.4 今後の展開

今回の実験系では、各腕型アバタ装用後、現実の手首位置を確認する前にアバタに影響された位置感覚を測るため、先ずは指先・手首の位置感覚の測定タスクを行い、次に主観的な身体感覚に関するアンケートを実施した。ここで、前者のタスクで手首関節の位置を指示させたことが、本来タコの触腕ではなく、また今回用いたタコ腕型アバタにおいても見た目に表れにく

かった関節を、実験参加者に意識させ、アンケートの結果に影響を及ぼした可能性がある。今後の検証では、指先・手首の位置感覚の測定タスクを行わずにアンケートを取る群も準備し、実験を行い、タコ腕型アバタの装用が身体感覚に及ぼす影響をより詳細に調査していく。

今回の実験の結果として、タコ型アバタではプロテウス効果のはたらきにより装用者が柔らかい身体感を覚えることが示唆されたが、インタビューの結果から、装用者が覚えた柔らかさには様々な要素が含まれていると考えられた。インタビュー時に、タコ腕型アバタに対して「動作が滑らかに感じた」「関節位置が無いように感じた」「くねくねと曲がっていた」といった柔らかさに関するコメントが得られた。これらは、タコが持つ運動の滑らかさや、関節が無いことによる運動自由度の高さ等のイメージに影響されている。また、このような運動に関するイメージの他に、アバタ体表面の柔らかさのイメージに影響されることも考えられた。今後の検証で、タコが持つ柔らかさに関するイメージを要素ごとに分離し、それぞれの要素について柔らかい身体感の提示への影響を検討していく。例えば、運動の柔らかさのイメージと体表面の柔らかさのイメージによる影響を分離して調べるために、金属のフレキシブルアームを模した運動的な柔らかさのみをイメージに持つアバタや、太った人を模した体表面の柔らかさのイメージのみを持つアバタを用意し、プロテウス効果による柔らかい身体感の提示可能性を調査することを考えている。

今回の実験の結果として、ヒト腕型アバタとボーン構造を同じくするタコ腕型アバタにおいてプロテウス効果のはたらきにより装用者が柔らかい身体感を覚えることが示唆されたが、外見だけでなくボーン構造や操作方法を変えることで、より多くの人により強い柔らかい身体感を提示できる可能性がある。例えば、ソフトボディやボーンの揺れ等の物理シミュレーションを用いることで、更に柔らかなアバタの表現が可能になり、より強く柔らかい身体感を提示できる可能性があると考えられる。また、アバタのボーン構造を細かいボーンに分割された運動自由度が高いものにして、それぞれのボーンを各手指のモーションや筋電センサの信号と連動させた異なる身体動作によるマッピングにより操作することで、柔軟な身体動作を実現し、より強く柔らかい身体感を提示できる可能性があると考えられる。

本研究では、タコが持つ軟体動物らしい柔らかさのイメージがプロテウス効果の働きによりタコ腕型アバタの装用者に柔らかい身体感を与えることを報告した。これはドラゴンアバタについてのプロテウス効果について調査した先行研究 [113] と同じく、動物の持つ人にはない特性のイメージが作用した動物ならではのプロテウス効果である。ドラゴンの強靱さやタコの柔らかさなど、動物の持つ人にはない特性のイメージが与えるプロテウス効果を活用することで、生得的な身体に紐づく形態や能力などの制約を超えた体験を装用者に与える VR アバタを設計できる可能性がある。

今回用いたタコ腕型アバタのボーン構造は人腕型アバタと同様であり、現実のタコ腕のような関節を持たず自由に曲がることのできる運動自由度の高さは再現していなかった。それにも関わらず、インタビューから「動作が滑らかに感じた」「関節位置が無いように感じた」という関節数及び運動自由度の変化に関わる反応が得られた。ここから、ボーン構造を変えずとも外見のみを変えることで、プロテウス効果等の影響により錯覚的にキネマティクスを変えられる可能性が示唆された。これは、今回用いたタコだけでなく、クラゲやミミズなどの様々な柔

らかい身体を持つ動物のアバタを用いた VR 体験の設計に活用できる可能性があり、今後より詳細な調査を行っていく。

5.5 まとめ

本研究では、タコ腕型アバタを対象に、非生得的な身体特性を持つ動物の外見を得ることによる知覚・行動、身体認知の変容を調査した。身体化感覚スコアについてはいずれも限定的であった。アバタの外見による柔らかい身体感の提示、アバタの外見の錯覚的な影響により身体イメージの変容が誘起される可能性、アバタの外見に影響され行動変容が誘起される可能性が実験結果より示唆された。ここで得られた知見から、人間とは異なる身体特性を持つアバタの設計および、その装用による感覚体験の拡張にむけて、アバタの外見の影響により錯覚的に与えられる柔らかい身体感や主観的な身体イメージの変容を活用できる可能性を示唆した。

第 6 章

人間機械統合身体システムの総合考察および設計論の検討

6.1 余剰肢ロボティクス各種の身体認知変容

追加・協調を目指す余剰肢ロボティクスは生得的な身体と統合して扱われることを想定しているが、その制御戦略を指す Human-Machine-Coupling System/人間機械協調モデル [22, 23] においては身体認知や身体的自己意識が描ききれていなかったため、下記の 3 種類の余剰肢ロボットの装用学習から身体認知の変容を捉えることを試みた。

- (既存動作従属型 x ヒト型) VR 環境下で動作する余剰肢ロボットアームの装用学習
- (既存動作独立型 x ヒト型) 独立動作可能な人工余剰指の装用学習
- (既存動作従属型 x 非ヒト型) 超冗長自由度をもつタコ腕型 VR アバタの装用学習

これらの装用学習から得られた知見を下記に記す。

VR 環境下で動作する余剰肢ロボットアームの装用学習 装用学習後において余剰肢ロボットアームに対して身体化の可能性を示唆し、また、装用学習時にその装用に適応していく過程を捉えた。装用学習に掛かった時間は平均して約 17 ～ 18 分程度であった。また、生得的な身体に対する認知を覚えながらも、余剰肢に対して覚える感覚（余剰肢感覚；Supernumerary Limbs Sensation）を新たに観測した。余剰肢ロボットアームの周辺に生起したと思われる自己近傍空間と余剰肢感覚は共に生起することが示唆され、身体化の現象を助長する結果が得られた。Motor および Perceptual Embodiment の両方に関わる身体化感覚が観測され、身体的自己意識が生じたと考えられる。これらを踏まえ、VR 余剰肢を用いた人間機械統合身体システムが構築されたとみなした。

独立動作可能な人工余剰指の装用学習 装用学習後にて人工余剰指に対して身体化を覚える傾向が行為主体感・身体所有感・身体イメージの 3 つの主観評価スコアから得られ、先行研究 [43] に沿う結果が得られた。装用学習に掛かった時間は平均して約 1 時間程度であった。身体化に伴う脳活動変容を調べたところ、Sync 条件（触覚フィードバックあり、共収縮信号をトリ

ガーに動作)の学習後では一次感覚運動野において脳活動が統計的有意に高くなる傾向が見られた。また、身体化に関する主観評価と脳活動変容の間の相関を制御条件および学習前後にて評価したところ、身体化スコアと一部の生得指の脳活動変容には負の相関があることがわかった。これらの結果から、体部位局在性に基づく身体部位の原始的な表象に関わる脳活動の変容可能性を示唆した。Motor および Perceptual Embodiment の両方に関わる身体化感覚が観測され、身体的自己意識が生じたと考えられる。これらを踏まえ、6th Finger を用いた人間機械統合身体システムが構築されたとみなした。

超冗長自由度をもつタコ腕型 VR アバタの装用学習 生得的身体とは大きく特性が異なる超冗長自由度系の身体に対する装用学習から柔らかくなった感覚 (Softer Body Sensation) を描写した。装用学習に掛かった時間は平均して約 1.5 時間程度であった。これらはアバター外見の影響による影響 (プロテウス効果 [113]) により身体イメージおよび身体図式が変容したことから生じた可能性がある。今回の実験系では、身体化については統制条件との差分が得られず限定的であった。そのため、いずれの身体化も観測されず、タコ腕型 VR アバタを用いた人間機械統合身体システムは構築されなかったとみなした。

以上までに述べた内容を図 6.1 に示す。VR 余剰肢と 6th Finger はいずれも人間機械統合身体システムの構築が示唆された。一方、タコ腕型 VR アバタでは人間機械統合身体システムの構築にまで至らなかった。これを考えると、ヒト型の余剰肢ロボティクスが人間機械統合身体システムに有効であると考えられる。また、VR 余剰肢と 6th Finger を比較すると、VR 余剰肢では短い装用時間で身体化ができたことがひとつ有利な点として挙げられる。このことから既存動作従属型の余剰肢ロボティクスが人間機械統合身体システムに対して有効となるが、いずれも Motor および Perceptual Embodiment が得られていることから、既存動作の要素は大きく影響しないと考えられる。

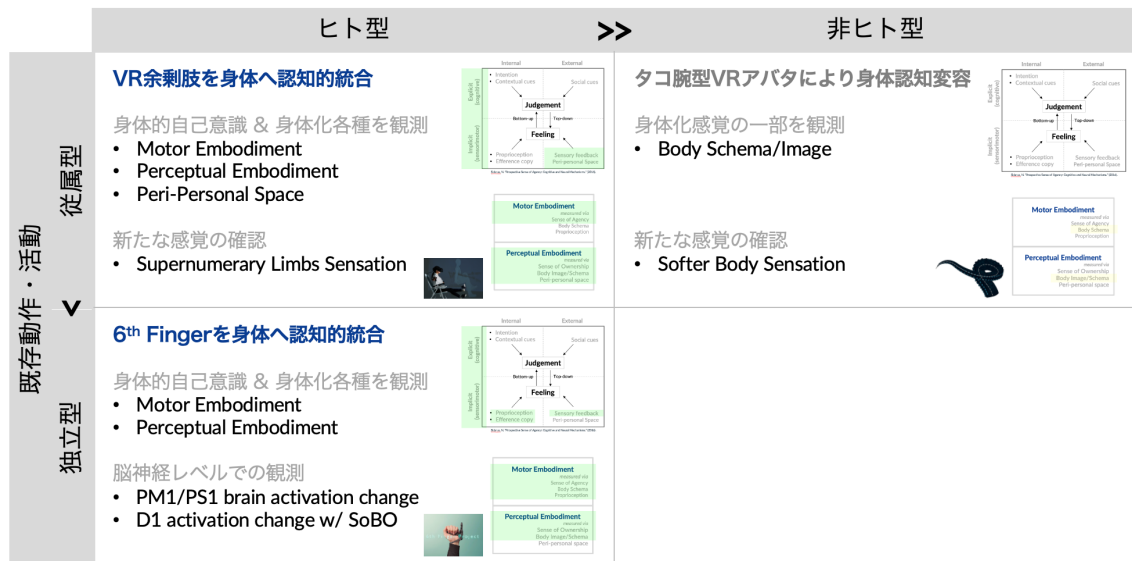


図 6.1: 余剰肢ロボティクス各種の身体認知変容まとめ

これらの得られた知見は人間機械協調モデルに対してどのように当てはめることができるだろうか．まずは生得身体における運動学習（フィードバック誤差学習 [31]）から考えていく．

6.2 人間機械統合身体システムに対する総合考察

6.2.1 身体認知の描写

生得身体のみを用いた身体動作の運動学習は，Wolpert・川人らによる内部モデルによる運動制御から図 6.2 のように描ける [31, 62]．下記にその信号処理過程を記す．

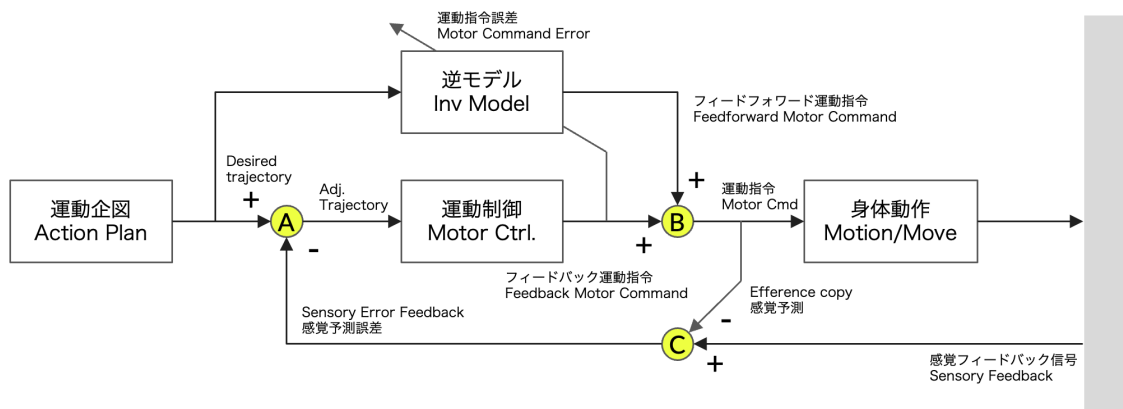


図 6.2: 生得身体における身体動作制御

- (1) 運動企図から逆モデルへ期待動作信号が伝達
- (2) フィードフォワード運動指令が伝達され，運動指令から感覚予測信号が生成
- (3) 運動指令に基づき筋骨格・四肢が動作し，外部環境と相互作用
- (4) 感覚器を通じて外部環境および身体状態のフィードバック信号が伝達され，感覚予測と比較照合
- (5) 得られた感覚信号が分類され，知覚信号へ変換
- (6) 次の運動企図とフィードバック信号から生成された感覚予測誤差が比較照合され調整信号が運動制御へ伝達
- (7) 運動制御から運動指令誤差信号が逆モデルに伝達され逆モデルが更新
- (8) フィードフォワードおよびフィードバック運動指令の比較照合から運動指令が調整
- (9) 調整された運動指令を元に (2) および (3) の実施 ※以降，繰り返し

信号処理過程で制御・調整を図っている要素として，逆モデルや運動制御なども挙げられるが，ここでは比較器に着目する．図 6.2 中の (A) に該当するのが運動企図調整であり，運動企図から伝達された動作情報と感覚・知覚から得られた観測情報を比較照合し調整を図る役割を担っている．図 6.2 中の (B) に該当するのが運動指令調整であり，逆モデルより送られた運動指令と運動企図統制された運動指令を比較照合し帳を図る役割を担う．図 6.2 中の (C) に該当するのがフィードバック誤差学習であり，運動指令時に予測した感覚信号とフィードバック信

号を比較し、その結果を運動企図調整に伝え感覚誤差調整を図る。

以上は、生得身体に対しての学習過程の描写であるが、道具を使用する場合にはどうなるか。ここでは道具の具体例としてナイフを考え、生得身体動作制御と比較する。生得身体動作制御における(1)における運動企図が道具(ナイフ)の操作を想定した身体動作を想定したものとなる。生得身体動作制御における(3)(4)においては、道具(ナイフ)を介して得られたフィードバック信号が伝達される。その他の動作制御処理は生得身体と同様となる。

続いて、余剰肢ロボティクスにおける身体動作制御を考える。Human-Machine-Coupling system[22, 23]を参考に図6.3のように描写した。

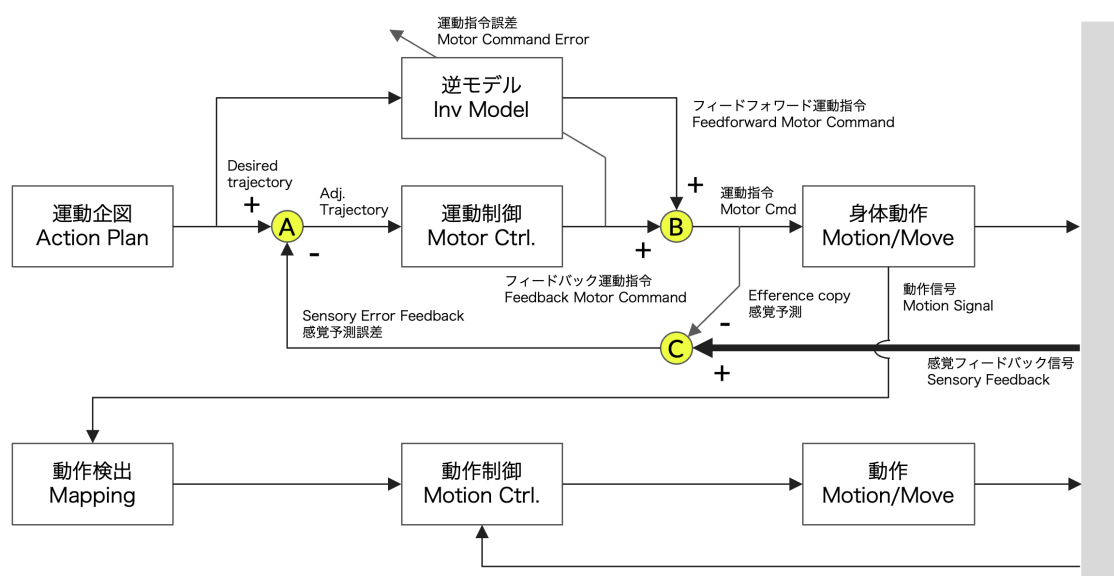


図 6.3: 余剰肢ロボットを用いた身体動作制御

生得身体動作制御部分は割愛し、余剰肢ロボットシステムにのみ着目して下記に記す。

- (1') 生得身体部位の動作信号を検出(動作検出)
- (2') 動作検出器より動作制御へ信号が伝達
- (3') 動作制御からの運動指令を元にエンドエフェクタが動作し、外部環境と相互作用
- (4') 外部環境およびシステム状態の信号が動作制御へフィードバック
- (5') 生得身体および余剰肢ロボットの相互作用結果が感覚フィードバック信号として返される

上記の動作制御過程(5')にあるように感覚フィードバック信号が生得身体だけでなく余剰肢ロボットシステムの要素も含まれることとなる。道具の身体動作制御においても同様に道具の要素が含まれるため、運動学習・身体制御の観点でいえば類似したものと考えることができる。本論文で使用したVR余剰肢、6th Fingerおよびタコ腕型VRアバタそれぞれの身体制御についても列挙する(図6.4, 図6.5, 図6.6)。身体動作制御の観点でいえば身体動作信号検出の方法が異なるものの、動作制御モデル図としては大きな相違はない。

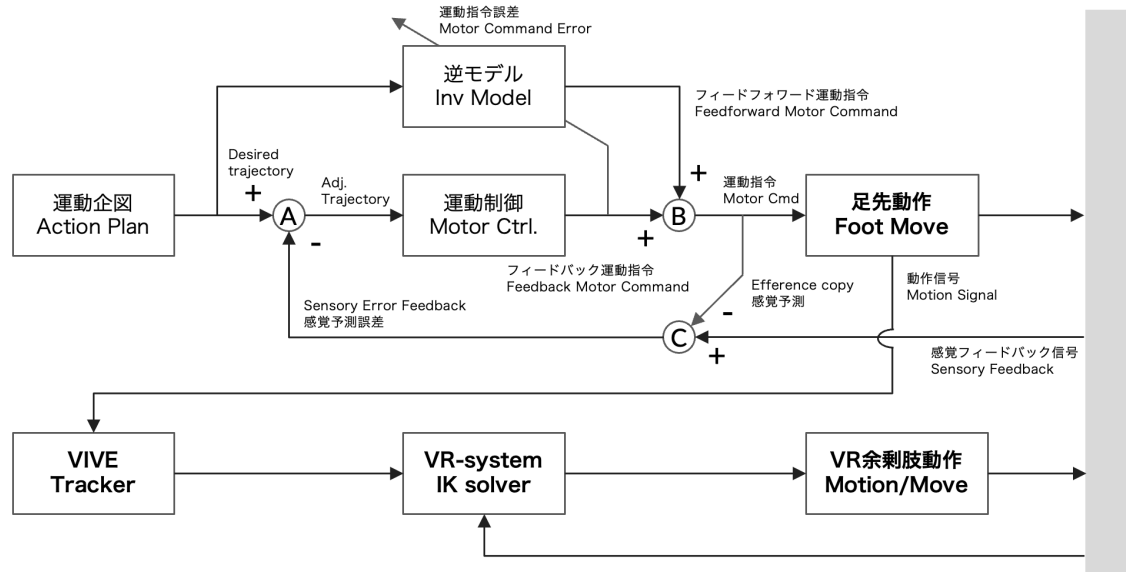


図 6.4: VR 余剰肢における身体動作制御

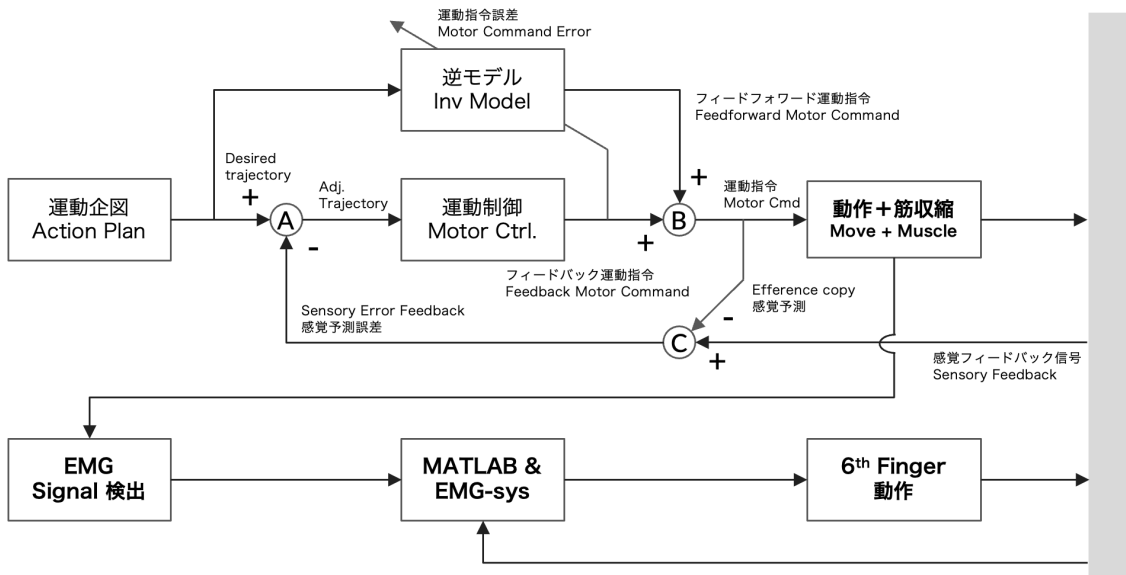


図 6.5: 6th Finger における身体動作制御

6.2.2 人間機械統合身体システム制御の状態遷移

前節にて説明をした人間機械統合身体システムにおける身体動作制御を状態遷移図として記述したものが図 6.7 である。運動企図および計画 (Action Plan) から始まり、運動を制御 (Action Control)、動作による相互作用 (State Change) そして感覚フィードバック信号からの状態推定 (State Est.) と続く。得られた状態推定信号を参照し、次の運動計画へフィードバックされ感覚-運動系のループが形成される。図 6.7 における矢印は状態遷移を指す。それ

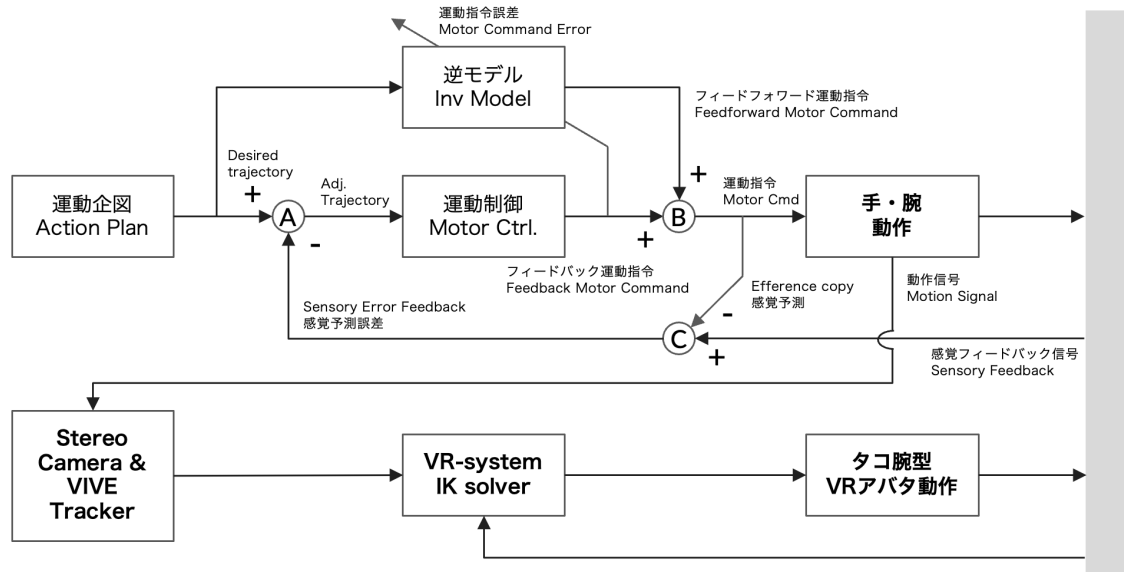


図 6.6: タコ腕型 VR アバタにおける身体動作制御

ぞれの情報処理は下記のとおりである。

- (1) 運動計画および視覚情報・身体イメージからの視覚運動変換 [114]
- (2) 運動指令およびその調整（内部モデル）
- (3) 感覚フィードバック信号の収集
- (4) 得られたフィードバック信号から状態推定および感覚予測（順モデル） [115]

いずれの項目も序論および身体認知の整理にて言及されており，人間機械統合身体システムの状態遷移を描く上で必要な感覚・認知は説明されている。

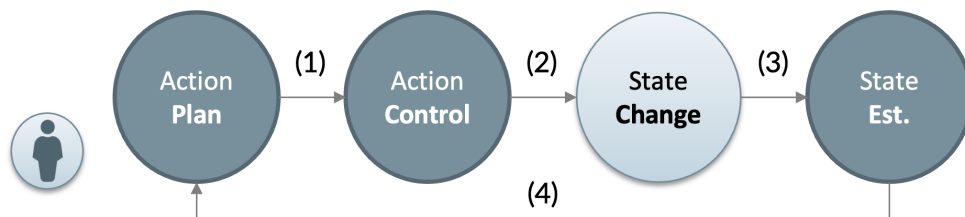


図 6.7: 人間機械統合身体システムの状態遷移図 身体動作制御を元に記述した状態遷移図。濃色部分は自己身体フレームを指し，薄色部分は自己身体外の他者もしくは環境を指す。(1)～(4)に矢印は遷移が対応する。

6.2.3 人間機械統合身体システム構築のための必要条件

人間機械統合身体システムと生得身体システムとの差分に着目したとき，状態遷移図（図 6.7）にて動作計画（Action Plan）と状態推定（State Est.）が大きく異なる点として挙げられる。これらの相違点がシステム構築に対して貢献できると解釈したとき，該当する情報処理

から人間機械統合身体システム構築の必要条件を下記のように列挙した。

1. 機械が身体イメージに取り込まれる
2. 予測-観測間にて感覚齟齬が抑制できる

1. 動作計画：身体-機械の身体イメージ 運動計画および視覚情報・身体イメージからの視覚運動変換において生得身体だけではなく、機械を含められることが必要となる。VR 余剰肢では、両足の動きを計画するとともに VR 余剰肢の動きも併せて計画されていなければ企図通りの動作はできない。加えて、生得的な身体は残しつつも新たに余剰肢に対する感覚である余剰肢感覚を観測できたことが、VR 余剰肢を身体イメージに反映された可能性を示唆されている。また、6th Finger においては、身体化感覚スコアにて人工余剰指が身体イメージに反映された可能性が示唆されている。これらの実験結果を踏まえても、動作計画において身体-機械の身体イメージが影響を及ぼしていると考えられる。

2. 状態推定：予測-観測間における感覚齟齬抑制 余剰肢ロボットシステムを身体システムに内包し、安定動作させるために意図通りにシステムを扱える必要がある。そのためには、余剰肢ロボットシステムの動作から受けるフィードバック信号も生得身体と同様予測可能な範囲にあることが想定される。VR 余剰肢および 6th Finger とともに装用学習後では身体化感覚の一つである行為主体感が確認されていることか r 、予測-観測間における感覚誤差が収束していることが考えられる。

必要条件をさらに身体化の観点で解釈を試みる。身体イメージは知覚のために利用される自己身体表象であることから [49]、必要条件 1 に対しては Implicit な身体化感覚が必要と言い換えられる。固有受容感覚や自己近傍空間などといった感覚・知覚が貢献していることが考えられる。必要条件 2 に対してはフィードバック誤差学習および感覚誤差収束による説明が成り立つことから、Motor および Perceptual Embodiment が必要であると言い換えられる。

6.2.4 人間機械統合身体システム制御のダイナミクス

VR 余剰肢の装用学習で計測した所要時間から人間-機械間の統合までのダイナミクスを考察できる。人間機械統合身体システムの身体制御におけるフィードバック誤差学習における比較器に着目すると、学習初期では生得身体動作による感覚予測が有意であり VR 余剰肢からのフィードバックを予測できない。そのため学習初期における事前態確率 $P_{pred}(s)$ は観測された状態確率 $P_{present}(s)$ とは大きくかけ離れているため、時刻 t における予測誤差 $Err(t)$ は大きい。結果、感覚予測誤差が大きいために運動制御によるフィードバック運動指令や逆モデルからのフィードフォワード運動指令が不安定となり、応じて運動指令調整が不安定となると考えられる。

学習後期においては、フィードバック誤差学習が進み、生得身体および VR 余剰肢を共に含めた動作に対応する感覚予測となり、事前確率 $P_{pred}(s)$ が観測された状態確率 $P_{present}(s)$ と

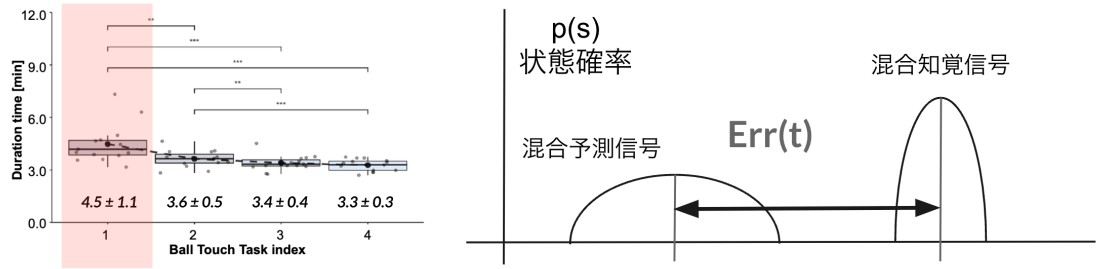


図 6.8: 装用学習初期における運動学習状態

近しくなり，時刻 t' における予測誤差 $Err(t')$ は小さくなる．結果，装用学習後期では安定動作かつ認知負荷の低い状態となり，余剰肢ロボットの身体化が進み，所要時間が安定する傾向となったと考えられる．

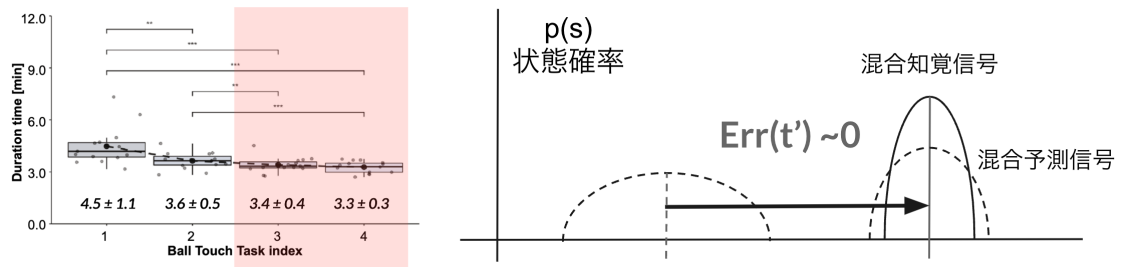


図 6.9: 装用学習後期における運動学習状態

6.2.5 余剰肢ロボティクス設計の検討

これまでの考察と人間機械統合身体システムの必要条件を踏まえ，Human-Machine-Coupling system[22, 23] を元に余剰肢ロボティクスにおける設計検討項目を列挙する．

a. 操作方法：既存身体動作従属型， b. 設計機構：ヒト型 VR 余剰肢と 6th Finger はいずれも人間機械統合身体システムの構築が示唆されたことからヒト型の余剰肢ロボティクスが人間機械統合身体システムに有効であると考えられる．また，VR 余剰肢と 6th Finger を比較すると，VR 余剰肢では短い装用時間で身体化ができたことがひとつ有利な点として挙げられる．余剰肢ロボットの装用学習デザインにもよるが，短時間での人間-機械統合が必要な場合には既存身体動作従属型の余剰肢ロボティクスが有効となると考えられる．いずれも Motor および Perceptual Embodiment が得られていることから，装用学習時間が担保できる場合においてはこの限りではない．なお，脳活動と連動した評価はなされていないため，操作方法に関して議論の余地があることをここに明記する．

c. Man-Machine Interface: 低遅延マルチモーダル刺激 Motor および Perceptual Embodiment が必要となる上で効果的に働くのが低遅延で提示される多感覚フィードバック刺激であ

る．身体的自己意識を構築する上で多感覚統合が重要となる．加えて，フィードバック信号は多岐に渡るため，身体的自己意識に対して効果的な情報を選定することが人間機械統合身体システムの構築という点も含めて必要となる．

6.2.6 人間機械統合身体システムによる認知・知覚への影響

人間機械統合身体システム構築における身体認知・知覚への影響を身体図式 (Body Schema) および身体イメージ (Body Image) から考察する．Pitron らが提唱している身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル [116] (図 6.10) は身体化に関わる身体認知として取り上げたが，人間機械統合身体システムに対しても有効であると仮定する．ここで図 6.10 中における情報処理 (A) (C) について説明する．(A) においては，経験などから構築された事前分布と運動-感覚信号より生じた多感覚信号から身体図式が構築されるフローを示している．このとき身体図式は暗黙的 (Implicit) なものであることから，使用される事前分布は体性感覚など構築されたものを想定している．(B) においては，事前分布と多感覚信号，そして，身体図式の3つから身体イメージが構築されるフローを示している．このとき身体イメージは自覚的 (Explicit) なものであり，使用される事前分布には社会的通念などのコンテキスト情報が反映されていることを想定している．(C) では身体図式と身体イメージの間における齟齬を解消するために，その差異を評価する．大きく異なる場合には，身体図式の修正を図る．

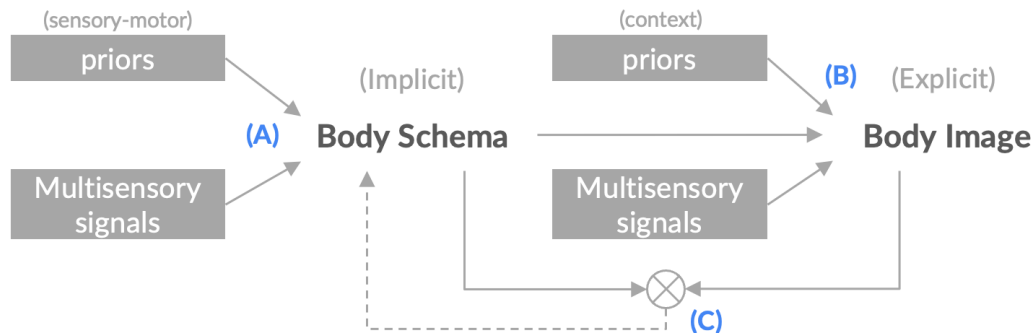


図 6.10: 身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル

このモデルに対して VR 余剰肢，6th Finger およびタコ腕型 VR アバタを当てはめて検討した。

VR 余剰肢 (図 6.11) では，装用学習前後の状態を示した．装用学習前では，生得身体のみを対象とした身体図式および身体イメージであったが，装用学習後において人間-機械統合が進み VR 余剰肢を含めた身体イメージと身体図式が構築されている．自己近傍空間と余剰肢感覚のそれぞれの生起が正の相関をする結果を得られていることもあり，系列モデルとして関係性が図示できた形となる．

6th Finger (図 6.12) では，先行研究にて固有受容感覚が確認されていること [43] や，本研究で取り上げた一次感覚野および運動野における脳活動を確認できたことから身体図式が更新され，結果，身体イメージが人工余剰指を反映したことが考えられる．身体化感覚スコアにお

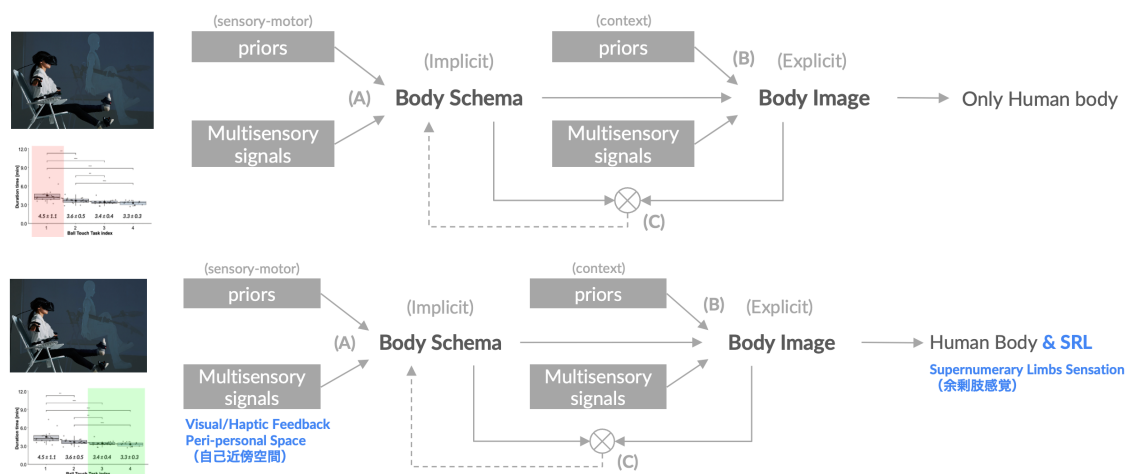


図 6.11: VR 余剰肢における身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル 上段に学習初期状態を, 下段に学習後期状態を示す。

いても人工余剰指が身体イメージに反映された結果が出ており, 実験結果としても適合する。

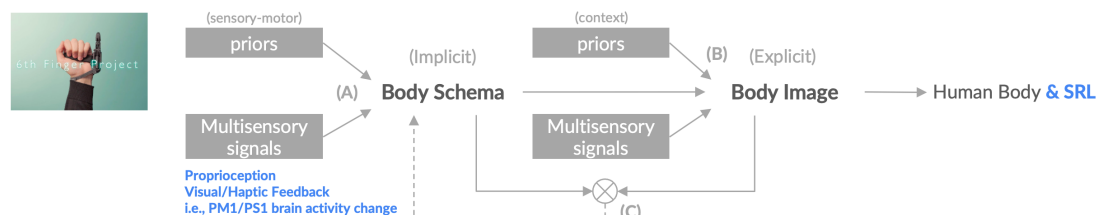


図 6.12: 6th Finger における身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル

タコ腕型 VR アバタ (図 6.13) では, 身体図式および身体イメージの変容はみられたもののプロテウス効果による身体が柔らかくなったような感覚 (Softer Body sensation) の観測がみられ, 身体化感覚スコアによる結果は得られなかった. このことから, 人間-機械統合身体システムの構築はされていない, と解釈できる。

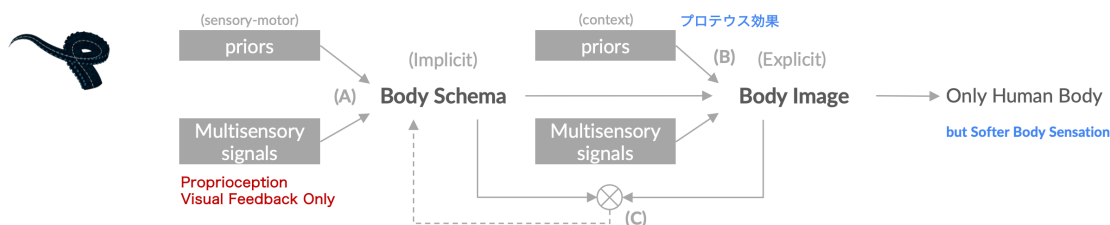


図 6.13: タコ腕型 VR アバタにおける身体図式と身体イメージの相互作用の系列モデル

6.2.7 人間機械統合身体システムの構築機序（提案）

これまでの考察・議論をふまえ人間機械統合身体システムの構築機序を図 6.14 として提案する．身体化感覚から始まり，身体図式と身体イメージの相互作用系列モデル，そして，人間機械統合身体システムの運動制御までを通して示すことができた．感覚-知覚-運動それぞれの情報が連動し，人間-機械をひとつの系としている．また，余剰肢ロボティクスにおける設計の検討にも沿った内容となっている．

図 6.14 における構築機序では，Implicit かつ Feeling レベルの身体化感覚が重要な要素となると考えられる．これらにより Motor および Perceptual Embodiment がもたらされ，Body Schema および Image の更新へつながっていくためである．一方で，Internal および External の Feeling レベルの身体化感覚はどちらが優位に働くのかについては議論の余地がある．それぞれの感覚を明確に隔てる実験系を組み立てることで，この点のさらなる検証が可能になると考えられる．

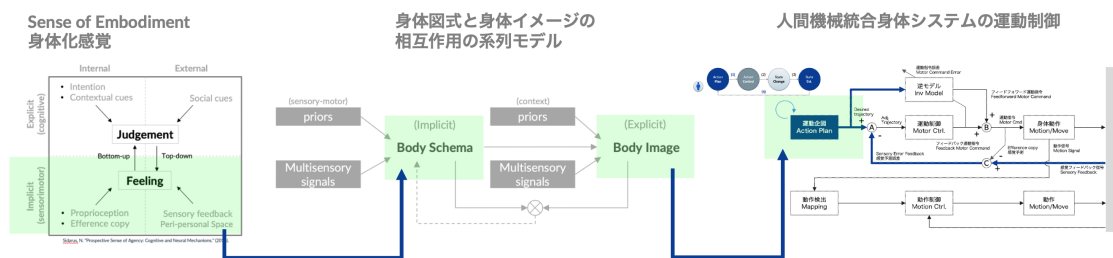


図 6.14: 人間機械統合身体システムの構築機序（提案）

6.2.8 人間機械統合身体システムと道具の身体化の違い

人間機械統合身体システムと道具の身体化の違いを考察する．身体認知からみて身体化と人間機械統合システムは類似しているが，明確に異なるのは身体化の対象となるものが「四肢もしくは身体の一部として機能するか」という点である．VR 余剰肢実験では，VR 余剰肢に対して生得身体が余剰に付加されたような感覚として観測しており，無機物な機械・道具とは異なるものとしている．もうひとつ考える相違点は身体所有感の喪失感である [39]．本研究では喪失感の計測・評価はできていないが，6th Finger 実験において，装用学習後に実験参加者より「外すと不思議と寂しい感覚を覚えた」といったコメントが得られている．これは喪失感と関連する感覚だと思われる．ただし，使い慣れた道具に対しても違和感を覚えることも報告されていることから，この点は慎重に検討・評価しなければならない [39]．

6.2.9 自律制御可能な機械との統合

自律制御可能な機械を対象とした際、人間機械統合身体システム構築の動態は異なる可能性がある。本研究で取り扱った VR 余剰肢, 6th Finger, タコ腕型 VR アバタはいずれも装用者の企図に応じて単純動作をする機械であった。そのために装用対象の身体化および身体的自己意識の構築が促進されたことが考えられる。一方で、取り扱う対象が複雑な動作を達成するために自律かつ自動制御されるような機械であった場合には、その身体化は応じて難しくなる可能性がある。タコ腕型 VR アバタは身体的特徴である冗長自由度を制御するために生得身体とは異なる挙動を示すために身体化が限定的であったことは機械の自律制御による影響も考えうる。

機械側から生得身体に対する認知・運動への介入具合を知ることは自律制御された機械との人間機械統合身体システムの構築を検討する上で重要である。前川・斉藤らが取り組む The Tight Game[117] や、前川・松原らが取り組む Pick Hits[118] は自律制御された機械と生得身体との関係性を取り上げている。また、認知的および運動的な透明性として斉藤らがまとめている [25]。身体的自己意識が成立する限界点の策定と、ここで取り上げた透明性の議論を行き来して議論していくことは機械の身体化の必要・十分条件を検討することにつながる事が期待される。

6.3 今後の展望と応用

本論文ではこちらで用意した3種類の余剰肢ロボットシステムの装用学習実験から身体認知変容を捉え、人間機械統合身体システムからみた身体認知および運動制御の考察を試みた。加えて、余剰肢ロボティクスの設計検討や、人間機械統合身体システムの構築に関する提案まで行った。生得身体に対し「追加・協調」を目指す余剰肢ロボティクスを題材に、その身体化に伴う身体認知の一部を捉えることができた。しかし、生得身体との協調動作・タスクでの評価は依然として必要であり、協調動作特有の身体認知や運動学習が考えられる。

今回使用した余剰肢ロボティクスでは、超冗長自由度系システムについては予備的検証に留まっているため、その操作方法の策定、また、その装用学習の評価から身体認知の変容を捉えることが求められる。身体認知および学習効果の詳細な動態解析（生起過程・消失過程など）についても、余剰肢ロボティクスのデザインや操作性によって異なることが予想され、効果的に身体化を促すことができる設計論について検討が必要がある。一方で、余剰肢感覚や自己近傍空間の生起といった余剰肢ロボティクスの評価に対する指標が増えたともいえ、これらを生起するために必要な設計要素なども検討が必要がある。

余剰肢ロボティクスのより詳細な操作方法によって身体化や学習過程が異なる可能性があるため、その追加検証が必要である。現状の提案モデルでは同様に分類として扱っているが詳細に見た場合には異なることが予想される。独立動作可能な人工余剰指では、日常動作では使用されない共収縮（Null space ともいわれる）を動作企図検出のためのトリガー信号として使

用しており、その学習は身体運動イメージがつきにくいこともあり、学習時間はかかることが予想される。その一方で、神経科学的に考えれば、体部位局在性にて説明されるような身体部位に応じた脳神経活動マップ（Homunculus）を変容させる可能性も考えられる。また、今回はBMI（ブレインマシンインターフェース）での装用学習の評価を実施していないため、本提案モデルが適用可能かどうかについては検証されなければならない。

認知科学 従来の道具の身体化で議論されていた身体部位の「代替・強化」といった観点ではなく、余剰肢ロボティクスを用いた身体部位の「追加」に伴う道具の身体化の議論を促進できる可能性がある。また、前段でも述べたが、学習効果の生起・消失過程の描写することも必要であると考えている。下條らによる逆さメガネを用いた逆転・反転視野実験 [119] では学習効果の過程を調べている。同様の実験パラダイムは身体部位の「付加」による認知科学実験として適用可能であると考えている。

神経科学 操作方法（e.g. Limbs Mapping vs EMG）による脳神経活動の差異の検証をはじめとして、体部位局在性における編集可能性の検討や、余剰肢ロボットシステムの装用学習における脳活動変容の動態解析などが検討できる。また、生得身体部位との協調動作による効果などについても、生得身体の運動を区別して議論することができれば、余剰肢ロボティクスにおける神経科学的解釈をさらに加速することができる可能性がある。

余剰肢ロボティクス 人間機械協調モデルを適用した設計論の検討をはじめとして、新たな操作方法・フィードバック方法の検討から、余剰肢ロボティクスがもつ特性を十分に考慮した設計・デザインが可能になると考えている。さらに、生得身体の運動学習を考慮した余剰肢ロボティクス側の動作計画（Action Planner）コンポーネントのデザインについても検討できれば、さらに効果的な設計が可能になると考えている。

第7章

結言

道具の身体化・運動学習・余剰肢ロボティクスを切り口に余剰肢ロボットと人間との関係性を多面的に描写しようと試みた。VR 提示型余剰肢ロボットアーム・独立動作可能な人工余剰指・超冗長自由度を持つタコ腕型 VR アバタ、それぞれの余剰肢ロボティクスのシステムの装用学習を通じて、変容する身体認知を捉えた。

VR 環境下で動作する余剰肢ロボットアームの装用学習より ボールタッチ課題の所要時間の解析結果から装用者が余剰肢ロボットアームの操作に適応することを示した。また、余剰肢ロボットシステムの装用学習後、余剰肢ロボットアームを身体化できた際の指標となる身体所有感、行為主体感、自己位置感覚、身体イメージの獲得に加えて、生得四肢より多く四肢を持つ感覚を指す「余剰肢感覚 (Supernumerary Limbs Sensation)」を主観評価スコアより捉えた。クロスモーダル一致課題にて視覚・触覚フィードバックに対する応答時間を計測したところ、応答時間が余剰肢ロボットアームの装用前後に大きく変化したことからロボットアーム周辺の視覚と触覚の情報統合認知である自己近傍空間が生起した可能性を示した。加えて、装用学習前後におけるそれぞれの身体認知の変容の相関を調べたところ、自己近傍空間と余剰肢感覚との間に正の相関があることが明らかとなった。

独立動作可能な人工余剰指の装用学習実験より Sync 条件時に人工余剰指を身体化できた際の指標となる身体所有感、行為主体感、身体イメージの獲得を主観評価スコアより捉えた。fMRI を用いた脳活動変容解析では、Sync 条件時に生得母指・示指・薬指・小指において第一次体性感覚野・運動野にて Async 条件と比較して脳活動が高くなる傾向を捉えた。また、主観評価スコアと脳活動変容での相関分析から人工余剰指への身体所有感と親指に関する脳活動変化、および、人工余剰指への行為主体感と薬指に関する脳活動変化において負の相関がみられた。これらより人工余剰指の身体化が一次感覚運動野における身体部位の原始的な表象に関わる脳活動を変容させる可能性を示唆した。

超冗長自由度をもつタコ腕型 VR アバタの装用学習より タコ腕型 VR アバタの装用学習後には位置感覚が学習前より広がる結果となり身体イメージの変容する傾向を捉えた。また、装用学習課題中に計測した生得身体の運動解析から、タコ腕型 VR アバタの装用時には運動が縮小する傾向がみられ、身体図式が変容する傾向を捉えた。アバタを身体化できた際の指標となる身体認知については主観評価スコアとして高くなる傾向があったものの統制条件との差分がみられず限定的であったが、プロテウス効果に伴う身体が柔らかくなったような感覚（Softer Body Sensation）を捉えた。

各種アプローチからの総合考察 得られた知見を横断的に用いて、身体認知および運動学習の観点から人間機械統合身体システムについて考察した。また、余剰肢ロボティクスの制御戦略を示す人間機械協調モデルに対して設計検討を提示した。人間機械統合身体システムの構築機序の提案として感覚-知覚-運動の情報連携をひとつの系にて示した。本提案については、さらなる検証は必要であるが、今後の道筋を示唆した。

上記をもって、人間-機械を統合した身体システムの構築機序の描写を試みた。

謝辞

この博士論文を執筆するにあたり、本当に様々な方にお世話になりました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

指導教員である稲見昌彦教授をはじめとし、東京大学・身体情報学研究室の皆様には大変にお世話になりました。研究に必要な機会・場・時間・環境・仲間を賜り、大変感謝しております。とりわけ齊藤寛人特任助教には身体情報学研究室における、いずれの研究プロジェクトへ御協力および御助力いただきましたこと、大変感謝しております。

稲見自在化身体プロジェクト（JST ERATO JPMJER1701）において、拠点代表を務められています宮脇陽一教授、北崎充晃教授、Ganesh Gowrishankar 教授、杉本麻樹教授の御協力を賜り、拠点間連携をすることが叶いましたこと、心より感謝致します。生理学研究所での脳機能画像計測実験に際して、福永雅喜准教授に多大な御協力を賜りましたこと、心より感謝致します。

本論文の審査にて、稲見昌彦教授、宮脇陽一教授、北崎充晃教授、矢入健久教授、門内靖明准教授より御指導賜りましたこと、心より感謝致します。

東京大学・身体情報学研究室および電気通信大学・宮脇研究室の教員・事務スタッフおよび博士・修士・学士課程の皆様には、研究活動だけでなく研究生活を含めて多大なサポートを戴きましたこと、大変感謝しております。多くの学びと経験をさせていただき、誠にありがとうございました。

社会人博士課程への進学に御理解および許諾いただきました GE ヘルスケア・ジャパン株式会社の皆様にも感謝の意を示したいと思います。誠にありがとうございました。

研究生活を応援・支援してくれた家族に心から感謝したいと思います。

最後に、本研究・博士論文に関わったすべての皆様へ、改めて、感謝の意を示したいと思います。誠にありがとうございました。

参考文献

- [1] Henri Bergson. *Creative Evolution*. London: Palgrave-Macmillan, 1911.
- [2] P M Fitts and M I Posner. Human performance. 1967.
- [3] Richard A Schmidt and Timothy D Lee. Motor control and learning: A behavioral emphasis, 4th ed. Vol. 4, p. 535, 2005.
- [4] Helena De Preester and Manos Tsakiris. Body-extension versus body-incorporation: Is there a need for a body-model? *Phenomenol. Cognitive Sci.*, Vol. 8, No. 3, pp. 307–319, September 2009.
- [5] Aubrie Schettler, Vicente Raja, and Michael L Anderson. The embodiment of objects: Review, analysis, and future directions. *Front. Neurosci.*, Vol. 13, p. 1332, December 2019.
- [6] Veronica Weser and Dennis R Proffitt. Tool embodiment: The tool’s output must match the user’s input. *Front. Hum. Neurosci.*, Vol. 12, p. 537, 2018.
- [7] Yasuo Kuniyoshi Cota Nabeshima. 対象同定に基づく道具身体化の計算論. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 897–905, 2007.
- [8] A Iriki, M Tanaka, and Y Iwamura. Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. *Neuroreport*, Vol. 7, No. 14, pp. 2325–2330, October 1996.
- [9] L Cardinali, C Brozzoli, C Urquizar, R Salemme, A C Roy, and A Farnè. When action is not enough: tool-use reveals tactile-dependent access to body schema. *Neuropsychologia*, Vol. 49, No. 13, pp. 3750–3757, November 2011.
- [10] Emiliano Macaluso, C D Frith, and J Driver. Supramodal effects of covert spatial orienting triggered by visual or tactile events. *J. Cogn. Neurosci.*, Vol. 14, No. 3, pp. 389–401, April 2002.
- [11] E Macaluso and J Driver. Spatial attention and crossmodal interactions between vision and touch. *Neuropsychologia*, Vol. 39, No. 12, pp. 1304–1316, 2001.
- [12] Shaun Gallagher, Dr and Andrew N Meltzoff. The earliest sense of self and others: Merleau-Ponty and recent developmental studies. *Philos. Psychol.*, Vol. 9, No. 2, March 1996.
- [13] Irfan Hussain and Domenico Prattichizzo. *Augmenting Human Manipulation Abili-*

- ties with Supernumerary Robotic Limbs*. Springer, Cham, 2020.
- [14] Yuchuang Tong and Jinguo Liu. Review of research and development of supernumerary robotic limbs. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 8, No. 5, pp. 929–952, May 2021.
 - [15] Tomoya Sasaki, Mhd Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. MetaLimbs: multiple arms interaction metamorphism. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17, pp. 1–2, New York, NY, USA, July 2017. Association for Computing Machinery.
 - [16] Jacob W Guggenheim, Federico Parietti, Tamar Flash, and H Harry Asada. Laying the groundwork for Intra-Robotic-Natural limb coordination: Is fully manual control viable? *J. Hum.-Robot Interact.*, Vol. 9, No. 3, pp. 1–12, May 2020.
 - [17] Ralph S Mosher. Handyman to hardiman. *SAE Trans. J. Mater. Manuf.*, Vol. 76, pp. 588–597, 1968.
 - [18] Paul D Marasco, Jacqueline S Hebert, Jonathon W Sensinger, Dylan T Beckler, Zachary C Thumser, Ahmed W Shehata, Heather E Williams, and Kathleen R Wilson. Neurorobotic fusion of prosthetic touch, kinesthesia, and movement in bionic upper limbs promotes intrinsic brain behaviors. *Sci Robot*, Vol. 6, No. 58, p. eabf3368, September 2021.
 - [19] Baldin Llorens Bonilla and H Harry Asada. A robot on the shoulder: Coordinated human-wearable robot control using coloured petri nets and partial least squares predictions. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 119–125, May 2014.
 - [20] I Hussain, G Salvietti, G Spagnoletti, and D Prattichizzo. The Soft-SixthFinger: a wearable EMG controlled robotic Extra-Finger for grasp compensation in chronic stroke patients. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 1, No. 2, pp. 1000–1006, July 2016.
 - [21] Yuchuang Tong and Jinguo Liu. Review of research and development of supernumerary robotic limbs. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 8, No. 5, pp. 929–952, May 2021.
 - [22] Wenhao Deng, Ioannis Papavasileiou, Zhi Qiao, Wenlong Zhang, Kam-Yiu Lam, and Song Han. Advances in automation technologies for lower extremity neurorehabilitation: A review and future challenges. *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, Vol. 11, pp. 289–305, May 2018.
 - [23] Michael R Tucker, Jeremy Olivier, Anna Pagel, Hannes Bleuler, Mohamed Bouri, Olivier Lambercy, José Del R Millán, Robert Riener, Heike Vallery, and Roger Gassert. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review. *J. Neuroeng. Rehabil.*, Vol. 12, p. 1, January 2015.
 - [24] Maria Gallagher, Cristian Colzi, and Anna Sedda. Dissociation of proprioceptive

- drift and feelings of ownership in the somatic rubber hand illusion. *Acta Psychol.*, Vol. 212, p. 103192, November 2020.
- [25] Hiroto Saito, Arata Horie, Azumi Maekawa, Seito Matsubara, Sohei Wakisaka, Zendai Kashino, Shunichi Kasahara, Masahiko Inami, Information Somatics Lab, Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan, and Sony Computer Science Laboratories, Inc. 3-14-13 Higashigotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0022, Japan. Transparency in human-machine mutual action. *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 33, No. 5, pp. 987–1003, October 2021.
- [26] Bruno Siciliano and Oussama Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, July 2016.
- [27] Arvid Guterstam, Valeria I Petkova, and H Henrik Ehrsson. The illusion of owning a third arm. *PLoS One*, Vol. 6, No. 2, p. e17208, February 2011.
- [28] Roger Newport, Rachel Pearce, and Catherine Preston. Fake hands in action: embodiment and control of supernumerary limbs. *Exp. Brain Res.*, Vol. 204, No. 3, pp. 385–395, July 2010.
- [29] 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.
- [30] A Curt, C Ngo Yengue, L M Hilti, and P Brugger. Supernumerary phantom limbs in spinal cord injury. *Spinal Cord*, Vol. 49, No. 5, pp. 588–595, May 2011.
- [31] D M Wolpert, R C Miall, and M Kawato. Internal models in the cerebellum. *Trends Cogn. Sci.*, Vol. 2, No. 9, pp. 338–347, September 1998.
- [32] Norbert Wiener. Cybernetics. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*, Vol. 3, No. 7, pp. 2–4, 1950.
- [33] C E Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 4, pp. 623–656, October 1948.
- [34] Clynes, Manfred E and Kline, Nathan S. Cyborgs and space. *Astronautics*, Vol. 14, No. 9, pp. 26–27, 1960.
- [35] George Fink, Donald W Pfaff, and Jon Levine. *Handbook of Neuroendocrinology*. Academic Press, October 2011.
- [36] M M Mesulam. From sensation to cognition. *Brain*, Vol. 121 (Pt 6), pp. 1013–1052, June 1998.
- [37] Andreas Riener. Chapter 19 - subliminal perception or “can we perceive and be influenced by stimuli that do not reach us on a conscious level?”. In Myounghoon Jeon, editor, *Emotions and Affect in Human Factors and Human-Computer Interaction*,

- pp. 503–538. Academic Press, San Diego, January 2017.
- [38] C Bauckhage, G A Fink, J Fritsch, F Kummert, F Lomker, G Sagerer, and S Wachsmuth. An integrated system for cooperative man-machine interaction. In *Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (Cat. No.01EX515)*, pp. 320–325, July 2001.
 - [39] Frédérique de Vignemont. Embodiment, ownership and disownership. *Conscious. Cogn.*, Vol. 20, No. 1, pp. 82–93, March 2011.
 - [40] Irfan Hussain and Domenico Prattichizzo. *Augmenting Human Manipulation Abilities with Supernumerary Robotic Limbs*. Springer, Cham, 2020.
 - [41] Irfan Hussain, Gionata Salvietti, Giovanni Spagnoletti, and Domenico Prattichizzo. The Soft-SixthFinger: a wearable EMG controlled robotic Extra-Finger for grasp compensation in chronic stroke patients. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 1, No. 2, pp. 1000–1006, July 2016.
 - [42] Paulina Kieliba, Danielle Clode, Roni O Maimon-Mor, and Tamar R Makin. Robotic hand augmentation drives changes in neural body representation. *Science Robotics*, Vol. 6, No. 54, May 2021.
 - [43] Kohei Umezawa, Yuta Suzuki, Gowrishankar Ganesh, and Yoichi Miyawaki. Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study. *Sci. Rep.*, Vol. 12, No. 1, p. 2339, February 2022.
 - [44] Andrea Stevenson Won, Jeremy Bailenson, Jimmy Lee, and Jaron Lanier. Homuncular flexibility in virtual reality. *J. Comput. Mediat. Commun.*, Vol. 20, No. 3, pp. 241–259, May 2015.
 - [45] Henry Head and Gordon Holmes. SENSORY DISTURBANCES FROM CEREBRAL LESIONS. *Brain*, Vol. 34, No. 2-3, pp. 102–254, November 1911.
 - [46] Shaun Gallagher. *How the Body Shapes the Mind*. Clarendon Press, October 2006.
 - [47] D M Wolpert, Z Ghahramani, and M I Jordan. An internal model for sensorimotor integration. *Science*, Vol. 269, No. 5232, pp. 1880–1882, September 1995.
 - [48] Eric R Kandel, James H (James Harris) Schwartz, Thomas M Jessell, Steven Siegelbaum, A James Hudspeth, Sarah Mack, 一郎金澤, 保司宮下, 栄之岡野, 圭司和田, 総夫 (医学) 加藤, 篤史入来, 一郎藤田, 正伊佐, 規弘定藤, 典子大隅, 清登笠井. *カンデル神経科学*. 2014.
 - [49] Manos Tsakiris and Patrick Haggard. The rubber hand illusion revisited: visuo-tactile integration and self-attribution. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, Vol. 31, No. 1, pp. 80–91, February 2005.
 - [50] Paillard. Vectorial versus configural encoding of body space. *Body image and body schema*, 2005.
 - [51] Edger Rubin. Figure and ground. *Readings in perception.*, 1958.
 - [52] Tanaka Shogo. 運動学習におけるコツと身体図式の機能. *バイオメカニズム学会誌*,

- Vol. 37, No. 4, pp. 205–210, 2013.
- [53] Shaun Gallagher. Body image and body schema: A conceptual clarification. *The Journal of Mind and Behavior*, Vol. 7, No. 4, pp. 541–554, 1986.
 - [54] Yochai Ataria, Shogo Tanaka, and Shaun Gallagher. *Body Schema and Body Image: New Directions*. Oxford University Press, July 2021.
 - [55] I Gallagher, I. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends Cogn. Sci.*, Vol. 4, No. 1, pp. 14–21, January 2000.
 - [56] M Botvinick and J Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756, February 1998.
 - [57] Claudio Brozzoli, Giovanni Gentile, and H Henrik Ehrsson. That’s near my hand! parietal and premotor coding of hand-centered space contributes to localization and self-attribution of the hand. *J. Neurosci.*, Vol. 32, No. 42, pp. 14573–14582, October 2012.
 - [58] 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. *Front. Psychol.*, Vol. 6, p. 1509, October 2015.
 - [59] Patrick Haggard and Manos Tsakiris. The experience of agency: Feelings, judgments, and responsibility. *Curr. Dir. Psychol. Sci.*, Vol. 18, No. 4, pp. 242–246, August 2009.
 - [60] Kenri Kodaka, Yutaro Sato, and Kento Imai. The slime hand illusion: Nonproprioceptive ownership distortion specific to the skin region. *Iperception*, Vol. 13, No. 6, p. 20416695221137731, November 2022.
 - [61] James W Moore. What is the sense of agency and why does it matter? *Front. Psychol.*, Vol. 7, p. 1272, August 2016.
 - [62] Matthis Synofzik, Gottfried Vosgerau, and Albert Newen. Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Conscious. Cogn.*, Vol. 17, No. 1, pp. 219–239, March 2008.
 - [63] Patrick Haggard and Valerian Chambon. Sense of agency. *Curr. Biol.*, Vol. 22, No. 10, pp. R390–2, May 2012.
 - [64] S J Blakemore, D M Wolpert, and C D Frith. Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nat. Neurosci.*, Vol. 1, No. 7, pp. 635–640, November 1998.
 - [65] S J Blakemore, D Wolpert, and C Frith. Why can’t you tickle yourself? *NeuroReport*: For rapid communication of neuroscience research, 11 (11), R11–R16, 2000.
 - [66] Patrick Haggard. Sense of agency in the human brain. *Nat. Rev. Neurosci.*, Vol. 18, No. 4, pp. 196–207, April 2017.
 - [67] Noham Wolpe and James B Rowe. Beyond the “urge to move”: objective measures for the study of agency in the post-libet era. *Front. Hum. Neurosci.*, Vol. 8, p. 450,

June 2014.

- [68] H Henrik Ehrsson. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, Vol. 317, No. 5841, p. 1048, August 2007.
- [69] Antonella Maselli and Mel Slater. Sliding perspectives: dissociating ownership from self-location during full body illusions in virtual reality. *Front. Hum. Neurosci.*, Vol. 8, p. 693, September 2014.
- [70] Andrea Serino, Adrian Alsmith, Marcello Costantini, Alisa Mandrigin, Ana Tajadura-Jimenez, and Christophe Lopez. Bodily ownership and self-location: components of bodily self-consciousness. *Conscious. Cogn.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1239–1252, December 2013.
- [71] Shogo Tanaka. What is it like to be disconnected from the body? a phenomenological account of disembodiment in depersonalization/ derealization disorder. *Journal of Consciousness Studies*, Vol. 25, No. 25(5-6), pp. 239–262, January 2018.
- [72] C S Sherrington. ON THE PROPRIO-CEPTIVE SYSTEM, ESPECIALLY IN ITS REFLEX ASPECT. *Brain*, Vol. 29, No. 4, pp. 467–482, March 1907.
- [73] Brian O’Shaughnessy. *Proprioception and the Body Image*. Oxford University Press, January 2003.
- [74] Barry C Stillman. Making sense of proprioception: The meaning of proprioception, kinaesthesia and related terms. *Physiotherapy*, Vol. 88, No. 11, pp. 667–676, November 2002.
- [75] John C Tuthill and Eiman Azim. Proprioception. *Curr. Biol.*, Vol. 28, No. 5, pp. R194–R203, March 2018.
- [76] G Rizzolatti, L Fadiga, L Fogassi, and V Gallese. The space around us. *Science*, Vol. 277, No. 5323, pp. 190–191, July 1997.
- [77] Nicholas P Holmes and Charles Spence. The body schema and multisensory representation(s) of peripersonal space. *Cogn. Process.*, Vol. 5, No. 2, pp. 94–105, June 2004.
- [78] Andrea Serino. Peripersonal space (PPS) as a multisensory interface between the individual and the environment, defining the space of the self. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, Vol. 99, pp. 138–159, April 2019.
- [79] Steffan Kennett, Charles Spence, and Jon Driver. Visuo-tactile links in covert exogenous spatial attention remap across changes in unseen hand posture. *Percept. Psychophys.*, Vol. 64, No. 7, pp. 1083–1094, October 2002.
- [80] C Spence, F Pavani, and J Driver. Crossmodal links between vision and touch in covert endogenous spatial attention. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, Vol. 26, No. 4, pp. 1298–1319, August 2000.
- [81] Angelo Maravita, Charles Spence, Steffan Kennett, and Jon Driver. Tool-use changes multimodal spatial interactions between vision and touch in normal hu-

- mans. *Cognition*, Vol. 83, No. 2, pp. B25–34, March 2002.
- [82] Lucilla Cardinali, Claudio Brozzoli, and Alessandro Farnè. Peripersonal space and body schema: two labels for the same concept? *Brain Topogr.*, Vol. 21, No. 3-4, pp. 252–260, May 2009.
- [83] Rory J Bufacchi and Gian Domenico Iannetti. An action field theory of peripersonal space. *Trends Cogn. Sci.*, Vol. 22, No. 12, pp. 1076–1090, December 2018.
- [84] Melita J Giummarra, Stephen J Gibson, Nellie Georgiou-Karistianis, and John L Bradshaw. Mechanisms underlying embodiment, disembodiment and loss of embodiment. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, Vol. 32, No. 1, pp. 143–160, 2008.
- [85] Joel Smith. *Self-Consciousness*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, summer 2020 edition, 2020.
- [86] Olaf Blanke, Mel Slater, and Andrea Serino. Behavioral, neural, and computational principles of bodily Self-Consciousness. *Neuron*, Vol. 88, No. 1, pp. 145–166, October 2015.
- [87] D O Hebb. *The Organization of Behavior*. Psychology Press, 1st edition edition, May 2002.
- [88] Emily J Koller and Paramita Chakrabarty. Tau-Mediated dysregulation of neuroplasticity and glial plasticity. *Front. Mol. Neurosci.*, Vol. 13, p. 151, August 2020.
- [89] G W T. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. (brain, vol. lx, p. 389, dec, 1937.) penfield, w., and boldrey, E. *J. Ment. Sci.*, Vol. 84, No. 352, pp. 868–868, September 1938.
- [90] James Kolasinski, Tamar R Makin, John P Logan, Saad Jbabdi, Stuart Clare, Charlotte J Stagg, and Heidi Johansen-Berg. Perceptually relevant remapping of human somatotopy in 24 hours. *Elife*, Vol. 5, , December 2016.
- [91] Etienne Burdet, David W Franklin, and Theodore E Milner. *Human robotics: neuromechanics and motor control*. 丸善出版, 2017.
- [92] R Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. 2, No. 1, pp. 14–23, March 1986.
- [93] Rodney A Brooks. Integrated systems based on behaviors. *SIGART Bull.*, Vol. 2, No. 4, pp. 46–50, July 1991.
- [94] Martin Heidegger, John Macquarrie, and Edward Robinson. *Being and Time*. London: Scm Press, 1962.
- [95] Ali Sengül, Michiel van Elk, Giulio Rognini, Jane Elizabeth Aspell, Hannes Bleuler, and Olaf Blanke. Extending the body to virtual tools using a robotic surgical interface: evidence from the crossmodal congruency task. *PLoS One*, Vol. 7, No. 12, p. e49473, December 2012.
- [96] G A Gescheider, S J Bolanowski, and K R Hardick. The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system. *Somatosens. Mot.*

- Res.*, Vol. 18, No. 3, pp. 191–201, 2001.
- [97] Jane E Aspell, Bigna Lenggenhager, and Olaf Blanke. Keeping in touch with one's self: multisensory mechanisms of self-consciousness. *PLoS One*, Vol. 4, No. 8, p. e6488, August 2009.
 - [98] Samantha F Anderson, Ken Kelley, and Scott E Maxwell. Sample-Size planning for more accurate statistical power: A method adjusting sample effect sizes for publication bias and uncertainty. *Psychol. Sci.*, Vol. 28, No. 11, pp. 1547–1562, November 2017.
 - [99] World Medical Association. Declaration of helsinki. *Br. Med. J.*, Vol. 313, pp. 1448–1449, 1996.
 - [100] Mar Gonzalez-Franco and Tabitha C Peck. Avatar embodiment. towards a standardized questionnaire. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 5, p. 74, 2018.
 - [101] David I Shore, Morgan E Barnes, and Charles Spence. Temporal aspects of the visuotactile congruency effect. *Neurosci. Lett.*, Vol. 392, No. 1-2, pp. 96–100, January 2006.
 - [102] Polona Pozeg, Giulia Galli, and Olaf Blanke. Those are your legs: The effect of Visuo-Spatial viewpoint on Visuo-Tactile integration and body ownership. *Front. Psychol.*, Vol. 6, p. 1749, November 2015.
 - [103] Charles Spence, Francesco Pavani, Angelo Maravita, and Nicholas Holmes. Multi-sensory contributions to the 3-D representation of visuotactile peripersonal space in humans: evidence from the crossmodal congruency task. *J. Physiol. Paris*, Vol. 98, No. 1-3, pp. 171–189, January 2004.
 - [104] H H Ehrsson. The concept of body ownership and its relation to multisensory integration. pp. 775–792, January 2012.
 - [105] James T Townsend and F Gregory Ashby. *Stochastic Modeling of Elementary Psychological Processes*. Cambridge University Press, February 1984.
 - [106] Bruno Siciliano and Oussama Khatib, editors. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
 - [107] R W Cox. AFNI: software for analysis and visualization of functional magnetic resonance neuroimages. *Comput. Biomed. Res.*, Vol. 29, No. 3, pp. 162–173, June 1996.
 - [108] R W Cox and J S Hyde. Software tools for analysis and visualization of fMRI data. *NMR Biomed.*, Vol. 10, No. 4-5, pp. 171–178, June 1997.
 - [109] Paul A Taylor, Gang Chen, Daniel R Glen, Justin K Rajendra, Richard C Reynolds, and Robert W Cox. FMRI processing with AFNI: Some comments and corrections on “exploring the impact of analysis software on task fMRI results”. April 2018.
 - [110] Matthew F Glasser, Stamatios N Sotiropoulos, J Anthony Wilson, Timothy S Coalson, Bruce Fischl, Jesper L Andersson, Junqian Xu, Saad Jbabdi, Matthew Web-

- ster, Jonathan R Polimeni, David C Van Essen, Mark Jenkinson, and WU-Minn HCP Consortium. The minimal preprocessing pipelines for the human connectome project. *Neuroimage*, Vol. 80, pp. 105–124, October 2013.
- [111] Gang Chen, Ziad S Saad, Audrey R Nath, Michael S Beauchamp, and Robert W Cox. FMRI group analysis combining effect estimates and their variances. *Neuroimage*, Vol. 60, No. 1, pp. 747–765, March 2012.
- [112] Tamar Makin and London Plasticity Lab. Phantom limbs and brain plasticity in amputees. In *Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience*. August 2020.
- [113] Oyanagi Akimi. Reducing the fear of height by inducing the proteus effect of a dragon avatar. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 1, pp. 2–11, 2020.
- [114] Holger G Krapp. Sensorimotor transformation: from visual responses to motor commands. *Curr. Biol.*, Vol. 20, No. 5, pp. R236–9, March 2010.
- [115] Reza Shadmehr and John W Krakauer. A computational neuroanatomy for motor control. *Exp. Brain Res.*, Vol. 185, No. 3, pp. 359–381, March 2008.
- [116] Victor Pitron, Adrian Alsmith, and Frédérique de Vignemont. How do the body schema and the body image interact? *Conscious. Cogn.*, Vol. 65, pp. 352–358, October 2018.
- [117] Azumi Maekawa, Shunichi Kasahara, Hiroto Saito, Daisuke Uriu, Gowrishankar Ganesh, and Masahiko Inami. The tight game: Implicit force intervention in interpersonal physical interactions on playing tug of war. In *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, No. Article 10 in SIGGRAPH '20, pp. 1–2, New York, NY, USA, August 2020. Association for Computing Machinery.
- [118] Azumi Maekawa, Seito Matsubara, Atsushi Hiyama, and Masahiko Inami. PickHits: hitting experience generation with throwing motion via a handheld mechanical device. In *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, No. Article 20 in SIGGRAPH '19, pp. 1–2, New York, NY, USA, July 2019. Association for Computing Machinery.
- [119] Shimojo Shinsuke. 逆転・反転視野実験についての一考察. 心理学評論, Vol. 21, No. 4, pp. 315–339, 1978.