

博士論文

拡張身体部位を用いた  
人間機械系の研究

佐々木智也



## 概要

本論文では、情報技術を用いて人間と機械を一体化し、人間の身体機能の拡張を目指す研究を行う。身体機能を拡張するために、人工的な身体部位を付加する。新たな身体部位を介して、人間が同時に複数の作業対象に作用することができる。このような部位を本論文では、「拡張身体部位」と呼び、人間機械系の観点からその設計について述べる。拡張身体部位は、人間と機械が一体化したシステムである。このシステムを実現するためには、ヒトの身体認知に基づく機械本体だけでなく、人間と機械が相互作用を行うためのインタフェース設計も重要になる。

拡張身体部位の設計には、人間の身体感覚、運動、認知に関わる心理学や神経科学などの科学的知見と機械本体を構成するロボット技術、情報技術といった工学的知見が必要となる。科学的知見として、人間の生得的な身体部位に着目する。人間は身体の手触や運動を通じて身体所有感や運動主体感が生起することで身体認知が成立している。この認知には可塑性があることから、感覚刺激や運動の結果を適切に制御することで、人工物を身体化することができる。工学的知見として、ロボットを用いた人間機械系における人間とロボットの関係に着目すると、協働ロボット、遠隔ロボット、装着ロボットに大別できる。また、人間拡張を志向する装着ロボットの関連研究の一つに、余剰肢ロボット (Supernumerary Robotic Limbs: SuperLimbs) がある。これらのロボットシステムを、人間、ロボット、作業対象でモデル化し、物理的相互作用と情動的相互作用の観点から整理して、設計要素を検討にする。本論文では、設計要素の中から、特に操作方法と本体形状に着目し、拡張身体部位を「どのように操るか?」、および「どんな形にするか?」について考える。

各設計要素はプロトタイプを用いて検証を行う。操作方法では、入力手法とフィードバック手法についてそれぞれ扱う。入力手法は、上肢の冗長自由度に着目した肩の動作による入力システムについて述べる。フィードバック手法では、人間の固有受容感覚に示唆を得た触覚提示手法について述べる。本体形状では、装着形状について、装着ロボットの利点を非接触で再現するためのシステム設計について述べる。また、部位形状について、人間の手の機能に着目して探索的に行ったインタラクション設計について述べる。最後に、各設計要素から得られた知見を踏まえて、拡張身体部位の設計について総合的な考察を行う。



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	2つの人間機械論	1
1.2	人間拡張と自在化身体	1
1.3	身体部位の付加による人間拡張	3
1.4	本研究の目的と構成	4
第 2 章	拡張身体部位の設計	5
2.1	ヒトの感覚と運動および身体認知	5
2.2	ロボットを用いた人間機械系	9
2.3	物理的・情動的相互作用を考慮した人間機械系のモデル	19
2.4	拡張身体部位による人間拡張	22
2.5	本章のまとめ	26
第 3 章	身体冗長自由度を用いた入力手法	27
3.1	はじめに	27
3.2	関連研究	28
3.3	提案手法と実装	30
3.4	実験	33
3.5	デモンストレーション	43
3.6	考察	44
3.7	本章のまとめ	47
第 4 章	固有受容感覚に示唆を得たフィードバック手法	49
4.1	はじめに	49
4.2	関連研究	50

## ii 目次

4.3	提案手法 . . . . .	51
4.4	実装 . . . . .	53
4.5	実験 . . . . .	54
4.6	考察 . . . . .	64
4.7	本章のまとめ . . . . .	65
第 5 章	座標共有による非接触な装着形状の設計	67
5.1	はじめに . . . . .	67
5.2	関連研究 . . . . .	69
5.3	Human Coincident Robot . . . . .	70
5.4	シミュレーション . . . . .	72
5.5	実機実験 . . . . .	74
5.6	考察 . . . . .	78
5.7	本章のまとめ . . . . .	79
第 6 章	部位形状に着目したインタラクション設計	81
6.1	はじめに . . . . .	81
6.2	関連研究 . . . . .	82
6.3	デザイン空間 . . . . .	85
6.4	実装 . . . . .	89
6.5	アプリケーション . . . . .	93
6.6	ユーザー調査 . . . . .	98
6.7	考察と今後の展望 . . . . .	100
6.8	本章のまとめ . . . . .	102
第 7 章	総合考察	104
7.1	前章までのまとめ . . . . .	104
7.2	設計要素の統合 . . . . .	105
7.3	設計要素に基づく設計手順 . . . . .	107
7.4	人間機械系のモデルの考察 . . . . .	108
7.5	今後の展望 . . . . .	109
第 8 章	結論	111

謝辞	112
参考文献	114
付録 A 触覚フィードバックを用いた肩入力の実験	136
A.1 実装 . . . . .	136
A.2 実験 . . . . .	138
付録 B HCR プロトタイプのモデルおよび制御式	142
B.1 運動モデル . . . . .	142
B.2 問題の定式化 . . . . .	142
B.3 人間の姿勢トラッキング . . . . .	144
B.4 制御設計 . . . . .	144



# 第1章

## 序論

### 1.1 2つの人間機械論

18世紀の哲学者 La Mettrie は、著書『人間機械論』 [1] で「人間は極めて複雑な機械である。」と述べた。この思想は、人間を物質的に還元して理解を試みようとする現代の生命科学の見解の出発点である。1929年に Bernal が人類未来論として出版した書籍 [2, 3] では、人間の肉体を機械とみなし、改造人間として器官を置き換える終極の姿について考察している。これは、人間を機械として考えるひとつの最終系である。

サイバネティクス (cybernetics) を提唱した Wiener が 1950 年に発表した一般書 [4] は、日本語訳書が『人間機械論』 [5] として出版されている。この本の原題は “The Human Use of Human Beings” であり、日本語訳書の副題となっている「人間の人的な利用」である。Wiener の目指した思想は、のちに「サイボーグ」として想起される人間の機械化というイメージよりも、むしろ機械の人間化であった [6]。

人間と機械の関係を扱うときに、この2つの視点の違いは重要である。人間を機械化することで所望の機能を達成するのではなく、機械を人間化する技術によって人間の生活の質を向上させる。本研究は、人間による人的な機械の利用を目指すものである。

### 1.2 人間拡張と自在化身体

人間拡張 (ヒューマンオーグメンテーション: Human Augmentation) は、人間と機械が一体化した自在な身体のあり方を探求する学問領域である。

暦本 [7, 8] によれば、情報技術を用いた能力拡張の概念は、1945年に Bush が発表した “As we may think” [9] にみることができる。近年の人間拡張に関する研究は 1990 年代後半から

## 2 第1章 序論

活発に行われており、2010年に第一回目の Augmented Human\*<sup>1</sup>国際会議が開催されている。ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)、バーチャルリアリティ (VR)、拡張現実 (AR)、ウェアラブルコンピューティングを扱う研究者達が、テクノロジーによる人間の能力拡張に関する研究を発表している。また、曆本は人間拡張の技術領域として「身体の拡張」、「知覚の拡張」、「認知の拡張」、「存在の拡張」の4つの方向性を示している (図 1.1)。

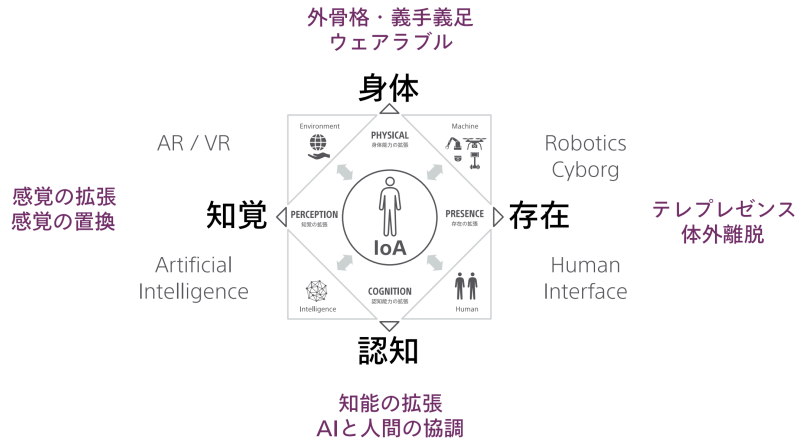


図 1.1: 人間拡張の4要素 [7]

稲見ら [10, 11] は、様々なデジタル機器が生活インフラになっている社会の進化系である Society 5.0 あるいは超スマート社会における新たな身体観のあり方として、自在化身体を提案している\*<sup>2</sup>。自在化身体の5つの形態として、「超感覚」、「超身体」、「幽体離脱・変身」、「分身」、「合体」を挙げている (図 1.2)。これらは、人間拡張の工学的なアプローチだけでなく、認知・神経科学、心理学といった科学的アプローチや社会学の観点からも取り込まれる。

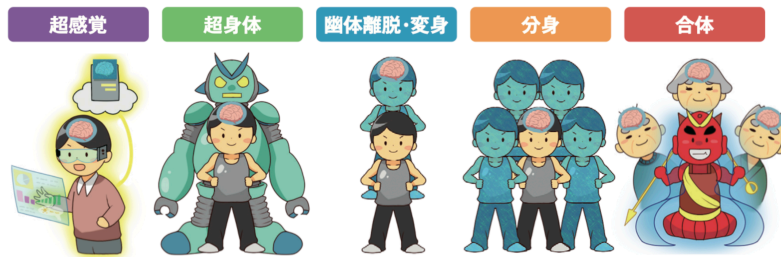


図 1.2: 自在化身体の5つの形態 [10]

本研究は、人間拡張技術における「身体の拡張」、自在化身体における「超身体」を対象としたものである。実世界の身体を扱うため、情報技術に加えて、物理的相互作用を行うために

\*<sup>1</sup> <https://dl.acm.org/conference/ah>

\*<sup>2</sup> <https://www.jst.go.jp/erato/inami/>

ロボティクスを用いた人間機械系を扱う。

### 1.3 身体部位の付加による人間拡張

人間の身体機能をロボットを用いて拡張することを考えるとき、人間の生得的な身体部位を機械で置き換えるようなサイボーグ以外の方向性として、複数の部位を新たに取り付けるアプローチが考えられる。SF などのフィクションの世界に目を向けると、ロボットアームを複数取り付けたキャラクターが登場する。例えば、スパイダーマンシリーズに登場するドクター・オクトパス<sup>\*3</sup>や映画ブラッドショット<sup>\*4</sup>に登場するジミー・ダルトンが挙げられる。また、オーストラリア出身のメディアアーティスト、Stelarc が 1980 年代に発表した先駆的な作品 “Third Hand” [12] では、パフォーマンスとして全身に貼り付けた電極で筋肉の活動を計測し、腕に取り付けたロボットハンドを操作する (図 1.3)。このようにエンターテインメントやアートの文脈では身体部位の付加が試みられていた。



図 1.3: Third Hand<sup>\*5</sup>

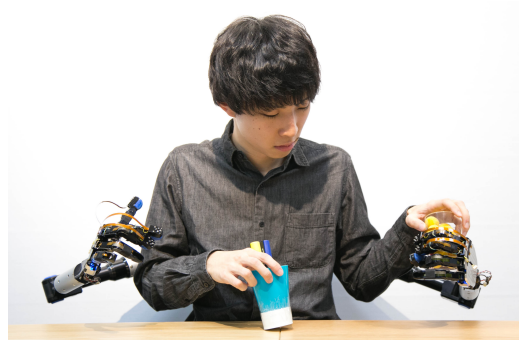


図 1.4: MetaLimbs [13]

筆者らは 2017 年にロボットを用いて人間の身体機能を工学的に拡張する試みとして、MetaLimbs [13] を発表した (図 1.4)。このシステムは、ロボットアームを搭載したバックパックを装着して足で操作する。足の位置姿勢をマーカーでトラッキングして、ロボットアームの手先の操作に用いる。足指の開閉動作をセンシングしてロボットハンドの操作に使用する。さらに、ロボットハンドで触れたときにその情報を足裏に触覚フィードバックする。

様々な機会でのこのシステムの実演展示を行い、老若男女関係なく多くの人がロボットアームを操作する体験をした。興味深いことに、このロボットアームを操作している人々にカップを渡すと、それをおもむろに口に近づけようとする [14]。普段から足を使って茶を飲む人はめっ

<sup>\*3</sup> <https://www.marvel.com/characters/doctor-octopus-otto-octavius>

<sup>\*4</sup> <https://www.sonypictures.com/movies/bloodshot>

<sup>\*5</sup> <http://stelarc.org/?catID=20265>

## 4 第1章 序論

たにいないが、このロボットアームを使うと目の前にあるこの手のような何かを操作している感覚になっているのではないかと考えられる。このような観察も含めて、MetaLimbsによって身体部位の付加による工学的な人間拡張の潜在的な可能性が示唆された。しかしながら、このシステムだけでは人間機械系として検討する上で十分ではない。そこで、本論文では、このようなロボットの身体部位を扱うシステムを新たな人間機械系として整理し、拡張身体部位と定義することで構成要素を整理し、設計指針を与えることを試みる。

### 1.4 本研究の目的と構成

本論文では、情報技術を用いて人間と機械を一体化し、人間の身体機能の拡張を目指す研究を行う。具体的な方法として、人工的な身体部位を人間に付加する。これにより新たな身体部位を介して、人間が同時に複数の作業対象に作用することができる。このような部位を本論文では、「拡張身体部位」と呼ぶ。本論文は、この人間の身体機能を拡張する拡張身体部位を提案し、その設計について論じる。拡張身体部位の設計は、ヒトの身体認知に基づいた身体部位の要因とロボットを用いた人間機械系の要件を目的に応じて参照して行うこと。これにより、従来のロボットシステムとは異なる機能を実現することができる。

本章では、研究の背景と目的について、主に人間拡張工学の観点から述べた。第2章では、ヒトの身体感覚、運動、認知の知見とロボットを用いた人間機械系の研究を論じ、拡張身体部位の設計要件を検討する。これにより以降の章で取り組む各設計要素を明確にする。第3章では、拡張身体部位を操作するために上肢の冗長自由度に着目して肩の動きによって入力を行う手法の提案し、魚眼レンズを用いたウェアラブルセンシングデバイスの実装を示す。第4章では、拡張身体部位の自己位置を把握するために位置の変化量を触覚強度に変換して提示する手法の提案し、皮膚変形を行うウェアラブル触覚デバイスの実装を示す。第5章では、拡張身体部位の重量の課題を座標の一致の観点から装着形状について論じる。そして、装着ロボットの利点を非接触状態で再現する手法の提案と実装を述べる。第6章では、拡張身体部位の部位形状について、手の形状に着目したインタラクションの検討と実装について述べる。第7章では、3~6章で得られた知見を整理し、本研究の総合的な考察と将来展望について述べる。第8章で結論を述べる。

## 第2章

# 拡張身体部位の設計

本章では、拡張身体部位の設計要素を明らかにする。2.1 で、システムを設計する上で要因となる人間の認知的・生理的特性としてこれまでに知られている知見を紹介し、人間の身体部位の認識について整理する。2.2 で、ロボットを用いた人間機械系の研究を概観し、本研究の主張である拡張身体部位の設計要素を整理する。2.3 では、人間、ロボット、作業対象間の相互作用に着目したモデルを示し、人間機械系の設計要素との関係を論じる。2.4 で、改めて拡張身体部位を定義し、以降の章で扱う設計要素について述べる。なお、3~6章の各研究において関連が高いものはその章ごとに言及する。

### 2.1 ヒトの感覚と運動および身体認知

本研究で提案する拡張身体部位を扱う上で、ヒトの身体感覚と運動、および身体認知についての先行研究に言及し、人間が有している身体部位について概観する。

#### 2.1.1 身体感覚

一般的に、身体感覚は視覚、聴覚、味覚、嗅覚、触覚の五感が挙げられる。この中で、視覚、聴覚、味覚、嗅覚は、感覚受容器が特定の部位に集中していることから、特殊感覚と呼ばれる。一方で、触覚は身体表面を覆う皮膚に感覚受容器があり、全身にあることから、一般感覚と呼ばれる [15]。

一般感覚には、皮膚感覚のほかにも固有受容感覚（体性感覚）や深部感覚があり、これらを含めて広義に触覚と呼ぶことがある。この中でも、固有受容感覚は身体動作に密接に関わる感覚である。固有受容感覚（体性感覚）は、皮膚内部の感覚受容器や筋肉の腱紡錘が皮膚や筋肉の収縮を検知して得られる感覚といわれている [16, 17]。固有受容感覚は身体部位の自己位置

## 6 第2章 拡張身体部位の設計

把握に重要である。例えば、この感覚入力に障害がみられる患者は、正確なリーチング動作が難しいことが報告されている [18]。固有受容感覚や皮膚感覚などの触覚は、運動感覚や身体部位の自己位置の認識や後述する身体認知の更新において重要な役割を果たす [19]。

### 2.1.2 身体運動

身体運動は、感覚入力に基づいて生成される運動指令によって実行される [17]。運動指令は、実際に身体を動かすだけでなく、運動の結果として生じる感覚入力を予測するために指令のコピー（遠心性コピー）としても用いられる（図 2.1）。

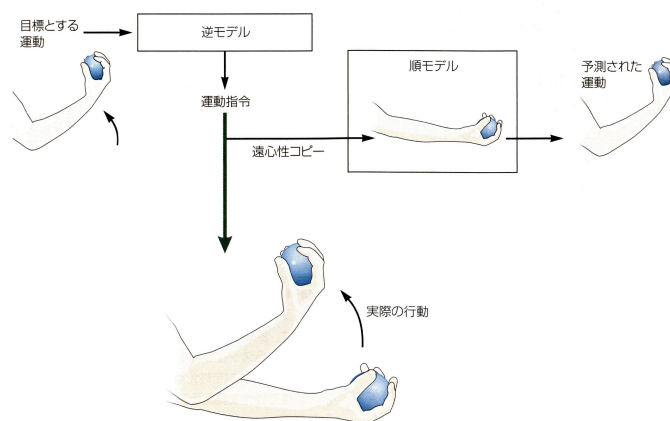


図 2.1: 身体運動における運動指令と遠心性コピー [17]

身体運動では、感覚フィードバックを利用しないフィードフォワード制御と、感覚フィードバックを利用するフィードバック制御がある。前者は、例えば 100 ms 以下の高速な応答が求められるような状況で利用される。これは、感覚運動系の信号伝達には遅延が内在しているためである。後者では、目標状態と知覚された状態が比較され、その誤差によって運動指令が修正される。多くの運動では、フィードフォワードとフィードバックの両方を組み合わせて運動制御が実現される。このような運動指令と実際の運動によって生じる感覚フィードバックによって、内部モデルが更新される [20]。

### 2.1.3 身体認知

身体認知は、自己と他者を区別し、環境とのインタラクションを行う上で重要である。この認知は身体感覚や身体運動とも密接に関わり、双方向に影響しながら生起される [21]。

哲学者 Gallagher は、最も最小な自己 (minimal self) として、身体所有感 (sense of ownership) と運動主体感 (sense of agency) の 2 つがあるとしている [22]。身体所有感は、「この身体は

まさに自分のものである」という感覚であり、運動主体感は「この行為を引き起こしたのはまさに自分自身である」という感覚である [23]。このような感覚は、特殊な状況を作ることによって、生得的な身体に限らない認知を生起することが知られている。

特殊な条件による身体所有感の変容を示す例として、ラバーハンド錯覚 (rubber hand illusion: RHI) が知られている。図 2.2 右のように、ゴムでできた手の模型 (ラバーハンド) を被験者の目の前において自身の手と並べる。自身の手は見えないように仕切りを立て、ブラシでラバーハンドと自身の手を同時に 2~3 分程度撫でる。これによって、自分の手ではないはずのラバーハンドがまるで自分の一部であるかのような奇妙な感覚が生じる。この現象は、1998 年に Botvinick と Cohen [24] によって報告された。ラバーハンド錯覚の生起には、感覚間の空間的整合性と時間的整合性が重要であるが、必ずしも厳密に一致する必要はない [25, 26]。例えば、2 本のラバーハンドを同時に見せた条件 [27] や自身の手とラバーハンドを同時に見せた条件 [28] (図 2.2) においても錯覚が生じる。また、ラバーハンド錯覚以外にも、全身に対して身体所有感が生じるフルボディ錯覚 [29, 30, 31] が知られている。

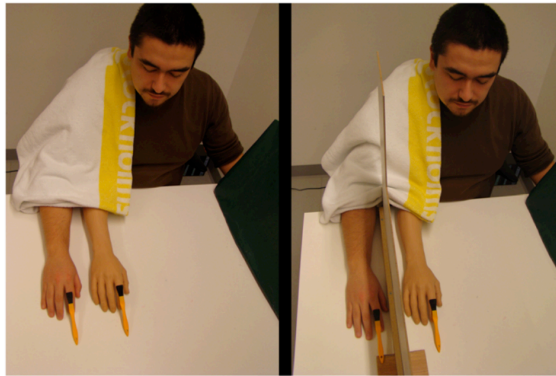


図 2.2: ラバーハンド錯覚 [28]: (左) 手とラバーハンドを同時に提示、(右) 一般的な条件

運動主体感は、2.1.2 で述べた運動制御と関連している。Synofzik ら [32] は、図 2.3 に示すようなコンパレータモデルを用いて、運動主体感には「感覚としての運動主体感 (feeling of agency)」と「判断としての運動主体感 (judgement of agency)」の 2 段階があると述べている。前者は、目標状態と遠心性コピーの比較によって運動を行なったかどうかとは別に自分の意図通りに身体を制御できているという感覚が生じる。後者は、実際に運動した結果として生じる感覚フィードバックとの比較によって、自分によってその動作が引き起こされたという感覚が生じる。運動主体感は、運動の意図と身体感覚の一致、および結果を認識することによる整合性の一致によって強く生じる。特に、遠心性コピーの役割を考慮すると、身体運動を伴う場合には能動的動作が運動主体感の生起に重要であることがわかる [33, 34]。

8 第2章 拡張身体部位の設計

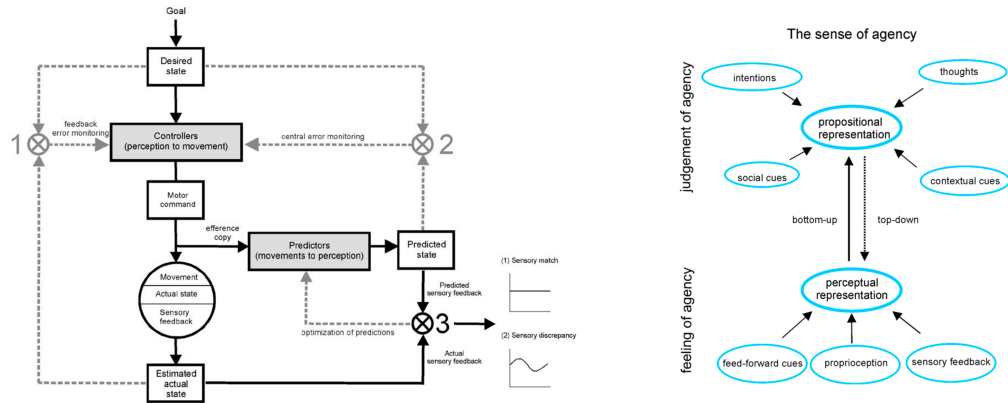


図 2.3: 運動主体感のモデル [32]: (左) コンパレータモデル、(右) 2 段階モデル

ここまでは、ヒトが生得的に有している身体を前提とした身体認知について述べた。しかし、ラバーハンド錯覚で示されるように、ヒトの身体認知は、必ずしも生物的な肉体を境界としていない。例えば、非生物である道具が、その使用を経て身体の一部として作用する現象を道具の身体化 (tool embodiment) と呼ぶ。Maravita と Iriki [35] は、マカクザル (ニホンザル) に熊手の使い方を学習させると、サル脳内で自身の身体領域にのみ反応するニューロンが道具の学習後に伸展したことを報告した (図 2.4)。人間も道具の使用によって、道具も含めた運動制御を学習すると考えられている [36, 37]。

また、ヒトの身体に関連した空間認知に身体近傍空間 (peripersonal space: PPS) [38] がある。身体表面から数 cm から数十 cm の範囲で身体を取り巻くこの空間は、それ以上身体から離れた空間とは異なる認知特性を示すことが知られている [39]。例えば、モニター上に提示されるターゲットの検出課題において、手の近くにターゲットを表示した場合は、そうでない場合に比べて早く検出される [40]。

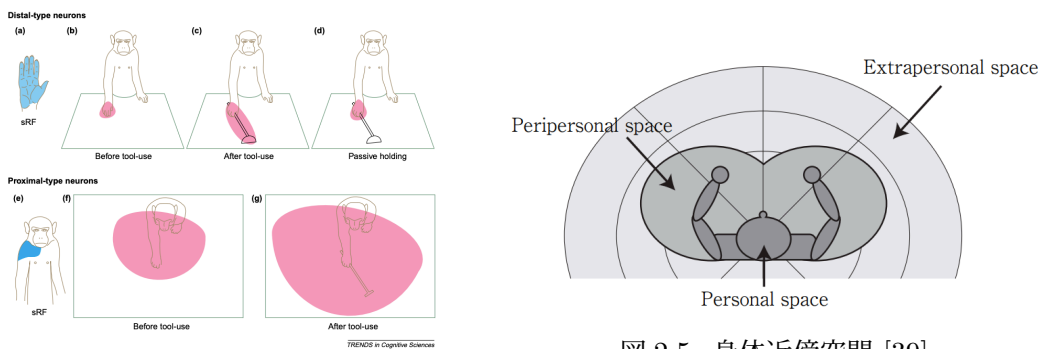


図 2.5: 身体近傍空間 [39]

図 2.4: 道具の使用による身体領域の変容 [35]

### 2.1.4 身体自己認識モデル

ここまで本節で述べた身体感覚、運動、認知の議論を踏まえて、人間の身体部位の要件を整理する。Blankeら [41] は、ラバーハンド錯覚やフルボディ錯覚の知見を踏まえた身体自己認識モデルを提唱している。身体部位または全身に対して、身体所有感が生起するためには以下の4条件を満たす必要があると述べている\*1。

1. その身体部位に関する体性感覚が存在すること（体性感覚制約）
2. その身体部位に関する視覚情報が存在すること（身体的視覚情報制約）
3. それが身体近傍空間に存在すること（PPS 制約）
4. 視覚-体性感覚情報が長い期間にわたって同期して与えられていること（embodiment 制約）

2.1.3 で述べたとおり、身体部位の認識には、身体所有感だけでなく運動主体感の生起も重要であるが、これらが上記の制約においてどのように相互に影響を及ぼしているのかは明らかになっていない。しかしながら、これらの要素の中でいくつかを工学的に満たすことは、人工的な身体部位が人間の身体の一部として認識されるように設計する指針になるといえる。

## 2.2 ロボットを用いた人間機械系

人間機械系について、ロボットを用いたシステムの観点から先行研究を概観する。人間とロボットの相互作用に着目し、協働ロボット、遠隔ロボット、装着ロボットの3つの形態に大別する。その後、人間機械系の設計要件を整理する。最後に複数の形態にまたがる研究に言及する。

### 2.2.1 協働ロボット

協働ロボット（collaborative robots）は、人間とロボットが同じ空間内で動作し、人間とロボットが接触状態で力学的な相互作用または非接触に意図を認識して操作する人間機械系である。

協働ロボットは産業ロボットの1つとして位置付けられる。1960年代にアメリカで開発された世界初の産業用ロボットユニメート（Unimate） [42] は、1970年代前半に川崎重工がラ

---

\*1 日本語訳は文献 [23] から引用および改変

## 10 第2章 拡張身体部位の設計

イセンス権を得て製造を開始した [43]。1980~90年代が産業ロボットの普及期 [44] と考えられており、この時期に日本やアメリカの工場で本格的に稼働しはじめた。しかしながら、2000年代時点でアメリカの産業用ロボットの8割弱が溶接やマテリアルハンドリング (material handling) 用途で用いられ、組み立て作業に用いられたのは1割程度であった [45]。当時のロボット制御は主に教示再生 (teaching-playback) や数値制御 (numerical control: NC) 方式が用いられている [44]。

1996年、Colgateら [46] は人間と力を伴う直接的な相互作用を伴う協働ロボットとして、コボット (cobot) を提案した (図 2.6 左)。Peshkin と Colgate はコボットを、“Collaborative robots “cobots” are intended for direct interaction with a human worker, handling a shared payload. They are a marked departure from autonomous industrial robots which must be isolated from people for safety reasons.” [47] と、従来の産業用ロボットとは異なる相互作用を実現するシステムである説明した。彼らの提案する先駆的な協働ロボットシステムは、ロボットが受動的に動作し、人間の入力に対してバーチャルサーフェスを生成することで作業支援を行う (図 2.6 右)。

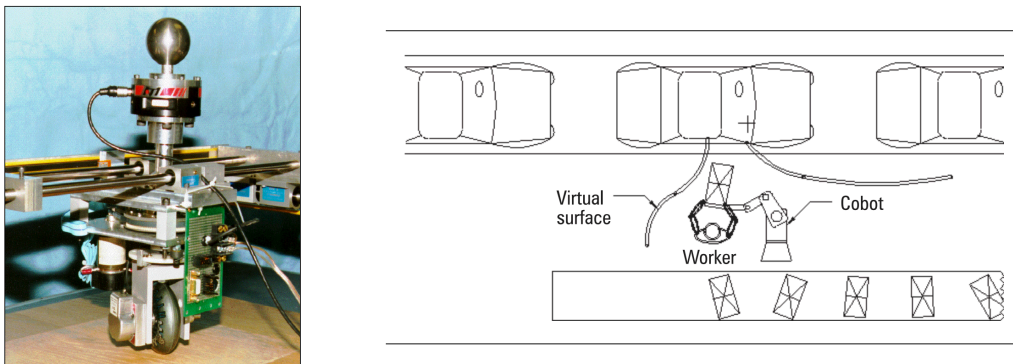


図 2.6: コボットシステム：(左) 一輪車型プロトタイプ [48]、(右) バーチャルサーフェスによる作業支援 [49]

2000年代に入り、協働ロボットに関する出版数は増加 [50] し、様々な研究が行われている [51, 52]。Bauerら [53] は協働ロボットの協働作業の水準を人間とロボットの協働作業空間の観点から、cell, coexistence, synchronized, cooperation, collaboration の5つに分類した (図 2.7)。左から順番に、ロボットが伝統的な柵の中にある水準、ロボットを囲う柵はないが人間と作業空間が交わらない水準、人間とロボットが作業空間を共有して交互にシーケンス作業 (sequential collaboration) を行う水準、人間とロボットが作業を行うが同時に1つの対象に対して作用しない水準、人間とロボットが1つの対象について同時に作用する水

準、を示す。各国のロボット協会やロボットメーカーが加盟する世界的な業界団体である IFR (International Federation of Robotics)<sup>\*2</sup>による 2018 年の報告によれば、現在の協働ロボットの作業形態の多くは、coexistence または synchronized の水準にある [54]<sup>\*3</sup>。

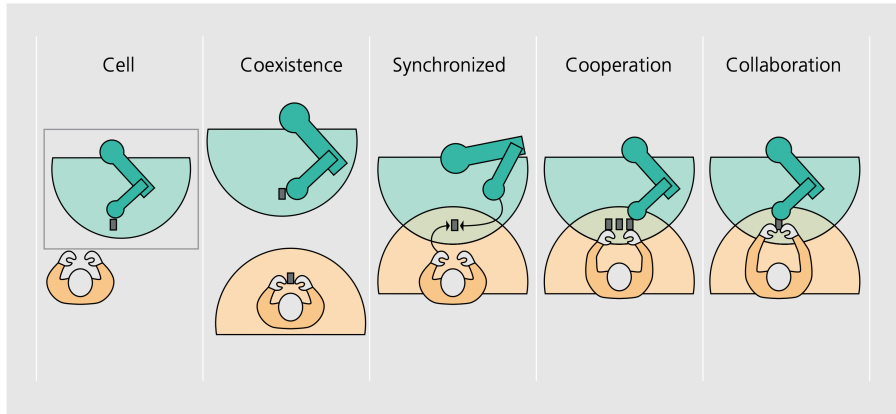


図 2.7: 協働作業空間による分類 [53]

以上のように、協働ロボットは工場に普及した産業用ロボットの用途を広げるために人間が近くで作業できる技術として研究され、先駆的にコボットシステムとして提案された。現在は、協働作業空間の観点からいくつかの水準で分類がされ、様々な研究が行われている。協働ロボットで扱われる人間機械系は、人間とロボットが同一空間に存在すること、ロボットと力学的相互作用がある場合とない場合の両方が考えられる、という特徴がある。

### 2.2.2 遠隔ロボット

遠隔ロボット (teleoperated robots) は、人間とロボットが物理的に離れた状態に位置し、人間がロボットの動きを指示して操作する人間機械系である。

最初期の遠隔ロボットは、放射性物質を離れたところから安全に取り扱うためのマスタスレーブ・マニピュレーション (master-slave manipulation) 技術として 1940 年代に研究がはじまる。1945 年、アメリカのアルゴンヌ国立研究所で Goertz によって開発されたシステムが、最初の近代的な遠隔ロボットとして知られている。これは入力装置がロボットと機械的に接続されたものであった (図 2.8 左)。Goertz らは 1954 年に電氣的に接続されたマスタスレーブシステムを開発した (図 2.8 右) [49]。これによって操作の入力を行う人間とロボット

<sup>\*2</sup> <https://ifr.org/>

<sup>\*3</sup> IFR の資料では、文献 [53] の synchronized に該当する水準を sequential collaboration と表現している。また、現状認識について 2020 年度更新版においても同様の見解を示している。<https://ifr.org/papers/demystifying-collaborative-industrial-robots-updated-version>

の配置を物理的に分離できるようになった。

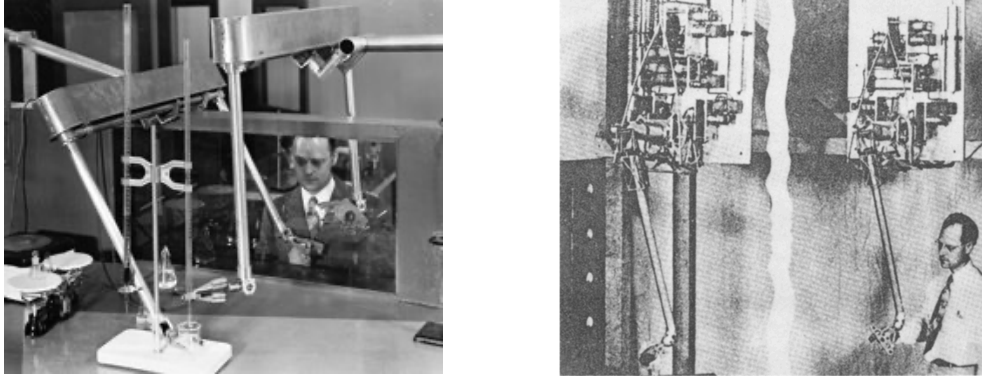


図 2.8: マスタスレーブシステム：(左) 機械式\*4、(右) 電気式 [49]

Sheridan は、1970 年代に管理制御 (supervisory control) [55] を提案し、1989 年にテレロボティクス (telerobotics) を紹介している [56]。管理制御は、人間がロボットの動きをひとつずつ直接操作するのではなく、管理者 (supervisor) として大まかな目標を指示することで任務を遂行するアイデアである。Sheridan はテレロボティクスを、“Telerobotics is a form of teleoperation in which a human operator acts as a supervisor, intermittently communicating to a computer information about goals, [...] while the subordinate telerobot executes the task based on information received from the human operator plus its own artificial sensing and intelligence.” [56] と定義し、自律型遠隔ロボットを用いたシステムを想定している (図 2.9)。

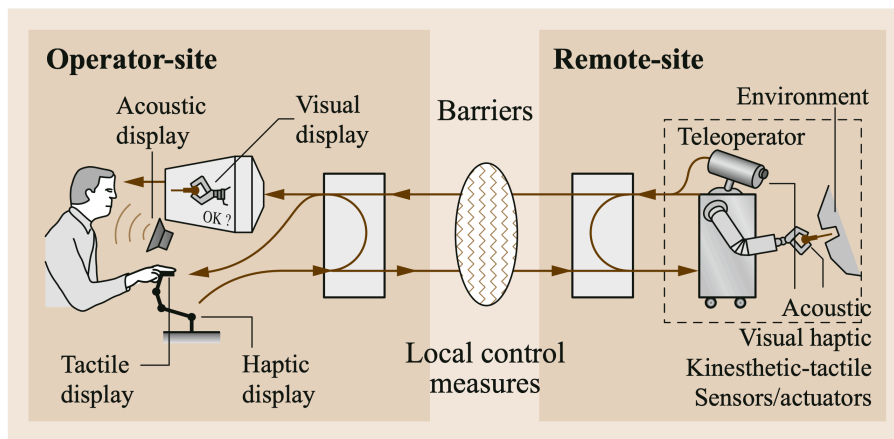


図 2.9: テレロボティクスシステムの概要 [57]

\*4 <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Apf1-06395t.jpg>

1980年代に日本では舘がレイグジスタンス [58, 59]、アメリカでは Minsky がテレプレゼンス [60] をそれぞれ提案した。これは、2.2.3 で述べる装着ロボット的一种である外骨格型人力増幅機 (exoskeleton human amplifier) と管理制御の利点を活かしたものである。舘はレイグジスタンスを、“実際にはロボットを遠隔で制御しているのだが、実はエクゾスケルトンのようにロボットの中に入り込んで、自分がその場にいるかのような感覚でロボットを制御する。別の表現をすれば、バーチャルな (みかけは異なるが本質的には) エクゾスケルトン型人力増幅機の実現である” [59] と説明しており、遠隔ロボットをまるで自分の身体のように自在に操作できることを目指した。Fernando らが 2012 年に発表した TELESAR V [61] は、レイグジスタンスロボットの一例である。合計 52 自由度 (胴体：5、頭部：3、腕：7×2、手：15×2) を有した人型ロボットで、人間の上半身の動きを再現する。

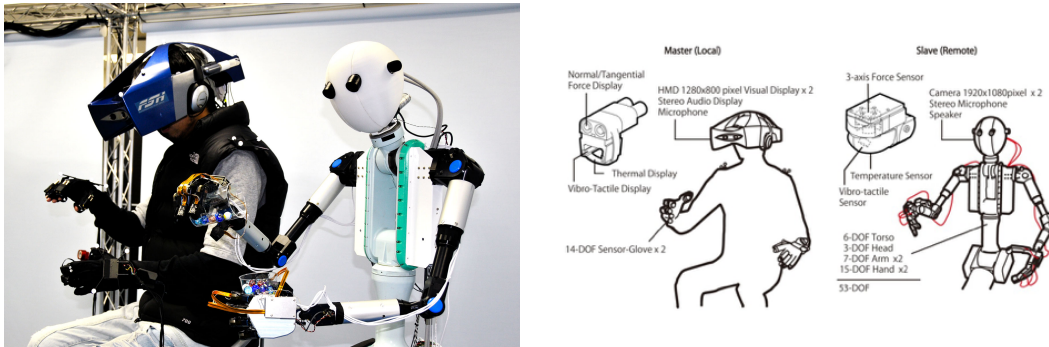


図 2.10: TELESAR V [61] : (左) 概要、(右) システム構成

基本的なコンセプトが提案された遠隔ロボットは、2000 年代以降、基礎的な研究開発段階から実用を見据えた社会実装に移行している。2018 年 3 月には、X プライズ財団が主催する世界的な技術コンペティションの 1 つのレーステーマとして ANA AVATAR XPRIZE\*<sup>5</sup> が立ち上げられた [62]。単純な作業から複雑な作業までさまざまな課題を遂行できる遠隔操作可能なロボットアバター (robotic avatar) の実現が課題として挙げられており、この課題を達成するために様々なチームが研究開発を行なっている [63, 64]。

以上のように、遠隔ロボットは最初期にマスタスレーブ技術としてはじまり、管理制御や外骨格ロボットの研究を経て、レイグジスタンスやテレプレゼンス研究につながり、現在はロボットアバターとして実用化に向けて開発されている。遠隔ロボットは様々な形で提案されているが、この人間機械系の特徴として、人間とロボットが物理的に離れて制御を介して接続されている、人間がロボットを操作するために直接的 (または、大まかな) 指示をすること、が

\*<sup>5</sup> <https://www.xprize.org/prizes/avatar>

挙げられる。

### 2.2.3 装着ロボット

装着ロボット (wearable robots) は、人間とロボットが同じ空間内の特に物理的に密着した状態で動作し、人間の意図や身体動作を用いて操作する人間機械系である。

装着ロボットの応用として第一に期待されているのは、補綴技術として人工の手足、義肢 (Prosthesis) を実現することである。義肢装具士法では義肢を、「上肢又は下肢の全部又は一部に欠損のある者に装着して、その欠損を補てんし、又はその欠損により失われた機能を代替するための器具器械」\*6と定義している。文献 [65] によれば、義肢の概念として以下の4条件を備えている。

1. 断端に密着する。
2. 複数の機能をもつ。
3. ヒトの四肢に近い外観をもつ。
4. 連続的に装着・使用される。

近代的な義肢は、第一次世界大戦後から工業製品として設計がはじまり [66]、第二次世界大戦後のサイバネティクスの興隆を契機に研究開発が進んだ [67]。Wiener は 1951 年に感覚の代替の問題とともに義肢に言及している [68]。1966 年には、「人工の手研究会」が発足し、能動義手の研究が本格化する [69]。その後 50 年間で能動義手技術は発展し、特に制御の面では非侵襲的・侵襲的な方法を含めて様々な手法が検討されている [70]。

外骨格 (exoskeleton) は装着ロボットの形態として、2.2.2 で述べた遠隔ロボットと同時代に先駆的な研究が行われている。1965 年、ゼネラル・エレクトリックの Mosher は、テレオペレーションの提案を発展させた外骨格型人力増幅機として Hardiman [71] を提案した (図 2.11)。Mosher は、““Hardiman” is a walking manipulator that is attached to operator like an exoskeleton. [...] the key to the control of Hardiman is spatial correspondence and kinesthetic force feedback. The operator will react such a natural manner that he subconsciously considers the machine as part of himself.” [71] と説明している。Hardiman は人間の力を 25 倍に増幅し、装着者が最大 1,500 ポンド (682kg) の荷重を持ち上げられることを目標として試作品が開発された。しかし、1970 年までに 750 ポンド (341kg) を持ち上げることができる片腕が発表されたが、1971 年には両脚を動かすと「機械が激しく制御不能な

---

\*6 <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=362AC0000000061>

動きをする」という原因不明のバグがあると報告され、1971年8月にプロジェクトは終了した [72, 73]。

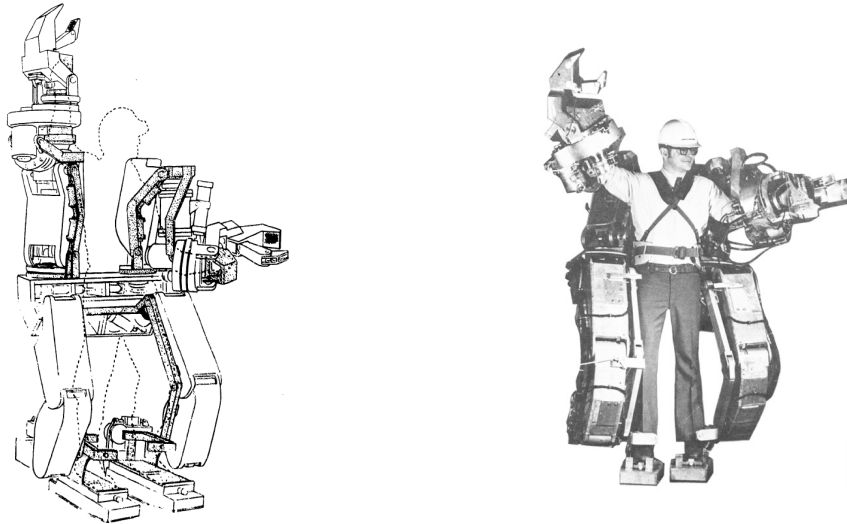


図 2.11: Hardiman I プロトタイプ：(左) イラスト\*7、(右) 写真 [73]

現在、様々な外骨格型が研究されているが、装着する部位に着目すると、上肢 (upper limb) [70, 74, 75]、下肢 (lower limb) [76]、全身 (whole body) [77] に大別できる [78]。その用途は、初期に想定された人間の力を数倍に増幅するだけでなく、弱い力で動作補助するものや装着者自身が動かすことができない四肢を外的に操作することでリハビリテーションを促すものがある。軍事目的と医療目的という異なる方向性で研究が進められている [72]。また、工場などの作業員の支援を目的とした外骨格がいくつか実用化されている。

ここまで見たように、義肢や外骨格型はロボット研究の黎明期から取り組まれている。2010年代頃から装着型ロボットの新たな潮流として、余剰肢 (supernumerary limbs) ロボットが提案されている。2014年に Parietti と Asada が発表した Supernumerary Robotic Limbs [79] は、飛行機部品の組み立て時に体を支える用途でヒューマンスケールのロボットアームを装着したシステムを提案した (図 2.12)。同年、別の研究グループである Prattichizzo らは The Sixth - Finger [80] を発表し、モジュール型の余剰指によって手の把持能力の拡張を提案した (図 2.13)。Vatsal と Hoffman は 2018 年に Wearable Robotic Forearm [81] を発表した (図 2.14)。上述の 2 つの余剰肢を出力と重量の観点で並べて、中間的な仕様のシステムとして設計し、そのアプリケーションを探索した。人間が生来有している身体部位の数を増やすことで義肢による補綴や外骨格による増強とは異なった身体機能の拡張を目指し、これらの研究

\*7 [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hardiman\\_I.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hardiman_I.png)

を総称し、SuperLimbs と呼んで活発な議論をおこなっている [82, 83, 84]。

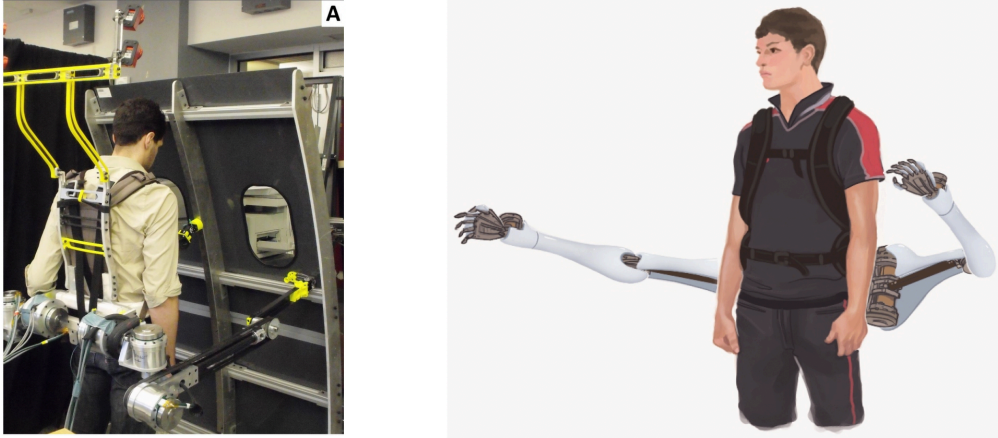


図 2.12: Supernumerary Robotic Limbs [79, 85]



図 2.13: The Sixth - Finger [80]

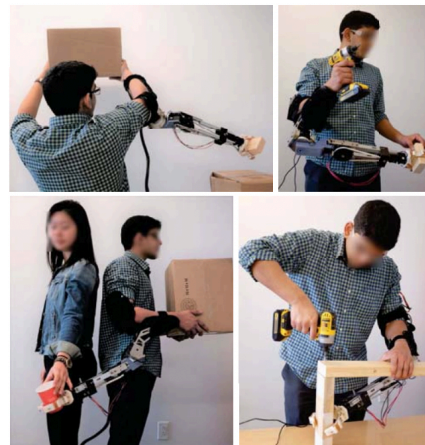


図 2.14: Wearable Robotic Forearm [81]

以上のように、装着ロボットは初期の段階から義肢や外骨格型による人間の身体機能の補綴や増幅を目指して研究されていた。現在は、これに加えて余剰肢ロボットという新たな身体機能の付加をコンセプトとする SuperLimbs 研究の潮流がある。この人間機械系の特徴は、人間とロボットが物理的に密着し、力学的相互作用や筋電、身体動作を用いてロボットを操作する点にある。

#### 2.2.4 人間機械系の設計要件

ここまで、ロボットを用いた人間機械系を協働ロボット (2.2.1)、遠隔ロボット (2.2.2)、装着ロボット (2.2.3) の3つの形態に大別したが、これらは必ずしもどれかひとつに分類出来る

わけではない。

まず、ここまでに挙げた人間機械系を、自律性 (autonomy)、操作方法 (control)、位置関係 (space)、接触状態 (contact)、形状 (shape) の5つの要件に着目し、その特徴を整理する。また、2つの形態が重なる領域にある先行研究についてもここで取り上げる。

表 2.1: 人間機械系の要件と形態ごとの特徴

要件	協働型	遠隔型	装着型	余剰肢
自律性	自律的	自律的/非自律的	非自律的	自律的
操作方法	間接的	直接的	直接的	間接的
位置関係	同一空間	別空間	同一空間	同一空間
接触状態	接触/非接触	非接触	接触	接触
本体形状	フルボディ	フルボディ	外骨格・部位	外骨格・部位

自律性は、この系において人間の動作に対してロボットがどの程度の自律的に動作するかを示す。協働ロボットは人間の意図や動作に全く関係なく振る舞うこともできるが、装着ロボットは基本的には人間の動作に連動して動くため非自律的である。遠隔ロボットは、管理制御のようにロボット自体が自律的に振る舞う場合と人間に操作される場合を切り替える方法を用いることがある。

操作方は、人間がロボットにどの程度直接的な指示を出すのかを示す。テレグジスタンスのような遠隔ロボットでは、人間がロボットをまるで自分の身体のように操作することがある。装着ロボットにおいても身体動作や生体信号を用いて操作する点で、人間がロボットに直接的な指示を行う。しかし、外骨格型などでは身体の構造に制限された操作となる。協働ロボットでは、人間がロボットに教示することもあるが、意図に基づいてパートナーのように操作される。

位置関係は、人間とロボットの空間的な配置を示す。遠隔ロボットは、人間とロボットが異なる空間で動作することを前提としている。それ以外では、同一空間内に人間とロボットが存在する。

接触状態は、人間とロボットの接触状態を示す。装着ロボットは、人間とロボットが接触していることを前提としている。協働ロボットでは、人間とロボットが同一空間に存在するが、常に接触しているわけではない。状況や作業に応じて接触・非接触状態を遷移する。遠隔ロボットで人間がロボットを遠隔操作する場合、物理的な接触は想定されない。

本体形状は、ロボットの構造を指す。協働ロボットや遠隔ロボットは用途によって、ヒュー

マノイドやアーム単体、また、大きさやアクチュエータの数などさまざまである。ただし、装着型は、人間の身体に取り付けるために外骨格や身体の一部を模した構造になっている。

以上を踏まえて、2つの形態が重なる領域の先行研究について述べる。まず、装着ロボットの種類として挙げた SuperLimbs の多くは、装着-協働ロボットの特徴を有している。人間とロボットが密着状態で使用されるが、ロボットは装着者の意図に応じて作業を支援するように制御される。この状況において、遠隔ロボットで想定されるような人間側が自分の身体の一部のようにロボットを直接操作的に作することは必ずしも考慮されていない。Gourmelen らの Co-Limbs [86] は、コボットシステムを SuperLimbs に適用した研究の一例である (図 2.15)。

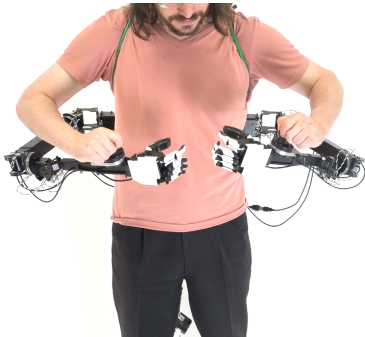


図 2.15: Co-Limbs [86]



図 2.16: Fusion [87]

装着-遠隔ロボットの特徴をもつものとして、人間に装着したロボットを遠隔の他者が操作する研究が挙げられる。Saraiji らの Fusion [87] は、ロボットアームとカメラを組み合わせたシステムによって遠隔から装着されたロボットを操作することができる (図 2.16)。Veronneau ら [88] は高出力なアクチュエータで構成されたロボットアームを遠隔のオペレータが操作するアプリケーションを示している (図 2.17)。Iwasaki らの Detachable Body [89] では、図 2.18 に示すような人間が装着したロボットを取り外して遠隔ロボットとして用いる方法を提案している。

本論文で扱う拡張身体部位は、装着-遠隔-協働ロボットの特徴を必要に応じて参照しながら設計する。これまで SuperLimbs で主に扱われてきた人間と装着ロボットによる協働に加えて、遠隔ロボットで用いられるような直接的な操作といった設計要件に着目することで、他者としてロボットとの協働作業ではなく、自己の一部としてのロボットによる身体機能拡張を目指すものである。

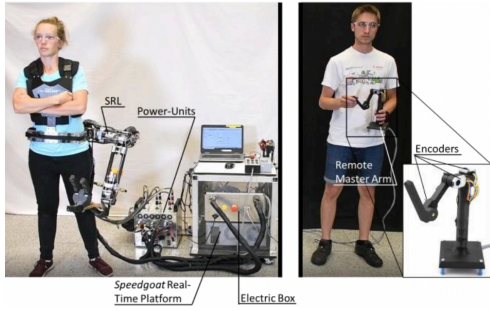


図 2.17: 文献 [88] のシステム

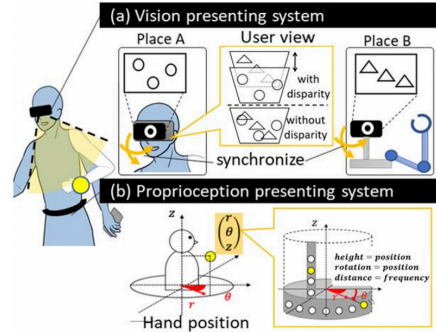


図 2.18: Detachable Body [89]

## 2.3 物理的・情動的相互作用を考慮した人間機械系のモデル

人間とロボットに加えて、作業対象\*8の 3 要素における相互作用の観点から分類し、2.2 で概観したロボットシステムを改めて整理する。

図 2.19 に、モデルを検討するための人間 (Human)、ロボット (Robot)、作業対象 (Object) を示す。ここでは、作業対象が 1 つと仮定する。(以降、作業対象は「対象」と表記する)

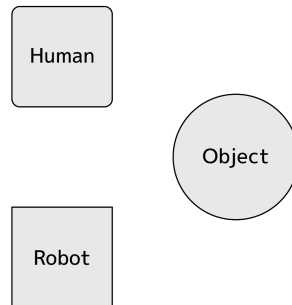


図 2.19: 人間、ロボット、作業対象

次に、各要素を接続する 2 つの相互作用を導入する。物理的相互作用と情動的相互作用である。図中では、矢尻が“▲”の矢印で物理的相互作用を示し、矢尻が“^”の矢印で情動的相互作用を示す。

物理的相互作用は、要素同士が接触した状態などで力学的に作用することを示す。結果として空間的に位置の拘束や移動が生じる。情動的相互作用は、意図、視聴覚情報のような感覚情報の作用、神経的な接続を示し、いわゆるユーザーインタフェースを介して通信されるものを指す。以下に要素間の相互作用を示すが、ここで対象として想定するものは生物やコンピュー

\*8 この作業対象には、単一の物体以外に環境の意味も含まれる。

タのように能動的な反応を起こさないものとする。すなわち、人間-対象、ロボット-対象間では情報の相互作用は生じない\*9と仮定する。

図 2.20 は、人間-対象間で物理的相互作用が生じている系を示す。これは、例えば、人間が「ものを持つ、運ぶ」といった一般的な作業を行なう状態で、ロボットはこの系に作用していない。

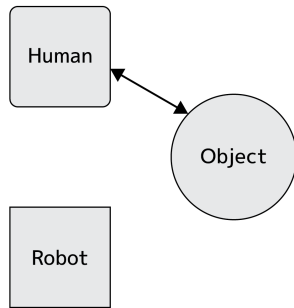


図 2.20: 人間による作業

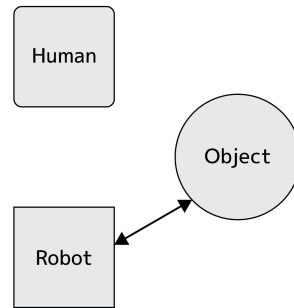


図 2.21: 完全自律型

図 2.21 では、ロボット-対象間で物理的相互作用が生じている系を示す。これは、逆に人間が作用していない状態で、完全な自律型ロボットの例である。

次に2つの要素が相互作用している状態を考える。図 2.22 は、人間とロボットが対象と物理的相互作用をしており、協働ロボットの系を示している。図 2.23 では、人間-ロボット間で情報の相互作用が生じており、ロボット-対象間で物理的相互作用をしている。これは、図 2.9 のテレロボティクスシステムに対応する系である。

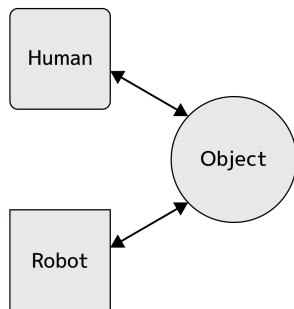


図 2.22: 協働型

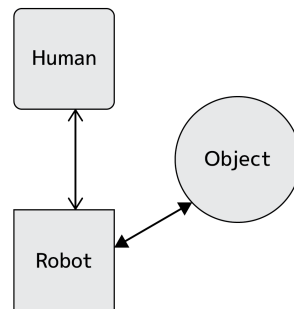


図 2.23: 遠隔型

図 2.24~2.27 は、それぞれ装着ロボットの系を示す。図 2.24 は、人間-ロボット間の物理的相互作用を介してロボットが対象に物理的相互作用を行う。これは、外骨格型人力増幅機の

\*9 人間やロボットが対象の状態を把握するためには視覚によって対象の情報を得るが、これは情報の一方向な流れなので今回のモデルでは相互作用には含まない。

ような機能を満たす系である。図 2.25 は、図 2.24 に加えて人間-ロボット間で情報の相互作用が生じる。筋電義肢のようなものがここに該当する。図 2.26, 2.27 は、ロボットが人間に相互作用し、人間が対象と物理的相互作用する。これは、作業支援アシストスーツやリハビリ用の外骨格ロボットでみられる系である。

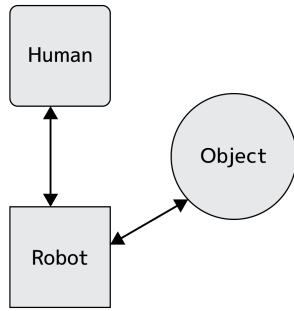


図 2.24: 装着型 (外骨格増幅)

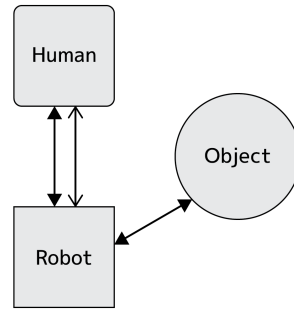


図 2.25: 装着型 (義肢)

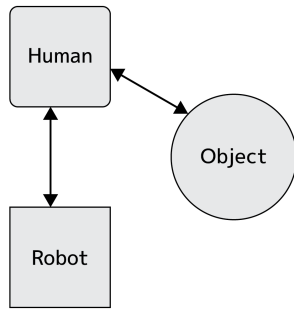


図 2.26: 装着型 (外骨格アシスト)

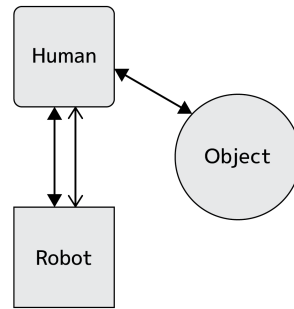


図 2.27: 装着型 (外骨格アシスト)

図 2.28 は、3 要素それぞれの間で物理的相互作用が生じている状態である。これは、協働型と装着型を合わせた状態とみなすことができ、前節で挙げた多くの SuperLimbs がこの系である。ここでは、人間-ロボット間で情報の相互作用が行われていない。つまり、人間がロボットに対して意図を伝達したり、逆にロボットが人間に力学的作用以外の提示を行う仕組みが考慮されていない。

図 2.29, 2.30 は、本研究対象となる拡張身体部位の系である。人間とロボットがそれぞれ対象に物理的相互作用をしている状態で、人間-ロボット間で情報の相互作用、または物理的・情動的相互作用を行なっている状態である。なお、図 2.29 は、意図を用いた協働ロボットシステムも該当する。

以上のように、人間、ロボット、対象の 3 要素に 2 種類の相互作用を導入することで、ロボットを用いた人間機械系の系を整理し、拡張身体部位が扱うシステムを示した。

ここまですべてを表 2.2 にまとめる。人間-ロボット間を H-R, 人間-対象間を H-O, ロボット-対

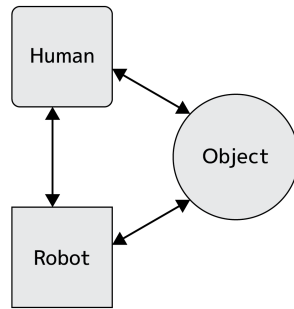


図 2.28: 協働・装着型 (SuperLimbs)

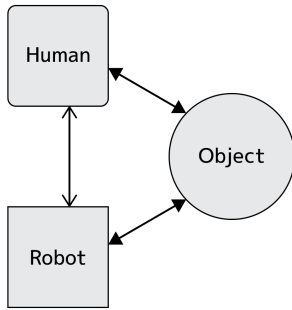


図 2.29: 拡張身体部位、協働型

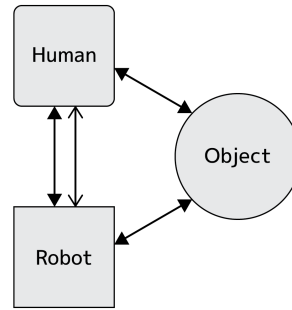


図 2.30: 拡張身体部位

象間を R-O とし、相互作用がない場合を N, 物理的相互作用を P, 情動的相互作用を I, 物理的・情動的相互作用を PI で示した。形態名は図のキャプションに対応する。なお、表中 12 行目の人間-ロボット間で情動的相互作用があり、人間-対象間で物理的相互作用があり、ロボット-対象間で相互作用がない形態は今回分類できないとして無名称とした。

## 2.4 拡張身体部位による人間拡張

### 2.4.1 定義

拡張身体部位は、付加する新たな身体部位を介して、人間が同時に複数の作業対象に作用することができるロボットシステムである。その拡張身体部位の特徴を図 2.29, 2.30 で示したモデルと改めて定義する。

拡張身体部位は第一に、人間とロボットが情動的相互作用を行なっている。2.3 では、情動的相互作用において具体的にどのような情報を通信しているのかは定めていない。しかし、ここで想定するのは、テレグジスタンスで用いられるような人間が自分で動かしていると感じられるような操作である。具体的には、インターフェースを介して、ロボットの動きを直接的に

表 2.2: 物理的・情動的相互作用に基づく人間機械系のロボットの分類

	H-R	H-O	R-O	形態
1	N	P	N	人間による作業
2	N	N	P	完全自律型
3	N	P	P	協働型
4	I	N	P	遠隔型
5	P	N	P	装着型 (外骨格増幅)
6	PI	N	P	装着型 (義肢)
7	P	P	N	装着型 (外骨格アシスト)
8	PI	P	N	装着型 (外骨格アシスト)
9	P	P	P	協働・装着型 (SuperLimbs)
10	I	P	P	拡張身体部位、協働型
11	PI	P	P	拡張身体部位
12	I	P	N	-

指示する方法である。

第二に、人間-ロボット間の物理的・情動的相互作用があることで、複数の対象に作用できる。図 2.31 に示すのは、図 2.30 の対象を 2 つにしたものである。人間が、自身で対象に作用すると同時に、ロボットを介して別の対象に作用することができる。この状況は図 2.28 の SuperLimbs においても一部達成できるが、人間とロボットが物理的相互作用のみの場合、例えば、人間がロボットのエンドエフェクタを開閉したいというような操作を行うことができない。また、これには同時性が意識されていることを強調しておく。つまり、拡張身体部位では、人間が複数の対象にロボットを介することで同時に相互作用することができる。

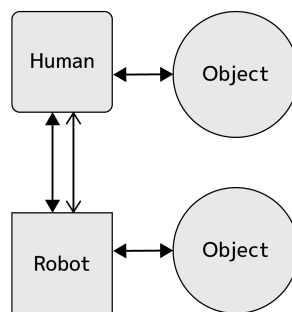


図 2.31: 拡張身体部位による複数対象への物理的相互作用

以上を総合して、拡張身体部位は、「ロボット身体部位が付加されることで、人間がロボットを介した直接的な操作によって、複数の対象に同時に作用することを可能にする人間機械系」と定義する。複数の対象に同時に作用できるようにすることを本論文で扱う身体の拡張とする。

## 2.4.2 設計要素

2.4.1 で示した拡張身体部位を実現するための設計要素を整理する。図 2.32 に、拡張身体部位の設計要素を示す。拡張身体部位の身体部位としての要因は、2.1.3 で言及した Blanke ら [41] の身体自己認識モデルの 4 条件と、2.2.3 で示した義肢の概念としての 3 条件 [65] に基づく\*<sup>10</sup>。人間機械系の特徴として 2.2.4 で整理した要素を、情報の相互作用、物理的相互作用に対応させて、これらを要件とする。これを踏まえて、図 2.31 の物理的相互作用と情報の相互作用を成立させることで拡張身体部位が設計できると考える。

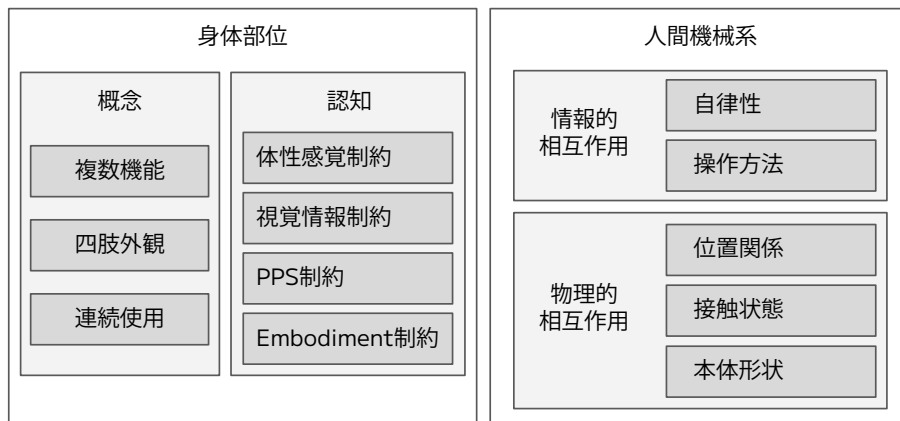


図 2.32: 拡張身体部位の設計要素

情報の相互作用の要件には、ロボットの自律性と操作方法が対応する。拡張身体部位では、前提としてロボットに高い自律性を要求しない。なぜなら、ロボットが人間の意図とは異なる動作を自律的に行う場合、身体部位として成立しないためである。操作方法とは、人間がロボットを「どのように操るか？」ということである。これは、人間とコンピュータを接続するユーザーインターフェースやヒューマンロボットインタラクションが扱う問題である。人間の意図に応じてロボットを動かすための入力手法、ロボットの状態を人間が把握するためのフィードバック手法を考える必要がある。また、拡張身体部位における操作インターフェースは、後述する理由によって従来のヒューマンマシンインターフェースとは前提条件が異なり、技術的課題

\*<sup>10</sup> ただし、条件の中の「断端に密着する。」は、拡張身体部位の用途において必須ではないので、3条件とする。

がある。

物理的相互作用の要件には、位置関係、接触状態、本体形状が対応する。これはロボットの構造に関するものである。総称して言い換えれば、「どんな形にするか？」である。身体部位の概念である、複数機能や四肢外観の要因と合わせて構造を設計する必要がある。人間とロボットがどのような位置関係でどのように接触するのかは、拡張身体部位を設計する上で自明ではない。また、身体部位認知の条件を満たしている範囲であれば、ヒト型とは異なる本体形状を選択できる余地がある。このことから、装着型ロボットの特徴を前提としつつも、柔軟な構造設計が検討できるといえる。

ここで、具体例として MetaLimbs [13] を事例に設計要素の対応を示す。MetaLimbs の情動的相互作用では、足の位置姿勢を入力としたアームの手先制御、およびロボットハンドの触覚情報を足裏にフィードバックすることで操作している。物理的相互作用は、ロボットアームを搭載したバックパックを介して接触し、人間とロボットの位置関係が固定されている。これにより、ロボットアームの手先位置は、足による操作に加えて、装着者の胴体の向きによっても変化する。本体形状は、アームとハンドであり、これは四肢外観に一致する。また、ロボットアームはバックパックを経由して、人間の前方に作業空間で動作するため、PPS 制約も満たしているといえる。このような構成によって、MetaLimbs は装着者の両手の作業に加えて、2本のロボットアームによる複数の対象への相互作用が行えるように機能が拡張されていることがわかる。以上より、このシステムは拡張身体部位の設計要素によって説明できる。しかしながら、情動的相互作用のために足を用いているので、用途として歩行動作が行えないという課題が生じている。

### 2.4.3 課題

物理的・情動的相互作用という、2つの相互作用の実態を整理することで設計要素を明らかにした。ここでは、拡張身体部位特有の課題をいくつか述べる。

まず、情動的相互作用のための操作インタフェースについて述べる。第一に、従来考えられたいような手を用いた相互作用を前提としない、身体を介した入力インタフェースが求められる。拡張身体部位では、人間が既に1つの対象と相互作用している状態で、同時に別の対象と相互作用する。そのためには、人間の意図を身体を介して複数の相互作用のために出力する必要がある。一般的な物理的相互作用に用いられる部位は手であり、通常は2本なので、空間的に2つを超える対象を同時に扱うことは難しい。一方で、これまで見たような遠隔ロボットに用いられるインタフェースも手を用いるものが多い。これでは、ロボットを介して対象と相互

作用できても複数の対象を扱うことはできない。MetaLimbs でみたように、ある状況において使用されていない身体部位の動作を用いることで、手による相互作用を維持したまま、さらに複数の対象と相互作用できるようになる。これを実現するためには、人間の身体が有している動作を入力として適切に変換する作業が必要になり、これを実現するための入力手法が必要になる。この課題は3章で扱う。第二に、視覚情報を前提としない、ロボットからの出力を扱う感覚フィードバックが求められる。複数の対象と同時に相互作用する上で、全ての対象を視覚情報だけで把握するのは難しい。そこで、視覚以外の感覚を用いたインタフェースとして、協働ロボットに用いられるような力学的相互作用を情動的相互作用のために活用する必要がある。この課題は4章で扱う。

物理的相互作用における課題を述べる。拡張身体部位の実装形態のひとつとしての装着型があるが、装着型を実現するための設置部位とロボットの形状が互いに設計上の強い制約になっており、これを解決する方法が求められる。ロボットの出力を上げるために大型の機体を用いると、本体重量が大きくなるため、それを設置できる身体の部位が限定される。逆に身体の装着部位の選択性を上げると、ロボットを小型軽量にする必要がある。重量と汎用性のトレードオフが生じる。拡張身体部位としての設計自由度を高めるためには、この課題に取り組む必要がある。この課題は5章で扱う。また、拡張身体部位の形状は、四肢に近い形状であることが望ましいことを満たせば自由度は高い。そこで、複数機能を実現するような形状について検討が必要である。この課題は6章で扱う。

## 2.5 本章のまとめ

本章では、拡張身体部位の設計を行うために、身体部位の要因と人間機械系の要件を整理した。身体部位の要因には、3つの概念的条件と4つの認知的条件が考えられる。人間機械系の要件として、情動的相互作用に関する2つの要素と物理的相互作用に関する3つの要素を整理した。これらの要件を具体例を示して検討した上で、身体の拡張を行う上での課題を明らかにした。

次章以降で、拡張身体部位の設計について各要素を個別に扱った研究を示す。3章では、操作方法における入力手法の課題を扱う。4章では、操作方法におけるフィードバック手法の課題を扱う。5章では、物理的相互作用の観点から位置関係と接触状態に着目して装着形状の課題を扱う。6章では、本体形状として、部位形状に着目したインタラクション設計を扱う。

## 第3章

# 身体冗長自由度を用いた入力手法

### 3.1 はじめに

本章では、拡張身体部位の入力インターフェースとして、身体の冗長自由度を活用した手法を示す。上肢の冗長自由度に着目し、肩の動作をセンシングすることで拡張身体部位を操作する。概念検証プロトタイプとして、図 3.1 に示すウェアラブルカメラと深層学習による姿勢推定モデルを用いたシステムを実装し、その性能を評価する。入力手法を用いて4つの拡張身体部位のデモンストレーションを示す。



図 3.1: 上肢の冗長性を利用することで使用者の四肢の動きを妨げない入力手法

## 3.2 関連研究

本研究で構築する肩センシングのためのウェアラブルシステムに関連する研究として、ここでは、ウェアラブルロボットの操作手法と、身体動作のウェアラブルセンシングについて概説する。

### 3.2.1 ウェアラブルロボットの操作手法

SuperLimbs を効果的に利用するためのアプローチは、非常に多く検討されている [90]。先行研究では、SuperLimbs を操作する際に身体の動きやジェスチャーを入力として利用するための様々なアプローチが提案されている。例えば、Sasaki ら [13] は、座った状態でウェアラブルロボットアームを操作するために足の動きを利用することを提案している。また、顔の表情 [91] や顔の向き [92]、腹筋の筋電信号 [93] など、四肢以外の身体部位を用いて SuperLimbs を操作する提案が行われている。しかし、これらの方法はいずれも日常生活で常用されている身体部位を利用するため、SuperLimbs の操作として利用できるシーンが限定される。SuperLimbs や拡張身体部位が人間の身体能力向上に十分に活用するためには、操作による既存の人間の身体部位の動作に与える影響を最小限にすることが望ましい。

ここでは、人間の自然なパフォーマンスに影響を与えることなく操作を可能にするために、身体の冗長性を利用することに着目する。本提案システムでは、人間の上肢の冗長性を利用することで、人間の手による作業に影響を与えることなく、ロボットの効果的な操作を可能とする。具体的には、肩の姿勢をセンシングし、肩の動きをロボットの操作に利用することで、手の動きと独立して操作の入力に利用する方法を検討する。

### 3.2.2 身体動作のウェアラブルセンシング

SuperLimbs や拡張身体部位の多くは、日常生活から産業作業まで様々な場面で使用される [94] ことを想定しているため、ウェアラブルである。そのため、そのインタフェースにおけるセンシングモジュールもウェアラブルであることが望ましい。

ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) の分野では、新しい入力インタフェースのひとつとして、ウェアラブルセンシングシステムの研究が盛んに行われている。特に、手の動きをセンシングする方法は、古くから研究されている [95]。ここで最も一般的なアプローチは、手に直接センサを取り付けることである。しかし、身体に直接センサを取り付けることで

生じる問題がある。センサ自体、あるいはセンサの取り付け方によって、身体部位の重要な機能を阻害してしまうことが考えられる。例えば、微細な感覚を感じにくくなったり、動きの自由度が損なわれたりする可能性がある。

このような直接装着の問題点を解決するため、間接的なセンシングアプローチが試みられている。間接的なアプローチでは、関連する（例えば、隣接する）身体部位の動きから、身体部位の動きを推定する。例えば、手首や腕に巻いたセンシングデバイスから手の姿勢を推定するシステムが開発されている。これらの先行研究では、力センサ [96, 97]、筋電センサ (EMG) [98, 97]、圧電センサ [99]、電気インピーダンス・トモグラフィー [100, 101]、赤外線反射率・透過率 [102, 103] など、さまざまなセンサが利用されている。また、耳に装着して顔の動きをセンシングする例 [104, 105, 106] もある。

また、直接装着の問題点を解決するために、対象とする身体部位からさらに離れて、コンピュータビジョン (CV) を用いて身体の動きを感知するアプローチもある。近年の CV の進歩により、HCI 研究者はウェアラブルカメラを利用して、人体の一部または全体の動きや姿勢を捉えることができるようになった。手の位置や形状のセンシングは、このアプローチの一般的なアプリケーションである [107, 108, 109]。例えば、Harrison ら [107] は、オンボディカメラを使用して、体の表面上の手のタッチ入力をトラッキングした。Chan ら [108] は、ハンドジェスチャーを分類できるリング型魚眼レンズカメラを発表した。Arakawa ら [109] は、手に装着した球体カメラを用いて、ハンドジェスチャーと身体周囲の手の位置を同時に検出する手法を提案した。

同様のアプローチは、顔 [110] や全身の動き [111, 112, 113] のセンシングにも適用されている。例えば、C-Face [110] は、耳に装着した2つの小型カメラからなるヘッドフォン型のデバイスで、顔のキーポイントを再構成することができる。Shiratori ら [111] はボディマウントカメラを用いたモーションキャプチャシステムを開発し、Chan ら [112] は単一のウェアラブルモーションキャプチャデバイスを提案した。最近では、Ahuja ら [113] が半球型ミラーを VR ヘッドセットに組み込み、身体のポーズ推定を行った。

手のセンシングに対するアプローチおよび、直接装着と CV を用いた2つのアプローチは、肩の動きをセンシングするために用いることができると考えられる。しかし、肩部は複雑な構造を持ち、可動域や変形が大きいため、センサを直接取り付けることには課題が残る。CV ベースのアプローチは、設置場所の制約が少ないため、比較的容易に採用することができる。我々は、ウェアラブルな CV ベースのアプローチで身体の大きな部位の動きをセンシングできることから、同様の CV ベースのアプローチでユーザーの肩の姿勢をセンシングすること

に着想を得た。特に、我々はデータ駆動型アプローチを採用し、認識モデルを構築する。これは、先行研究により、ユーザー間で頑健な姿勢分類が可能であることが示唆されているためである [108, 109, 112, 110]。

### 3.3 提案手法と実装

ここでは、上肢の冗長な自由度を利用し、手の動きを妨げずにロボット操作するためのウェアラブル肩センシングシステムを提案する。本システムは、ヘッドホン型カメラデバイスと CNN ベースの認識モデルから構成される。設計方針、ハードウェアプロトタイプ (図 3.2)、および使用した認識モデルを説明する。



図 3.2: ウェアラブルセンシングデバイスのプロトタイプ

#### 3.3.1 設計方針

人体の多くの器官には冗長な自由度 (DoF) が存在する。例えば腕は、手の 6 自由度 (位置 3、姿勢 3) を制御するために、手首に 3、肘に 1、肩に 3 の合計 7 自由度を含んでいる [114]。人間の上肢は、肩と合わせて 8 自由度以上の自由度を持ち、手の位置と姿勢を制御している。これらの冗長自由度は、通常、腕や肩の姿勢を変化させても同じ手の姿勢を実現するために利用される。これは、例えば、狭い場所や複雑な場所に手を伸ばして作業する場合に有効である。我々は上肢の冗長自由度を利用し、SuperLimbs や拡張身体部位と手の独立した並列操作を可能にすることを目指す。具体的には、肩の姿勢を検出し、それを入力として SuperLimbs

を操作することを目的とする。

3.2.2 で述べたとおり、身体動作のセンシングには既に様々な手法が提案されている。しかし、上肢の冗長性を利用して上肢の制御を行う目的において、本研究で必要とする肩のセンシングにこれらの既存手法を適用するには制約がある。まず、肩部に直接センサを取り付けることは不向きである。ユーザーの肩の動きを阻害する可能性がある上、肩の変位が大きいいため、肩へのセンサの安定的な取り付けが難しい。次に、肩の動きをセンシングするために、既存の推定手法を適用することがより困難である。人間の肩は複雑な構造を持ち、大きな面積を占めるため、関連する身体部位（腕や首など）の動きから肩の動きを推定することが難しい。また、人間の体が様々な形や大きさであるように、肩も人によって大きさや形、柔軟性が大きく異なる可能性がある。そのため、肩の周辺にオンボディセンサを取り付けて、肩の動きをセンシングすることは困難だと考えた。そこで、CV を用いたセンシングアプローチを採用する。

### 3.3.2 ハードウェア設計

肩の動きをセンシングするために、ヘッドホン型のセンシングデバイスを開発した（図 3.2）。この装置には、ヘッドホンに埋め込まれた 2 つの下向きカメラが内蔵され、肩を上から見下ろした映像を撮影することができる。2 つのスピーカユニットを搭載され、実験中に参加者に音声で指示を与えるために使用した。センシングカメラの配置は、顎や背中など他の場所も検討したが、スペースがない、肩に近すぎる、あらゆる肩の動きに対して肩の全体像を把握できないなどの理由で除外した。また、過去の研究により、装着位置や向きのばらつきが比較的少ない装着方法であることから、ヘッドホン型を選択した [110]。

肩の部分を撮影するために使用した 2 台のカメラは、魚眼レンズ付きの ELP USB8MP02G-L180 RGB カメラ（1024×768 ピクセル、30fps）である。その他、開発時には、深度カメラや赤外線カメラ、光学式距離センサなどを検討した。しかし、測定対象（肩）とその位置・近さ、ワークスペースの広さやセンササイズの制約などから、魚眼レンズを搭載した RGB カメラを採用した。この魚眼レンズによる広視野は、肩の広い可動域を継続的にセンシングすることに大きく貢献した。また、3.2.2 で前述したように、同様のカメラはオンボディセンシングに使用されており、機械学習ベースの認識システムと併用することで、強固なセンシングと認識結果を得られることが実証されている [109]。デバイスを装着した様子を図 3.3a に示す。

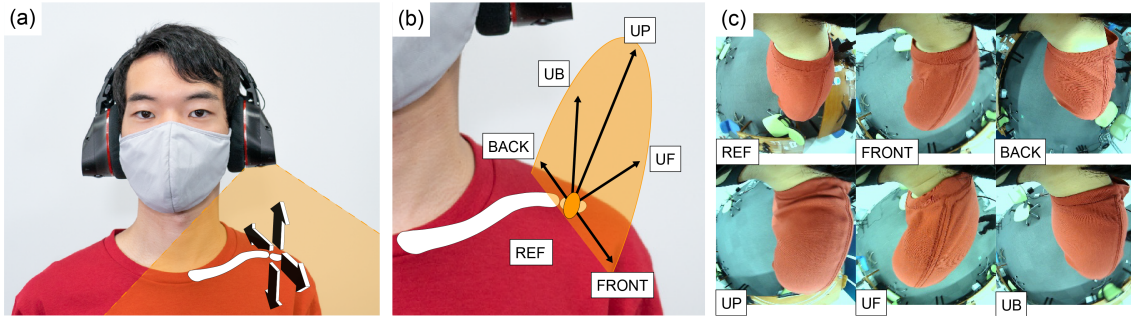


図 3.3: 肩の動きを取得するためのヘッドホン型センシングデバイス：(a) デバイスを装着したユーザー、(b) 認識対象となる肩の姿勢、(c) 左カメラで撮影した各姿勢のサンプル画像

### 3.3.3 認識モデル

肩の姿勢を識別するために使用する認識モデルについて説明する。魚眼カメラを利用する他の研究を参考に、我々は ResNet-50 [115] アーキテクチャに基づく畳み込みニューラルネットワークを採用した。このアーキテクチャは、スキップ接続を持ち、画像認識タスクで良好なパフォーマンスを発揮することで知られている。このモデルを ImageNet [116] 公開データセットで事前学習し、さらに自分たちで収集したデータセットでネットワークを学習させた。リアルタイムでの運用を想定し、高速な認識結果を得るために、まず入力画像を  $1024 \times 768$  ピクセルから  $768 \times 68$  ピクセルにセンターカットし、さらに  $224 \times 224$  ピクセルにリサイズする方法を選択した。リサイズした画像は、肩の動きに対して肩が映っており、肩の認識に必要な解像度を確保することができることを手動で確認した。

予備検証の結果では、安静時と下方向への動作でほとんど差がないことがわかった。そこで、認識対象となる肩の姿勢を次の 6 つとした。肩甲骨の存在が肩の下方向への動きを妨げていることから、「REFERENCE (REF)」「UP」「FRONT」「BACK」「UPANDFRONT (UF)」「UPANDBACK (UB)」の姿勢を認識対象とした。これらの姿勢を図 3.3b に示す。また、各姿勢を左カメラで撮影したサンプル画像を図 3.3c に示す。ネットワークの出力層は 6 出力になるように調整した。ネットワークの学習には Adam optimizer を使い、学習率は  $1.0 \times 10^{-3}$ 、重み減衰は  $1.0 \times 10^{-2}$  とした。時間の都合上、学習は GeForce RTX 3090 GPU を搭載したデスクトップ PC で実施した。しかし、実時間認識は Quadro T2000 (GTX 1060 mobile 相当) で可能である。モデルの開発には Python の PyTorch フレームワークを使用した。

## 3.4 実験

本研究では、提案する肩入力システムの実現性を実証するために3つの実験を行った。1つ目の実験では、制御された条件下で提案システムの実現可能性を評価した。2つ目の実験では、被験者がリアルタイムにシステムを利用できるか、また、視覚フィードバックなしでシステムを利用できるようになるかを検討した。3つ目の実験では、被験者の体勢が認識結果にどのような影響を与えるかを調べ、肩の入力が、被験者の手の動きに関係なく、上肢を制御できる可能性を明らかにした。実験の結果、本システムは様々な条件下で肩の姿勢を認識することができ、操作者は様々な体勢で本システムを用いて上肢を操作することが可能であることが示された。なお、今回行った実験はフィジビリティ実験であり、ロバスト性を評価するものではない。

本実験は、本システムの実現可能性を検証することを目的としているため、すべての実験は、蛍光灯が制御された室内で、参加者があらかじめ決められた衣服を着用して行われた。これにより、実験中のデータセットの一貫性を確保した。我々は、本システムが最終的に実世界の様々な場面で利用されるためには、一般化する必要があることを認識している。すなわち、我々のデバイスから得られた画像を用いた肩の姿勢検出は、環境、肩の大きさや形状、体型、衣服の色や質感などの要因の変化に対してロバストである必要がある。しかし、他の研究により、十分に大きなデータセットがあれば、このような要因に対する汎化が可能であることが示されている [117, 109] ため、我々も同様の仮定をした。また、実験を簡単にするため、肩の姿勢認識には1台のカメラ（左カメラ、したがって左肩）のみを使用した。

### 3.4.1 実験1：肩姿勢認識

提案するデバイスを用いて、参加者の肩の画像を収集し、収集したデータを用いて認識モデルの学習を行い、本システムの実現可能性を検証する。

#### 実験参加者

9名の参加者（男性9名、22~25歳）から肩の姿勢認識に関するデータを収集した。肩の疾病歴のある参加者はいなかった。

## 手順

この実験では、まず参加者1人あたり6種類の肩の姿勢について、肩の画像を取得することから始めた。参加者に音声で指示を出し、データを自動的に収集するシステムを開発した。音声による指示はヘッドホン型デバイスに内蔵されたスピーカーから各参加者に伝えられ、同時にデバイス内のカメラから画像データを取得した。

実験に先立ち、参加者には、どのような肩の姿勢をとってもらうかについて説明を行い、その姿勢を練習してもらった。このとき、実験者は参加者にどのような姿勢をとるべきかを明確に指示することはしなかった。その代わりに、参加者は与えられた説明に最も適合すると思われる姿勢を取る。また、このとき、被験者には実験中に首を回さず、頭と体の向きを固定して動くように指示した。本提案システムでは、頭の側面から肩を観察するため、頭と肩の間に相対的な動きがあると肩の姿勢認識に問題が生じる可能性があるためである。例えば、我々の予備実験では、頭部回転時に肩の画像にモーションブラーが発生し、肩が認識できなくなることが観察された。説明の後、被験者にヘッドホンをするようにセンシングデバイスを装着してもらった。実験者は、被験者が適切にデバイスを装着していることを目視で確認した上で実験を開始し、デバイスの装着方法の極端なばらつきを抑えた。

各収録セッションでは、両手を横にリラックスさせた状態で室内を自由に移動しながら、6種類の肩の姿勢を両肩で交互に行うよう指示した。また、様々な背景のデータを取得するために、室内を自由に歩き回るようにした。なお、各実験において、参加者の体勢は大きく変化しないようにした（つまり、座ったりしゃがんだりしないようにした）。各記録セッションにおいて、肩の姿勢はあらかじめ決められた順序で参加者に提示された（REF, UP, FRONT, BACK, UPANDFRONT, UPANDBACK）。参加者は各肩の姿勢を約17秒間保ち（1秒間に30フレームで500フレーム）、合計で約100秒の記録時間を確保した。1人の参加者に対し、10回の記録を行った。その結果、1人あたり合計3万コマの画像を収集した。なお、実験中はデバイスを一度も外していない。

映像の収集は、カメラとUSBで接続されたノートパソコンを用いて行った。参加者が配線につまづくことを避けるため、実験者はノートパソコンを持ちながら参加者の後を追った。カメラとノートPCをつなぐUSBケーブルは、被験者の動きを妨げない程度の長さにした。映像収集後、ビデオストリームから画像を抽出した。実験終了後、各カメラから合計27万枚の画像を取得し、各肩の姿勢について4万5千枚の画像を構成した。このデータを用いてニューラルネットワークの学習を行い、提案システムの実現可能性を検証した。

### ユーザービリティ評価

各自がすべての録音を終えた後、口頭で肩の姿勢が特に難しかったかどうかを尋ねた。その結果、すべての参加者が「特に難しい姿勢はなかった」と答えた。しかし、「UPANDFRONT」「FRONT」の姿勢と「BACK」「UPANDBACK」の姿勢の違いがあまり感じられないという意見があった。また、データ収集中にヘッドホン型デバイスが若干ずれたと報告する参加者もあり、試作機の装着性については今後改善が必要であることがわかった。

### 結果

提案システムの実現可能性と未知ユーザーに対する肩姿勢の認識能力を評価するために、一個抜き交差検証法 (leave-one-out cross-validation: LOOCV) を用いて認識モデルの学習と評価を行った。すなわち、一人の被験者のデータをテスト集合とし、他の被験者のデータでモデルの学習・検証を行った。テスト参加者を選択した後、他の参加者のデータを訓練：検証データの比率が 9：1 になるように分割した。これを 9 回繰り返し、各参加者のデータセットがテストセットとなるように 1 回ずつ行った。各ケースにおいて、まずニューラルネットワークモデルを最大 20 エポックまで学習させた。トレーニングの最後に、検証データでの精度に基づいて評価された、最も優れたモデルを使用することにした。最後に、選択したモデルをテストデータでテストし、手元にあるモデルの精度の指標を得た。トレーニングデータにはテストデータが含まれていないため、最後の精度テストの結果は、未知の被験者データに対するモデルの頑健性の指標として見ることができる。

その結果を混同行列として図 3.4 にまとめたところ、認識結果には大きなばらつきがあることがわかった。参加者全体の平均認識精度は 69% (53.8% - 83.8%, sd: 9.0%) であった。左の混同行列の値は、全参加者の平均値である。中央と右の行列は、それぞれ最も成績の良い参加者と最も成績の悪い参加者の行列である。混同行列から、本システムは REF 姿勢の検出に最も成功し、UP 姿勢の検出精度が最も低いことがわかる。また、UPANDFRONT は、UP または FRONT と誤表示される傾向があり、UPANDBACK は、UP または BACK と誤表示される傾向があることがわかった。

この問題は、肩の動きや大きさ、デバイスの位置、首の長さのばらつきに起因していると考えられる。体型が他の被験者と最も異なっている被験者の場合、全体の精度が最も悪くなったことは、この説を支持するものである。また、実験中にデバイスがずれることも分類エラーにつながった可能性がある。最後に、画像を手動で確認したところ、被験者が体とは無関係に首を回している場合があることがわかった。このような場合に撮影された画像は、認識精度を低

Instruction	Average						Tested on P3 (Best)						Tested on P7 (Worst)					
	REF	UP	FR	BC	UF	UB	REF	UP	FR	BC	UF	UB	REF	UP	FR	BC	UF	UB
REFERENCE	91.6	0.5	6.6	0.7	0.4	0.2	99.7	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	95.9	0.1	0.0	3.9	0.0	0.1
UP	3.0	58.5	2.5	1.2	11.6	23.2	0.0	84.8	0.0	0.0	0.1	15.1	0.0	31.9	0.0	0.0	0.0	68.1
FRONT	6.2	1.5	68.8	0.0	23.4	0.0	2.4	0.0	37.7	0.1	59.8	0.0	11.8	12.8	40.4	0.0	34.8	0.1
BACK	4.2	2.7	0.0	63.0	0.1	30.0	0.0	0.0	0.0	87.7	0.0	12.3	0.0	0.0	0.0	19.5	0.0	80.5
UPANDFRONT	0.6	10.3	19.3	0.1	68.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	58.1	0.0	0.0	35.5	6.3
UPANDBACK	0.8	17.6	0.0	18.3	0.0	63.2	0.0	4.6	0.0	2.3	0.0	93.1	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	99.5
	Average Accuracy: 69.0%						Average Accuracy: 83.8%						Average Accuracy: 53.8%					

図 3.4: 一個抜き交差検証によるモデル認識精度を示す混同行列：(左) 平均性能行列、(中央) 最高性能行列、(右) 最低性能行列

下させる一因となった可能性がある。

### 3.4.2 実験 2：リアルタイム肩入力

実験 1 で取得した全データを用いて学習させた推定モデルを用いて、リアルタイムでの肩の入力が可能かどうかを検証する。また、視覚的なフィードバックがなくても、被験者が肩を使った操作方法を学習できるかどうかを確認する。

#### 実験参加者

参加者は 12 名 (男性 11 名、女性 1 名、22 歳 ~ 34 歳) である。うち 9 名は実験 1 にも参加した。この実験は、実験 1 とは別の日に行われた。

#### 手順

実験 1 と同様、この実験ではまず、被験者に取ってもらう肩の姿勢について説明を行った。ここでも、正確な指示は与えず、参加者は与えられた説明に最も適合すると思われる姿勢をとることが促された。その後、実験システムの詳細な説明を行う。実験システムは、ヘッドホン型センシングデバイス、コンピュータ、ディスプレイから構成される (図 3.5)。参加者はディスプレイの指示に従い、表示された肩の姿勢をとる。また、参加者には実験中、正面に座ったスクリーンに視線を集中させることを指示した。この指示は、頭の動きやモーションブレンダーを防止するために行われた。

実験では、1 回の試行ごとに、被験者が望む肩の姿勢を表す単語をディスプレイ上に視覚的



図 3.5: 実験 2 を行う参加者。参加者は表示された指示に従い、適切な肩の姿勢をとっている。写真は 2 回目のセッションで、システムがリアルタイムに推定した姿勢を表示している。

に提示した。それに対応する音声コマンドをヘッドホン型デバイスに内蔵されたスピーカーから提示した。被験者は 3 秒間で希望する姿勢をとることができる。その後、リラックスするよ  
うにとの指示が視覚と聴覚の両方から被験者に与えられた。さらに 3 秒後に次の姿勢のコマ  
ンドが与えられ、新しい試行が開始される。最後に、オプションとして、肩の姿勢認識結果をリ  
アルタイムに表示し、被験者がとっている姿勢に関する視覚的なフィードバックを与えるこ  
とも可能である。実験中、認識システムのフレームレートが 9fps 以上であることを確認した。

参加者一人あたり 60 回の試行を含む合計 3 回のセッションを行った。各セッションの試行  
は、6 つの姿勢をそれぞれ 10 回ずつ、ランダムな順序で行った。最初のセッションでは、参  
加者はリアルタイムの視覚フィードバックなしで試行を行った。第 2 セッションでは、被験者  
に視覚的なフィードバックを与え、そのフィードバックを用いて肩の姿勢を調整するよう  
に指示した。そして、最後のセッションでは、再び視覚的フィードバックなしで行った。全 3  
回のセッション終了後、参加者に簡単なアンケートを実施し、肩の姿勢を取ることがどの程度難  
しいと感じているか、肩の姿勢の認識結果が自分の意図と合っていると思えるかどうかを尋  
ねた。

## 結果

被験者の肩の姿勢データと表示された希望する姿勢を比較することで、被験者が希望する肩の姿勢をとることに成功したかどうかを識別する。リラックスを指示するコマンド直前の肩の姿勢が、事前に与えられた肩の姿勢のコマンドと一致した場合、その試行は成功したと判断した。図 3.6 は、3 回のセッションにおける参加者の成功率分布である。

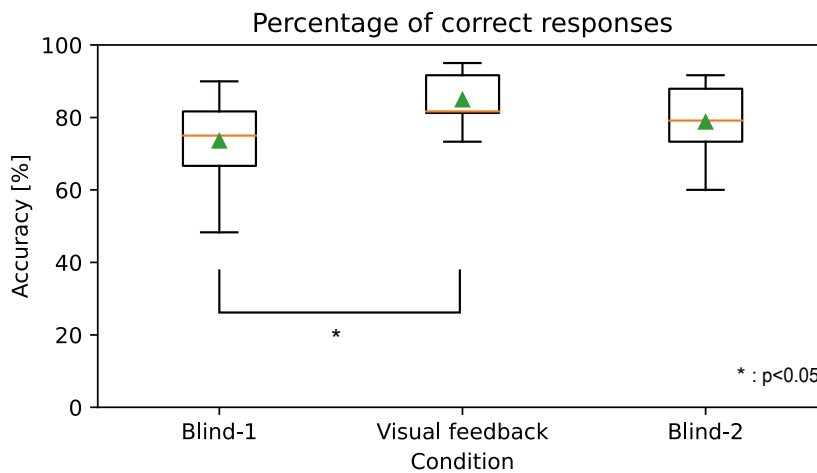


図 3.6: 実験 2 の結果。リアルタイムの肩の姿勢分類 3 つの条件：[Blind-1] リアルタイムの視覚フィードバックなし、[Visual feedback] 視覚フィードバックあり、[Blind-2] 視覚フィードバック後にフィードバックなし

各セッションの平均成功率は、それぞれ 73.5%、84.9%、78.9% であった。一元配置分散分析の結果、3 つのセッションで得られた結果には有意差があった ( $F = 4.16, p = 0.024$ )。Tukey-Kramer 検定では、1 回目と 2 回目のセッションの間のみ有意差があることが示された。アンケートの結果、座った状態で UPANDFRONT や UPANDBACK などの肩を上げる姿勢をとることが難しいという意見があった。システムが特定の肩の姿勢をほとんど認識しないというコメントがいくつかあり、特に“UPANDBACK”は難しいという声が多く聞かれた。

この実験では、システムが正確なリアルタイム肩姿勢分類を実行できることを示した。つまり、参加者は、重要なトレーニングなしで正確な制御入力を達成した。前述のように、この実験は一部の参加者が参加した最初の実験だったが、この実験のフィードバックありの部分で記録された全体的な精度の最低値は 70% であった。視覚的なフィードバックが提示されなかった場合は精度が低下したが、結果は、参加者が意図した結果を達成できたことを示している。これは、肩の認識モデルがユーザーの体型に合わせて調整されていない一般的なモデルである

にもかかわらず得られた結果である。この結果は、実験 1 と 2 の参加者が両方の実験で同じようにデバイスを着用していない可能性が高いという事実と同様に、システムが堅牢な認識機能を備えており、実用的な設定で使用できることを示唆している。ただし、システムの改善点も明らかになった。一部の参加者は、UPANDBACK などの肩の姿勢を行うことができなかつたとコメントし、実験 1 と同様に、これは参加者間の物理的な違いによる可能性がある。

この実験では、参加者が視覚的なフィードバックを与えられると、精度が大幅に向上することも実証された。参加者は視覚的なフィードバックを使用して、試行中に肩の姿勢を調整し、望ましい姿勢に合わせることができた。ただし、視覚的なフィードバック後のセッション 3 でいくらかの改善が観察されたが、フィードバック前の精度よりも統計的に有意な改善はみられなかった。このことから、トレーニングセッションによって参加者の精度が向上する可能性があると推測されるが、最終的な結論に到達するには、さらなる実験と分析が必要である。

### 3.4.3 実験 3：姿勢の違いによる頑健性

実験 1 と実験 2 により、座った状態で腕を横に置いた場合の肩の姿勢をシステムが推定できることを示した。この実験では、参加者の体の姿勢が推定結果にどのように影響するかを調査する。特に、手が空間に固定されている（タスク中の）いくつかの体の姿勢に焦点を当てた。これらの姿勢でのシステムのパフォーマンスを調べることで、システムが並列タスクシナリオでどのように機能するかを確認した。

#### 手順

この実験の参加者は、実験 2 の参加者と同じである。この実験に使用されたシステムも、実験 2 と同様である。図 3.7 に示す 4 つの姿勢のデータをランダムな順序で収集し、参加者は画面上の指示に従って指示された肩の姿勢を取得した。参加者の姿勢は、1) 立位、2) 座位、3) 両手を肘の高さに固定した座位、4) 両手を肩の高さに固定した座位、である。後者の 2 つの姿勢は、ユーザーが手動タスクを実行するときの姿勢（キーボードで入力するときやボックスを保持するときなど）を想定して選択した。固定された手の姿勢では、参加者に自分の前に置かれたハンドルを握るように求めた。ハンドルまでの距離は、各参加者の腕の長さに基づいて設定した（肩峰から尺骨茎状突起までの距離の 70%）。なお、座位姿勢は実験 2 で得たデータを用いた。

実験 2 と同様、参加者には 3 秒間姿勢をとり、3 秒間リラックスした後、次の姿勢をとるよう指示した。参加者は各身体姿勢で 60 試行（6 姿勢 × 10 回をランダムな順序で繰り返す）を

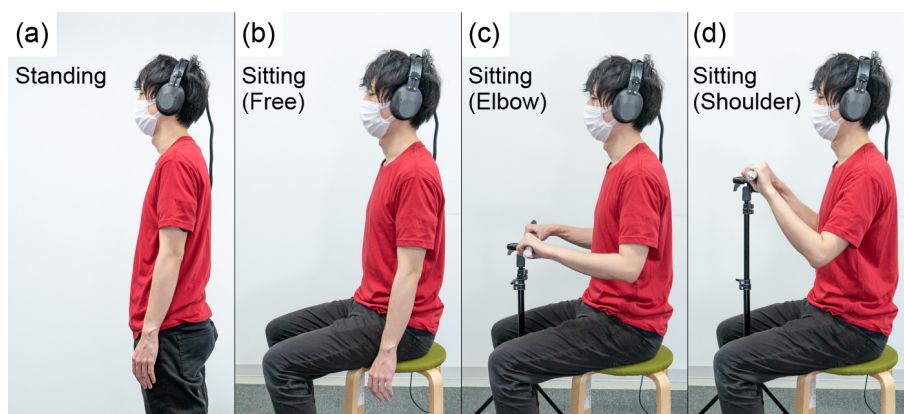


図 3.7: 実験 3 の 4 種類の姿勢：(a) 立位、(b) 座位、(c) 両手を肘の高さに固定した座位、(d) 両手を肩の高さに固定した座位

行った。なお、参加者には視覚的なフィードバックを与え、そのフィードバックを用いて肩の姿勢を調整するよう指示した。各実験終了後、参加者は、各肩の姿勢をとるのがどの程度困難であったか、また、システムが意図した姿勢を認識しているように見えたかについて、アンケート回答を求めた。

## 結果

実験 2 と同様に、推定モデルで推定した被験者の肩の姿勢が、画面に表示された指示と一致しているかどうかを確認した。本実験で調べた 4 つの体位それぞれの正答率を図 3.8 示す。実験 2 の第 2 段階で得られた正答率を、(b) 条件の精度とした。手を使わないときの立位姿勢と座位姿勢の平均精度は、それぞれ 90.1%, 84.9% であった。また、手を肘と肩の高さに固定した座位での平均正答率は、それぞれ 75.6%, 61.1% であった。

一元配置分散分析により、4 つの体位間で与えられた正解率に有意差があるかどうかを調べた。 $F = 33.9, p = 1.6 * 10^{-11}$  の統計量で有意差が認められた。Tukey-Kramer 検定による事後検定では、両手を自由に使える座位姿勢と立位姿勢の間で、正確さに有意な差がないことが明らかになった。その他はすべて有意差がみられた。アンケート調査の結果、手を固定した状態から肩を離す必要がある姿勢 (BACK、UPANDBACK) をとることが困難であることがわかった。

これまでの実験では、肩の姿勢を利用して制御入力を行うことができることを実証した。本実験では、手の位置が固定されているような制約のある姿勢でも、参加者は様々な肩の姿勢をとることができ、それによって制御入力を行うことができるかどうかを検討した。その結果、図 3.9 では、特定の肩の姿勢 (例：REFERENCE, UP, FRONT 姿勢) において参加者の精

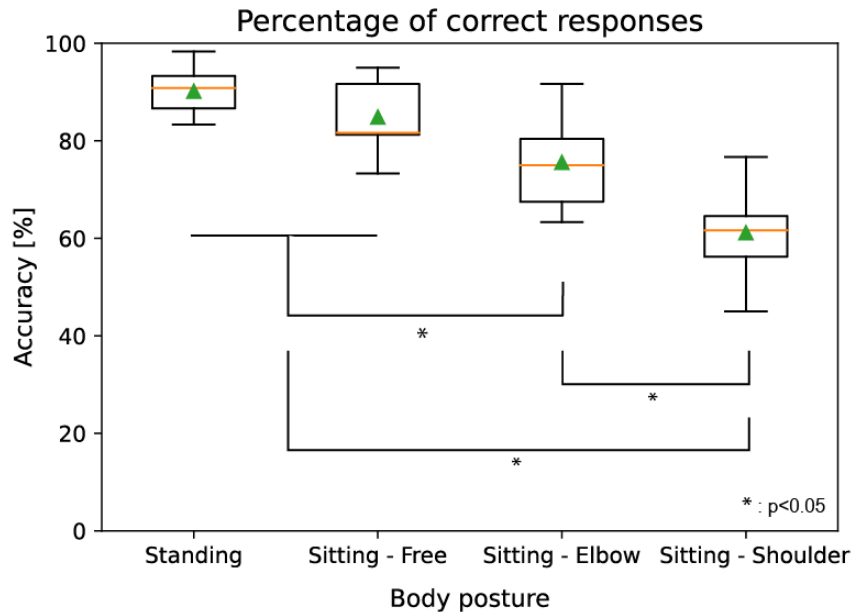


図 3.8: 実験 3 の結果：4 つの体位におけるリアルタイムの肩の姿勢の分類精度、緑色の三角形は平均値を表す

度が高く、上肢の冗長性により手が固定されていても制御が可能であることが示された。一方、手を固定した 2 つの条件では、他の条件に比べて参加者の精度が有意に低いことが示された。

手の位置を固定した姿勢で精度が低下した主な理由は、身体構造の制限にあると考えられる。具体的には、手の位置の制限により、肩の可動域が減少し、静止位置が変化した（肩位置の平均値の変化と分散が減少した）ためである。図 3.9 下 2 つの混同行列が示すように、手の位置の制限による可動域の減少は認識モデルの学習時に示したのと同じ肩の姿勢をとることができず、参加者の回答精度を全体的に低下させた。特に、両手を固定する距離が比較的長いため、両手を制限すると両手から離れるように肩を動かす UPANDBACK 姿勢や BACK 姿勢に大きな影響を与えることがわかった。参加者のコメントや、BACK-REF エラーや UPANDBACK-UP エラーが多いという混同行列は、この仮説を支持するものである。一方、手を肩の高さに固定したときのみ肩の姿勢変化は明確に観察された。この姿勢では、肩が前方に移動し、静止時（すなわち、REF 状態を提示しようとする時）には通常 FRONT と認識される。図 3.9 中の右下の「座る-肩」の姿勢で得られた混同行列から、この姿勢では REF-FRONT と UP-UPANDFRONT の誤りが多く見られることが確認された。今後、冗長性を利用した制御入力がどのような場合に可能なのか、さらに検討が必要である。

ユーザーごとに独自の推定モデルが必要かどうかについても、今後検討する必要がある。例

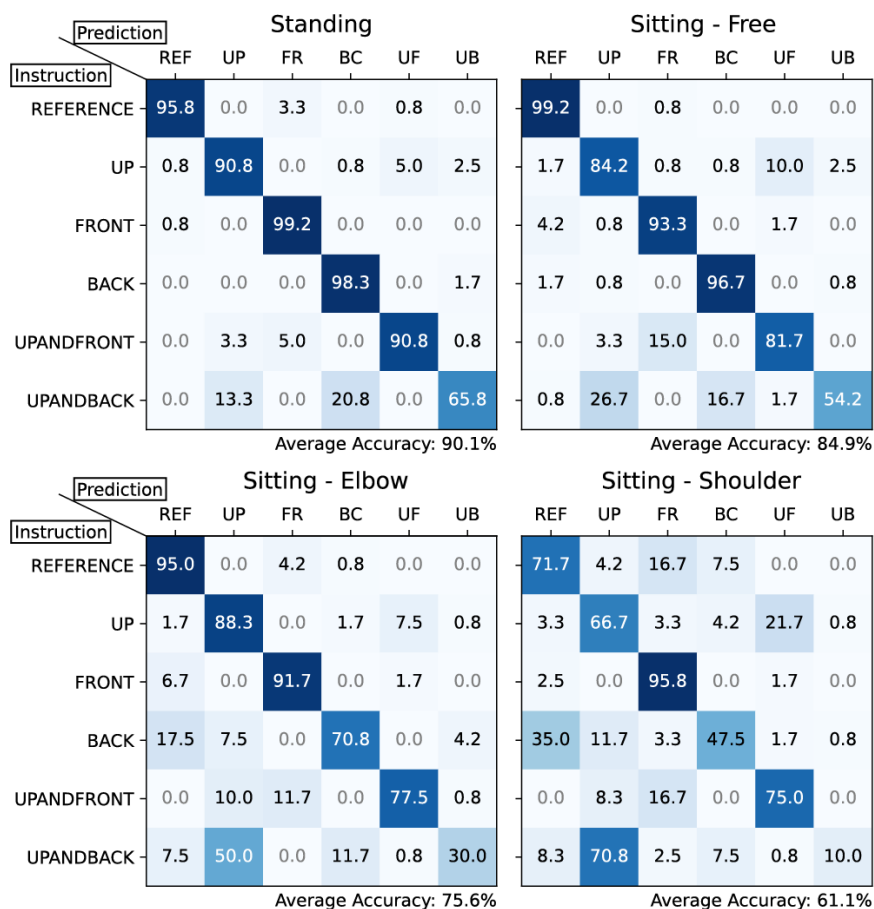


図 3.9: 実験 3: 4 種類の体位における推定モデルによる認識精度を示す混同行列

例えば、実験 1 の混同行列 (図 3.4) と実験 3 の立位姿勢 (図 3.9) を比較すると、UPANDBACK 姿勢の応答精度は視覚フィードバックがあるにも関わらず向上していないことがわかる。「全く認識できない肩の姿勢があった」という参加者のコメントもあり、体勢に制約がなくても到達が難しい姿勢があることが推測される。このように、肩の可動域のばらつきは、今後の肩入力システムの設計において、考慮されるべき課題である。この課題を解決するための一つのアプローチとしては、最小限の肩の動きで入力を実現することである。また、様々な体型、年齢、性別のデータを取得し、より高度な認識モデルを学習させることも考えられる。しかし、本研究では、ロバストな入力方法を提案することを意図していないことに留意されたい。本研究では、肩の力を利用した入力の可能性を示したに過ぎない。今後は、より幅広い上肢の姿勢や体型にデータ収集を拡張し、ロバストな肩の姿勢推定を実現するなど、ロバスト制御手法としてさらに発展させていく予定である。

## 3.5 デモンストレーション

前節までで、上肢の冗長性を利用することで、手の操作を妨げずに制御入力を行うことが可能であることを示した。ここでは、本システムにより実現可能な拡張身体部位の応用例として、図 3.10 に示す 4 つの事例を紹介する。

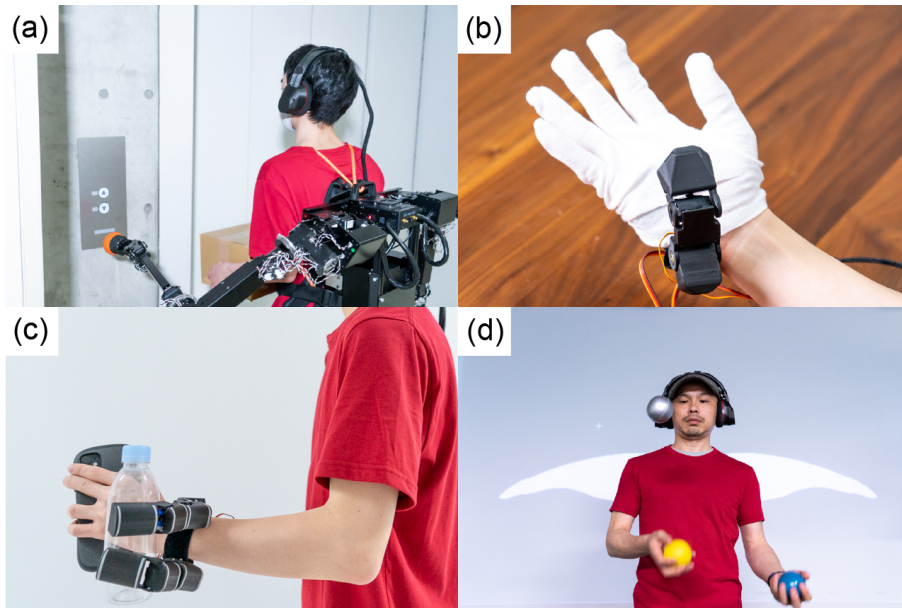


図 3.10: 応用例：(a) ロボットアーム、(b) ロボットフィンガー、(c) ロボット触手、(d) バーチャルウィング

### 3.5.1 ロボットアーム

まず、ユーザーがロボットアームを操作するデモを紹介する。図 3.10a は、利用者が箱を持ったままアームを操作してエレベーターのボタンを押す様子を示している。このような場面は、SuperLimbs の有用性が期待されているひとつである [118]。このアプリケーションでは、ユーザーが肩を使ってロボットアームを前後上下に動かすことができるようにした。

### 3.5.2 ロボットフィンガー

図 3.10b は、人間の手にロボットの指を装着したデモである。この指は、人間の手の機能を拡張し、第 6 の指として機能する。ユーザーの他の指の動きとは独立して操作することができるため、さらなる器用さを提供することができる。プロトタイプでは、肩の前後と斜めの姿

勢を入力として、ロボット指の2軸を操作した。また、UP姿勢によって指のタップ操作ができる。

### 3.5.3 ロボット触手

図 3.10c は、ロボットの触手を操作する例である。このような複数のアクチュエータを直列に接続したロボット触手は、既存の身体構造に制約されない身体拡張の可能性を示唆している [119, 120]. 今回は、手の甲に触手を配置し、さらに物体を把持できるようにした。他のデモと同様、この触手は歩行しながら使用することができる。触手を操作するために、肩の前後姿勢とロボットの触手の開閉を対応付けた。この触手を使うことで、手を使わずに触手で物体を把持することができる。

### 3.5.4 バーチャルウィング

図 3.10d では、我々のシステムを使ってバーチャルウィングを操作している。肩の動きを拾って羽ばたきを行っている。このシナリオでは、ユーザーが手を使って複雑な操作（例えば、3つのボールのセットをジャグリングする）を行っている間に、翼を操作している。このデモでは、本システムが実用的な用途だけでなく、パフォーマンス的な用途にも適用できることを示唆している。さらに、本システムが現実とバーチャルの複合的な現実のシナリオで使用可能であることを示している。

## 3.6 考察

本節では、我々の提案するシステムのコンセプトの貢献について議論する。次に、本システムの限界と、今後の展望について議論する。

### 3.6.1 コンセプトの貢献

本論文では、上肢の独立した操作を可能にする新しいウェアラブルセンシングシステムを提案した。本システムは、人体構造に存在する機械的な冗長性を利用した強力なアプローチをとっている。上肢の冗長性とそれが肩に与える自由度を利用することに焦点を当てているが、このアプローチは肘、頭、下肢にも適用可能であると考えられる。このように、我々のコンセプト上の貢献は、人体における機械的な冗長性を利用することの可能性を強調している。つまり、冗長性を利用することで、身体の他の部分への影響を最小限に抑えた上で、拡張身体部位の操

作が可能になるということである。

第二に、本アプローチが作業や部位形状への依存性が低いことを示した。我々のアプリケーションとデモンストレーションは、我々のアプローチが様々なロボットやバーチャルアバターの操作に使用できることを示した。これは、タスクに依存した典型的な入力に焦点を当てた先行研究とは対照的である [118].

最後に、私たちの研究は、肩を使った入力の可能性を示した。肩は、肩甲骨の存在により、人間が意図的にコントロールして表現できる形状が多くある。例えば、肩全体を動かすだけでなく、肩甲骨をスライドさせて向きを変えたり、周囲の筋肉を緊張させたりすることが可能である。これらの表現をセンシングできれば、繊細で正確、かつ複雑な入力が可能になることが期待できる。今回は、肩の外形のみをセンシングしたが、今後は、肩からより多くの情報を抽出する手法の開発を検討している。これには、既存のオンボディセンシングの手法が応用できる可能性がある。

### 3.6.2 適用限界

このように、現在のシステムは潜在的な可能性を秘めているが、解決しなければならない複数の課題が残っている。まず、肩の動きと拡張身体部位の制御入力を対応させるという課題がある。従来手法では、エンドエフェクタの6自由度（位置3自由度、姿勢3自由度）を制御するために、6つの入力次元を持つことが一般的である。しかしながら、現在のシステムでは、信頼性の高い6つの入力次元を持つことは困難である。そのため、身体他の部分から独立した2軸に沿ったロボットアームの動作しか実証できなかった。また、すべての制御入力が矢状面にあるため、さらなる問題が発生する可能性がある。すなわち、冠状面に沿ったロボットの制御は、ユーザーが使えるようになるまでかなりのトレーニングが必要になる可能性がある。より高い自由度を持つ上肢の制御を可能にするために、義手やロボットアームの制御に適用されているような次元削減による制御の適用が考えられる [121, 122]。また、今回の研究では、操作司令を出す際に、入力姿勢を保持する必要がある。これは、我々のシステムを長時間使用する場合の疲労につながる可能性がある。この問題に対しては、いくつかの解決策が考えられる。例えば、トリガー入力を実装し、反対側の入力があるまでコマンドを保持すること、また、入力時の肩の動きを最小限に抑えるといった方法である。

第二の大きな課題は、本システムで使用できる SuperLimbs の種類の制限についてである。本手法は、肩の視覚情報を用いて制御入力を推定するため、肩を覆うような装着方法を用いる SuperLimbs は使用できない。例えば、リュックのように背負うタイプの SuperLimbs は、

肩紐が肩のセンシングに干渉し、入力精度に大きな影響を与える可能性がある。このような SuperLimbs では、ストラップにマーカーを取り付け、そのマーカーの姿勢を検出するアルゴリズムを利用することで性能の向上が期待できる。

最後に、センシングデバイスについても解決しなければならない問題がある。今回のカメラベースのアプローチは、参加者間の差異に頑健である一方、この種のアプローチに共通する多くの問題点を抱えている。例えば、カメラで撮影された人物はプライバシーを侵害する可能性があり、また、照明の変化の影響を受ける。SuperLimbs は様々な場面で使われることを想定しているので、我々のセンシングデバイスも様々な場面で、様々な人に適用できるものがある必要がある。また、センシングデバイスの課題として、頭部の回転によって視野が変化することが挙げられる。頭部の動きで、カメラ視野内の肩の位置がずれ、モーションブラーが発生し、肩の姿勢の検出に影響を与える。後者の問題は、カメラのフレームレートを上げるか、頭の動きを検出する IMU を追加することで解決できると考える。また、その他の問題については、同様の問題に直面した先行研究の手法を導入することで解決できる可能性がある [109, 110]。

### 3.6.3 今後の展望

今後の研究の方向性としては、いくつかの可能性はある。一つの方向性は、我々のセンシングシステムの精度をさらに向上させることである。今後の研究で取り組むべき重要な課題は、センシングシステムの汎化である。システムの汎化性能を高めるためには、様々なユーザーや使用状況から学習データを取得する必要がある。これには、さまざまな服を着たユーザーのデータ、再装着位置、頭の姿勢、さまざまな腕の姿勢などが考えられる。これらのデータを用いることで、より強固な認識システムを構築し、SuperLimbs の動作を許容できるシチュエーションを拡大できると考えている。また、今回は肩の姿勢が左右で同じことを前提としていたので、両肩の独立した操作を可能にすることも、本システムをさらに発展させるための方向性のひとつである。これにより、ユーザーが利用できる自由度が増え、より複雑な制御が可能になる。また、今回の研究を発展させ、肩の位置入力を離散的なものから連続的なものにするとも考えられる。最後に、他のセンサ（例えば、IMU や EMG）を追加したセンサフュージョンによって、我々のカメラベースの肩姿勢センシングのアプローチを拡張する方向性もある。

また、肩の入力を利用した SuperLimbs 操作のユーザービリティ調査を検討している。本研究では、肩の動きを利用することで、SuperLimbs 操作とマルチタスクが可能であることを示した。しかし、実際にユーザーのタスクと SuperLimbs のタスクが独立して行えるのかについては、十分に調査されていない。今後は、マルチタスク時のユーザーへの心理的・身体的負荷

や使い勝手の検討も必要である。

冗長性に基づく入力の人因性について調査することも今後の課題である。例えば、参加者がどのようにシステムの使い方を学ぶかを調査することが挙げられる。実験2では、視覚的なフィードバックを提示することで、ある程度の学習が確認された。しかし、他の研究で示唆されているように、マルチモーダルなフィードバックを提供することによって、学習が加速される可能性がある [123, 124]。

最後に、我々の提案するセンシングシステムの他の応用の模索がある。我々は、人間の拡張に関連するシステム（すなわち、SuperLimbs や VR アバター）の制御に焦点を当ててきたが、我々のシステムは、HCI の分野でより広く適用される可能性がある。例えば、リハビリテーションの文脈で、汎用的な入力システムとして、あるいは義肢の制御のために使用することができる。

### 3.7 本章のまとめ

本研究では、上肢の独立した制御を実現するための新しい手法を提案した。本アプローチの最も新しい点は、上肢の冗長性を利用し、既存の四肢の動きに干渉することなく制御入力を実現することである。本手法は、肩の姿勢を上部からカメラで取得し、ニューラルネットワークの分類器を用いて状態を認識している。魚眼レンズカメラ2台を用いたヘッドフォン型のセンシングデバイスを作成し、広い視野を実現した。分類に用いたニューラルネットワークは、ResNet-50 をベースとしたものである。実験により、本アプローチの実現性と可能性を実証し、一連のデモンストレーションを通じて、我々のアプローチで実現可能な幅広いアプリケーションを示した。

本章は拡張身体部位の設計要素である情動的相互作用の操作方法に対応する（図 3.11）。ここで示した身体の冗長自由度を用いた入力手法によって、拡張身体部位を使用者自身が直接的に操作することができる。

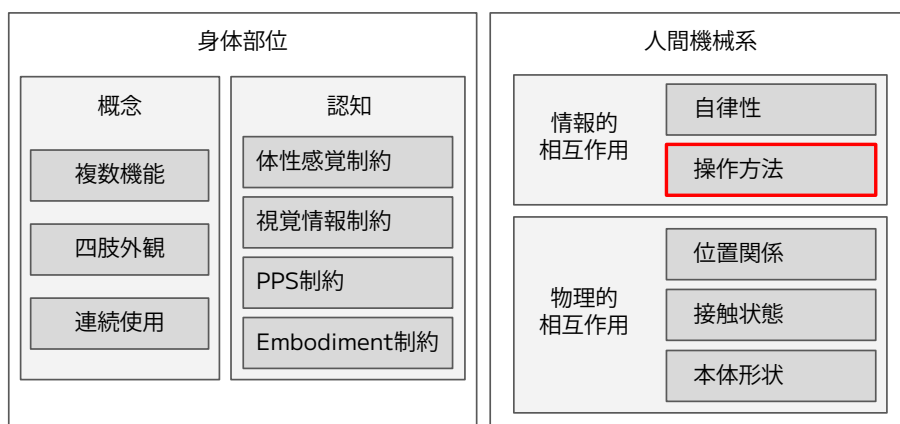


図 3.11: 3章で扱った設計要素

## 第4章

# 固有受容感覚に示唆を得たフィードバック手法

### 4.1 はじめに

本章では、拡張身体部位のフィードバック出力として、人間の固有受容感覚に示唆を得た触覚提示手法を示す。拡張身体部位の変位を触覚の強度に変換することで、接触を伴わない運動中のフィードバックを行う。概念検証プロトタイプとして、皮膚変形によるウェアラブル触覚提示を用いたシステムを実装し、提案手法を評価する。

ロボットの状態を感覚フィードバックとして使用者に提示する方法を検討する上で、人間の身体動作の生理的なメカニズムは示唆的である。人間が身体動作を行うときには視覚以外の感覚情報も手がかりとしている。例えば、身体部位の自己位置や姿勢を把握するための感覚

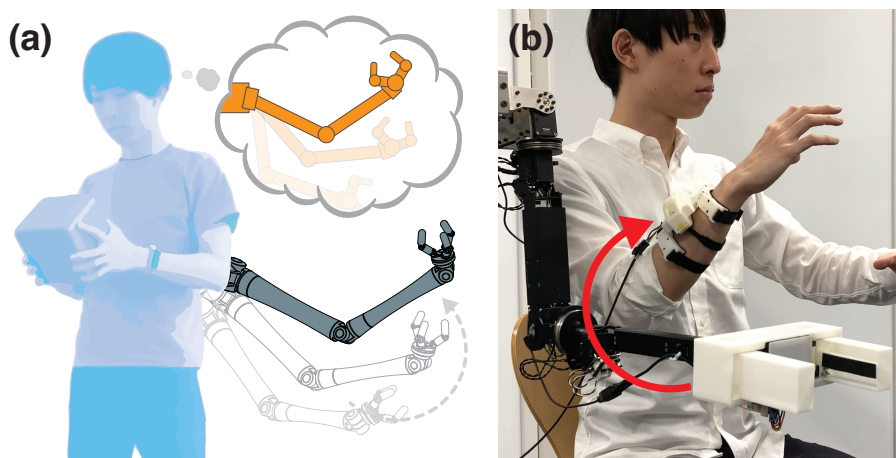


図 4.1: (a) 提案手法のイメージ、(b) 実装したプロトタイプ

として、固有受容感覚（体性感覚）がある [16]。固有受容感覚は自己位置把握に重要であり、この感覚入力に障害がみられる患者は、正確なリーチング動作が難しいことが報告されている [18]。特に、視覚情報が遮断された状態では、到達点の誤差が著しく増大する。拡張身体部位の操作において視覚以外の感覚フィードバックがないことは、人間が身体動作を行うときに固有受容感覚によって自己位置を把握できないのと同じような状態だとみなせる。そこで、本研究は拡張身体部位における人工的な固有受容感覚を実装することを試みる。

本研究では、拡張固有受容感覚提示を提案する（図 4.1）。ロボットの状態が目視できず、かつ物体に接触していない状況で拡張身体部位を操作するときに、視覚情報以外の感覚フィードバックとして触覚提示を用いる手法である。拡張身体部位の動作変位量を触覚刺激量に変換して使用者に提示する。本稿では、提案手法の定式化および使用状況を想定した2種類の触覚提示方法を示す。次に、提案手法を検証するために皮膚変形を用いたウェアラブル触覚装置によるフィードバックシステムの実装を行い、刺激量と知覚量の関係を決定的にする。実装したシステムを使用して、シミュレータおよびロボットアームを用いたリーチング課題を行い、拡張身体部位の操作における感覚フィードバックの効果を検証する。

## 4.2 関連研究

本研究で提案する拡張固有受容感覚提示システムに関連する研究として、拡張身体部位操作に用いられる感覚フィードバックとウェアラブル触覚について概説する。

### 4.2.1 拡張身体部位操作のための感覚フィードバック

これまで、様々な形状の拡張身体部位ロボットについて、利用目的に応じた機構設計や制御手法、操作のための入力手法が検討されている [84]。一方で、拡張身体部位の状態を使用者へフィードバックする方法は、主に使用者の目視による視覚情報が用いられており、触覚や聴覚提示のような感覚フィードバックは入力手法と比較すると十分に検討されていない [82]。

感覚フィードバックに触覚提示を用いる先行研究はいくつか提案されている。例えば、Sasaki ら [13, 125] は足でロボットアームを操作するためのコントローラーに触覚提示機構を実装し、アームが物体に接触した際に触覚提示を行う。Guggenheim ら [126] はロボットと環境とのインタラクション時の状態をトルク生成によって触覚提示するシステムを提案している。Iwasaki ら [89] は、使用者からみたロボットアームのエンドエフェクタの位置を腰につけたベルトの振動子によって触覚提示している。

以上のように、既に拡張身体部位操作のための触覚提示手法が提案されている。しかしながら、多くはロボットが物体に接触している状態、または接触時の情報をフィードバックすることに着目している。拡張身体部位が空間中で物体に接触していない状況における触覚、例えば、人間が空間中で身体の自己位置や動きを把握するための感覚フィードバックの実現には至っていない。そこで本研究では、拡張身体部位の操作のために人間が有している固有受容感覚に示唆を得た感覚フィードバック機能を実装することを目指す。

#### 4.2.2 固有受容感覚提示のためのウェアラブル触覚

固有受容感覚（体性感覚）は、皮膚内部の感覚受容器や筋肉の腱紡錘が皮膚や筋肉の収縮を検知して得られる感覚といわれている [16]。この感覚は、皮膚感覚とも重なるので、広義の触覚として扱うことがある [127]。そのため、触覚技術の一つとして、固有受容感覚を提示するための触覚装置の研究が行われている [128, 129]。

触覚装置の分類の1つにウェアラブル触覚 [130, 131] がある。これは使用者の身体に装置を装着して触覚提示を行う。装着する部位は、指先や手、腕をはじめ、足や腰など全身の様々な部位が対象になる [132]。例えば、皮膚に密着させた接触子を剪断方向に回転 [133, 134]、並進方向に直動 [135]、ローラー機構による回転 [136] といった方法で皮膚を変形させた触覚提示が提案されている。これらは筋電義手操作時の固有受容感覚提示を目的としており、義手の開閉量を皮膚変形量として提示することで、把持した物体の形状を判別する精度が向上することを示した。また、Meliら [137] は2つのベルトを用いた絞り機構と1つ伸縮機構を用いた装置を提案し、皮膚変形による触覚提示によってロボットアームを遠隔操作する際のロボットの状態を提示する応用例を示した。

本研究では、このような、皮膚変形による皮膚感覚を介した固有受容感覚提示を行うウェアラブル触覚装置を用いたフィードバックシステムを構築する。

### 4.3 提案手法

提案する拡張固有受容感覚提示は、拡張身体部位の動作の変位量を触覚刺激量に変換して使用者に触覚提示する手法である。ある空間における拡張身体部位の任意の位置・姿勢をベクトル  $\boldsymbol{x}$  とし、これに対応する触覚刺激量をベクトル  $\boldsymbol{H}$  とし、その変換関数を  $\boldsymbol{f}$  とおく。この変換関数  $\boldsymbol{f}$  は、拡張身体部位のある基準状態と現在の状態との変化量を計算する関数  $\boldsymbol{g}$  と変化量から触覚刺激量へ変換する関数  $\boldsymbol{h}$  の合成関数とする。このとき、触覚刺激量  $\boldsymbol{H}$  と拡張

身体部位の任意の位置・姿勢  $x$  の関係は式 4.1 となる。

$$H = f(x) = h(g(x)) \quad (4.1)$$

この式は、概念的なものであり、実際に拡張身体部位へ適用する場合、関数  $h, g$  をシステムの使用条件に応じて決定する。

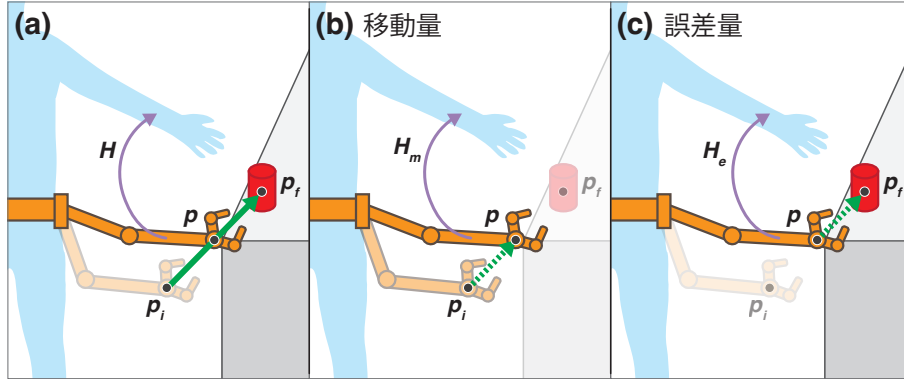


図 4.2: 拡張身体部位によるリーチング

本稿では、図 4.2a のように、ロボットアーム型の拡張身体部位が目標物体にリーチングを考える。ロボットアームの先端（エンドエフェクタ）の現在、初期、目的の位置・姿勢をそれぞれ、 $p, p_i, p_f$  とし、基準点の取り方が異なる 2 種類の変化量を考える。

変化量を線形と仮定して現在の状態  $p$  を式 4.1 の  $x$  としたとき、初期状態  $p_i$  と現在の状態  $p$  の差に補正係数  $a_m$  を掛けたものは、移動量に着目した移動量関数  $g_m$ 、目的状態  $p_f$  と現在の状態  $p$  の差に補正係数  $a_e$  を掛けたものは、誤差量に着目した誤差量関数  $g_e$  として、それぞれ式 4.2, 4.3 のように表現する。

$$g_m(x) = a_m(x - p_i) \quad (4.2)$$

$$g_e(x) = a_e(p_f - x) \quad (4.3)$$

関数  $h$  は、触覚提示に用いるシステムの特性によって決定するため、基準点の取り方に関わらず共通である。式 4.1 と式 4.2, 4.3 より、移動量に着目した触覚提示では式 4.4、誤差量に着目した触覚提示では式 4.5 となり、本研究ではそれぞれ、移動量提示と誤差量提示と呼ぶ。

$$H_m = h(g_m(x)) \quad (4.4)$$

$$H_e = h(g_e(x)) \quad (4.5)$$

以上、提案する拡張固有受容感覚提示を定式化した上で、ロボットアーム型拡張身体部位のリーチング課題における触覚提示方法として、移動量提示と誤差量提示を示した。

## 4.4 実装

定式化した提案手法を用いて3次元空間上の任意の位置・姿勢全ての変位量を触覚提示するには、例えば6自由度の触覚提示機構が必要になる。その実装は、複雑な機構で大型な触覚装置となる可能性がある。本稿では、拡張固有受容感覚提示の効果検証を第一目的に、1自由度のリーチング課題を対象とした状況を扱うことで、1自由度が提示できる比較的単純な機構を用いる。提案手法を適用するためには、触覚刺激量を連続的に変化でき、皮膚感覚を介して固有受容感覚を提示できる軽量でウェアラブル触覚装置が要求される。接触子を用いて皮膚を変形することで固有受容感覚提示を行う手法 [133, 134, 135, 136] においては、どのような機構が空間情報を扱う課題において効果的であるかは定かではない。そこで本研究では、実装の容易さを基準に先行研究 [137] と同様のベルトを用いて皮膚を絞る機構を採用する。図 4.3a に提示機構の構成要素を示す。

触覚提示機構は回転するアクチュエータ（モータ）とベルトによって構成され、装置を提示部位に巻き付けて使用する。図 4.3b のように2つのモータを逆方向に回転させてベルトを巻き上げる。提示部位を絞ることで皮膚を圧迫し、刺激提示を行う。刺激提示量はモータの回転角度に応じて連続変化する。

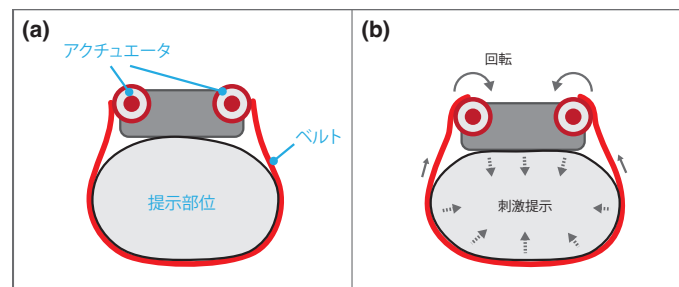


図 4.3: 触覚提示機構

図 4.4 に実装したウェアラブル触覚装置の構成を示す。装置外寸は、装着前の状態で幅、高さ、奥行きが  $124 \times 45 \times 98$  mm で重量は 100 g である。サーボモータは HITEC HS-5035HD を 2 つ使用し、モータ軸間幅は 60 mm、サーボモータの動作角度範囲は 0–180 度である。絞りをを行うベルト幅は 12 mm である。装置本体とベルトは 3D プリント部品で製作した。デバイス使用時は、モータ可動部が外から見えないようにカバーを被せる。ベルトは固定長 (180 mm) で作成した。使用者の提示部位の大きさの個人差は、絞られていない (サーボモータの角度が 0 度) 状態でベルトが提示部位に密着するように取り付け位置を調整することで解

決する。サーボモータはマイコン（Arduino Uno）を介して、PC から Unity を使用してシリアル通信で制御する。

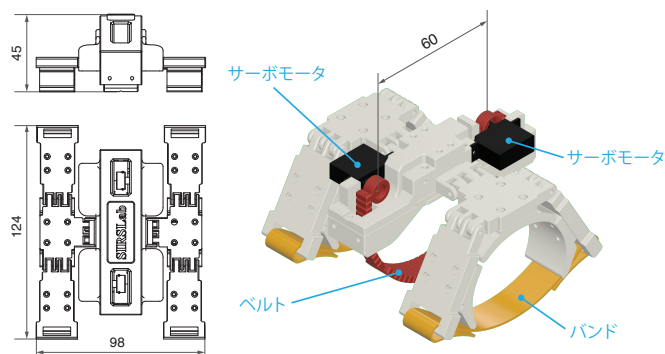


図 4.4: 実装した触覚装置

## 4.5 実験

提案する拡張固有受容感覚提示を評価するためにリーチング課題を含んだ 3 つの実験を行う。実験は、視覚情報が制限された状況下における感覚フィードバックとして、触覚提示が課題の成績にどのような影響を与えるのかに着目する。そこで、本実験での入力手法は先行研究 [13, 138] と異なり手を使用する。まず実験 1 では、実装したウェアラブル触覚装置を提案手法に用いるために、触覚刺激量の知覚強度を計測してパラメータを決定する。実験 2 では、シミュレータを用いてモニタ上で操作中の視覚情報を遮断する。実験 3 では、計算課題を行うことで視線を固定し、ロボットアームを用いたリーチング中の視覚情報を制限する。

### 4.5.1 実験 1：パラメータ決定実験

拡張固有受容感覚提示の関数  $h$  を決定するために、実装した触覚装置における触覚刺激量と知覚強度の関係を求める。

#### 手順

マグニチュード推定法に基づき、実験参加者にまず基準刺激を提示、その後、比較刺激を提示する。主観的な知覚強度を数値 (0 以上、上限なし) で口頭で回答する。触覚刺激量は装置のサーボモータ動作角度範囲 (0–180 度) を百分率に変換したものをを用いる。基準刺激を 10、比較刺激を 5 種類 (5, 10, 20, 40, 80) とする。基準刺激では、触覚刺激量 0 から 0.5 s 間刺激提

示し、その後 0 にする。比較刺激は、触覚刺激量 0 から刺激提示し、口頭での回答後に 0 にする。触覚装置を実験参加者の右腕に装着し、実験参加者一人当たり、25 試行（比較刺激 5 種類をランダムに 5 回ずつ）行う。実験参加者は健康な男性 8 名（23-30 歳、平均年齢 25.1 歳）である。

## 結果

実験で得られたデータに対してモデルを仮定し、フィッティングを行う。スティーブンスの法則によれば、一般に物理刺激量  $\phi$  と感覚知覚量  $\psi$  は、 $\alpha$  は指数、 $k$  は定数とにおいて、式 4.6 のような指数関数の関係でモデル化できる。

$$\psi = k\phi^\alpha \quad (4.6)$$

これを用いてフィッティングを行うと、式 4.7 の値が得られた。

$$\psi = 0.941\phi^{0.86}, (R^2 = 0.9971) \quad (4.7)$$

決定係数  $R^2$  の値から、このモデルの一致度が高いといえる。

同じデータに対して線形スケール上で線形モデルを考えた場合、 $k, \beta$  を定数とすると式 4.8 が仮定できる。

$$\psi = k\phi + \beta \quad (4.8)$$

これを用いてフィッティングした値は式 4.9 となる。

$$\psi = 0.511\phi + 1.518, (R^2 = 0.9986) \quad (4.9)$$

決定係数  $R^2$  の値から、線形モデルを用いた場合でも一致度が高いといえる。

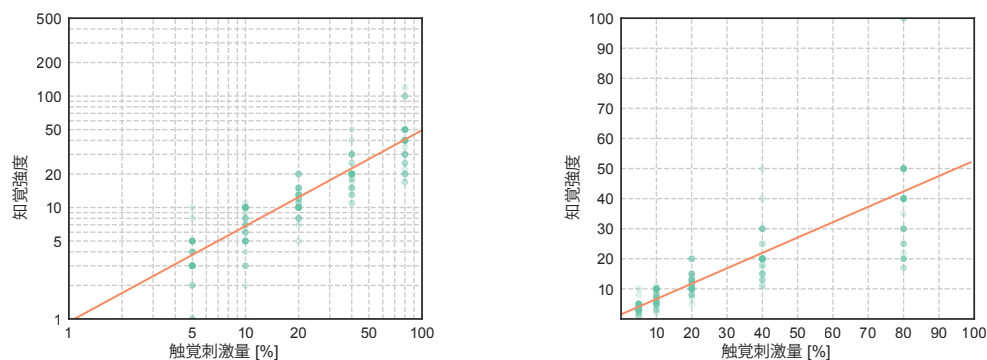


図 4.5: 触覚刺激量-知覚強度

データを対数変換し、グラフ上にプロットした結果を図 4.5 に示す。横軸が触覚刺激量の百分率、縦軸が回答した知覚強度である。左が両対数グラフ、右が線形グラフである。

ここで得られたモデルの逆関数を提案手法の関数  $h$  として用いるため、線形モデルの方が簡便である。実験結果より線形モデルを用いてもフィッティングできていることから、式 4.9 のパラメータを使用する。以降の実験では式 4.10 のパラメータを用いる。

$$h(x) = 1.957x + 2.971 \quad (4.10)$$

#### 4.5.2 実験2：シミュレータを用いた実験

シミュレータを使用して、視覚情報が遮断されたリーチング課題において、提案手法による移動量提示と誤差量提示が成績にどのような影響を与えるのかを評価する。

##### 環境

実験参加者は、図 4.6 のように椅子に座り、右腕に触覚装置を装着する。モニタの指示に従い、右手でレバー型の入力装置を操作して課題を行う。左手は実験指示に応じてキーボードの操作を行う。課題中はホワイトノイズを流したヘッドホン装着する。使用するレバー型入力装置は自作したフォースプレートの上面にレバーを取り付けたものである。圧力センサ (Interlink Electronics FSR 402) を 4 つ使用し、Arduino Pro Micro で処理して PC とシリアル通信を行う。この装置は机に固定する。PC は、Razer Blade 15 (CPU: Intel Core i7-8750H, GPU: NVIDIA GeForce RTX 2070, OS: Windows 10)、モニタは、LG 24UD58-B 23.8 インチモニタ (画面解像度: 3840×2160) を使用する。



図 4.6: 実験環境

## 課題

課題は画面内縦軸 1 方向を移動するリーチング課題である。シミュレータは Unity で実装した。シミュレータはモニタに、赤色のターゲットと拡張身体部位ロボットのエンドエフェクタを模したカーソルを表示する（図 4.7）。黄線が目盛りはシミュレータ上の単位を示し、本実験環境での距離 1 はモニタ上での実測で 8 mm である。実験参加者はレバー型入力装置でカーソルを操作してターゲットに近づける課題を行う。レバーを垂直方向に押し込みながら前後に傾けることで入力を行う（入力範囲 0.2 N–20 N）。カーソルの移動は入力装置の圧力センサの値を定数倍して、Unity の 1 周期（平均 20 ms）ごとに位置に加算（0.00–10.00）することで行う。

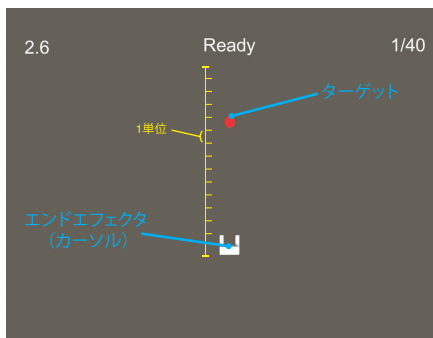


図 4.7: シミュレータ画面

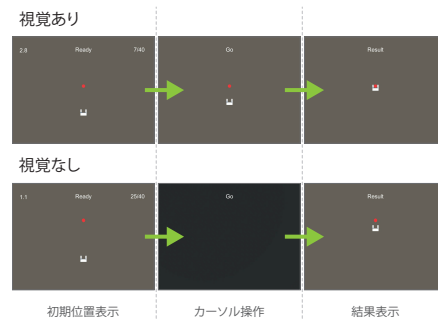


図 4.8: 課題の流れ

図 4.8 に示すように、課題は 3 段階で構成される。1) ターゲットとカーソルの初期位置が表示される。2) 3 秒後、実験参加者が操作できる状態になり、カーソルを動かす。3) カーソルが目標位置に到着したと判断した時点で、左手でキーボードのキーを押す。1 試行終了後、画面が数秒暗転し、次の試行へ移る。以上を規定試行回数行う。ターゲットの初期位置は 4 地点（カーソル–ターゲットの距離：6, 7, 8, 9）からランダムに決まる。実験参加者には課題中、できるだけ早く、正確にカーソルをターゲットに近づけること、カーソルの凹部がターゲットと密着した状態が到達状態であることを指示した。なお、段階 2 では、後述する視覚提示条件に応じて、モニタ上の表示状態が異なる。

## 手順

リーチング課題は、視覚提示 2 条件（視覚あり・視覚なし）、触覚提示 3 条件（触覚提示なし、移動量提示、誤差量提示）の組み合わせで合計 6 条件で行う。視覚提示条件の違いによって、課題の段階 2 における表示を変える。視覚あり条件では、カーソルの操作中、常にその動

きが見える状態で課題を行う（図 4.8 上段）。視覚なし条件では、課題開始時点のターゲットとカーソルの初期位置が表示されたあと、カーソル操作中は映像が非表示になる。実験参加者が到達と判断してキーボードを押した後、最終結果としてのカーソルとターゲットの位置が提示される（図 4.8 下段）。

実験は触覚提示条件毎にセッションを分ける。移動量提示、誤差量提示を行う上で、4.3 節における現在、初期、目的位置をそれぞれ、課題中のカーソルの位置、課題開始時点でのカーソルの初期位置、ターゲットの位置とする。また、 $a_m$ 、 $a_e$  は、マッピング関数の入力範囲の補正係数とした。触覚提示条件は、セッション 1 では触覚提示なし、セッション 2 と 3 では移動量提示、誤差量提示のいずれかを行う。セッション 2、3 で提示する条件の順番は実験参加者全体でカウンターバランスをとる。

各セッションは、練習（5 回）、視覚あり条件の試行（20 回）、視覚なし条件の試行（20 回）の順に行う。視覚あり条件と視覚なし条件それぞれの課題終了後、主観作業負荷を計測する NASA-TLX [139, 140] 質問紙の 6 項目、精神的要求 (Mental Demand: MD), 身体的要求 (Physical Demand: FD), 時間的圧迫感 (Temporal Demand: TD), 作業達成度 (Performance: OP), 努力 (Effort: EF), 不満 (Frustration Level: FL) を回答する。全セッション終了後、口頭で自由回答を行う。

実験参加者は健康な成人 12 名（23 歳–40 歳で平均年齢は 27.0 歳、男性 10 名、女性 2 名）。左利きは 2 名である。

## 結果

図 4.9 にカーソル操作開始から課題終了までの課題時間、図 4.10 に正確性として課題終了時のターゲットとカーソルとの距離、図 4.11 に主観作業負荷の指標となる質問紙回答の得点を箱ひげ図で示す。それぞれ、左側の 3 つが視覚あり条件、右側の 3 つが視覚なし条件の結果である。

まず、課題時間をみる。全条件の平均時間は 3.6 s (SD:  $\pm 1.3$  s) であった。視覚あり条件では 3.4–3.7 s、視覚なし条件では 3.5–3.8 s であり、視覚提示条件によって課題時間に違いがある傾向はみられない。触覚条件の違いによる差を確認するため、統計分析を行った。シャピロ・ウィルク検定により正規性が棄却されたため、フリードマン検定を行ったところ、視覚なし条件において有意差のある条件があることが確認された ( $\chi^2(2)=6.008$ ,  $p = 0.050$ )。事後検定として、ボンフェローニ法を用いたウィルコクソンの順位和検定で多重比較を行ったところ、移動量–誤差量 (adj.  $p=0.005$ ) で有意差が確認された。

次に、正確性をみる。図 4.10 の縦軸はシミュレータ内の距離を示す。視覚あり条件では、

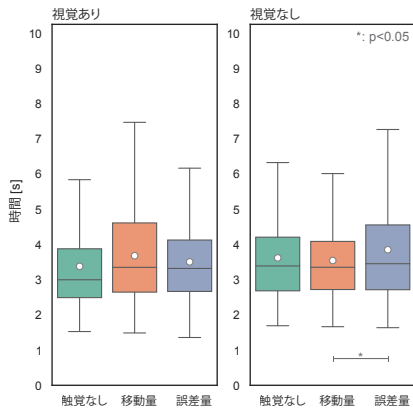


図 4.9: 課題時間

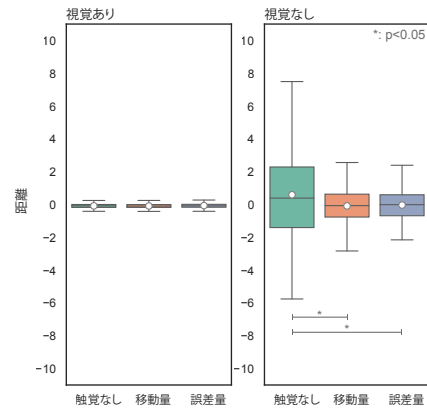


図 4.10: 課題の正確性

触覚提示条件の違いによる距離の違いはみられなかった。視覚なし条件では、触覚条件によって異なる傾向がみられるため、統計分析を行った。シャピロ・ウィルク検定により正規性が棄却されたため、フリードマン検定を行ったところ、視覚なし条件 ( $\chi^2(2)=6.008, p=0.050$ ) で有意差のある可能性が確認された。事後検定として、ボンフェローニ法を用いたウィルコクソンの順位和検定で多重比較を行ったところ、触覚なし-移動量 (adj.  $p=0.011$ )、触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.023$ ) で有意差が確認され、移動量提示、誤差量提示のどちらも触覚提示なし条件よりも有意に距離誤差が小さいことが示された。一方、移動量-誤差量に差は確認できなかった (adj.  $p=1.000$ )。

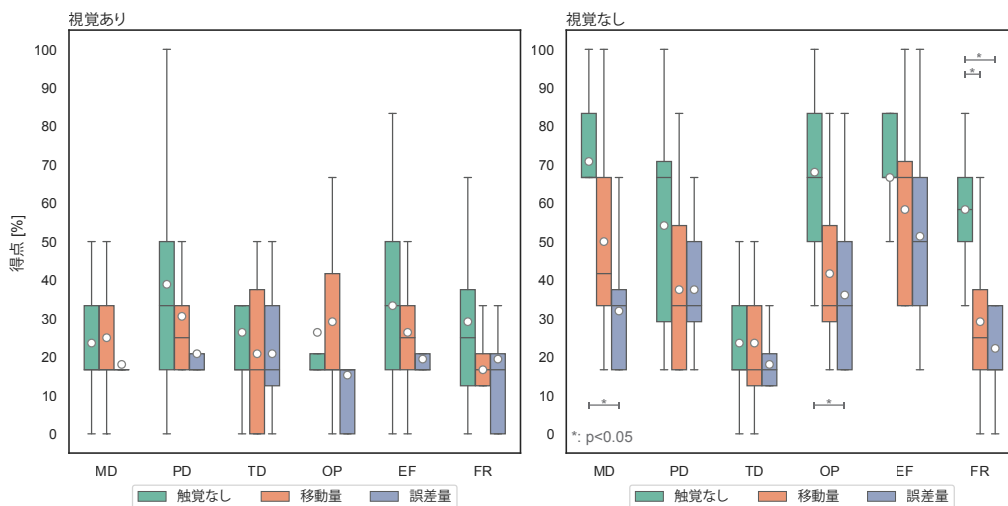


図 4.11: 主観作業負荷の得点

次に、主観作業負荷をみる。左側が視覚あり条件、右側が視覚なし条件、得点は7段階のス

ケールを百分率に変換している。全体の傾向として、視覚なし条件の得点が視覚あり条件の得点よりも高い傾向が確認できる。得点が高いことは、作業負荷が高いことを示している。視覚なし条件の課題が視覚あり条件と比較して高負荷であることが示唆される。触覚提示条件による違いを確認するために統計分析を行う。シャピロ・ウィルク検定により正規性が棄却されたため、フリードマン検定を行ったところ、視覚あり条件の項目 PD ( $\chi^2(2)=6.067$ ,  $p=0.048$ ), 視覚なし条件の項目 MD ( $\chi^2(2)=12.409$ ,  $p=0.002$ ), OP ( $\chi^2(2)=9.3488$ ,  $p=0.009$ ), FR ( $\chi^2(2)=15.2$ ,  $p=0.001$ ) で有意差のある可能性が確認された。事後検定として、ボンフェローニ法を用いたウィルコクソンの順位和検定で多重比較を行ったところ、視覚なし条件の項目 MD の触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.010$ ), 項目 OP の触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.036$ ), 項目 FR の触覚なし-移動量 (adj.  $p=0.018$ )、および触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.010$ ) で有意差が確認された。項目 MD は課題時の精神的要求の指標であり、触覚提示によって精神的な作業負荷が減少することを確認した。また、有意差は確認されないものの、移動量提示よりも誤差量提示の方が負荷が低い傾向が示唆された。項目 FR は課題時の努力の指標であり、触覚提示なし条件と比較して、触覚提示によって課題に対する努力が減少する傾向が確認できた。

口頭による自由回答では、触覚提示条件の操作性の違いについて、12名中3名が移動量提示の方が操作しやすいと答え、6名は誤差量提示が良いと回答した。3名はどちらも同程度と回答または無回答であった。移動量提示については、刺激量を記憶する必要があることや頭で刺激量から移動量に一度変換が必要のために負荷が高いという回答があった。また、誤差量提示では、カーソルの位置がターゲットを超えた場合に刺激量が減少するため、その変化を目安に操作していたという回答もあった。

### 4.5.3 実験3：ロボットアームを用いた実験

ロボットアームを使用して、提案手法がリーチング課題と計算課題を同時に行う二重課題の成績にどのような影響を与えるのかを評価する。

#### 環境

課題を行うための拡張身体部位システムとして、2自由度を有した等身大のロボットアームを用いる。先端には、距離センサ (Pololu VL53L1X) を内蔵したエンドエフェクタを取り付ける。今回は実験参加者の身体動作による影響をなくすため、アームを台に固定した状態で操作する。図 4.12 に実験で使用するロボットアームを示す。ロボットアームの制御は Unity で行い、先端の最高速度は 0.5 m/s 以下とした。

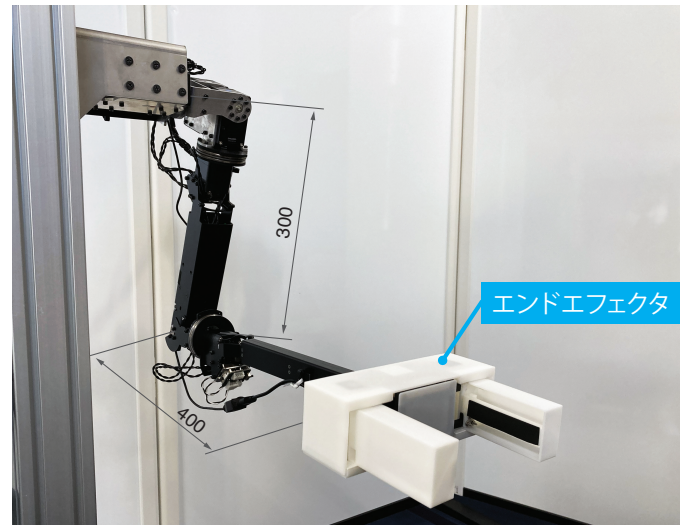


図 4.12: ロボットアームの構成

図 4.13 に示すように、実験参加者は椅子に座り、正面のモニタの表示をみながら右手で入力装置であるレバー型の力センサを操作する。右腕に触覚提示装置を装着し、肘掛けによって腕の位置を固定する。ロボットアームは実験参加者の横に設置する。左手で実験指示に応じたキーボードの操作を行う。入力装置は実験 2 と同じものを使用する。

### 課題

課題はモニタに表示された一桁同士の足し算の計算課題とロボットアームを 1 方向に操作するリーチング課題を同時に行う二重課題である。操作中の実験参加者の視線は正面に固定する。参加者は、周辺視野でロボットの動きを確認することができる。図 4.14 に示すように、ターゲット（直径 100 mm）にエンドエフェクタを近づけ、エンドエフェクタを閉じて把持する。

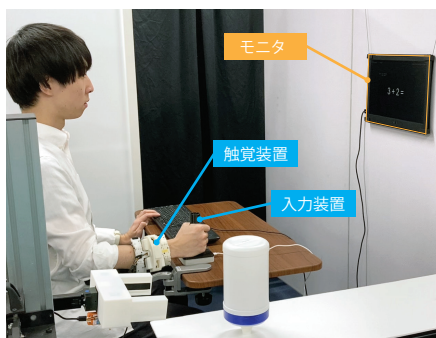


図 4.13: 実験環境

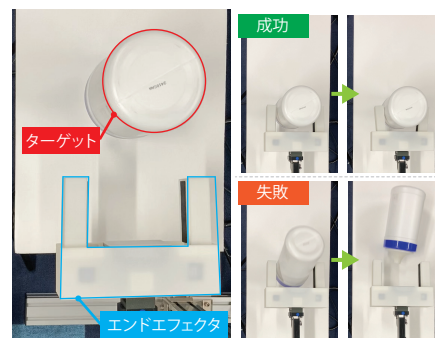


図 4.14: 課題の成功失敗判定

## 62 第4章 固有受容感覚に示唆を得たフィードバック手法

課題は3段階で構成される。1) アームを初期位置に移動し、ターゲットを設置する。ターゲットの初期位置は4地点(エンドエフェクタ先端-ターゲット中心の距離: 150, 200, 250, 300 mm) からランダムに決まる。2) 実験参加者が操作できる状態になり、モニタに表示される一桁の足し算の回答を声に出し続けながら、アームを動かす。表示される数字は1秒ごとに更新される。実験参加者は、常に足し算を行いながら、できるだけ早く、正確にアームをターゲットに近づけることが要求される。3) アームが目標位置に到着したと判断した時点で、左手でキーボードのキーを押す。キーが押されると、エンドエフェクタが閉じる。ターゲットを把持できた場合に成功、ターゲットを倒すか手前で止めた場合に失敗とする(図 4.14)。以上を規定試行回数行う。

### 手順

実験は3セッションに分けて触覚提示条件(触覚提示なし、移動量提示、誤差量提示)を変えて行う。セッション1では触覚提示なし、セッション2、3で提示する条件の順番は実験参加者全体でカウンターバランスをとる。課題は1条件あたり20試行である。触覚提示のために設定する現在、初期、目的位置はそれぞれ、課題中のエンドエフェクタの位置、課題開始時のエンドエフェクタの位置、ターゲットの位置とする。ただし、誤差量提示の誤差量には、エンドエフェクタに取り付けた距離センサの計測値を用いる。各セッション終了時にNASA-TLX質問紙を回答する。全セッション終了後、口頭で自由回答を行う。

実験参加者は健康な成人12名(22歳-41歳で平均年齢は27.4歳、男性10名、女性2名)。全員右利きであり、実験2の参加者は4名である。

### 結果

図 4.15 に1試行におけるカーソル操作開始から課題終了までの課題時間、図 4.16 に課題の成功率、図 4.17 に課題成功時のエンドエフェクタからターゲットまでの距離を正確性として、結果を箱ひげ図で示す。

まず、課題時間をみる。全条件の平均時間は4.6s (SD:  $\pm 1.8$ s)であった。課題の完了時間は触覚なし、移動量、誤差量の順に減少している傾向がみられるため、統計分析を行った。シャピロ・ウィルク検定により正規性が棄却されたため、フリードマン検定を行ったところ、有意差のある条件があることが確認された( $\chi^2(2)=25.833$ ,  $p < 0.001$ )。事後検定として、ボンフェローニ法を用いたウィルコクソンの順位和検定で多重比較を行ったところ、触覚なし-誤差量 (adj.  $p < 0.001$ )、移動量-誤差量 (adj.  $p=0.002$ ) で有意差が確認された。この結果から、誤差量提示による触覚提示は、触覚提示なしよりも有意に課題時間を減少させること、ま

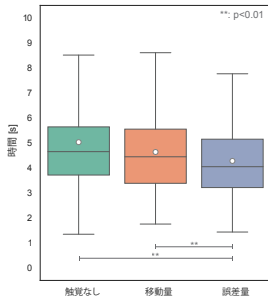


図 4.15: 課題時間

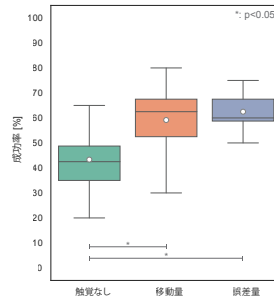


図 4.16: 課題成功率

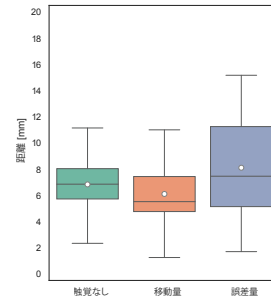


図 4.17: 課題の正確性

た、触覚提示の種類によっても課題時間に影響を与えることが示された。

次に、課題成功率をみる。成功率は、触覚なし、移動量、誤差量の順に高くなっている傾向がみられる。シャピロ・ウィルク検定により正規性が棄却されなかったため、一元配置分散分析を行ったところ、有意差のある条件があることが確認された ( $F(2, 33)=5.512$ ,  $p=0.009$ )。事後検定として、ボンフェローニ法を用いたウィルコクソンの順位和検定で多重比較を行ったところ、触覚なし-移動量 (adj.  $p=0.048$ )、触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.014$ ) で有意差が確認された。

正確性は、この実験においてターゲットの把持に成功した場合のエンドエフェクタとターゲットの距離を指す。シャピロ・ウィルク検定により正規性が棄却されなかったため、一元配置分散分析を行ったところ、有意差のある条件が確認されなかった ( $F(2, 33)=1.016$ ,  $p=0.373$ )。移動量提示と誤差量提示を比較すると、誤差量提示の方が距離のばらつきが大きい傾向がみられる。このことから、有意差は確認されなかったものの、触覚提示の方法によって正確性に異なる傾向があることが示唆された。

主観作業負荷の指標となる質問紙回答の得点を図 4.18 に示す。得点は 7 段階のスケールを百分率に変換している。得点の全体的な傾向は、実験 2 と同様に触覚提示なしの負荷が高く、移動量提示と誤差量提示が同程度に低い、または誤差量提示が最も低いという傾向がみられる。統計分析として、シャピロ・ウィルク検定により正規性が棄却されたため、フリードマン検定を行ったところ、項目 MD ( $\chi^2(2)=9.905$ ,  $p=0.007$ )、TD ( $\chi^2(2)=6.790$ ,  $p=0.034$ )、EF ( $\chi^2(2)=10.757$ ,  $p=0.005$ )、FR ( $\chi^2(2)=9.771$ ,  $p=0.008$ ) で有意差のある可能性が確認された。事後検定として、ボンフェローニ法を用いたところ、項目 MD の触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.022$ )、項目 EF の触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.030$ )、項目 FR の触覚なし-誤差量 (adj.  $p=0.033$ ) で有意差が確認された。

自由回答では、課題中のロボットアームの動きがどの程度見えていたのかについて、12 名全

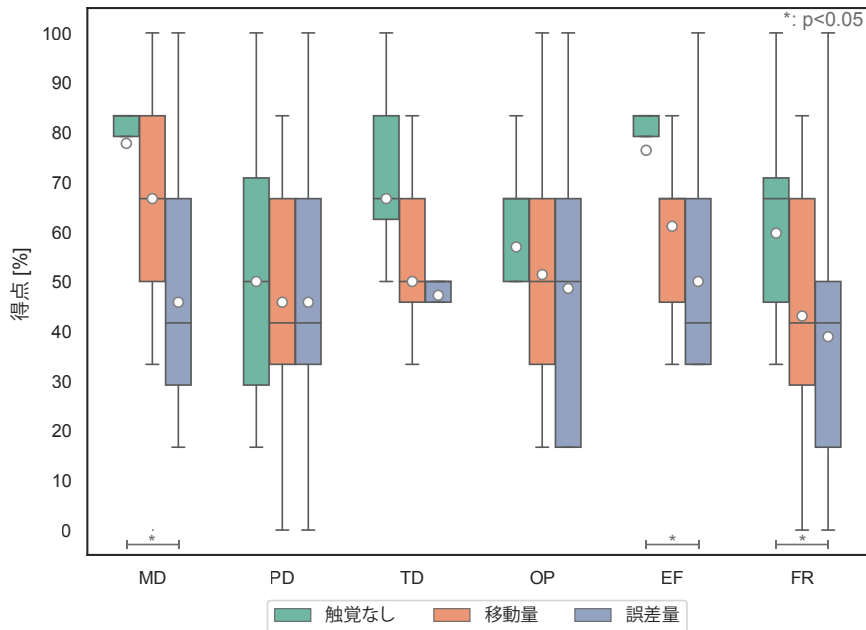


図 4.18: 主観作業負荷の得点

員がほとんど見えていないまたは視野には入っているが動きはわからなかったと回答した。また、ターゲットが倒れる瞬間はわかるという回答があった。二重課題の注意配分についての主観的な回答は実験参加者によって異なり、計算課題に多く注意配分する人も操作課題に多く配分する人もいた。

## 4.6 考察

まず、実験 2, 3 の結果を踏まえて考察する。実験 2 では、視覚情報が遮断された状況において、2つの触覚提示方法が触覚なし条件と比べて操作の正確性を有意に向上させることを確認した。しかしながら、視覚なし条件の触覚提示ありの結果は、視覚あり条件の成績と比較して距離のばらつきが大きく主観作業負荷が高い。現時点では触覚提示が視覚機能を代替する程の効果は得られていない。この要因のひとつとして、線形モデルのフィッティングパラメータの影響が考えられる。本実験では、複数人から得たデータを用いたパラメータを使用した。個人ごとにフィッティングすることで成績の向上が期待できる。触覚提示方法の違いによる課題時間の有意差について、実験参加者の中に誤差量提示条件では刺激量の変化を目安にして操作する人がいた。この場合、カーソルがターゲットを通り過ぎてから戻すという操作を行うために、課題時間が長くなったと考えられる。

実験3では、拡張身体部位を独立に操作する使用状況を想定して、リーチング課題と計算課題を同時に行った。このとき、触覚なしよりも触覚提示がある場合の成績が高いことに加えて、触覚提示方法によっても異なる傾向があることが示唆された。課題時間は誤差量提示が移動量提示よりも有意に短く、成功率は有意差はないものの誤差量提示の方が高い傾向がみられる。一方で、正確性とした把持成功時のエンドエフェクタからターゲットまでの距離をみると、移動量提示が誤差量提示よりも近い位置で把持している結果になった。実験では、把持時のターゲットまでの距離については指示していない。そのため、触覚情報に基づいて把持するタイミングが、エンドエフェクタ移動中の触覚提示方法によって異なると考えられる。これは、物体の接触時に触覚提示する場合にはみられない傾向であり、固有受容感覚の特徴を示していると考えられる。2つの実験に共通して、試行回数を増やすことで学習に伴い、視覚情報や触覚提示条件の違いによる影響が少なくなる可能性が考えられる。長期的な課題による運動学習への効果や人間の身体の運動制御モデルの違いとの比較、また、触覚提示方法による使用者の影響に関する詳細な調査は今後の課題である。

本稿では、1自由度のリーチング課題を用いて触覚提示の効果を調査した。今後、本提案手法を用いて多自由度のリーチング課題や別の課題を扱う場合、触覚装置の機構や刺激の設計、入力手法との組み合わせによる影響、および人間の認知的な制約を考慮する必要があると考えられる。機構や刺激の設計については、知覚強度のダイナミックレンジが高い刺激の設計も期待される。このような観点からウェアラブル触覚装置の技術開発を行うことが重要である。入力手法との組み合わせについては、例えば、足の操作時には足先に近いふくらはぎへの提示が効果的である可能性がある。このように入力とフィードバックを考慮した設計が必要になる。人間の認知的な制約については、複数の触覚刺激が同時に提示された時に、使用者がそれらの情報をどのように処理して拡張身体部位の操作を行うかは明らかではない。多自由度の拡張身体部位における触覚提示では、ロボットの自動制御を用いて、使用者が操作する割合と提示する情報量を減らす工夫も必要になると考えられる。今後は、より複雑な課題における人間の身体部位と拡張身体部位の協調動作において、触覚提示が及ぼす影響についての調査が必要である。

## 4.7 本章のまとめ

本研究は、拡張身体部位の操作インタフェースの構成要素の中で、感覚フィードバックに着目し、視覚情報が制限された状態において操作性を向上する手法を提案した。特に、接触を伴わない空間の移動中における感覚フィードバックとして、人間の固有受容感覚に示唆を得た。

本研究は、拡張身体部位の使用において固有受容感覚に相当する機能を実現することを試みた最初の取り組みである。本手法は、遠隔操作ロボットなどにも適用可能であり、ロボットの状態を自己位置として、まるで自分の一部のように把握できることで、扱える機能の数や作業負荷の低減が期待される。

本章では、身体拡張部位におけるフィードバック手法について、触覚提示を用いた方法を示した。ここでは、提案手法の有効性をタスクの精度の向上によって示したが、身体部位の体性感覚制約に対しても効果があることが予想される。扱った設計要素を図 4.19 に示す。

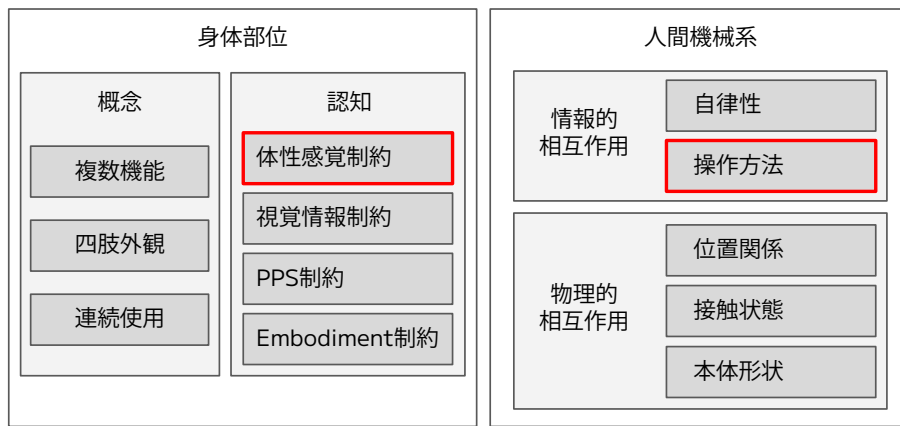


図 4.19: 4章で扱った設計要素

本研究で示した手法と3章を組み合わせることで、手の動きや視覚に制限されない操作インタフェースを設計することができると思う。操作インタフェースの設計例については、7.2.1にて考察する。

## 第 5 章

# 座標共有による非接触な装着形状の設計

### 5.1 はじめに

本章では、拡張身体部位の物理的相互作用における接触状態や本体形状の観点から、装着について扱う。SuperLimbs や一般的な装着ロボットでは大前提と考えられていた人間とロボットの物理的な接触について、座標を一致させるという点に着目することで、新しい視点とインタラクションを提供する。

人間とロボットの協調は、人間あるいはロボットのどちらか一方だけでは実現できない行動を実現するために採用される [50]。人間拡張ではロボットを用いて人間の能力を向上させることを目的のひとつとしており、Human-Robot Interaction (HRI) や情報技術の分野とも関連している [11]。

本研究では、人間拡張のための新しいロボットシステムとして、Human Coincident Robot (HCR) というコンセプトを提唱する。HCR は、ウェアラブルロボットが持つ本質的な強みを継承し、物理的な接触なしに人間と座標を共有できるように設計される。HCR は、人間の身体に直接装着するのではなく、移動機構によって対象である人間に追従して自立的に動くことで、人間を物理的な制約から解放する。HCR は移動ロボットの物理的な独立性と自律性を導入することで、人間の物理的な制約に起因するウェアラブルロボットの限界を解決する。このように、HCR はウェアラブルロボットと自律型移動ロボットの利点を兼ね備えている。図 5.1 に、ヒューマンスケールのロボットを搭載した HCR のプロトタイプを示す。これは、SuperLimbs などのウェアラブルロボットで期待されるような、人間とロボットの協働を可能にする。



図 5.1: 物理的な接触なしにユーザーと座標を共有する Human Coincident Robot (HCR) の概念実証プロトタイプ。HCR に搭載された 2 つのロボットアームの内部で人間が動くことができる。

HCR のコンセプトは、状況や実装に応じて様々な形態や構成で実現することが可能である。本研究では、HCR の概念を検証する最初の試みとして、2 輪移動ロボットを採用し、スライディングモード制御 (SMC) [141, 142, 143] を用いて制御問題に取り組み、実際のロボットプロトタイプを用いて実験を行った。本章は以下のように構成される。5.2 では、HCR 概念の前提となる背景を紹介する。5.3 では 2 輪 HCR のロボット設計と基本構成、5.4 では制御法の妥当性をシミュレーションで確認、5.5 では実際のロボットとデモによる検証作業を紹介する。なお、付録 B では本プロトタイプシステムで用いたロボットの力学モデルと SMC に基づく制御法を示す。本研究の貢献は以下の通りである。

- 人間拡張のための新しいコンセプトである HCR を提案する。
- 2 輪 HCR のプロトタイプの実装例を示す。
- 実際のロボットを用いてコンセプトの概念検証を行う。

## 5.2 関連研究

HRI の観点において、人間とロボットが同一の座標系を共有することは、ロボット操作での最適なパフォーマンスを発揮するために重要である。例えば、遠隔操作ロボットの操作において、操作者とロボットの座標が原理的に一致しない場合、メンタルローテーション [144] が要求される。一方、ウェアラブルロボットでは、一般的に操作中にメンタルローテーションを要求されない。ウェアラブルロボットはその名の通り、ロボットが人間と物理的に接触し、固定されることで人間の作業空間とロボットの座標系が一致する。したがって、ユーザーは人体の位置を基準とした座標を参照しながらロボットアームを操作することができる。また、人間がロボットを操作する際に、人間から見たロボットの座標系を一致させることで、操作時の認知負荷を軽減できることが示唆されている [145]。

しかし、ウェアラブルロボットの根本的な課題は、その構造が人間の身体的特性によって大きく制限されることにある。ロボットの重量は、人間が脚で支えられる範囲に制限されるため、ロボット設計の可搬重量やトルクが制限される。例えば、先行研究 [146] と [88] のロボットユニットの重量は、それぞれ 18 kg と 6.7 kg である。ロボットの動作に伴うモーメントは人体に伝わるため、ロボットが積極的にモーメントを利用する場合 [147] を除き、人間の作業に支障をきたす可能性がある。また、ロボットを構成するアクチュエータやセンサの取り付け位置が人体表面に限定される [84]。

5.3.1 で述べるように、ウェアラブルロボットのこれらの利点と欠点は、システム設計において分離可能であり、接触状態と座標系の一致に分けられると考えられる。そこで、ウェアラブルロボットとは人間とロボットの関係が異なる、HRI の別の研究領域について考える。そのひとつである移動ロボットは、非接触で人間とインタラクションすることができるロボット形態である。

移動ロボットは、環境に応答して自律的に動作するものと、人間の指令によって動作するものがある。移動ロボットはその用途に応じて、様々な種類の制御対象を持つ。完全自律型の移動ロボットは、あらかじめ決められた経路や動的に計画された経路を追跡してタスクを遂行する。ロボットアームを搭載したサービスロボットは、日常生活を支援するために計画された経路を追従する [148]。人間追従型ロボットは、ターゲットとなる人間を追跡し、一定の距離を保つロボットである [149]。荷物を運ぶ人のサポートなどに広く使われている [150]。人間追従型ロボットは、完全自律型移動ロボットやサービスロボットとは異なり、ウェアラブルロボットと同じようにターゲットとなる人間との物理的制約があるという特徴がある。このよう

な物理的制約を満たすためには、移動ロボットがターゲットに追従するための効果的な制御方法を設計することが重要である。

制御に目を向けると、SMC は移動ロボット、特に2輪ロボットの非線形ロバスト制御の手法として普及している [151]。SMC の設計では、Lyapunov 関数とスイッチング関数をどのように決定するかが重要になる。極座標で設計する研究 [152, 153] もあれば、直交座標で設計する研究 [142] もある。直交座標では、前後方向と横方向の収束優先度を明示的に決定することができる。先行研究 [142] は前後方向の優先度が高く、次にヨー角、左右方向の優先度が高い。これらの機能を適切に適用することで、ロボットが人間に追従するような新しい HRI システムを設計することができる。

### 5.3 Human Coincident Robot

本節では、HCR の概念検証プロトタイプを設計するための基本方針を示す。5.3.1 ではウェアラブルロボットの拡張としての HCR のコンセプトを詳述し、5.3.2 では HCR のプロトタイプを設計するための方針を導く。

#### 5.3.1 基本概念

ここでは、ウェアラブルロボットの利点を継承しつつ、その限界を解決するコンセプトについて説明する。

ウェアラブルロボットと人間の位置関係は、物理的な空間において制約を受ける。ウェアラブルロボットが人体に装着された時点で、ロボットと人間の姿勢は6自由度すべてで一致する。この物理的な一致により、人間はウェアラブルロボットを自分の体の一部として扱うことができる。しかし、接触による物理的制約を満たすには、ロボットを人体で支える必要があるため、ロボットの構造設計が制限される。

ここで、非接触で物理的な制約を満たすロボットを考え、人間追従型ロボットの延長線上で検討する。人間追従型ロボットは、対象となる人間に一定の距離を保ちながら追従する。つまり、移動機構を制御することで、2自由度の物理的一致の制約を満たす。このような特性を拡張し、もし、6自由度すべてにおいて物理的一致を満たすことができれば、人体に装着することなく座標が一致するロボットが存在することになる。

本研究では、まず、2次元位置拘束に限定した問題、すなわち、対象となる人間と同じ位置と姿勢を持つことで3自由度の一致を実現するロボットに取り組む。次に、この限定された課

題を解決するためのプロトタイプ的设计方針について説明する。

### 5.3.2 ロボット設計

HCR の概念検証プロトタイプを設計するための方針について説明する。HCR は、人間が自由に振り向いたり歩いたりできる空間を内部に持つ。また、人間とロボットの座標が一致するように、人間の体の位置や向きに追従する可動性を持っている。

図 5.2 は、従来の人間追従型ロボットと HCR の違いを示したものである。図 5.2a で示す人の背後を追従する移動ロボットでは、人間とロボットの距離を一定に維持することで、2 自由度の空間的拘束ができる。しかしながら、人間とロボットの姿勢や移動軌道に不一致が生じる可能性がある。図 5.2b で示す HCR では、相対位置の拘束に加えて姿勢、つまり回転も一致している。そのため、移動軌道も一致している。

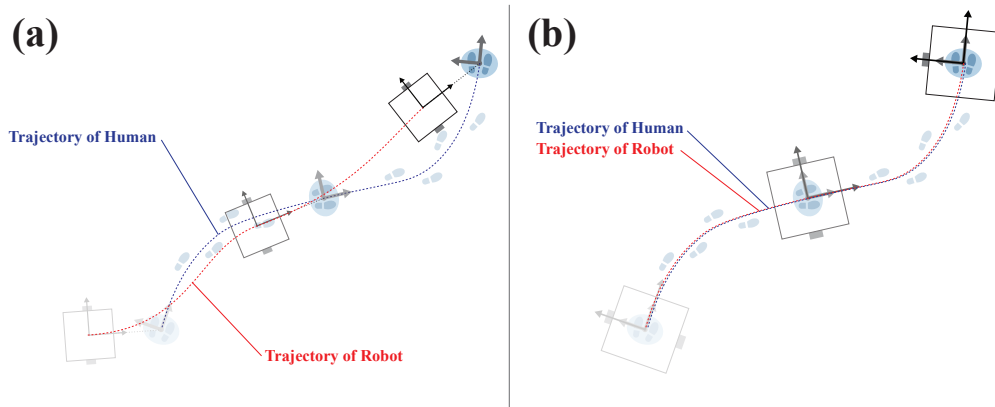


図 5.2: 人間に追従する移動ロボット：(a) 2 自由度（人間追従型ロボット）、(b) 3 自由度（HCR）

このような HCR のコンセプトを検証するための第一歩として、いくつかの仮定を設けて設計問題を単純化した。まず、「HCR 内の人間は横方向に移動しない」という仮定をおく。予備的な観察から、自然な歩行をする人間が急に横方向に移動することはほとんどないと判断したためである。したがって、本検証では、ロボットの横方向への並進運動は緩やかで小さいと仮定する。2 つ目の仮定は、人間とロボットが平らな面、つまり無限の地面の上にいるということである。荒れた地形や障害物のある環境にロボットを導入する方法については、多くの研究が行われている [154]。しかし、そのような環境での移動の問題は条件が煩雑になることから、本研究が扱う HCR の初期段階では取り扱わない。

これらの前提のもと、HCR のシンプルで実現可能な例の具体的な設計を決定する。まず、

移動機構として独立した2輪駆動型を採用する。二輪駆動型は、いくつかの自律型移動ロボットに採用されているため、信頼性が高い。また、アクチュエータやセンサの数が少ないため、実装が容易である。次に HCR の本体形状について、円形やコの字型などの他の形状ではなく、剛性や構造の簡略化の観点から四角形とした。この機械構造は、パイプを組み合わせることで構成する。

以上の基本設計方針に基づいて、プロトタイプを実装する。使用した力学モデルについては付録 B で説明する。ロボットの詳細な実装については、5.5 で述べる。

## 5.4 シミュレーション

付録 B で述べた制御方法を確認するために、シミュレーションによる実験を行う。

### 5.4.1 実験設定

シミュレーション環境では、二輪車は直線と円の形をした2種類の軌道を歩く人間に追従するように設計されている。これらの軌道をたどる人間の動きは、台形状の線速度を持つようにモデル化されている。図 5.3 に示すように、台形関数を (5.1) のように3次関数で平滑化し、加速度に不連続点がないようにする。

$$v = \begin{cases} v_0 \left( \frac{(t - \frac{T_1}{2})^3}{3} - (\frac{T_1}{2})^2 (t - \frac{T_1}{2}) \right) + \frac{v_{max}}{2} & (0 < t < t_1) \\ v_{max} & (t_1 < t < t_2) \\ v_0 \left( \frac{(t_3 - t + \frac{T_1}{2})^3}{3} - (\frac{T_1}{2})^2 (t_3 - t + \frac{T_1}{2}) \right) + \frac{v_{max}}{2} & (t_2 < t < t_3) \end{cases} \quad (5.1)$$

ここで、 $t_1 = T_1$ ,  $t_2 = T_1 + T_2$ ,  $t_3 = 2T_1 + T_2$ ,  $v_0 = -6\frac{v_{max}}{T_1^3}$   
角速度は、ロボットが常に軌道の接線方向を見るように決定される。

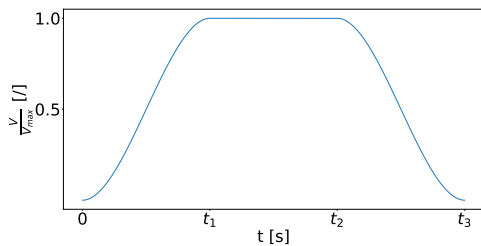


図 5.3: 平滑化した台形速度

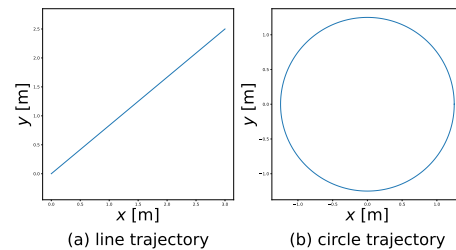
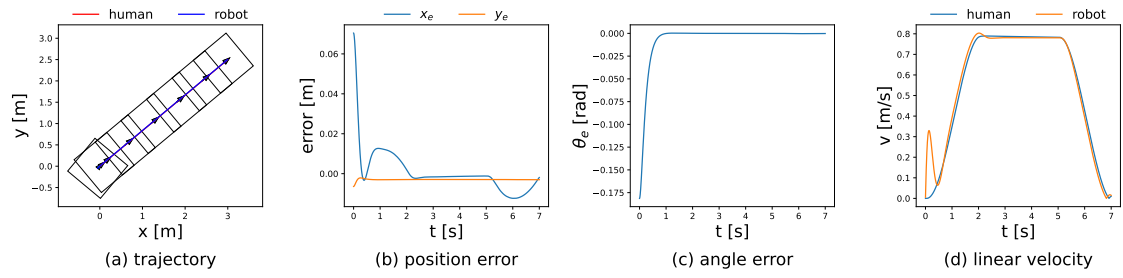
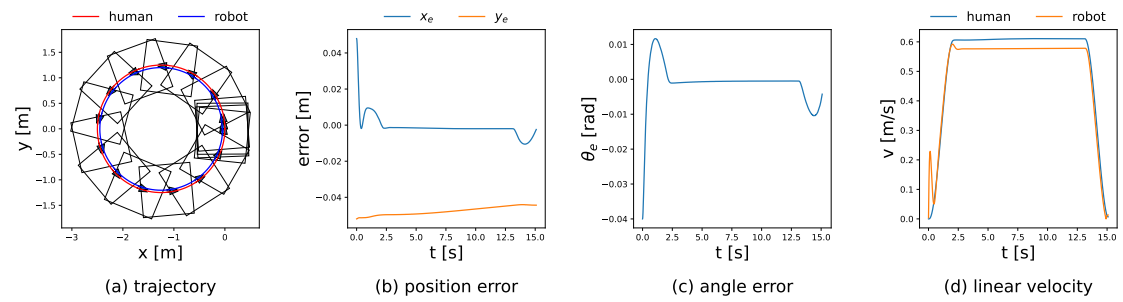


図 5.4: 人間の軌道：(a) 線、(b) 円



直線軌道



円軌道

図 5.5: シミュレーション実験の結果：(上) 直線軌道 (下) 円軌道

### 5.4.2 結果

各軌跡の大きさは、(5.2) と (5.3) で定式化されているように、実際のロボット実験と条件が合うように決定した (5.5)。図 5.4 はそれぞれの軌道を表している。

$$\begin{cases} \frac{x}{x_0} - \frac{y}{y_0} = 0 & (0 < x < x_0) \\ x_0 = 3.0, & y_0 = 2.5 \\ v_{max} = 0.78 \\ T_1 = 2.0, & T_2 = 5.0 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\begin{cases} r = 1.25 & (0 < \theta < 2\pi) \\ v_{max} = 0.6 \\ T_1 = 2.5, & T_2 = \frac{2\pi r - v_{max} T_1}{v_{max}} = 10.59 \end{cases} \quad (5.3)$$

シミュレーション環境では、制御のための設計パラメータを  $k_1 = 8.0, k_2 = 4.0$  と設定した。位置誤差が正常にゼロに収束するかどうかを確認するために、初期誤差に以下のようなゼロでない値の組を与える。 $x_r(0) = x_h(0) - 0.05, y_r(0) = y_h(0) - 0.05, \theta_r(0) = \theta_h(0) - 0.2$  である。

図 5.5 はシミュレーションの結果である。(a) は人間とロボットの軌跡である。(b) はロボットのローカル座標  $x_e, y_e$  の位置誤差である。(c) は角度誤差である。(d) は人間とロボットの線速度である。この結果から、2 輪の HCR はどちらの軌道でも歩行する人間に正しく追従していることが確認できた。

## 5.5 実機実験

ここでは、実装した HCR のプロトタイプを用いた一連の実験を行い、物理環境下での制御方法の評価する。また、ウェアラブルロボットのシナリオへの適用について検討する。

### 5.5.1 プロトタイプ実装

図 5.6 に実装した 2 輪 HCR を示す。正方形の構造体にはアルミフレームを使用し(1000 mm × 1000 mm)、トラスを挿入して剛性を高めている。移動機構やセンサの取り付けには、3D プリント部品、アクリル板、機械部品を使用した。ロボットの外径は 1300 mm × 1170 mm × 165 mm、内部で人間が歩ける範囲は、750 mm × 750 mm 程度の大きさである。ロボットの質量は約 14 kg である。用途に応じて、このフレーム構造の上にアクチュエータ (ロボットアームなど) やセンサを搭載することができる。

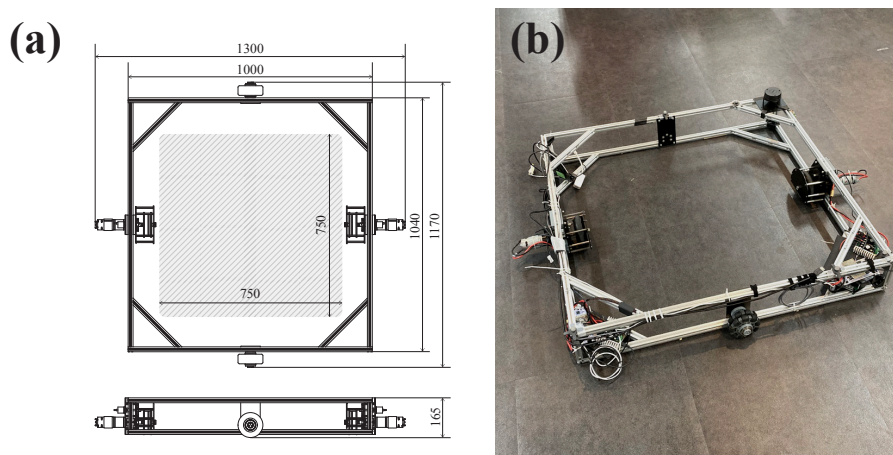


図 5.6: 二輪車 HCR の概要：(a)CAD 設計、(b) 実装されたプロトタイプの写真

2 輪駆動機構の構成要素として、直流ギヤードモータ (MABUCHI MOTOR RS-775、減速比 49:1、定格トルク 1.76 Nm、定格負荷回転数 375.5 rpm)、モータドライバ (Dimension Engineering Sabertooth 社製、駆動電流 32 A、定格電圧 33.6 V)、車輪 (直径 125 mm) が車輪ユニット 1 台に搭載されている。駆動輪のほか、受動回転するオムニホイールをロボットの

前面と後面に取り付けた。

制御系は ROS (Robot Operating System) [155] フレームワークを用いて実装されており、ノート PC (CPU: Intel Core i9-10980HK @ 2.4GHz) にインストールされた Ubuntu 20.04 上で動作する。移動機構の速度を制御するために、車輪の回転速度をエンコーダ (OMRON E6A2-C) で計測し、モータドライバのデューティ比をマイコン (STMicroelectronics NUCLEO-H7A3ZI-Q) で管理する。移動機構はマイコンを介して PC に接続されている。ロボットに搭載されたアクチュエータやセンサも ROS 上で管理される。また、位置追跡のためのモーションキャプチャシステム (OptiTrack) との通信も ROS を介して行われる。

実験中のロボットの電源は有線で配線され、スイッチング電源により AC100 V 電源から DC24 V に変換される。

### 5.5.2 実験設定

図 5.7(a) のように床に描かれた軌跡の上を人間が歩いた。各軌跡の大きさは、式 (5.2),(5.3) で表したシミュレーション環境と同じである。

キャプチャシステムは 6 台の OptiTrack カメラ (PrimeX 22) で構成され、100 Hz でターゲットとなる人間の位置と向きを取得する。人間の姿勢は、図 5.7(b) に示すように、腰に固定された基準トラッキングオブジェクトで追跡する。また、ロボットのフレームに取り付けたマーカによりロボットの姿勢を追跡する。

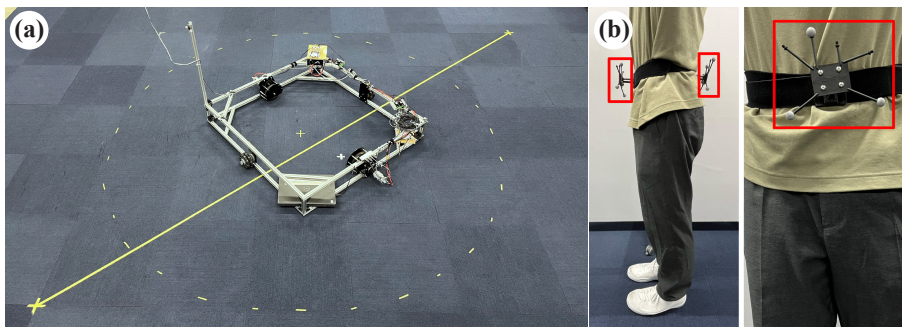


図 5.7: 実機実験の設定 : (a) 床に線と円の軌道が記されている。(b) 人間の腰部にトラッカーが装備されている。

人間の歩行は、初期地点で停止した状態から歩き始め、できるだけ速く歩き、軌道の終点でゆっくりと停止する。

## 5.5.3 結果

制御のための設計パラメータは、5.4のシミュレータ実験と同じ値、 $k_1 = 8.0$ ,  $k_2 = 4.0$ とした。

図5.8は実験結果である。プロットされたデータは全てモーションキャプチャから取得したものである。各グラフの軸は図5.5と同じである。

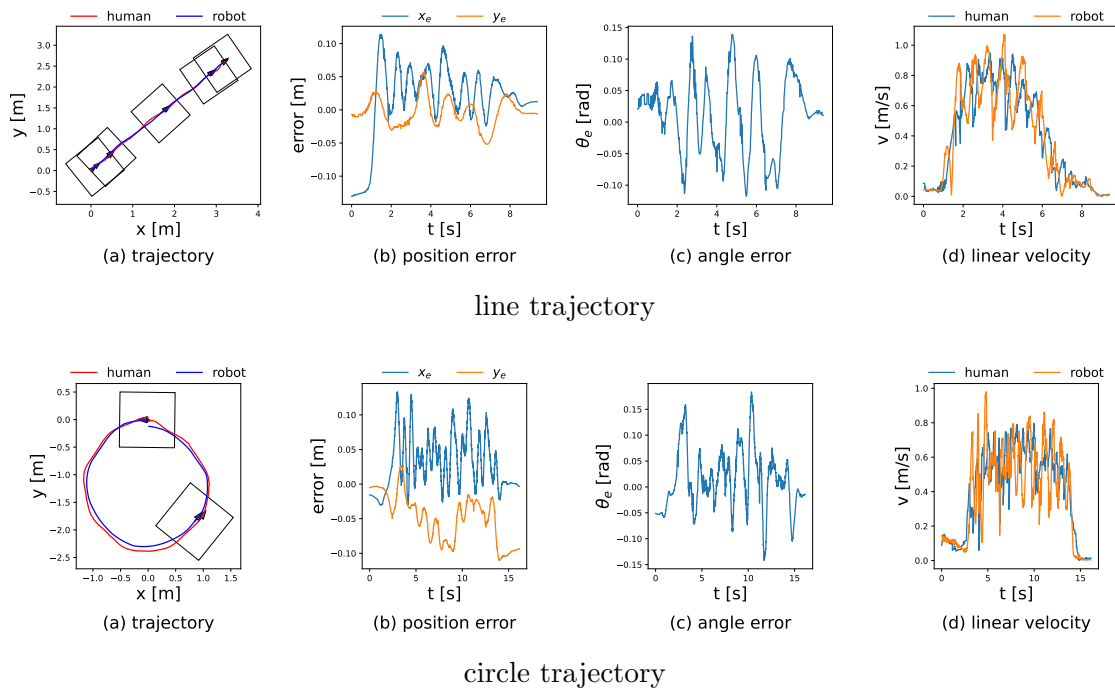


図5.8: 実機実験結果。(上) 直線軌道 (下) 円軌道

直線軌道では、HCRは人間にスムーズに追従し、最高速度が0.949 m/sに達した。また、 $x_e$ ,  $y_e$ ,  $\theta_e$ のRMSE値は、それぞれ2.1 cm, 12.9 cm, 0.0037 radであった。 $x_e$ の初期誤差は歩行開始直後から減衰し、その後13.7 cmのPeak-to-Peakで振動し、終点で収束することが示された。また、 $y_e$ ,  $\theta_e$ は歩行中に振動し、Peak-to-Peakはそれぞれ11.3 cm, 0.256 radであった。HCRの速度と人間の速度はほぼ同時で、両者は約1 Hzで振動していた。

円軌道の場合、人間の最大速度は0.797 m/sであり、HCRもその動きにうまく追従していることがわかった。 $x_e$ ,  $y_e$ ,  $\theta_e$ のRMSE値は、それぞれ1.6 cm, 0.5 cm, 0.0035 radであった。 $x_e$ ,  $y_e$ ,  $\theta_e$ は歩き始めてから振動し始めた。各誤差のPeak-to-Peak値は、それぞれ16.1 cm, 13.4 cm, 0.3182 radであることがわかった。また、 $y_e$ は終点での誤差が-9.3 cmであった。

HCR と人間の速度は線の軌跡とほぼ一致しており、両者は約 2 Hz で振動していた。

#### 5.5.4 デモンストレーション

ウェアラブルロボットを用いた人間拡張の観点から、HCR の適用可能性を探る。

図 5.1 は、SuperLimbs のユースケースを可能にするロボット構成を示している。2 輪の HCR の上部に 2 本のヒューマンスケールのロボットアームが取り付けられている。それぞれのアームはユーザーの左右に装着され、ユーザーが 2 本のロボットアームを腰に装着しているような状況を実現する構成となっている。ロボットアームユニットの総重量は 7 kg だが、アームを含めたロボット本体の重量はロボット自身が支えているため、ロボット内部のユーザーには負荷がかからない。

この構成は、図 5.9 に示すように、荷物を運ぶタスクに利用することができる。ユーザーは通常の歩行と段ボール箱の運搬を自然に行うことができる (図 5.9(a))。また、2 つのロボットアームを追加することで、ユーザーが箱を持つと同時に別のダンボール箱を運ぶことができる (図 5.9(b))、さらに、2 つのロボットアームは、ユーザーが箱を持つと同時に、別のダンボール箱を運ぶことができる。今回は、ロボットアームをリモートで操作したが、別の設定でユーザーが直接ロボットアームを操作することも可能である。既に SuperLimbs の研究分野で議論されている様々な種類のアプリケーション [82, 84] は、本システムで提供できると考えられる。

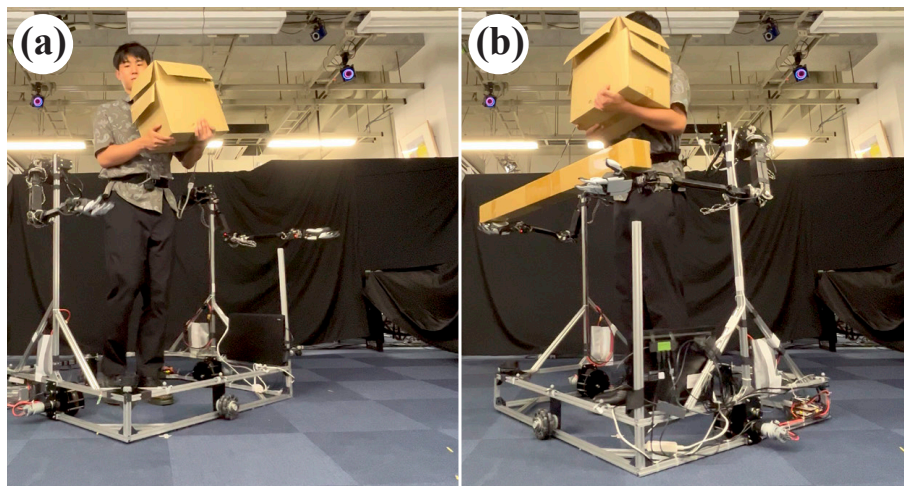


図 5.9: 実機によるデモ：2 本のロボットアームを持つ HCR は、(a) 物理的な接触なしに荷物を運ぶユーザーの動きに追従し、(b) ロボットアームで追加の荷物を抱えてユーザーの行動をサポートする。

## 5.6 考察

HCR の全体コンセプトや実装されたプロトタイプについて考察する。

### 5.6.1 システムの妥当性と最高速度について

実装したプロトタイプを用いた実験の結果、人間の通常歩行時の HCR の実現可能性について一定の妥当性を示すことができた。人間の歩行特性を考慮した方針を採用した制御設計により、二輪車 HCR を実現することができた。しかし、歩行速度に関わる新たな課題が発見された。

本システムでは、直線軌道上での最高速度として  $0.949 \text{ m/s}$  を計測した。この速度は、一般的な歩行速度  $1.36 \text{ m/s}$  [156] と比較して約 70% であり、基本歩行時の座標系一致機能を満たしていることが推測される。一方で、実験中の観察から、本システムにおけるロボットの最高速度の制約要因は、制御モデルの限界や移動機構の運動性能、フレームが見えることによるユーザー側の心理的影響ではなく、ユーザーの後足の踵がロボット背面側のフレームに接触することが原因であることが明らかになった。

人間は歩行速度が速くなると歩幅が広くなるため、接触を避けるために歩幅の大きさによってロボットフレームの前後長が決まる。足を前に踏み出し、後ろ足を引くという一連の全身歩行動作の中で、後ろ足は最後まで後方に残っているため、前足よりも後ろ足の位置がロボットとの接触に支配的であることが確認された。

本プロトタイプにおいて人間とロボットの誤差を収束させる制御は、想定される歩行速度で最適に動作した。今回は、腰に対して後方  $0.5 \text{ m}$  を超えない歩幅の範囲という制約によって最高速度の上限が決まった。この問題は、制御設計の改善ではなく、次に述べるハードウェアの改善で解決できる可能性がある。

### 5.6.2 ハードウェアの形状要因

2 輪の HCR プロトタイプの実装により、今後の設計に必要なロボット形状やハードウェア構成の知見を得ることができた。

フレーム形状については、基本的に前後長を長くした形状の方が、左右長を長くした形状よりも好ましい。特に、所望の歩行速度で想定した腰位置から後足の踵までの距離で寸法を決定することができる。これは前述したロボット最高速度の制限要因である後足とフレームとの接

触を考慮したものである。試作機は低重心を優先して高さを 200 mm 以下とし、剛性の高いシンプルな形状を採用したが、将来的には様々な形状を検討することが可能である。例えば、歩行器のような U 字型や、後脚との接触を避けるために後枠のみを上下方向にアーチ型にすることも選択肢に入る。これらは、前後長を大きく変えることなく、最高速度の制限を改善することができる。左右の長さについては、一般的な歩行動作の場合、本試作品よりも幅を小さくすることができる。しかし、2つの駆動輪の幅を小さくすることは、ロボットの旋回性能に影響し、移動機構への要求が高くなるというトレードオフの関係にある。

本研究では、独立 2 輪システムを用いて HCR のコンセプトを検証し、歩行状態での要求を達成した。本手法は、足とロボットの接触問題を解決することで、理論的には人間が走る状況においても実現可能である。しかし、人間の横方向の動きがより多く使われるような場面では、全方向の動きに対応した機構を用いる方が良い場合もある。このような機構の選択については今後の HCR の開発において検討する必要がある。

### 5.6.3 制御のためのセンシングと予測

本研究では、HCR の制御問題に着目し、信頼性の高い追跡を行うために、設置型モーションキャプチャを採用した。移動ロボットを最大限に活用するためには、ロボットに搭載されたセンサのみで人間とロボットの位置・姿勢を追跡できることが望ましい。具体的には、カメラ、深度センサ、距離センサをロボットの内側に向けて搭載し、ロボットフレーム内の人間の動きを計測することが望ましい。また、ロボットの外側には LiDAR などのセンサを搭載し、環境中のロボットの自己位置推定を行う。そして、これらのセンサデータを組み合わせることで、人間とロボットの相対座標と、環境における人間の絶対座標が得られる。

ロボットに搭載されたセンサからのデータを用いて全体の座標取得とロボット制御を行うためには、センサを含めたハードウェア設計や、必要なセンシング周波数、時間遅れ、位置誤差に関する検討が必要である。また、今回は位置のトラッキングデータをカルマンフィルタで速度に変換して速度制御を行った。将来的には人間の歩行動作以外の様々な動作を含めた予測モデルの検討も必要である。

## 5.7 本章のまとめ

本研究では、人間とロボットが非接触で座標を共有する HRI の新しいコンセプトとして、HCR を提示した。HCR コンセプトの検証の第一歩として、2 輪移動ロボットを用いた概念検

証プロトタイプを実装した。プロトタイプの実装では、人間とロボットの座標共有に SMC を適用し、シミュレータと実機ロボットを用いて、人間の歩行速度条件下で提案手法が適用可能であることを実証した。最後に、HCR にウェアラブルロボットアームを搭載し、ウェアラブルロボットが目指す人間拡張シナリオの実現可能性を探った。実ロボット実験を通じて、ハードウェア設計に関わる知見を得ることができた。しかし、本論文は HCR 研究の初期段階であるため、5.6 で示したように、実用化には様々な工夫が必要である。これらの課題や知見は、今後の研究に活かされるべきものである。

本章では、拡張身体部位の装着について、人間とロボットの座標を一致させるような追従制御を行うことで、物理的な接触を伴わずに装着ロボットの利点を得られる方法を提案した。特に、身体部位の認知要因である PPS 制約を満たしつつ、接触状態を設計できることを示した。本章で扱った設計要素を図 5.10 に示す。

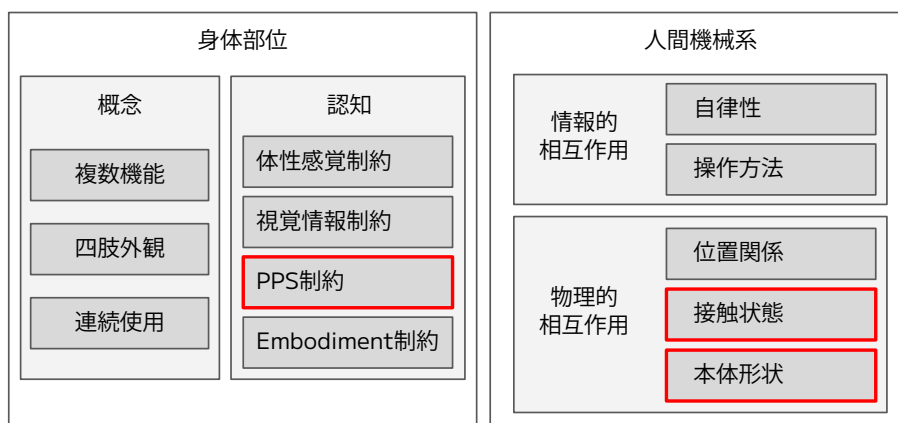


図 5.10: 5章で扱った設計要素

## 第6章

# 部位形状に着目したインタラクション設計

### 6.1 はじめに

本章では、拡張身体部位の物理的相互作用における本体形状について検討する。特に、部位形状に着目したインタラクション設計について述べる。SuperLimbsの研究では、新たに付加するための身体部位の形状が日々検討されている [82, 83, 84]。日常生活の中で作業を行うことを考える場合、複数の機能を実現するためには、部位形状の選択が重要になる。そこで、人間が行うインタラクションにおいて特に重要な働きをする手の部位に着目して、拡張身体部位の部位形状を考える。本章では TOMURA と呼称するシステムを提案する。概念検証プロトタイプとして、ロボットハンドと着脱機構を組み合わせたシステムを実装し、デザインスペースの整理およびユーザービリティ評価を行う。

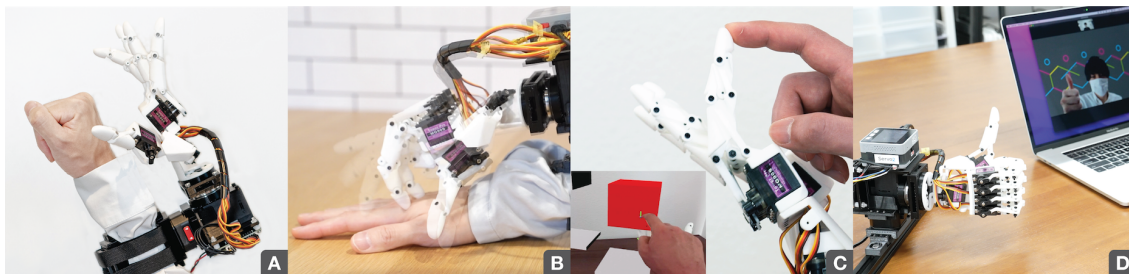


図 6.1: 装着可能なロボットハンド TOMURA : A) 人間の腕への装着。B) 手のひらを覆うように装着し、遠隔操作で手に触れる。C) 手のひらに乗せ、仮想の物体に触れているような感覚の提示。D) ビデオ会議中に机の上に置き、遠隔ユーザーのハンドジェスチャーを表現。

人間の手は、日常生活の中でさまざまな動作や行動を可能にする、非常に汎用性の高いものである [157, 158]。例えば、一日の中で人は手を使って様々な大きさの物を掴み、様々な道具を使い、複雑な考えや感情を身振りや手触りで伝えることができる。そのため、難しい仕事をするときに「手を貸してほしい」と思うことは少なくない。このフレーズは、しばしば他の人の必要性を示すために使われるが、人間拡張の分野の発展により、このフレーズをより文字通り解釈することができるようになる。

本章では、複数機能を想定した多用途なインタラクションを実現するために、汎用的な装着型ロボットハンド「TOMURA」(Tele-Operable MoUtable Robotic hAnd, Fig. 6.1A)のコンセプトを提案する。TOMURA は、人間の手の機能を再現することに加え、着脱や多方向への装着を可能にすることに重点を置いて設計された拡張身体部位である。このように TOMURA をデザインすることで、人間の手が持つ多彩な手先の機能を様々なシーンで活用できるようになることを目指す。

まず、提案するコンセプトで実現可能なインタラクションのデザインを整理し、導くために定義したデザインスペースも提示する。次に、TOMURA のプロトタイプの実装を紹介する。このプロトタイプを用いて、デザインスペースで定義された可能性を総合的に検討する。具体的には、触覚提示による感覚の伝達 (Fig. 6.1B)、複合現実感環境における仮想物体への触覚提示 (Fig. 6.1C)、遠隔操作者の手を表現する物理アバターへの TOMURA の適用 (Fig. 6.1D) などを実現した。また、ユーザー調査を行い、本コンセプトがどのように受け取られるのかフィードバックを集める。

我々が定義したデザインスペースは、拡張身体部位一般に適用可能であることに留意すべきである。関連研究で述べるように、本研究は形状変化デバイスを用いたタンジブルユーザーインタフェースとウェアラブルロボットを用いた人間拡張の研究とのギャップを埋めることにより、HCI とロボット工学の両方の研究者に洞察を提供することができる。

## 6.2 関連研究

TOMURA は、様々なインタラクションに利用できる装着型のロボットハンドである。そのため、形状変化インタフェース、ロボットインタフェース、ウェアラブルロボット、人間拡張など、幅広い研究分野との関連がある。ここでは、TOMURA の2つの主要な機能に対応する、最も関連性の高い2つの分野についてのレビューを行う。1つ目は、TOMURA のタンジブルインタフェースとしての機能に対応する、形状変化・ロボットインタフェースの分野。もうひとつはウェアラブルロボット分野であり、これは TOMURA の SuperLimbs としての

機能に対応する。

### 6.2.1 形状変化・ロボティックインタフェース

形状変化 (Shape-Changing) インタフェースは、典型的な触覚インタフェースで、インタラクションに応じて動的に形状を変化させることができるため、適応的アフォーダンスや複数の物体を模擬できるなどの利点がある [159]。形状変化するインタフェースは様々なものが提案・研究されており、設置型 (卓上型 [160, 161, 162] など) と携帯型 (手持ち型 [163, 164, 165, 166]、身体装着型 [167, 168] など) に大別される。これらのインタフェースは、現実世界での物理的なインタラクションを拡張したり、仮想現実 (VR) や拡張現実 (AR) で動的な触覚表現を提供するためによく使用される。

形状変換インタフェースを実現するための主要なアプローチとして、複数のアクチュエータを含むロボットシステムを用いて任意の形状を実現することが挙げられる [169]。例えば、Cubimorph [170] は、動的な関節機構を持つキューブ型モジュールで構成され、任意の形状間の変形を可能とするインタフェースである。LineForm [171] や ChainForm [172] は、複数のアクチュエータを直列に接続したアクチュエーションカーブインタフェースである。Swarm User Interfaces [173] は、複数の小型移動ロボットを用いて、ユーザーの入力を取り込み、システムの出力を卓上で提示するものである。ShapeBots [174] はこのアイデアを拡張し、各スウォームロボットにリニアアクチュエータユニットを追加することで、ロボットを長くし、テーブルトップに対して垂直にインタフェースの形状を変化させることができるようにした。

汎用性の高いインタフェースには、任意の形状を実現することが望ましいが、形状変化するインタフェースには、自然物を中心としたデザインが重要であることが示されている。特に、生物の構造を参考にすることは、その多くが形状を変化させるものであることから、非常に価値の高いものであることが示されている [175, 169]。例えば、PneUI [176] では、海洋生物から着想を得たソフトマテリアルを用いたインタフェースを提案している。また、人体をデザインに取り入れたものもある。例えば、MobiLimb [177] は、携帯端末に装着して I/O 機能を拡張する、小さな指のようなロボットマニピュレーターである。

形状変化インタフェースとして有力な候補となる人体部位のひとつが、人間の手である。手は複数の関節で構成され、様々な形状をとることができるため、汎用性が高く表現力が豊かである [178, 157, 179]。また、多くの日用品が人の手で使うことを前提に設計されていることを考えると、人の手を採用することで得られるメリットもある。その一例として、道具を活用するためのインタフェースを可能にすることが挙げられる。にもかかわらず、人の手の機能が

ら着想を得た形状変化インタフェースは少ないのが現状である。HCI 研究の領域では、一般的に手はユーザーがコンピュータに意思を入力するためのデバイス（タッチやジェスチャーなど [180, 181]）として捉えられている。これまで、人型ロボットの文脈を除いて、出力デバイスとして使用されたことはない。

本研究では、人間の手から着想を得て、汎用的で表現力豊かな形状変化インタフェースを作成することを目指した。具体的には、人間とコンピュータのインタラクションにおいて、入力と出力の両方の役割を果たすロボットハンドの実現を目指した。また、様々なシーンで利用できるように、設置型・携帯型のどちらでも利用できる汎用性の高いインタフェースを目指した。次に、人体形状に近いロボットシステムを扱う研究として、ウェアラブルロボットによるヒューマンオーギュメンテーションに関する研究を紹介する。

## 6.2.2 人間拡張のためのウェアラブルロボット

ウェアラブルロボットは、元来、義肢やリハビリテーションなどの支援技術として考えられてきたが、近年、人間の拡張技術として利用されるようになってきている [82, 182]。しかし、この領域にはまだ調査されていないトピックがいくつかある。

1つ目は、SuperLimbs のロボットハンドについてである。人間の手の機能的な能力を考えると、機能的なロボットハンドを身体に装着することで、人間の能力を補強することが期待できる。従来のロボット工学の領域では、ロボットハンドは生身の人間の器用さを再現し、遠隔操作やテレプレゼンスに利用できるほど進化している [183]。このような SuperLimbs ロボットハンドがあれば、文字通り「助かる手」を手に入れることができる。にもかかわらず、ロボットハンドを人体に装着することに焦点を当てた SRAs 研究はほとんどない。この点で最も注目すべきは、メディアアーティストのステラークによる「The Third Hand」\*1という作品である。同様のテーマに関する学術的な作品は、文献上では見当たらない。腕 [85] や上肢 [184] を追加する研究はよく見られる。しかし、これらの研究では、手の機能よりもユーザーの作業空間の拡張に焦点が当てられているため、エンドエフェクタは全体の議論のサブテーマであることが多い。

もう一つのトピックは、SuperLimbs が人体への装着可能な身体部位であることによってもたらされる機会の全範囲について、これまでの研究で十分に検討されていないことである。ほとんどの既存の研究は、(SuperLimbs で) 拡張されている状態のみを考慮し、SuperLimbs の取り付け、取り外し、または再装着の結果については調査していない。Orochi [185] は例外

---

\*1 <http://stelarc.org/?catID=20265>

で、シナリオに応じて1つのロボットユニットを身体の数々の部位に装着する使用法を研究している。しかし、全体として、SRAの着脱や再装着を伴うインタラクションは十分に検討されていない。

最後に、ハードウェアの設計や制御システムの提案は文献に多く見られるが、インタラクションやアプリケーションの設計に関する議論はまだ発展途上にある。アプリケーションの設計とインタラクションの設計が切り離されているケースも少なくない。例えば、SuperLimbsは、VRにおける触覚提示 [186, 187]、楽器演奏の拡張 [188, 189]、プログラマブルインタフェース [190, 191]、協調型テレプレゼンス [87] など、様々なアプリケーションへの応用が独自に提案されている。Vatsalら [81] のように、より包括的な研究も存在するが、提案システムのプロトタイプを用いたアプリケーションの探索的な研究にとどまっている。SRAで可能なインタラクションのデザイン空間を包括的に定義することは、SuperLimbsのある未来に向けてさらに研究を進めようとする研究者にとって、有用なツールとなり得るだろう。

本研究では、普遍的に装着可能な超小型ロボットハンドを提供することにより、身体機能を拡張し、新しいインタラクションを可能にする新しい方法を提示することを目指す。また、本システムを用いたインタラクションの包括的なデザイン空間を定義し、その中で着脱の可能性を検討する。このデザインスペースは、より一般的なSuperLimbsに適用可能であり、SuperLimbsを用いたインタラクションの包括的なデザインスペースを定義するための第一歩となるであろう。

### 6.3 デザイン空間

TOMURAは、手首に回転自由度を持ち、任意の位置・姿勢で任意の対象に容易に装着できるロボットハンドである。人体へ装着することでSuperLimbsとして扱えるが、環境への装着も可能である。手を使ってできる機能であれば、身体や環境のあらゆる部分に付与することが可能である。このように、人体や環境に対して容易に着脱できることは、TOMURAのデザイン空間やアプリケーションを従来のSuperLimbsのそれよりも拡張することになる。ここでは、TOMURAの入出力モダリティ、操作方法、出力先、設置場所などのデザインスペース(図6.2)を説明する。デザインスペースを構成する要素を図示することで、TOMURAが実現しうるアプリケーションやインタラクションを整理し、体系的な探索を支援する。また、TOMURAは着脱式であるが、TOMURAのデザインスペースは他のSuperLimbsのインタラクションやアプリケーションの整理、検討、デザインに役立つ。

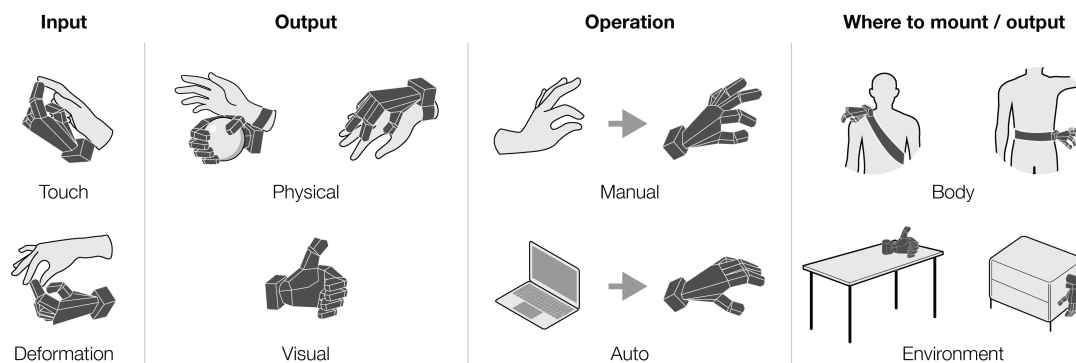


図 6.2: TOMURA のデザインスペース

### 6.3.1 入力モダリティ

人間の手（あるいは他の手足）の感覚能力について考える。触覚はもちろんのこと、固有受容感覚により、自分の手の姿勢を感じることができる。TOMURA は、この「タッチ」と「変形」という2つの入力機能を持っている。

#### タッチ

ロボットハンドの皮膚にタッチセンサを取り付けることは、ロボティクスにおけるセンシングを可能にするための一般的なアプローチである [192]。TOMURA も同じ手法でタッチセンサを搭載することができる。これにより、物体との接触を検知するだけでなく、一般的なタッチ式入力デバイスとして利用することができる。例えば、手のひらをユーザーの手のひらに、各指をユーザーの指に向けるように配置すれば、ボタンやキーボードとして機能させることが可能である。

#### 変形

TOMURA は、各関節から集めたセンサの値を使って、指の変形や動きを検出 [171] する。例えば、各関節にポテンショメータを使い、その位置を把握することができる。これにより、TOMURA は変形可能なインタフェースとして機能し、アフォーダンスが変化する。拳を閉じた状態であれば、手を握って力に相当する連続値を入力することができる。親指を伸ばせば、ジョイスティックのように使うこともできる [190]。

### 6.3.2 出力モダリティ

入力モダリティと同様に、出力として手をどのように使うか考える。手は一般的に物理的に物を操作するために使われるが、情報を伝えるためのジェスチャーにも使われる。TOMURAは、物理と視覚の2つの出力機能を備えている。

#### 物理出力

TOMURAは、物体の把持や操作に利用することができる。例えば、6番目の指のように、本来の手だけでは持てないものをつかむために使える [80, 193]。なお、この動作は、ユーザーが手動で操作する必要はない。つまり、TOMURAの入力機能（タッチや変形）を活用することで、自動的に把持や操作を行うことができる。例えば、手に触れると物体を掴み、動かしたり揺すったりすると物体を離すように、コンピュータを使ってTOMURAを制御することができる。

TOMURAの物理的な出力機能を用いて、被験者に触覚フィードバックを表示することができる。例えば、TOMURAはエンカウント型の触覚ディスプレイ [187] として、また、様々な時空間パターンでタップやストロークの触覚フィードバックを表示することができる [186]。このような触覚フィードバックは、着用者に触覚的な通知を表示するために使用することができる。

上記は一般的な触覚提示の例だが、TOMURAはその形状を活かして、愛情を伝えるようなインタラクションに効果的である。例えば、相手の指や手を触ることで、遠隔コミュニケーションを深めることができる。また、楽器の演奏など、指の動きを指示する際にも、人の手触りを感じられると喜ばれるかもしれない。

#### 視覚出力

TOMURAは、ロボットハンドの5本の指を使って、視覚情報を表示することができる。この手の形状は、単純な形状や物体では得られない、非言語コミュニケーションにおけるダイナミックなアフォーダンスを誘発する。例えば、親指を立てるジェスチャーやOKを出すジェスチャーなど、象徴的な手の動きを表示することができ、さらに話し言葉を手話に変換することもできる [194, 195]。また、手首を回転させることで、例えば、別れを告げる手を振るなど、ダイナミックな手の動きを表示することができる。

対人コミュニケーションだけでなく、「TOMURA」を身につけた人が探している物や行き

先の方向を示すのにも利用できる。

### 6.3.3 操作

TOMURA はユーザーが操作することが可能である。しかし、前述のように、TOMURA はセンシング能力を有しており、自律的に動作することが可能である。このように、TOMURA は、手動操作と自動操作の2つの機能を持つ。

#### 手動操作

TOMURA は、外部センシングデバイスを接続することで、手動で操作することが可能である。例として、動作入力デバイス（データグローブ<sup>\*2</sup>、ハンドエクソスケルトン<sup>\*3</sup>、フットウェア [13]、ジェスチャートラッキングデバイス [196] など）、筋電センサ [190] などが挙げられ、さまざまな研究 [82] がある。最もストレートなアプローチは、ユーザーの手の動きをキャプチャして、ロボットハンドで再現することだろう。しかし、手動操作は、より抽象的で象徴的なもの（例えば、筋肉を緊張させることで手を閉じさせるなど）でも達成することができる。

TOMURA は、それと相互作用する人、または別の個人によって操作され得ることに留意すべきである。遠隔コミュニケーションの場面では、例えば、遠隔地の操作者がロボットハンドを操作して、近くにいる人や TOMURA を装着している人と遠隔協力やコミュニケーションの一形態として対話することが可能である [87]。

#### 自動操作

また、コンピュータシステムによる TOMURA の自動操作も可能で、アバターとしての利用や触覚提示の利用も可能である。例えば、パソコンに接続することで、オフィスアプリケーションからの通知や、VR ゲームからの触感を提示することができる。また、センシング機能を備えているため、受けた刺激に自律的に反応し、単体で動作させることも可能である。

実際には、過去の作品で提案されたように、ユーザーが手動と自動をケースバイケースで混在させたり、切り替えたりするセミオート制御が一般的だと思われる [80, 197, 177, 184]。

---

<sup>\*2</sup> <https://www.manus-meta.com>

<sup>\*3</sup> <https://www.youbionic.com/handexohand>

### 6.3.4 設置箇所・出力対象

TOMURA の特徴は、身体だけでなく、環境にも装着することを想定していることである。同様に、身体に出力することも、環境に出力することも可能である。装着する場所や状況によって、TOMURA の機能は大きく変化する。

#### 身体

手首 [80, 190]、前腕 [184, 198]、肩、腰、脚など、体の部位に装着することで、SuperLimbs としての人間拡張機能を発揮することができる。TOMURA を体のさまざまな部位に着脱することで、現在提案されている SuperLimbs 多くの用途を網羅することができる。例えば、手首や腕など装着する場所によって、手 [80, 197, 193] や上肢 [184, 198] 付近の物体の把持や楽器の演奏 [188, 189] ができるようになるなど、人間の能力を拡張することができる。

#### 環境

机 [199] や壁、家具 [175] などの環境上に設置することで、TOMURA は設置型の形状変化するインタフェースとして機能し、動的なアフォーダンスが得られる。例えば、ビデオ会議中に机の上に TOMURA を設置することで、TOMURA を物理的なアバター [177] として利用し、遠隔地にいる人を表す視覚的・物理的な出力を表示することができる [161]。また、遠隔地にいる人が机上のオブジェクトを操作することができ、遠隔の身体部位として機能する。

## 6.4 実装

本コンセプトを実証するために製作した TOMURA のプロトタイプについて説明する。プロトタイプは、市販のロボットハンドに手首機構 (図 6.3A) とマウント機構 (図 6.3B、C) を搭載し、それぞれ 1 回転の自由度を持たせたものである。ここでは、TOMURA の手と 2 つのカスタムハードウェア機構、およびカスタム制御アーキテクチャについて説明する。

### 6.4.1 ロボットハンド

今回のプロトタイプには、市販のロボットハンド\*<sup>4</sup>を使用した。選定理由は、5本の指を独立して制御でき、軽量なためである。このロボットハンドは、指を動かすために6つのサーボ

---

\*<sup>4</sup> <https://www.youbionic.com/avatarhand>

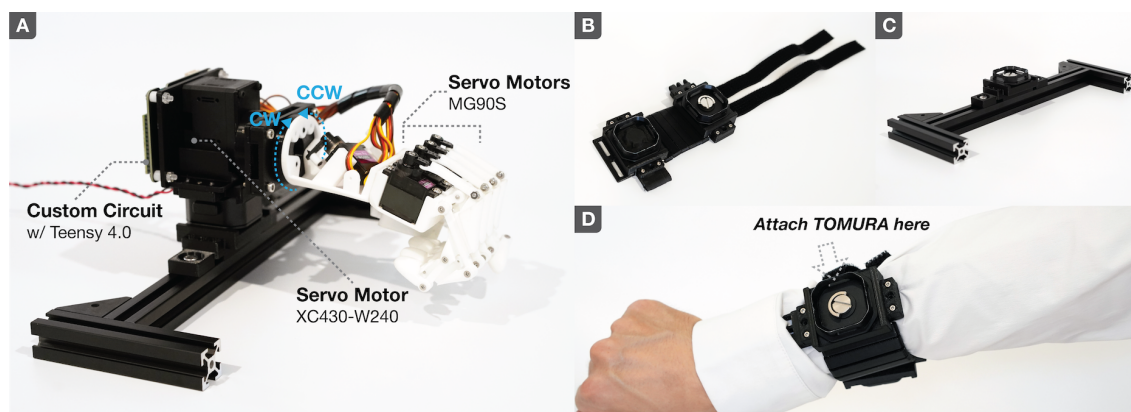


図 6.3: TOMURA の全体設計と構成要素。A) スタンド型マウント機構に載せた TOMURA の外観。B) ベルト型マウント機構。C) スタンド型マウント機構。D) ベルト式マウント機構をアームに取り付けたところ。マウントのクイックリリース部に TOMURA が取り付けられている。

モータ (MG90S)<sup>\*5</sup>を使用している。親指は 2 自由度、そのほかの各指は 1 自由度である。各指は約 2.5 N の力を出力することができる。このハンドには、ハンドを回転させるための手首機構が取り付けられている。

#### 6.4.2 手首機構

手首機構は、サーボモータ、スタビライザ、ロボットハンドの基部に接続されたクイックリリースパーツから構成されている。この機構により、ハンドのロール軸 (Fig. 6.3A の CW と CCW の矢印) に沿って回転し、任意のヨー方向で任意の取り付け機構に素早く着脱することが可能になっている。

ロール軸の回転は、サーボモーターとスタビライザーで実現している。サーボモーターは XC430-W240<sup>\*6</sup>を使用し、12 V で最大 70 rev/min の速度で 360° 回転させることができる。このモーターは、試作品に使用したロボットハンドを任意の位置に回転させるのに十分なトルクを発揮する。サーボモーターとロボットハンドの取り付け部の間にはクロスローラベアリングを挿入し、このベアリングが回転軸を安定させる役割を担っている。

また、どのようなヨー方向でもマウント機構に素早く取り付けられるよう、クイックリリースカメラアダプターセット<sup>\*7</sup>を使用した。そのため、手首機構にはロボットハンドと直交する

<sup>\*5</sup> <https://www.towerpro.com.tw/product/mg90s-3/>

<sup>\*6</sup> <https://manual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xc430-w240/>

<sup>\*7</sup> <https://www.ulanzi.com/products/ulanzi-claw-quick-release-system-generation-ii>

ように1つのアダプタが組み込まれ、マウント機構にはもう1つのアダプタが組み込まれている。マウント機構の詳細については、6.4.3で説明する。

手首機構の部品をつなぐ構造部品や、手首機構と手や制御回路をつなぐ部品は、すべて3DプリントされたPLAで作られている。手首機構、制御回路、ロボットハンドの合計重量は420gである。手首機構のサイズは、ロボットハンドを含まない状態で95mm × 75mm × 80mmである。指を伸ばしたロボットハンドを含むサイズは265mm × 130mm × 80mmである。

### 6.4.3 マウント機構

マウント機構は、ロボットハンドを搭載した手首機構を人体や環境に固定するために使用される。クイックリリースアダプタ部（手首機構に内蔵されているものと対になるもの）と身体・環境との固定手段から構成されている。これにより、手首機構は対象物（人体や環境）に装着されるマウント機構に迅速かつ容易に着脱することができる。人体や環境への装着を考慮したマウント機構は、2つのバリエーションを開発した。

最初のバリエーションは、Fig. 6.3Bに示すようなベルトタイプのマウント機構である。ベルトは、3Dプリンターで製作したリンクをワイヤーでつないだものである。ベルクロストラップでベルトを体に固定する（図 6.3D）。柔軟性があるため、さまざまな体型やサイズにフィットさせることができる。そのため、手首、足首、肩、腰など、様々な部位に着脱部を配置することが可能である。さらに、クイックリリース部はヨーの向きを自由に変えることができ、手首機構はロールの向きを連続的に変えることができるため、一箇所に取り付けることで、様々な構成が可能になる。例えば、ベルト式マウント機構を手首に巻き付けることで、ロボットハンドを手の甲に被せたり、腕の甲に被せたり、手のひらに向けたり、手のひらと並べたりすることが可能である。リリースプレートを組み込んだベルト式マウント機構の重量は94gだが、ベルトの長さによって微妙に変化する。

2つ目のバリエーションは、環境への取り付けを考慮したスタンドタイプのマウント機構である。アルミフレームのベースに3Dプリント（PLA）したアダプターを介してクイックリリースパーツを取り付ける構成となっている。例えば、図 6.3Cのように机の上に置くことができる。

## 6.4.4 制御アーキテクチャ

TOMURA は、カスタム基板上的マイクロコントローラで制御され、すべてのシステム I/O を処理する。図 6.4 にシステムアーキテクチャの概要と TOMURA が利用できる全ての I/O を示す。ロボットハンドと手首機構を制御するマイクロコントローラは Teensy 4.0<sup>\*8</sup>である。この Teensy は、Bluetooth モジュール (RN42<sup>\*9</sup>)、モータドライバ、3つのタクトスイッチ、電圧調整・分配回路をコンパクトにまとめたカスタム基板に搭載されている<sup>\*10</sup>。マイコンとサーボモータ間の情報の受け渡しは、シリアル通信で行っている。TOMURA の制御システムは、USB、Bluetooth、2つの GPIO ピンによるシリアル通信にも対応している。

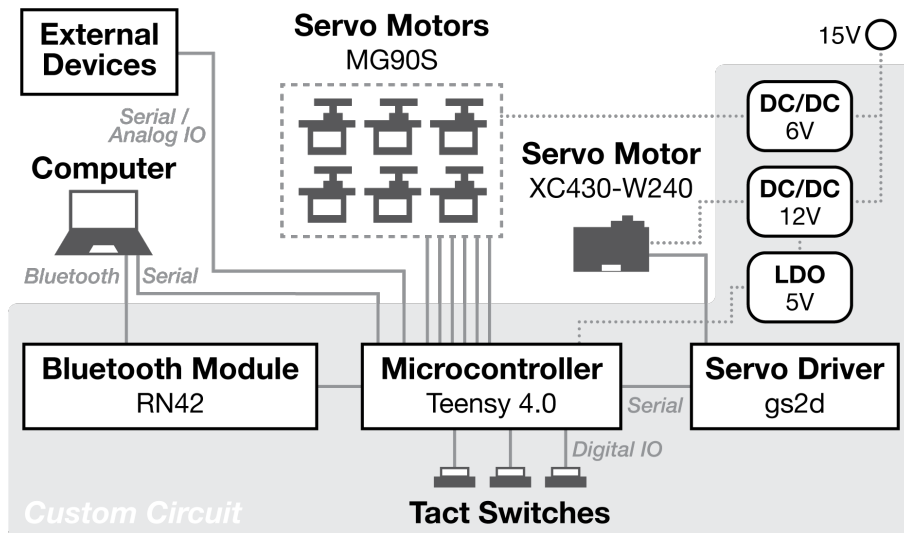


図 6.4: TOMURA の制御アーキテクチャの概要

USB や Bluetooth ではコンピュータと接続して汎用的な演算や制御が可能だが、GPIO ピンを2つ搭載することで、外部の制御機器（例えば、外骨格型の指の動きを捉える装置）で使われる手の動きを制御するソックス型の装置 [13] と直接接続することができる。また、追加センサを用いた入力（タッチや変形など）の取り込みも可能である。これにより、TOMURA をスタンドアロンで動作させることができ、携帯性を向上させることができる。

TOMURA のファームウェアはプログラミング言語 Arduino で書かれている。ロボットハ

\*8 <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>

\*9 <https://www.microchip.com/en-us/product/RN42>

\*10 最初のプロトタイプは、M5Stack と市販のサーボ制御基板を使用して動作させ、カスタム基板を作成することで軽量化・小型化を図った。

ンドのサーボモータを制御するために Servo ライブラリ<sup>\*11</sup>を、手首機構のサーボモータを制御するために gs2d ライブラリ<sup>\*12</sup>を使用した。

## 6.5 アプリケーション

TOMURA はウェアラブルロボットハンドであるため、これまでの SuperLimbs アーム [85, 13, 87] や SuperLimbs フィンガー [80, 189, 193, 200] と同様に、人間の把持動作や物体操作の支援に利用することができる。しかし、これらの用途に限定されるものではない。TOMURA は、人間の手を持つ表現力や多様性を活かし、他にもさまざまな用途に利用することができる。さらに、身体や環境のさまざまな位置や方向に装着できるため、その汎用性を活かしてさまざまなシーンで活用できると考える。TOMURA で実現可能なインタラクションやアプリケーションを整理するために、6.3 ではコンセプトとデザインスペースを定義した。ここでは、定義したデザインスペースから導き出されるいくつかのアプリケーションを紹介する。また、関連する研究をもとに、TOMURA を人間の拡張手段として用いるアプリケーションと、TOMURA をインタフェースとして用いるアプリケーションの2つに分類し、それぞれのアプリケーションを紹介する。

### 6.5.1 TOMURA による人間拡張

#### 把持補助

把持を支援するために、人はまず、自分の手の周りに余分な手を置くことを考えることができる。例えば、手首に装着したロボットハンドを操作することで、自然な手とロボットハンドの両方を使い、自然な手だけでは掴みにくい大きなものや多くのものを掴めるようになる。また、両手を使うときに、手首に装着したロボットハンドで一時的に物を保持することもできる(図 6.5 上)。

しかし、物体を把持する能力は、身体の他の部分にも有益である。他の部位に装着した場合、装着したロボットハンドは、装着者の手の周辺にない物体を保持したり、持ち上げたりするために使用することができる。例えば、脚に装着して低い場所にある物を拾ったり、腰に装着してキャビネットにある物をつかんだりすることができる(図 6.5 下)。

---

<sup>\*11</sup> <https://github.com/arduino-libraries/Servo>

<sup>\*12</sup> <https://github.com/karakuri-products/gs2d>

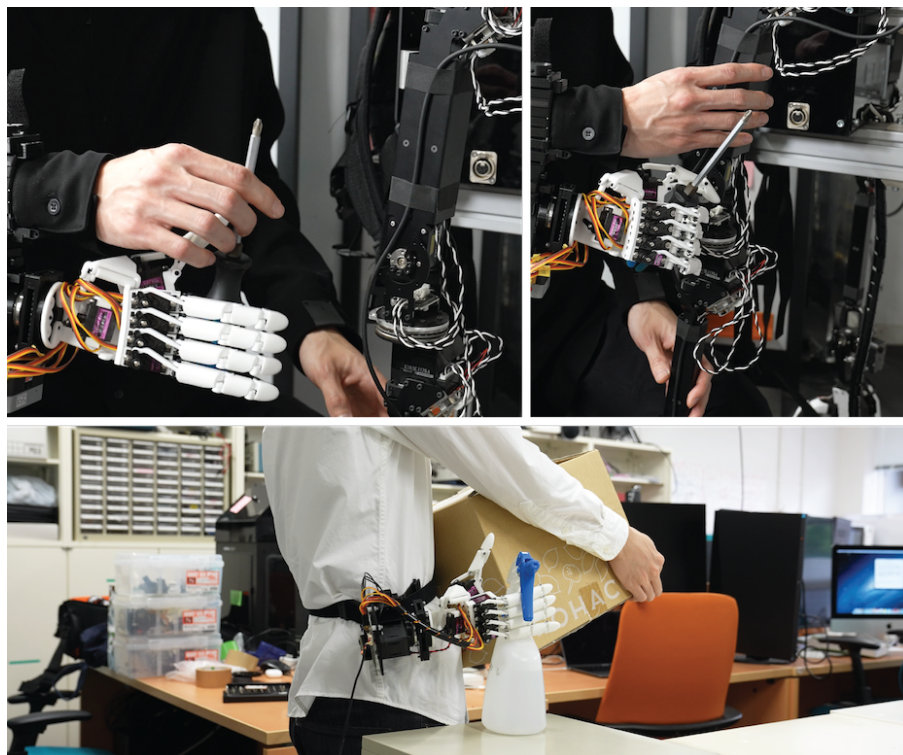


図 6.5: 把持補助：(上) 両手で対象物を操作する必要がある場合、腕に装着した TOMURA に道具を渡すことができる。(下) 両手がふさがっている状態で物を操作する必要がある場合、腰に装着した TOMURA で物をつかむことができる。

### コミュニケーション

TOMURA は、Fusion [87] などのように、他者との遠隔コミュニケーションに利用することができる。例えば、手の甲を覆うようにロボットハンドを配置することで、手に触れる感覚を再現することができる。遠隔地にいるユーザーは、装着者の手や指に遠隔で触れることで、感情を伝えるために使用することができる (図 6.1B)。

また、TOMURA を机の上に置くと、最小限のテレプレゼンスロボットとして利用できる (図 6.1D、図 6.6)。直接的な例としては、遠隔会議において、遠隔地にいる人の手のひらを表現することができる。これにより、遠隔会議では見ることができない物理的な握手や手振りを見ることができ、遠隔地にいる人の臨場感を高めることができる。

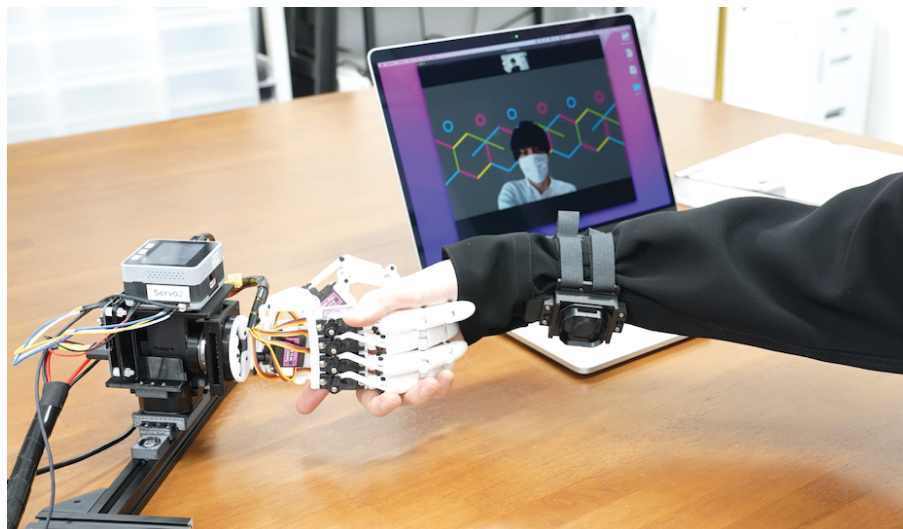


図 6.6: テレプレゼンスハンドロボット：TOMURA は、ビデオ会議中に遠隔地にいる人の手を表現し、物理的なインタラクションを実現する。

## 6.5.2 TOMURA によるインタフェース

### 通知

TOMURA は、ロボットの指が体に触れるように装着することで、物理的な通知を行うことができる。その一例として、腕の側面に向けて手首に装着することで実証できる (図 6.7 上)。また、背中や肩に装着して、肩や腕をたたくこともできる。また、机や椅子などの環境に装着することで、人間に通知することも可能である。(図 6.7 下)。

### MR における触覚提示

TOMURA は、ロボットハンドを手のひらに向けることで、MR の中で仮想物体に関連した触覚刺激を提示するウェアラブルな遭遇型触覚ディスプレイ [187] として利用することができる。このシナリオでは、ロボットハンドの指が動いて、仮想物体に触れた人間の指に触れることになる (図 6.1C)。この用途で TOMURA を使うメリットは、着脱が容易なことである。MR の現場では、仮想の物体だけでなく、現実の物体にも触れる必要がある場合がある。そのような場合でも、すぐに取り外すことができ、シームレスなインタラクションを実現することができる。



図 6.7: 通知：(上) カレンダーの通知が届くと、触覚刺激により装着している人に次の予定を知らせる。(下) メールが届くと、肩を叩いて通知する。

### アダプティブスタンド

手の持つ多様な把持力を利用して、さまざまなものを保持するデスクスタンドとして利用できる。対象物があると、その形状や特徴に合わせて、手や指の位置や姿勢を変化させる。例えば、指を曲げてイヤホンケースを挟んだり (図 6.8A)、スマートフォンの画面を見やすく傾けたり (図 6.8B)、親指を伸ばして時計のベルトをかけたり (図 6.8C)、葉書を指で挟んだり (図 6.8D) することが可能である。同様のコンセプトは以前にも提案されている [177] が、TOMURA は手全体であるため、持ち方のアフォーダンスがより多様になるという利点がある。

### コントローラー

これまでの応用例では、主に出力デバイスとして利用してきたが、人間とコンピュータのインタラクションを仲介する入力デバイスとして利用することも可能である [190]。例えば、ロボットハンドの指先に圧力センサを搭載することで、TOMURA をボタンやキーボードとして利用することができる。同様に、指に沿って歪みセンサを搭載したり、指に使われているサーボモータの角度を計測することで、ジョイスティックとして利用することができる。こ

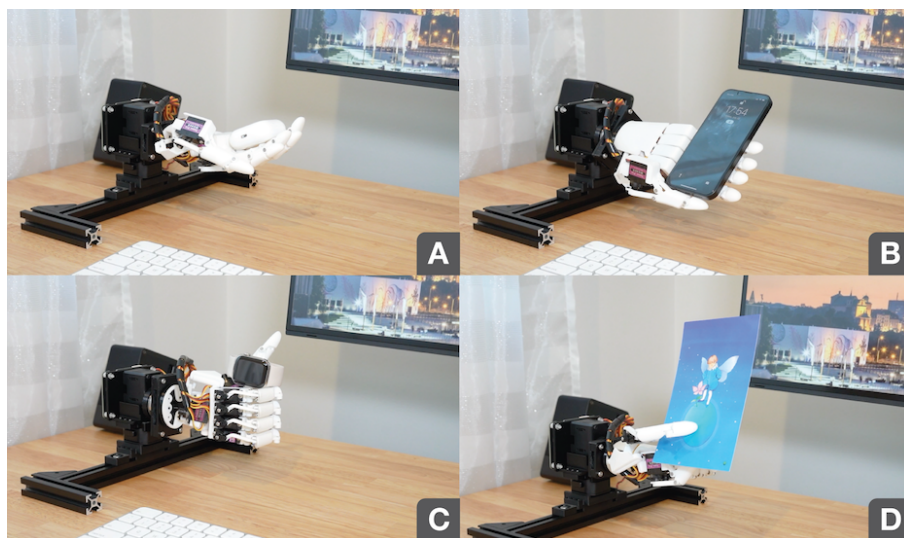


図 6.8: アダプティブスタンド：TOMURA は、保持するものの形状や特性に適應する。(A) ワイヤレスイヤホンケース、B) スマートフォン、C) スマートウォッチ、D) ポストカード)

れにより、様々な場面でデジタルメディアの入力に利用することができる。図 6.9 に、2本の TOMURA で画面内のキャラクターを操作している例を示す。両腕に装着した TOMURA で画面上のキャラクターを操作している。左の TOMURA の親指には圧力センサが取り付けられており、これがボタンとして機能し、キャラクターをジャンプさせることができる。右の TOMURA の親指にはサーボモーターが取り付けられており、サーボモーターの角度が変わるとキャラクターが移動するジョイスティックとして機能する。



図 6.9: コントローラー：TOMURA を両腕に装着し、画面内のゲームキャラクターを操作する。

## 6.6 ユーザー調査

我々は、コンセプトとデザイン空間の可能性をさらに追求するために、コンセプトに対するユーザーのフィードバックを集めた。フィードバックは、我々の大学のオープンキャンパスイベントで TOMURA の使用を体験した 50 人以上のサブセットから集めた。

TOMURA の狙いや特徴など簡単な説明を受けながら、事前に考えてきたアプリケーションの一部を映像で紹介する（想像力が偏らないよう、一部のアプリケーションのみを紹介した）。その後、ベルト型マウントを参加者の手首に装着する。ここまでスタンド型マウントに載せていた TOMURA を、スタンドから取り外し、いくつかの向きで来場者に装着する。外骨格型入力装置により、参加者は左手で自由に TOMURA を操作する体験ができる。

TOMURA を体験した後、参加者は以下の記述に対してどの程度同意するか、5段階のリッカート尺度（強く同意する：5、強く同意しない：1）で回答する。

- Q1. 本システムが好きですか？
- Q2. 本システムが便利だと思いますか？
- Q3. 本システムを面白いと思いますか？
- Q4. 本システムをしばしば利用したいと思いますか？

さらに、「TOMURA」を自分の身体、他人の身体、環境のどこに装着したいかについての以下の質問について、参加者は回答する。

- Q5. 自分の身体で本システムを装着したい部位はありますか？
- Q6. 他者の身体で本システムを装着したい部位はありますか？
- Q7. 身体以外に本システムを搭載したいと思うところはあるですか？

### 6.6.1 結果

アンケートには 26 名（男性 16 名、女性 9 名、無回答 1 名、9 歳から 59 歳）の参加者が回答した。図 6.10 は、その回答の概要である。この結果から、本機は概ね好印象を持たれていることがわかる。回答者の約 85% がデバイスを気に入った（Q1）、約 80% がデバイスを便利だと感じた（Q2）、約 96% がデバイスを面白いと感じた（Q3）となっている。しかし、「よく使いたい」と回答したのは半数の 58% にとどまった。また、回答者の中には、追加ハンドがあ

ると便利という意見や、TOMURA の可能性を評価する意見もあったが、今回使用したロボットハンドの精度や堅牢性、応答性の低さ、重さなどが、継続使用に関する低いスコアになっていることがわかった。これは、今回のプロトタイプのパフォーマンスの低さによるものと考えられる。この点については、6.7 でさらに検討する。

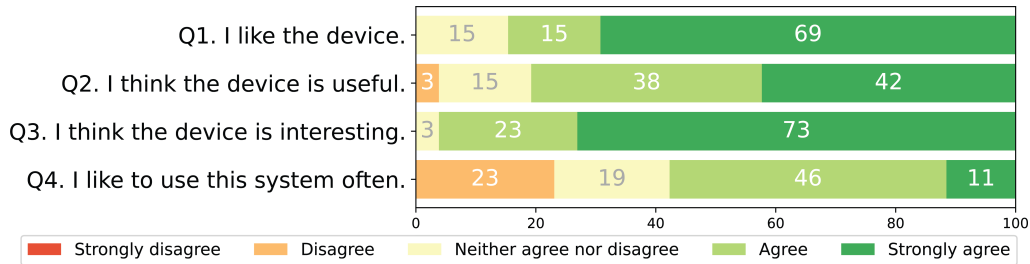


図 6.10: 5 段階リッカート尺度の質問に対する回答の要約：ほとんどの質問で、全体的に肯定的な回答が得られた。しかし、「使いたい」という質問に対しては、現在の試作機のシステムパフォーマンスの低さ（低精度、低堅牢性、低反応性、重さ）により、高いスコアを得られないことが示唆された。

デバイスを装着したい部位（Q5、Q6）を聞いたところ、自分自身（12 件）、他人（11 件）ともに「腕」という回答が最も多かった。両手がふさがっているときに物を持ったり、他の人を介助するために使いたいという回答が多くあった。

自分や他人の体の肩（それぞれ 7 件、5 件）や背中（それぞれ 7 件、5 件）への装着を希望する回答も多くあった。自分の体に装着する場合、肩や背中に装着した方が、手が視界に入らないので集中しやすいかもしれないという意見があった。肩に装着した方がファッション性が高いのではないかという意見、背中に装着することで、自分の背後で作業したり自分の背中を掻いたりすることが可能になるとの意見もあった。また、他人の体に装着する場合は、肩や背中に装着して、肩を叩いて存在を知らせたり、背中をさすってコミュニケーションを図りたいという回答があった。

足の指ではつかめないものや、地面から低いものをつかむために、足など自分の体に装着したいという回答があった（7 件）。一方、他人の身体については、足への装着希望率が低い（1 件）。他の身体部位については、他人から認識されやすい胸に装着したいという意見もあった。また、手に装着することで、挨拶や感情表現などのエージェントとして活用できるのではないかという意見もあった。

TOMURA の設置場所として、「電車やバスの荷物置き場に設置して、荷物を運べるようにしたい」（Q7）、「楽器に設置して、遠隔演奏をしたい」（Q8）などの意見もあった。「電車や

バスの荷物置き場に取り付けて荷物を運ぶ」、「楽器に取り付けて離れた場所で演奏する」、「床に設置して床を拭いてもらう」、「椅子の背もたれに取り付けて、肩を揉みながら仕事をする」、「スクリーンの前に置いて、スクリーンに映った人物と遠隔で握手する」なども挙げられた。遠隔握手に関する既存の研究 [201] は想定していたものの、回答者からの提案は、デバイスを周囲に取り付けて物を持つ、デバイスを楽器に取り付ける、デバイスを新しいマッサージ機や掃除機として使うなど、いくつかの新しいアイデアが提供された。

## 6.7 考察と今後の展望

我々は、SuperLimbs や形状変化インタフェースに関する過去の研究を参考に、TOMURA のデザイン空間を定義し、いくつかの選択的なアプリケーションシナリオの実装とユーザー調査を通じて、人間拡張やインタフェースとしての利用可能性を示した。ここでは、我々の実装とユーザー調査の限界について概説し、現在のデザインと実装を改善するための今後の課題について議論する。

### 6.7.1 ユーザー評価

本研究では、初期のプロトタイプに関するユーザーのフィードバックを収集するために、予備的なユーザー調査を実施した。その結果、私たちのコンセプトやデバイスは、好感度、有用性、興味などの点で回答者から高い評価を得ることができた。一方、使用したロボットハンドの機能性やデバイスの重量など、プロトタイプに対する懸念から「よく使いたい」という感想は少なかった。今後は、性能・機能の向上はもちろん、使い勝手の定性的な評価も行っていきたいと考えている。また、提案した応用シナリオごとに、デバイスの限界と適用性を見極める必要がある。例えば、触覚フィードバックによる意思伝達（TOMURA が表現できる触覚刺激の強さや種類など）、仮想オブジェクトの描画、臨場感の表現（物理アバターやエージェントとして機能する場合）に対して、デバイスがどの程度有効であるかを調査する。そのほかに、将来的には、より幅広い応用シナリオを模索するためのワークショップ型研究などが考えられる。

定性的ではあるが、我々が提案したアプリケーションのいくつかについて、すでに肯定的なフィードバックを得た。例えば、「第三の手があると便利」「離れた場所から教える」「触覚インタラクションでコミュニケーションを取りたい」といったコメントがある。同時に、同じようにユーザーの声から新しいアプリケーションのアイデアもいくつか提案された。新しいア

アプリケーションもすべて私たちが定義したデザインスペースで説明できることから、私たちのデザインスペースの定義が一般的なものであることが示唆される。今後、新たに提案されたアプリケーションの実装と、それに対応した実用性を調査するためのユーザー調査を、将来の研究課題として検討する。

### 6.7.2 ロボットハンド

TOMURA のデザインスペースは広いが、物理的なプロトタイプでは一部の応用シナリオのみを示した。これは、TOMURA のプロトタイプで使用したロボットハンドの器用さに限界があるためである。今回使用したロボットハンドは、6つのアクチュエータを持ち、人間の手の最低限の機能を実現したに過ぎない。しかし、将来的には、技術の進歩により、より器用なロボットハンドが容易に実現できるようになるであろう [183]。例えば、2005年には、重さ 500 g 以下、19 関節、8 アクチュエーター、劣駆動のロボットハンドがすでに開発されている [202]。このようなロボットハンドを利用することで、より幅広い用途（例えば、楽器を演奏するための指の動きの指示、話し言葉の手話への翻訳 [194]、ペンを使って紙にメッセージを書く [177] など）で、デザイン空間の全てをカバーできると考えている。

### 6.7.3 技術的課題

このコンセプトの可能性を実現するためには、ロボットハンド以外の改善も必要である。今回の実装では、どのような向きでもハンドを回転・保持できるよう、十分なトルクを確保するため、高トルク出力のサーボモーターを使用した。しかし、その分、装置の大きさや重量が大きくなった。そこで、ハンドを回転させるのに必要なトルクを算出し、手首機構に使用するサーボモーターを最適化することで、装置の小型・軽量化が可能になると考えている。現在は積極的に検討していないが、モーターの回転数もこの最適化の一因になる可能性がある。現在の応用シーンでは、デバイス装着後に手首機構を回転させることは想定していないが、今後追加される応用シーンでは、手首機構の回転速度が低いと影響を受ける可能性がある。

もう一つ必要な改善点は、バッテリーの搭載である。現在の実装では、デバイスの中にバッテリーが含まれていない。単体で動作し、真のポータビリティを実現するためにはバッテリーは必須である。今回、すべての指を動かしたときの消費電力は、15 V で約 0.6 A であった。したがって、一般的なクアッドコプターに使用されているリポバッテリー（14.8 V, 450 mAh, 70 g）で、すべてのサーボモーターを約 45 分間連続動作させることが可能であると推定している。

#### 6.7.4 複数台の TOMURA

最後に、今回は1台の TOMURA (6.5.2 のコントローラを除く) を利用したアプリケーションのみを検討したが、複数の TOMURA を同時に利用することによる可能性についても今後考えられる。2つ、3つだけでなく、多数の TOMURA を同時に同じ環境に装着・設置することは可能だが、すべての TOMURA を効果的に利用するためには、インタラクションの設計に工夫が必要である。一人のユーザーが数十の手を使って同時に独立した作業を行うためには、制御方式を慎重に設計する必要がある。また、一人の人間の動きを多くの人に同時に伝えるというような、よりシンプルな使い方も考えられる。例えば、1人のピアノの先生の指の動きを、TOMURA を装着した複数の人が同時に体験する状況が考えられる。また、もっと奇抜なもの、例えば、たくさんの手でベルトやベストを作成し、持ちたいものを何でも持てるようにしたり、影絵のような手法で複数の手の表現力を組み合わせて、任意のアバターを作ったりすることもできるかもしれない。このような、複数の TOMURA を同時に使用する応用シーンは、6.7.1 で述べたワークショップ形式のユーザー調査を通じて将来的に探索・収集したいと考えている。

### 6.8 本章のまとめ

本研究では、汎用的なインタラクションを実現するユニバーサルマウント型ロボットハンド「TOMURA」のコンセプトを提案した。そして、TOMURA のデザインスペースを定義し、人間拡張のための SuperLimbs や人間とコンピュータのインタラクションのためのインタフェースとしての TOMURA の使用に焦点を当てた。また、本コンセプトの可能性を示すため、市販のロボットハンドを用いて TOMURA の概念実証用プロトタイプを開発した。プロトタイプは、ハンドのロール方向を変更するための手首機構と、ハンドを人体や環境に固定するためのマウント機構(4つのヨー方向)を備えている。このプロトタイプをさまざまな応用シーンで使用し、私たちの提案がどのように私たちの身体や日常生活を拡張できるのか、具体的な事例を紹介した。その後、50名以上のユーザーにプロトタイプを体験してもらい、私たちのコンセプトとプロトタイプの可能性と限界をさらに探った。現在のプロトタイプの限界に関する懸念はあるが、私たちのコンセプトとプロトタイプは全体的にポジティブに受け止められていることを確認した。

本章では、位置関係や本体形状に関する設計要素について、人間の手という身体部位形状に

着目してインタラクションの検討を行った。また、5本指を有するロボットハンドを用いることで、より人間の手の形に似た構造を採用し、四肢外観や視覚情報制約といった身体部位の要因を満たす設計を行った。本章で扱った設計要素を図 6.11 に示す。

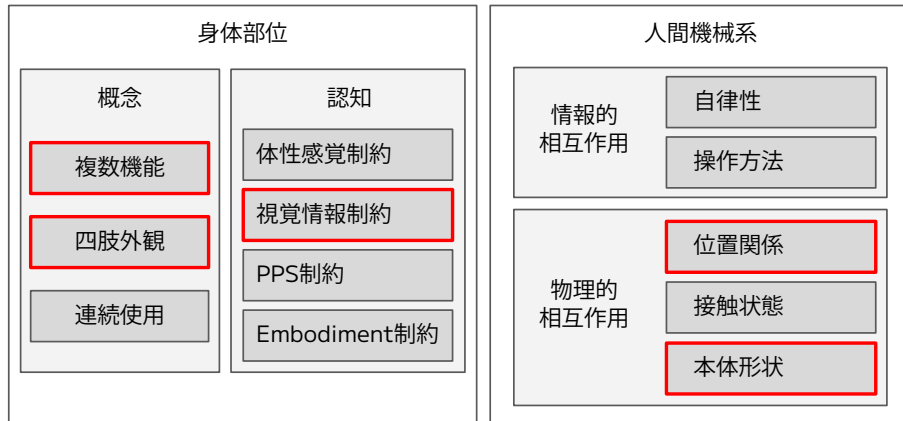


図 6.11: 6 章で扱った設計要素

プロトタイプを用いた探索において、人間拡張のアプリケーションは既存の研究で扱っているものを多くカバーできることを確認した。一方で、新しいインタラクションについては、一人の人間の作業よりも、遠隔の他者とのコミュニケーション用途や動的に変化するインタフェース用途が有望であることが示唆された。

## 第7章

# 総合考察

### 7.1 前章までのまとめ

最初に、3~6章の研究をまとめる。これを踏まえて2章で述べた拡張身体部位の設計を考察する。

3章と4章では、人間とロボットの情報の相互作用に関する操作方法を扱った。3章では、入力手法の課題を扱い、身体の冗長な自由度を用いる手法を提案した。上肢の冗長自由度を肩の動作としてセンシングすることで、手先が固定されている状況において入力ができることを示した。ロボットを用いたデモンストレーションによって、座位、立位、歩行時に手先が固定された状態で2自由度の操作ができることを確認した。4章では、フィードバック手法の課題を扱い、固有受容感覚に示唆を得たロボットの動きに応じた触覚提示手法を提案した。ロボットの手先の変位に応じて触覚の提示強度を皮膚の剪断変形を連続的に変化させることで提示し、視覚情報が制限されている状況でロボット操作ができることを確かめた。提案手法では1自由度のフィードバックを用いた。

5章と6章では、人間とロボットの物理的相互作用に関するロボットの構造を扱った。5章では、装着形状の課題を扱い、人間の動きに応じて座標を一致させる非接触移動ロボットを提案した。人間が内部で移動可能な包囲型ロボットを設計し、人間の姿勢変化に応じてロボットの姿勢を追従させることで、装着ロボットの利点を活かした非接触システムを実現した。これにより、平面上の歩行動作に対して人間とロボットの相対的な座標を3自由度一致できることを確認した。6章では、部位形状に着目してシステム全体のアプリケーション設計について扱い、着脱性や可動自由度の高い拡張身体部位を対象にデザインスペースを提案した。手という身体部位が持つ複雑さによって、装着する位置や状況に応じた様々なアプリケーションが想定されることを示した。表 7.1 に 2.4 で整理した人間機械系の設計要素と身体部位の要因につい

て、本論文の 3~6 章で述べた研究との対応を示す。

表 7.1: 各章と設計要素の対応

要件 \ 要因	3 章	4 章	5 章	6 章
自律性				x
操作方法	x	x		
位置関係			x	x
接触状態		x	x	x
本体形状			x	x
複数機能	x	x		x
四肢外観				x
連続使用				
体性感覚制約	x	x		x
視覚情報制約	x		x	x
PPS 制約			x	x
Embodiment 制約				

それぞれの章では、設計要素の個別の課題を解決することを目的としたが、各要素は完全に独立しているわけではなく、実装方法によって複数の章で取り扱っているものがあることがわかる。一方で、本論文では取り扱っていない要素があることも確認できる。

以下の節では、各章で得られた知見を総合して考察する。7.2 では、各章で個別に論じた設計要素を統合することを考える。7.3 では、拡張身体部位の設計手順について考える。7.4 では、2 章で導入した人間機械系のモデルについて考える。最後に、7.5 で、本論文で扱いきれなかった研究課題や発展性について考える。

## 7.2 設計要素の統合

### 7.2.1 操作インタフェースの設計

操作方法について入力とフィードバックを統合したインタフェースの設計を考える。3 章と 4 章の各デバイスシステムは、それぞれ独立に機能している。入力は肩の動作を用いて行い、感覚フィードバックは腕に行っている。これらを同時に用いることで、2 自由度のロボット部位を操作し、その動作を 1 自由度のフィードバックとしてユーザーに提示することができる。

ここで、入力部位とフィードバック部位が一致しないことによる影響が懸念される。Francoら [203] の研究によれば、肩の動作をトリガーとした振動触覚提示を肩、手首、腰、足首に提示したところ、足首以外では反応時間に有意差が見られなかったと報告している。身体部位の入力とフィードバックの距離は一定の範囲で許容されることが予想される。一方で、付録 A の実験のように、肩動作の入力を脇腹にフィードバックする場合、肩を動かしたときの部位自体の固有受容感覚や皮膚の変形によるデバイスの密着状態の変化によって、触覚フィードバックを妨げてしまう可能性があることが考えられる。このことは、部位同士が近すぎる場合も影響があることを示唆している。これは、視線入力デバイスと映像提示を同時に用いるときに生じる課題と似ている。

入力部位とフィードバック部位が一致しないことは、身体部位の認知形成にも影響が考えられる。例えば、Araiら [204] のバーチャルアバターによる足で操作する余剰肢ロボットアームの研究では、視覚提示と触覚提示の位置が一致していない場合だと、学習後の課題成功率に差がみられることを報告している。本論文では、入力とフィードバックを個別に設計できることを示したが、入力とフィードバックの部位の選定および、異なる部位を用いた場合の学習効率の調査は今後の課題となる。

## 7.2.2 本体形状の選択

まず、身体部位について、3章のデモンストレーションでは、腕と指型を操作できること、6章では、手型のシステムを提案し、上肢を構成する部位の事例を網羅した。SuperLimbsの先行研究では、脚や尻尾を対象としたものもある。本研究では直接取り扱っていないが、5章の移動ロボットは用途に応じて人間の重量を支持するような脚として応用することもできると考えている。また、3章では、触手型ロボットや羽アバターの例を示している。これらは、人間の生得的な身体にはない部位である\*1。6章では、着脱機能を実装することで、様々な用途に用いることを可能にしたが、人間の身体部位は取り外すことは一般的に不可能である。このような、人間の生物学的な構造では身体部位と呼べない部位においても、人間の意図を介して作用することができれば、このような形状も拡張身体部位と考えることができる。

本論文では、人間が複数の対象に同時に作用することができる点を身体の拡張としたため、作用点を複数に増やす方針での形状設計を主に扱った。しかし、力を増強する、精密な作業が行える、素早く動作する、といった機能拡張を指向する身体部位の設計においても、本研究の知見は有効である。

---

\*1 尻尾部位も人間が本来有していないが、哺乳類では尻尾があるものも少なくないので除外した。

### 7.2.3 適用可能な使用状況

使用者の体勢から使用状況を考える。1章で取り上げた MetaLimbs [13] は、座位での使用に制限されていたが、3章と4章の各デバイスシステムは、立位や歩行状態で使用することができる。5章の移動ロボットは、立位および歩行状態で追従できることを確認した。6章のデバイスは、身体上だけでなく、身体から取り外して環境に設置する用途で使用できる可能性を示した。3章の入力手法は、手先が固定されている場合でも使用できることを確認したが、例えば腕を高く上げてる状態など、肩を動かすことが難しい特定の状況では使用できない。5章のロボットは、使用者が屈んだ姿勢などは想定していないため、座標の一致を保持することができない。また、着座状態から立ち、歩行するような状況も同様に使用できない。以上をまとめると、本研究によって、室内のような環境で座位以外の立位や歩行に拡張身体部位を使用することができる。しかしながら、体勢が大きく変化する状況や特定の姿勢での使用には課題が残っている。

身体感覚の観点から使用状況を考える。3章と4章の各デバイスシステムは、身体動作による入力、触覚のフィードバックを用いている。これにより、騒音で音声を使用できない状況でも利用できる。例えば、工場作業などで用いる場合にこの利点を活かすことができる。

## 7.3 設計要素に基づく設計手順

7.2での考察をもとに、拡張身体部位の設計手順を示す。前節では、本研究で提案した要素技術に基づいたシステムの設計を述べた。ここでは、将来的に実現しうる技術を想定して、より汎用的に拡張身体部位を設計することを考える。設計は以下の3段階で行う。

### 7.3.1 構造の検討

まず、物理的相互作用の観点から、人間とロボットに生じる接触状態とロボット本体の形状を検討する。本体形状は、目的とする作業によって採用する部位の方針が大まかに決まる。しかし、身体部位として複数の状況で使用することを想定した構造が望ましい。具体的な部位の選択については、7.2.2の考察が参考になる。また、この時点では、5章で示したように、身体に装着する以外の構造も選択肢となる。

### 7.3.2 操作方法の検討

次に、人間とロボット間の情報的相互作用を成立させる操作インタフェースを検討する。入力手法は、採用する拡張身体部位の構造と自由度を考慮する。操作に要求される自由度が多い場合は、複数の入力手法を組み合わせることも考えられる\*2。想定される作業において、高い精度や時間応答性を要求される場合は、フィードバック手法の選定も重要となる。その際は、7.2.1の考察を踏まえて入力とフィードバックの部位を選択する。この検討段階において、既存の技術だけでなく新たな操作手法の開発についても選択肢となる。

### 7.3.3 制約を考慮した実装

最後に、上で検討した要素を身体部位の要因となる制約を考慮して実装する。拡張身体部位の構造と操作方法を決定した上で、人間の身体部位の認知を踏まえてシステムを構築する。具体的には、必要に応じて四肢の外観に近いものや連続使用が可能な構成を採用することが考えられる。選択した操作方法によって、体性感覚制約や Embodiment 制約を満たすことが好ましい。また、実装したシステム毎に7.2.3で考察したような適用可能な状況を整理することで、複数の状況で使用できることを確認できる。

## 7.4 人間機械系のモデルの考察

### 7.4.1 人間の内部モデルの更新

人間の身体動作を介して運動意図を検出して操作に用いる、または固有受容感覚についても皮膚を介して提示している。しかし、筋電 (EMG) やブレインマシンインタフェース (BMI) といった神経インタフェース技術が十分に発達することで、将来的には、実際の運動を伴わなくても意図の検出や感覚提示が行える可能性がある。その場合でも、本研究で示したようなインタフェースは操作の学習過程において必要になると考えられる。なぜなら、既存の身体が持つ内部モデルを拡張身体部位を有したモデルに更新するためには、身体動作を伴う中間的な学習過程が必要だと予想されるからである。2.3で扱った人間機械系のモデルでは、人間は設計の対象として考えていないが、今後は物理的・情報的相互作用の結果生じる人間側の変化を計測し、人間の内部モデルの更新も考慮した設計が必要になる。

---

\*2 例えば、3章の手法と先行研究 [13] など。

## 7.4.2 作業対象との情報的相互作用を含むモデル

拡張身体部位を検討する上で、2.3 で導入したモデルでは、人間-対象、ロボット-対象間で情報的相互作用が生じないと仮定した。これは、作業対象が荷物や道具などの非生物であることを想定しているためである。実際に3章や5章で示したデモンストレーションでは、ボタン押し(図 3.10a) やボトルの把持(図 3.10c)、荷物の保持(図 5.9b) といった作業を行なっている。一方で、6章では、手型の拡張身体部位によるアプリケーションとして、他者とのコミュニケーション用途が有望であることが示唆された。

他者とのコミュニケーションにおいては、相手の意図や動作の機微、言語的対話などから情報的相互作用が生じる。また、他者自体も拡張身体部位を介して相互作用を行う状況も考えられる。このような状況では、モデル内で仮定した自己としての人間以外に、情報的相互作用を含む対象としての他者が想定される。人間およびロボットと作業対象との間に情報的相互作用が生じるモデルへ拡張することで、身体機能の拡張だけでなく、社会的な存在の拡張を扱うことができる可能性がある。このような、他者性を含む人間機械系のモデルについては、社会科学の知見などを踏まえた更新が期待される。

## 7.5 今後の展望

### 7.5.1 自律性と長期装用

表 7.1 で示したように、拡張身体部位の設計要素の中で本研究では十分に扱えていないものがある。

ロボットの自律性の要件は、人間の身体部位が一般的に本人の意図に反して動かないことを仮定したために、本論文の拡張身体部位は自律性の低いロボットを想定している。5章の移動ロボットも人間の座標に追従するような制御し、高度な認識行動を行っていない。しかし、3章と4章の各デバイスシステムが扱う自由度をみると、ロボット側でもある程度自律的な動作や処理が必要であると考えられる。この点については、ロボット自体がもつ自律性と人間の意図をどのように合成すればいいのかといった Shared Autonomy の研究 [205, 206, 207] や、人間とロボットが協調した結果を人間がどのように解釈するのかといった議論 [208] を踏まえた研究に期待し、これらの知見をシステムの設計に利用することが必要である。

また、身体部位の条件における連続使用、Embodiment 制約の要因も本論文では取り扱っていない。長期装用での学習効果の影響は Zhu ら [209] や Arai ら [204] によって行われてい

る。しかしながら、これらの学習効果を設計要件に反映するための知見は十分ではない。これは、HCIのユーザーインターフェースにおける使いやすいデバイスの議論とも関連する。長期間使用できるようなロボットやデバイスの開発という課題を解決することで、より詳細な研究が行えると考える。

### 7.5.2 異なるスケールにおける人間機械系

本研究では、人間と機械の関係において、人間とロボットが同じスケールであることを前提としている。そのため、2章で挙げた人間機械系の多くは、人間が自らの身体でを使用することを想定した等身大となっている。しかしながら、人間機械系全般で考える場合、必ずしもロボットが人間と同じサイズである必要はない。例えば、モビリティや建機などは、人間の直接的な入力によって力を増幅して物理的相互作用を行うものであり、本論文で扱った装着ロボットや遠隔ロボットと関連する。Transfantom [210] は、人間が操作する遠隔ロボットシステムとして提案されているが、そのロボットは建機のような大型機械を想定している。また、5章で提案した移動ロボットでは、人間はロボットに搭乗しないが、平面上を走行する点でモビリティなどと類似点がある。今後、拡張身体部位の発展系として、巨大または極小の身体部位を扱う方向性が考えられる。

### 7.5.3 サイバーフィジカルな人間拡張

本論文では、ロボットを用いた人間機械系として拡張身体部位を考えてきた。しかしながら、物理的相互作用と情動的相互作用を分けて拡張身体部位が設計できることを主張している点において、バーチャルアバター研究との親和性も高いと考える。例えば、3章で示した羽はバーチャルアバターで容易に用いることができる。また、バーチャルアバターでは身体の質量を考慮しなくて良いために使用できるが、現実では実装が難しい形状に対して、5章のシステムが一つの選択肢になる。

本論文で扱った拡張身体部位には、ロボットという言葉は明示的には含んでいない。これは、本提案の扱う範囲がロボット研究だけでなく、人間と機械を含むシステム全般を対象にしたいという期待も込められている。実世界とバーチャル世界を横断した身体の拡張について探求していきたい。

## 第8章

# 結論

本論文は、人間の身体機能を拡張する人間機械系として、拡張身体部位を提案し、その設計について論じた。

1章では、人間拡張工学の観点から本論文の背景を説明した。2章で、身体部位の要因と人間機械系の要件という観点で先行研究を整理した。3章では、入力手法の課題を扱い、身体の冗長な自由度を用いる手法を提案した。4章では、フィードバック手法の課題を扱い、固有受容感覚に示唆を得たロボットの動きに応じた触覚提示手法を提案した。5章では、装着形状の課題を扱い、人間の動きに応じて座標を一致させる非接触移動ロボットを提案した。6章では、部位形状に着目してシステム全体のアプリケーション設計について扱い、着脱性や可動自由度の高い拡張身体部位を対象にデザインスペースを提案した。7章で総合的な考察を行い、個別に検討した要素の統合と今後の展望を示した。

本論文の貢献は、まず、人間を身体機能を拡張するロボットシステムとして、身体認知と人間機械系の知見を融合して拡張身体部位を提案し、その設計要素を整理したことにある。そして、個別の設計要素について課題とその解決策を検討し、具体的なプロトタイプの実装によって、その実現可能性を示した点にある。

本論文では、人間とロボットの相互作用に主眼をおいた人間機械系を扱っているが、ここで得られた知見や議論は人間とコンピュータを扱う研究や人間同士のコミュニケーションといった対象にも有益であると考えている。本論文が、人間が人間的な営みを充実させるために機械を人間化する技術として、微力ながら貢献できることを願っている。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、修士学生の頃からご指導いただいた、稲見昌彦教授に深く感謝いたします。素晴らしい研究環境を与えていただいただけでなく、研究の根底にある哲学や見識に触れる機会を得られたのは大きな学びでした。檜山敦教授とは、研究を深めるための議論を重ねさせていただきました。お礼申し上げます。岩田浩康教授、門内靖明准教授、吉本英樹特任准教授には、本博士論文の審査を引き受けていただきました。皆様からのコメントやご指導がとても重要な指針を与えてくださいました。ここに感謝申し上げます。

研究室での日々は、さまざまな人と関わりながら刺激的に過ごすことができました。研究だけでなく、多くの行事やイベントの機会に恵まれ、楽しく過ごすことができました。研究室の関係者全員の名前をここであげることはできませんが、瓜生大輔さん、吉田成朗さん、前川和純さん、堀江新さん、齊藤寛人さん、柏野善大さんにはさまざまな場面でお世話になりました。お礼を申し上げます。

本博士論文で取り上げた研究は、研究室の人々との議論の中で生まれ、育まれたものです。特に、一緒に研究を進めて論文を書いた後輩の、下林秀輝くん、荒川陸くん、渡辺貴史くんには感謝いたします。また、博士課程と一緒に挑んできた戦友である、荒井謙さん、山村菜穂子さん、大伏仙泰くん、松原晟都くん、久保田祐貴くんにもお礼を申し上げます。ここに名前を挙げられていない修士・博士学生にもたくさんお世話になっています。

研究室外でも、プロジェクトと一緒に進めてくれた方々にも感謝いたします。Domenico Prattichizzo 教授には、貴重なイタリアでの研究機会を与えていただきました。北崎充晃教授、杉本麻樹教授、Gowrishankar Ganesh 主任研究員、宮脇陽一教授には、それぞれ異なる専門分野からの視点で議論いただき、とても刺激的でした。松村玲央さんには、実験装置の開発など多くの場面でお世話になりました。

日々の研究室の活動は、事務スタッフの方々のお力なしでは行えませんでした。特に、小川昌子さん、中川純希さんの円滑なお仕事のおかげで、私は研究に集中することができました。ありがとうございます。また、研究室の立ち上げ期から尽力いただいた脇坂崇平さん、泉原厚

史さんには改めて感謝いたします。今の研究室があるのはお二人のおかげです。

最後に、研究生生活をあたたかく見守り、支えてくれた、家族、友人に感謝して謝辞といたします。

## 参考文献

- [1] La Mettrie, Julien Offray, 杉, 捷夫. 人間機械論. 岩波書店, 1957.
- [2] J D Bernal, A Maurois, and S Radhakrishnan. The world, the flesh and the devil. <http://foyle.quarkweb.com/WorldFleshDevil.pdf>, 1929. Accessed: 2022-10-12.
- [3] J・D・バナール. 宇宙・肉体・悪魔【新版】 理性的精神の敵について. みすず書房, July 2020.
- [4] Norbert Wiener. The human use of human beings: Cybernetics and society. *Land Econ.*, Vol. 27, No. 1, p. 85, February 1951.
- [5] ノーバートウィーナー. 人間機械論: 人間の人間的な利用. みすず書房, September 2014.
- [6] 西垣通. 新・基礎情報学: 機械をこえる生命. NTT 出版, June 2021.
- [7] 暦本純一 (監修者). オグメンテッド・ヒューマン: AI と人体科学の融合による人機一体、究極の IF が創る未来. エヌ・ティー・エス, 2018.
- [8] 暦本純一. 人間拡張が築く未来. 情報学研究 : 学環 : 東京大学大学院情報学環紀要, May 2021.
- [9] Vannevar Bush. As we may think. *The atlantic monthly*, 1945.
- [10] 稲見昌彦, 瓜生大輔, 前川和純. 自在化身体とその展望. 日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 8, pp. 685-692, 2021.
- [11] Masahiko Inami, Daisuke Uriu, Zendai Kashino, Shigeo Yoshida, Hiroto Saito, Azumi Maekawa, and Michiteru Kitazaki. Cyborgs, human augmentation, cybernetics, and JIZAI body. In *Augmented Humans 2022*, AHs 2022, pp. 230-242, New York, NY, USA, March 2022. Association for Computing Machinery.
- [12] アンディ・クラーク. 生まれながらのサイボーグ: 心・テクノロジー・知能の未来. 春秋社, July 2015.
- [13] Tomoya Sasaki, Mhd Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Mi-

- namizawa, and Masahiko Inami. MetaLimbs: multiple arms interaction metamorphosis. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, No. Article 16 in SIGGRAPH '17, pp. 1–2, New York, NY, USA, July 2017. Association for Computing Machinery.
- [14] 佐々木智也, サライジムハマドヤメン, フェルナンドチャリス, 南深孝太, 北崎充晃, 稲見昌彦. 部位代替による複数の腕を用いた身体変容の研究. 第 22 回 日本バーチャルリアリティ学会大会, Vol. 2017, pp. 2F1–04, 2017.
- [15] 山科正平. カラー図解 新しい人体の教科書 下. 講談社, 2017.
- [16] E P Gardner and J H Martin. Coding of sensory information. *Principles of neural science*, 2000.
- [17] カンデル神経科学. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2014.
- [18] C Ghez, J Gordon, and M F Ghilardi. Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. effects of visual information on accuracy. *J. Neurophysiol.*, Vol. 73, No. 1, pp. 361–372, January 1995.
- [19] 電子情報通信学会知識ベース | 2 編 感覚・知覚・認知の基礎. [https://www.ieice-hbkb.org/portal/doc\\_179.html](https://www.ieice-hbkb.org/portal/doc_179.html). Accessed: 2022-12-31.
- [20] Sarah Jayne Blakemore, Daniel M Wolpert, and Christopher D Frith. Abnormalities in the awareness of action. *Trends Cogn. Sci.*, Vol. 6, No. 6, pp. 237–242, June 2002.
- [21] 近藤敏之, 今水寛, 森岡周. 身体性システムとリハビリテーションの科学 2 身体認知. 東京大学出版会, December 2018.
- [22] I Gallagher, I. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends Cogn. Sci.*, Vol. 4, No. 1, pp. 14–21, January 2000.
- [23] 日本認知科学会 (著) 嶋田総太郎 (編). 脳のなかの自己と他者-身体性・社会性の認知 脳科学と哲学-. 共立出版, September 2019.
- [24] M Botvinick and J Cohen. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756, 1998.
- [25] Sotaro Shimada, Kensuke Fukuda, and Kazuo Hiraki. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PLoS One*, Vol. 4, No. 7, pp. 1–5, 2009.
- [26] 本間元康. ラバーハンドイリュージョン: その現象と広がり. 認知科学, Vol. 17, No. 4, pp. 761–770, 2010.
- [27] 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.
- [28] Arvid Guterstam, Valeria I Petkova, and H Henrik Ehrsson. The illusion of owning a third arm. *PLoS One*, Vol. 6, No. 2, p. e17208, 2011.
- [29] H Henrik Ehrsson. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, Vol. 317, No. 5841, p. 1048, 2007.
- [30] Bigna Lenggenhager, Tej Tadi, Thomas Metzinger, and Olaf Blanke. Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness. *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1096–1099, August 2007.
- [31] Valeria I Petkova and H Henrik Ehrsson. If I were you: Perceptual illusion of body swapping. *PLoS One*, Vol. 3, No. 12, 2008.
- [32] 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.
- [33] Manos Tsakiris and Patrick Haggard. The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, Vol. 31, No. 1, pp. 80–91, 2005.
- [34] Sotaro Shimada, Yuan Qi, and Kazuo Hiraki. Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements. *Exp. Brain Res.*, Vol. 201, No. 2, pp. 359–364, March 2010.
- [35] Angelo Maravita and Atsushi Iriki. Tools for the body (schema). *Trends Cogn. Sci.*, Vol. 8, No. 2, pp. 79–86, 2004.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Andrea Serino, Jean-Paul Noel, Robin Mange, Elisa Canzoneri, Elisa Pellencin, Javier Bello Ruiz, Fosco Bernasconi, Olaf Blanke, and Bruno Herbelin. Peripersonal space: An index of multisensory Body–Environment interactions in real, virtual, and mixed realities. *Frontiers in ICT*, Vol. 4, , 2018.
- [39] 榎本玲子, 山上精次. 空間認知の身体化過程とその機序をめぐって. 専修人間科学論集.

- 心理学篇, Vol. 1, pp. 61–69, March 2011.
- [40] Catherine L Reed, Jefferson D Grubb, and Cleophus Steele. Hands up: attentional prioritization of space near the hand. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, Vol. 32, No. 1, pp. 166–177, 2006.
- [41] 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.
- [42] Shimon Y Nof. *Handbook of Industrial Robotics*. John Wiley & Sons, March 1999.
- [43] 原田研介, 万偉偉. 産業用ロボットの次世代技術について. 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 10, pp. 915–918, 2019.
- [44] 日本ロボット工業会. 国産ロボット技術発達の系統化に関する調査, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, 第(3)巻. 国立科学博物館, December 2003.
- [45] John J Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson Educación, 2005.
- [46] J Edward Colgate, J Edward, Michael A Peshkin, and Witaya Wannasuphoprasit. Cobots: Robots for collaboration with human operators. 1996.
- [47] Michael Peshkin and J Edward Colgate. Cobots. *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 26, No. 5, pp. 335–341, January 1999.
- [48] Witaya Wannasuphoprasit, Prasad Akella, Michael Peshkin, and J Edward Colgate. Cobots: A novel material handling technology. In *in proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, ASME 98-WA/MH-2*. Citeseer, 1998.
- [49] Goertz and Thompson. Electronically controlled manipulator. *Nucleonics (US) Ceased publication*, 1954.
- [50] Arash Ajoudani, Andrea Maria Zanchettin, Serena Ivaldi, Alin Albu-Schäffer, Kazuhiro Kosuge, and Oussama Khatib. Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Auton. Robots*, Vol. 42, No. 5, pp. 957–975, June 2018.
- [51] Valeria Villani, Fabio Pini, Francesco Leali, and Cristian Secchi. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, Vol. 55, pp. 248–266, November 2018.
- [52] Abdelfetah Hentout, Mustapha Aouache, Abderraouf Maoudj, and Isma Akli.

- Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008-2017. *Adv. Robot.*, Vol. 33, No. 15-16, pp. 764-799, August 2019.
- [53] Bauer, Bender, Braun, Rally, and others. Lightweight robots in manual assembly- best to start simply. *Fraunhofer-Institut für*, 2016.
- [54] 金唯眞, 山田陽滋, 岡本正吾. 人間-ロボット協働作業系の安全. 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 10, pp. 923-927, 2019.
- [55] William R Ferrell and Thomas B Sheridan. Supervisory control of remote manipulation. *IEEE Spectrum*, Vol. 4, No. 10, pp. 81-88, October 1967.
- [56] T B Sheridan. Telerobotics. *Automatica*, Vol. 25, No. 4, pp. 487-507, July 1989.
- [57] Günter Niemeyer, Carsten Preusche, Stefano Stramigioli, and Dongjun Lee. Telerobotics. In Bruno Siciliano and Oussama Khatib, editors, *Springer Handbook of Robotics*, pp. 1085-1108. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [58] 館暲. テレイグジスタンス. 計測と制御, Vol. 30, No. 6, pp. 465-471, 1991.
- [59] 館暲. テレイグジスタンス. 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 215-221, 2015.
- [60] Marvin Minsky. Telepresence. 1980.
- [61] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Design of TELESAR v for transferring bodily consciousness in telexistence. *Rep. U. S.*, pp. 5112-5118, 2012.
- [62] 深堀昂, 梶谷ケビン. ANA AVATAR. 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 10, pp. 663-667, 2018.
- [63] Max Schwarz, Christian Lenz, Andre Rochow, Michael Schreiber, and Sven Behnke. NimbRo avatar: Interactive immersive telepresence with Force-Feedback telemanipulation. In *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5312-5319, September 2021.
- [64] Jean Chagas Vaz, Akshay Dave, Nathan Kassai, Nicolas Kosanovic, and Paul Y Oh. Immersive Auditory-Visual Real-Time avatar system of ANA avatar XPRIZE finalist Avatar-Hubo. In *2022 IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO)*, pp. 1-6, May 2022.
- [65] 川村次郎, 陳隆明, 古川宏, 林義孝. 義肢装具学. 医学書院, March 2009.
- [66] 磯崎弘司, 両角昌実, 横山茂樹. 義肢装具学テキスト. 南江堂, December 2017.

- [67] 舘暲. 人間能力の補綴と医用精密工学. 精密機械, Vol. 48, No. 5, pp. 572–577, 1982.
- [68] Norbert Wiener. Problems of sensory prosthesis. *Bull. Am. Math. Soc.*, Vol. 57, No. 1, pp. 27–35, 1951.
- [69] Rajko Tomović, 一郎加藤, Yugoslav Committee for Electronics and Automation. 人間の手足の制御. 1973.
- [70] Francesca Cordella, Anna Lisa Ciancio, Rinaldo Sacchetti, Angelo Davalli, Andrea Giovanni Cutti, Eugenio Guglielmelli, and Loredana Zollo. Literature review on needs of upper limb prosthesis users. *Front. Neurosci.*, Vol. 10, p. 209, May 2016.
- [71] Ralph S Mosher. Handyman to hardiman. *SAE Trans. J. Mater. Manuf.*, Vol. 76, pp. 588–597, 1968.
- [72] Robert Bogue. Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 36, No. 5, pp. 421–427, January 2009.
- [73] August. Do you even lift, bro? hardiman was GE’s muscular take on the Human-Machine interface. <https://www.ge.com/news/reports/do-you-even-lift-bro-hardiman-and-the-human-machine-interface>. Accessed: 2022-10-10.
- [74] R A R C Gopura, D S V Bandara, Kazuo Kiguchi, and G K I Mann. Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 75, pp. 203–220, January 2016.
- [75] R A R C Gopura, Kazuo Kiguchi, and D S V Bandara. A brief review on upper extremity robotic exoskeleton systems. In *2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 346–351. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org), August 2011.
- [76] 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.
- [77] Yoshiyuki Sankai. HAL: Hybrid assistive limb based on cybernics. In *Robotics Research*, pp. 25–34. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [78] Massimo Bergamasco and Hugh Herr. Human–Robot augmentation. In Bruno Siciliano and Oussama Khatib, editors, *Springer Handbook of Robotics*, pp. 1875–1906. Springer International Publishing, Cham, 2016.

- [79] Federico Parietti and H Harry Asada. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: Body stabilization and guidance by bracing. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1176–1183, May 2014.
- [80] Domenico Prattichizzo, Monica Malvezzi, Irfan Hussain, and Gionata Salvietti. The Sixth-Finger: A modular extra-finger to enhance human hand capabilities. *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Vol. 2014-October, No. October, pp. 993–998, 2014.
- [81] Vighnesh Vatsal and Guy Hoffman. Design and analysis of a wearable robotic forearm. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5489–5496, 2018.
- [82] Domenico Prattichizzo, Maria Pozzi, Tommaso Lisini Baldi, Monica Malvezzi, Irfan Hussain, Simone Rossi, and Gionata Salvietti. Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives. *Prog. Biomed. Eng.*, Vol. 3, No. 4, p. 042005, September 2021.
- [83] Bo Yang, Jian Huang, Xinxing Chen, Caihua Xiong, and Yasuhisa Hasegawa. Supernumerary robotic limbs: A review and future outlook. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, pp. 1–1, 2021.
- [84] 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.
- [85] Federico Parietti, Kameron Chan, and H Harry Asada. Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 141–148, 2014.
- [86] Guillaume Gourmelen, Adrien Verhulst, Benjamin Navarro, Tomoya Sasaki, Ganesh Gowrishankar, and Masahiko Inami. Co-Limbs: An intuitive collaborative control for wearable robotic arms. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, SA '19, pp. 9–10, New York, NY, USA, November 2019. Association for Computing Machinery.
- [87] Mhd Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Reo Matsumura, Kouta Minamizawa, and

- Masahiko Inami. Fusion: full body surrogacy for collaborative communication. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, No. Article 7 in SIGGRAPH '18, pp. 1–2, New York, NY, USA, August 2018. Association for Computing Machinery.
- [88] Catherine Veronneau, Jeff Denis, Louis Philippe Lebel, Marc Denninger, Vincent Blanchard, Alexandre Girard, and Jean Sebastien Plante. Multifunctional remotely actuated 3-DOF supernumerary robotic arm based on magnetorheological clutches and hydrostatic transmission lines. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 2546–2553, 2020.
- [89] Yukiko Iwasaki, Kozo Ando, Shuhei Iizuka, Michiteru Kitazaki, and Hiroyasu Iwata. Detachable body: The impact of binocular disparity and vibrotactile feedback in Co-Presence tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 3477–3484, April 2020.
- [90] Sang won Leigh, Harshit Agrawal, and Pattie Maes. Robotic symbionts: Interweaving human and machine actions. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 17, No. 2, pp. 34–43, 2018.
- [91] Masaaki Fukuoka, Adrien Verhulst, Fumihiko Nakamura, Ryo Takizawa, Katsutoshi Masai, and Maki Sugimoto. Facedrive: Facial expression driven operation to control virtual supernumerary robotic arms. *ICAT-EGVE 2019 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*, 2019.
- [92] Yukiko Iwasaki and Hiroyasu Iwata. A face vector - the point instruction-type interface for manipulation of an extended body in dual-task situations. In *2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*. IEEE, October 2018.
- [93] Federico Parietti and H. Harry Asada. Independent, voluntary control of extra robotic limbs. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, May 2017.
- [94] Vighnesh Vatsal and Guy Hoffman. Wearing your arm on your sleeve: Studying usage contexts for a wearable robotic forearm. In *2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. IEEE, August 2017.

- [95] L. Dipietro, A.M. Sabatini, and P. Dario. A survey of glove-based systems and their applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 38, No. 4, pp. 461–482, July 2008.
- [96] Artem Dementyev and Joseph A. Paradiso. WristFlex: low-power gesture input with wrist-worn pressure sensors. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '14*. ACM Press, 2014.
- [97] Jess McIntosh, Charlie McNeill, Mike Fraser, Frederic Kerber, Markus Löchtfeld, and Antonio Krüger. EMPress: Practical hand gesture classification with wrist-mounted emg and pressure sensing. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, May 2016.
- [98] T. Scott Saponas, Desney S. Tan, Dan Morris, Ravin Balakrishnan, Jim Turner, and James A. Landay. Enabling always-available input with muscle-computer interfaces. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '09*. ACM Press, 2009.
- [99] Travis Deyle, Szabolcs Palinko, Erika Shehan Poole, and Thad Starner. Hambone: A bio-acoustic gesture interface. In *2007 11th Annual International Symposium on Wearable Computers - ISWC '07*. IEEE, October 2007.
- [100] J. Rekimoto. GestureWrist and GesturePad: unobtrusive wearable interaction devices. In *Proceedings Fifth International Symposium on Wearable Computers*. IEEE Comput. Soc, 2001.
- [101] Yang Zhang and Chris Harrison. Tomo: Wearable, low-cost electrical impedance tomography for hand gesture recognition. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '15*. ACM Press, 2015.
- [102] Rui Fukui, Masahiko Watanabe, Tomoaki Gyota, Masamichi Shimosaka, and Tomomasa Sato. Hand shape classification with a wrist contour sensor: development of a prototype device. In *Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing - UbiComp '11*. ACM Press, 2011.
- [103] Jess McIntosh, Asier Marzo, and Mike Fraser. SensIR: Detecting hand gestures with a wearable bracelet using infrared transmission and reflection. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST*

- '17. ACM Press, 2017.
- [104] Hiroyuki Manabe, Masaaki Fukumoto, and Tohru Yagi. Conductive rubber electrodes for earphone-based eye gesture input interface. In *Proceedings of the 17th Annual International Symposium on Wearable Computers - ISWC '13*. ACM Press, 2013.
- [105] Abdelkareem Bedri, David Byrd, Peter Presti, Himanshu Sahni, Zehua Gue, and Thad Starner. Stick it in your ear: building an in-ear jaw movement sensor. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers - UbiComp '15*. ACM Press, 2015.
- [106] Toshiyuki Ando, Yuki Kubo, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. CanalSense: Face-related movement recognition system based on sensing air pressure in ear canals. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '17*. ACM, October 2017.
- [107] Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson. Omnitouch: wearable multitouch interaction everywhere. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '11*. ACM Press, 2011.
- [108] Liwei Chan, Yi-Ling Chen, Chi-Hao Hsieh, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. Cyclopsring: Enabling whole-hand and context-aware interactions through a fisheye ring. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology - UIST '15*. ACM Press, 2015.
- [109] Riku Arakawa, Azumi Maekawa, Zendai Kashino, and Masahiko Inami. Hand with sensing sphere: Body-centered spatial interactions with a hand-worn spherical camera. In *Symposium on Spatial User Interaction*. ACM, October 2020.
- [110] Tuochao Chen, Benjamin Steeper, Kinan Alsheikh, Songyun Tao, François Guimbretière, and Cheng Zhang. C-face: Continuously reconstructing facial expressions by deep learning contours of the face with ear-mounted miniature cameras. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, October 2020.
- [111] Takaaki Shiratori, Hyun Soo Park, Leonid Sigal, Yaser Sheikh, and Jessica K. Hodgins. Motion capture from body-mounted cameras. In *ACM SIGGRAPH 2011*

- papers on - SIGGRAPH '11*. ACM Press, 2011.
- [112] Liwei Chan, Chi-Hao Hsieh, Yi-Ling Chen, Shuo Yang, Da-Yuan Huang, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. Cyclops: Wearable and single-piecefull-body gesture input devices. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15*. ACM Press, 2015.
- [113] Karan Ahuja, Chris Harrison, Mayank Goel, and Robert Xiao. Mecap: Whole-body digitization for low-cost VR/AR headsets. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, October 2019.
- [114] J. Lenarcic and A. Umek. Simple model of human arm reachable workspace. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 24, No. 8, pp. 1239–1246, 1994.
- [115] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, and Jian Sun. Deep residual learning for image recognition. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE, June 2016.
- [116] Jia Deng, Wei Dong, Richard Socher, Li-Jia Li, Kai Li, and Li Fei-Fei. ImageNet: A large-scale hierarchical image database. In *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, June 2009.
- [117] Fabrice Matulic, Riku Arakawa, Brian Vogel, and Daniel Vogel. PenSight: Enhanced interaction with a pen-top camera. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '20*. ACM, April 2020.
- [118] Jacob Guggenheim, Rachel Hoffman, Hanjun Song, and H. Harry Asada. Leveraging the human operator in the design and control of supernumerary robotic limbs. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 2177–2184, April 2020.
- [119] Ken Nakagaki, Sean Follmer, and Hiroshi Ishii. LineFORM: Actuated curve interfaces for display, interaction, and constraint. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology - UIST '15*. ACM Press, 2015.
- [120] Mohammed Al-Sada, Thomas Höglund, Mohamed Khamis, Jaryd Urbani, and Tatsuo Nakajima. Orochi. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019 on - AH2019*. ACM Press, 2019.
- [121] S. Bitzer and P. van der Smagt. Learning EMG control of a robotic hand: towards

- active prostheses. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. IEEE, 2006.
- [122] P.K. Artemiadis and K.J. Kyriakopoulos. EMG-based control of a robot arm using low-dimensional embeddings. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, No. 2, pp. 393–398, April 2010.
- [123] Jacob William Guggenheim and H. Harry Asada. Inherent haptic feedback from supernumerary robotic limbs. *IEEE Transactions on Haptics*, pp. 1–1, 2020.
- [124] Irfan Hussain, Leonardo Meli, Claudio Pacchierotti, Gionata Salvietti, and Domenico Prattichizzo. Vibrotactile haptic feedback for intuitive control of robotic extra fingers. In *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, June 2015.
- [125] M H D Yamen Saraji, Tomoya Sasaki, Kai Kunze, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. MetaArms: Body remapping using Feet-Controlled artificial arms. *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '18*, pp. 65–74, 2018.
- [126] Jacob William Guggenheim and H Harry Asada. Inherent haptic feedback from supernumerary robotic limbs. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 4, No. 3, pp. 1–9, 2020.
- [127] Vincent Hayward, Oliver R Astley, Manuel Cruz - Hernandez, Danny Grant, and Gabriel Robles - De - La - Torre. Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, Vol. 39, p. 88, March 2004.
- [128] Karlin Bark, Jason W Wheeler, Sunthar Premakumar, and Mark R Cutkosky. Comparison of skin stretch and vibrotactile stimulation for feedback of proprioceptive information. In *2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 71–78. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org), March 2008.
- [129] K Bark, J Wheeler, P Shull, J Savall, and M Cutkosky. Rotational skin stretch feedback: A wearable haptic display for motion. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 166–176, July 2010.
- [130] Claudio Pacchierotti, Stephen Sinclair, Massimiliano Solazzi, Antonio Frisoli, Vincent Hayward, and Domenico Prattichizzo. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 10, No. 4, pp. 580–600, October 2017.
- [131] Heather Culbertson, Samuel B Schorr, and Allison M Okamura. Haptics: The

- present and future of artificial touch sensation. *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, Vol. 1, No. 1, pp. 385–409, May 2018.
- [132] Peter B Shull and Dana D Damian. Haptic wearables as sensory replacement, sensory augmentation and trainer - a review. *J. Neuroeng. Rehabil.*, Vol. 12, p. 59, July 2015.
- [133] Karlin Bark, Jason W Wheeler, Sunthar Premakumar, and Mark R Cutkosky. Comparison of skin stretch and vibrotactile stimulation for feedback of proprioceptive information. In *2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 71–78, March 2008.
- [134] Jason Wheeler, Karlin Bark, Joan Savall, and Mark Cutkosky. Investigation of rotational skin stretch for proprioceptive feedback with application to myoelectric systems. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, Vol. 18, No. 1, pp. 58–66, February 2010.
- [135] Matteo Rossi, Matteo Bianchi, Edoardo Battaglia, Manuel G Catalano, and Antonio Bicchi. HapPro: A wearable haptic device for proprioceptive feedback. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 66, No. 1, pp. 138–149, January 2019.
- [136] Nicoletta Colella, Matteo Bianchi, Giorgio Grioli, Antonio Bicchi, and Manuel G Catalano. A novel Skin-Stretch haptic device for intuitive control of robotic prostheses and avatars. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 1572–1579, April 2019.
- [137] Leonardo Meli, Irfan Hussain, Mirko Aurilio, Monica Malvezzi, Marcia K O’Malley, and Domenico Prattichizzo. The hbracelet: A wearable haptic device for the distributed mechanotactile stimulation of the upper limb. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 2198–2205, July 2018.
- [138] Hideki Shimobayashi, Tomoya Sasaki, Arata Horie, Riku Arakawa, Zendai Kashino, and Masahiko Inami. Independent control of supernumerary appendages exploiting upper limb redundancy. In *Augmented Humans Conference 2021, AHs’21*, pp. 19–30, New York, NY, USA, February 2021. Association for Computing Machinery.
- [139] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. In Peter A Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Advances in Psychology*, Vol. 52, pp. 139–183. North-

Holland, January 1988.

- [140] 三宅晋司, 神代雅晴. メンタルワークロードの主観的評価法. *人間工学*, Vol. 29, No. 6, pp. 399–408, 1993.
- [141] Dongkyoung Chwa. Sliding-mode tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots in polar coordinates. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Vol. 12, No. 4, pp. 637–644, July 2004.
- [142] Jun Ho Lee, Cong Lin, Hoon Lim, and Jang Myung Lee. Sliding mode control for trajectory tracking of mobile robot in the rfid sensor space. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 429–435, 2009.
- [143] Jun Ku Lee, Yoon Ho Choi, and Jin Bae Park. Sliding mode tracking control of mobile robots with approach angle in cartesian coordinates. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 718–724, 2015.
- [144] B P DeJong, J E Colgate, and M A Peshkin. Mental transformations in Human-Robot interaction. In Xiangyu Wang, editor, *Mixed Reality and Human-Robot Interaction*, pp. 35–51. Springer Netherlands, Dordrecht, 2011.
- [145] Kuniharu Sakurada, Ryota Kondo, Fumihiko Nakamura, Masaaki Fukuoka, Michiteru Kitazaki, and Maki Sugimoto. The reference frame of robotic limbs contributes to the sense of embodiment and motor control process. In *Augmented Humans 2022, AHs 2022*, pp. 104–115, New York, NY, USA, March 2022. Association for Computing Machinery.
- [146] B Llorens-Bonilla, F Parietti, and H H Asada. Demonstration-based control of supernumerary robotic limbs. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, No. Figure 1, pp. 3936–3942, 2012.
- [147] Azumi Maekawa, Kei Kawamura, and Masahiko Inami. Dynamic assistance for human balancing with inertia of a wearable robotic appendage. pp. 4077–4082, 2020.
- [148] Takashi Yamamoto, Koji Terada, Akiyoshi Ochiai, Fuminori Saito, Yoshiaki Asahara, and Kazuto Murase. Development of human support robot as the research platform of a domestic mobile manipulator. *ROBOMECH journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–15, 2019.
- [149] Meenakshi Gupta, Swagat Kumar, Laxmidhar Behera, and Venkatesh K Subrama-

- nian. A novel vision-based tracking algorithm for a human-following mobile robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 47, No. 7, pp. 1415–1427, 2016.
- [150] Noriaki Hirose, Ryosuke Tajima, and Kazutoshi Sukigara. Personal robot assisting transportation to support active human life—human-following method based on model predictive control for adjacency without collision. In *2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, pp. 76–81. IEEE, 2015.
- [151] Spyros G Tzafestas. Mobile robot control and navigation: A global overview. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 91, No. 1, pp. 35–58, 2018.
- [152] Jong-Min Yang and Jong-Hwan Kim. Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 15, No. 3, pp. 578–587, 1999.
- [153] Dongkyoung Chwa. Sliding-mode tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots in polar coordinates. *IEEE transactions on control systems technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 637–644, 2004.
- [154] BK Patle, Anish Pandey, DRK Parhi, A Jagadeesh, et al. A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 582–606, 2019.
- [155] Morgan Quigley, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, Andrew Y Ng, et al. ROS: an open-source robot operating system. *ICRA workshop on open source software*, 2009.
- [156] Jacquelin Perry and Judith M Burnfield. *Gait analysis: Normal and pathological function 2nd Edition*. 2010.
- [157] Lynette A Jones and Susan J Lederman. *Human Hand Function*. Oxford University Press, USA, April 2006.
- [158] Ian M Bullock and Aaron M Dollar. Classifying human manipulation behavior. In *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 1–6, June 2011.
- [159] Jason Alexander, Anne Roudaut, Jürgen Steimle, Kasper Hornbæk, Miguel Bruns Alonso, Sean Follmer, and Timothy Merritt. Grand challenges in Shape-Changing interface research. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. Paper 299 in CHI '18, pp. 1–14, New York, NY,

- USA, April 2018. Association for Computing Machinery.
- [160] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, and Ryo Kawamura. Project FEELEX: adding haptic surface to graphics. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '01, pp. 469–476, New York, NY, USA, August 2001. Association for Computing Machinery.
- [161] Ivan Poupyrev, Tatsushi Nashida, and Makoto Okabe. Actuation and tangible user interfaces: the vaucanson duck, robots, and shape displays. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, TEI '07, pp. 205–212, New York, NY, USA, February 2007. Association for Computing Machinery.
- [162] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '13*, pp. 417–426, 2013.
- [163] Anne Roudaut, Abhijit Karnik, Markus Löchtefeld, and Sriram Subramanian. Morphees: toward high “shape resolution” in self-actuated flexible mobile devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 593–602, New York, NY, USA, April 2013. Association for Computing Machinery.
- [164] Joohee Park, Young-Woo Park, and Tek-Jin Nam. Wrigglo: shape-changing peripheral for interpersonal mobile communication. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 3973–3976, New York, NY, USA, April 2014. Association for Computing Machinery.
- [165] Sungjune Jang, Lawrence H Kim, Kesler Tanner, Hiroshi Ishii, and Sean Follmer. Haptic edge display for mobile tactile interaction. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Vol. 15, pp. 3706–3716, 2016.
- [166] Shigeo Yoshida, Yuqian Sun, and Hideaki Kuzuoka. PoCoPo: Handheld pin-based shape display for haptic rendering in virtual reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–13, New York, NY, USA, April 2020. Association for Computing Machinery.
- [167] Shan-Yuan Teng, Tzu-Sheng Kuo, Chi Wang, Chi-huan Chiang, Da-Yuan Huang, Liwei Chan, and Bing-Yu Chen. Pupop: Pop-up prop on palm for virtual reality.

- In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 5–17, 2018.
- [168] Hsin-Ruey Tsai, Chieh Tsai, Yu-So Liao, Yi-Ting Chiang, and Zhong-Yi Zhang. Fingerx: Rendering haptic shapes of virtual objects augmented by real objects using extendable and withdrawable supports on fingers. In *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14, 2022.
- [169] Majken K Rasmussen, Esben W Pedersen, Marianne G Petersen, and Kasper Hornbæk. Shape-changing interfaces: a review of the design space and open research questions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 735–744, New York, NY, USA, May 2012. Association for Computing Machinery.
- [170] A Roudaut, D Krusteva, M McCoy, A Karnik, K Ramani, and S Subramanian. Cubimorph: Designing modular interactive devices. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3339–3345, May 2016.
- [171] Ken Nakagaki, Sean Follmer, and Hiroshi Ishii. LineFORM: Actuated curve interfaces for display, interaction, and constraint. *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology - UIST '15*, pp. 333–339, 2015.
- [172] Ken Nakagaki, Artem Dementyev, Sean Follmer, Joseph A Paradiso, and Hiroshi Ishii. ChainFORM: A linear integrated modular hardware system for shape changing interfaces. *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, pp. 87–96, 2016.
- [173] Mathieu Le Goc, Lawrence H Kim, Ali Parsaei, Jean-Daniel Fekete, Pierre Dragicevic, Sean Follmer, Université Paris-sud, and Université Paris-saclay. *Zooids : Building blocks for swarm user interfaces*. 2016.
- [174] Ryo Suzuki, Clement Zheng, Yasuaki Kakehi, Tom Yeh, Ellen Yi-Luen Do, Mark D Gross, and Daniel Leithinger. ShapeBots: Shape-changing swarm robots. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 493–505, New York, NY, USA, October 2019. Association for Computing Machinery.
- [175] Jonas Togler, Fabian Hemmert, and Reto Wettach. Living interfaces: the thrifty faucet. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded*

- Interaction*, TEI '09, pp. 43–44, New York, NY, USA, February 2009. Association for Computing Machinery.
- [176] Lining Yao, Ryuma Niyama, Jifei Ou, Sean Follmer, Clark Della Silva, and Hiroshi Ishii. PneuUI: pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '13, pp. 13–22, New York, NY, USA, October 2013. Association for Computing Machinery.
- [177] Marc Teyssier, Gilles Bailly, Catherine Pelachaud, and Eric Lecolinet. Mobilimb: Augmenting mobile devices with a robotic limb. *UIST 2018 - Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 53–63, 2018.
- [178] M R Cutkosky. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Trans. Rob. Autom.*, Vol. 5, No. 3, pp. 269–279, June 1989.
- [179] Thomas Feix, Javier Romero, Heinz-Bodo Schmiedmayer, Aaron M Dollar, and Danica Kragic. The GRASP taxonomy of human grasp types. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 46, No. 1, pp. 66–77, February 2016.
- [180] Ali Erol, George Bebis, Mircea Nicolescu, Richard D Boyle, and Xander Twombly. Vision-based hand pose estimation: A review. *Comput. Vis. Image Underst.*, Vol. 108, No. 1, pp. 52–73, October 2007.
- [181] Hong Cheng, Lu Yang, and Zicheng Liu. Survey on 3D hand gesture recognition. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, Vol. 26, No. 9, pp. 1659–1673, September 2016.
- [182] Masahiko Inami, Daisuke Uriu, Zendai Kashino, Shigeo Yoshida, Hiroto Saito, Azumi Maekawa, and Michiteru Kitazaki. Cyborgs, human augmentation, cybernetics, and jizai body. In *Augmented Humans 2022*, AHs 2022, p. 230 – 242, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [183] C Piazza, G Grioli, M G Catalano, and A Bicchi. A century of robotic hands. *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–32, May 2019.
- [184] Vighnesh Vatsal and Guy Hoffman. The wearable robotic forearm: Design and predictive control of a collaborative supernumerary robot. *Robotics*, Vol. 10, No. 3, p. 91, July 2021.

- [185] Mohammed Al-Sada, Thomas Höglund, Mohamed Khamis, Jaryd Urbani, and Tatsuo Nakajima. Orochi: investigating requirements and expectations for multipurpose daily used supernumerary robotic limbs. *ACM International Conference Proceeding Series*, No. Figure 1, 2019.
- [186] Mohammed Al-Sada, Keren Jiang, Shubhankar Ranade, Mohammed Kalkattawi, and Tatsuo Nakajima. HapticSnakes: multi-haptic feedback wearable robots for immersive virtual reality. *Virtual Real.*, Vol. 24, No. 2, pp. 191–209, June 2020.
- [187] Arata Horie, Mhd Yamen Saraiji, Zendai Kashino, and Masahiko Inami. EncounteredLimbs: A room-scale encountered-type haptic presentation using wearable robotic arms. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 260–269, March 2021.
- [188] Roozbeh Khodambashi, Gil Weinberg, William Singhose, Shima Rishmawi, Varun Murali, and Euisun Kim. User oriented assessment of vibration suppression by command shaping in a supernumerary wearable robotic arm. In *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 1067–1072, November 2016.
- [189] Ali Shafti, Shlomi Haar, Renato Mio, Pierre Guilleminot, and A Aldo Faisal. Playing the piano with a robotic third thumb: assessing constraints of human augmentation. *Sci. Rep.*, Vol. 11, No. 1, p. 21375, November 2021.
- [190] Sang-Won Leigh and Pattie Maes. Body integrated programmable joints interface. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, pp. 6053–6057, New York, NY, USA, May 2016. Association for Computing Machinery.
- [191] Sang Won Leigh, Kush Parekh, Timothy Denton, William S Peebles, Magnus H Johnson, and Pattie Maes. Morphology extension kit: A modular robotic platform for customizable and physically capable wearables. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Vol. Part F1276, pp. 397–400, 2017.
- [192] Ravinder S Dahiya, Philipp Mittendorf, Maurizio Valle, Gordon Cheng, and Vladimir J Lumelsky. Directions toward effective utilization of tactile skin: A review. *IEEE Sens. J.*, Vol. 13, No. 11, pp. 4121–4138, November 2013.
- [193] 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.

- [194] K Hoshino and I Kawabuchi. A humanoid robotic hand performing the sign language motions. In *MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechanics and Human Science (IEEE Cat. No.03TH8717)*, pp. 89–94, October 2003.
- [195] Ali Meghdari, Mino Alemi, Mohammad Zakipour, and Seyed Amir Kashanian. Design and realization of a sign language educational humanoid robot. *J. Intell. Rob. Syst.*, Vol. 95, No. 1, pp. 3–17, July 2019.
- [196] Frank Weichert, Daniel Bachmann, Bartholomäus Rudak, and Denis Fisseler. Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller. *Sensors*, Vol. 13, No. 5, pp. 6380–6393, May 2013.
- [197] Faye Wu and Harry Asada. Supernumerary robotic fingers: An alternative Upper-Limb prosthesis. In *ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, December 2014.
- [198] Haoran Xie, Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Toby Chong, Takuma Torii, and Tsukasa Fukusato. Augmenting human with compact supernumerary robotic limbs. In *13th Augmented Human International Conference*, No. Article 8 in AH2022, pp. 1–4, New York, NY, USA, May 2022. Association for Computing Machinery.
- [199] Natan Linder and Pattie Maes. LuminAR: portable robotic augmented reality interface design and prototype. In *Adjunct proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '10, pp. 395–396, New York, NY, USA, October 2010. Association for Computing Machinery.
- [200] Kohei Umezawa, Yuta Suzuki, Gowrishankar Ganesh, and Yoichi Miyawaki. Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study. *Scientific reports*, Vol. 12, No. 1, pp. 1–11, 2022.
- [201] Hideyuki Nakanishi, Kazuaki Tanaka, and Yuya Wada. Remote handshaking: Touch enhances video-mediated social telepresence. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, p. 2143 – 2152, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [202] K Hoshino and I Kawabuchi. Pinching with finger tips in humanoid robot hand.

- In *ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.*, pp. 705–712, July 2005.
- [203] Leonardo Franco, Gionata Salvietti, Michele Pompilio, Simone Rossi, and Domenico Prattichizzo. On the somatotopic mapping of haptic feedback from robotic supernumerary limbs. In *2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 192–197, August 2022.
- [204] Ken Arai, Hiroto Saito, Masaaki Fukuoka, Sachiyo Ueda, Maki Sugimoto, Michiteru Kitazaki, and Masahiko Inami. Embodiment of supernumerary robotic limbs in virtual reality. *Sci. Rep.*, Vol. 12, No. 1, p. 9769, June 2022.
- [205] Jonathan Eden, Mario Bräcklein, Jaime Ibáñez, Deren Yusuf Barsakcioglu, Giovanni Di Pino, Dario Farina, Etienne Burdet, and Carsten Mehring. Principles of human movement augmentation and the challenges in making it a reality. *Nat. Commun.*, Vol. 13, No. 1, p. 1345, March 2022.
- [206] David A Handelman, Luke E Osborn, Tessy M Thomas, Andrew R Badger, Margaret Thompson, Robert W Nickl, Manuel A Anaya, Jared M Wormley, Gabriela L Cantarero, David McMullen, Nathan E Crone, Brock Wester, Pablo A Celnik, Matthew S Fifer, and Francesco V Tenore. Shared control of bimanual robotic limbs with a Brain-Machine interface for Self-Feeding. *Front. Neurobot.*, Vol. 16, , 2022.
- [207] Hong Jun Jeon, Dylan P Losey, and Dorsa Sadigh. Shared autonomy with learned latent actions. May 2020.
- [208] Hiroto Saito, Arata Horie, Azumi Maekawa, Seito Matsubara, Sohei Wakisaka, Zendai Kashino, Shunichi Kasahara, and Masahiko Inami. Transparency in Human-Machine mutual action. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 33, No. 5, pp. 987–1003, 2021.
- [209] Yaonan Zhu, Takayuki Ito, Tadayoshi Aoyama, and Yasuhisa Hasegawa. Development of sense of self-location based on somatosensory feedback from finger tips for extra robotic thumb control. *ROBOMECH Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–10, June 2019.
- [210] Atsushi Izumihara, Tomoya Sasaki, Masahiro Ogino, Reona Takamura, and Masahiko Inami. Transfantome: transformation into bodies of various scale and

structure in multiple spaces. In *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, No. Article 27 in SIGGRAPH '19, pp. 1–2, New York, NY, USA, July 2019. Association for Computing Machinery.

- [211] Arata Horie, Zendai Kashino, Hideki Shimobayashi, and Masahiko Inami. Two-Dimensional moving phantom sensation created by rotational skin stretch distribution. In *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 139–144, July 2021.
- [212] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pp. 2019–2028, New York, NY, USA, May 2011. Association for Computing Machinery.
- [213] Oliver S Schneider, Ali Israr, and Karon E MacLean. Tactile animation by direct manipulation of grid displays. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, UIST '15*, pp. 21–30, New York, NY, USA, November 2015. Association for Computing Machinery.

## 付録 A

# 触覚フィードバックを用いた肩入力 の実験

ここでは、3章で述べた入力手法に触覚フィードバックを組み合わせたシステムを用いた実験について述べる。

### A.1 実装

本システムは、肩の動きを検出・分類するセンシングシステムと、脇腹に触覚フィードバックを与えるフィードバックシステムから構成される。装置は拡張身体部位での利用を想定し、センシングとフィードバックの両方ともウェアラブル化した。

使用したセンシングシステムの詳細は、3.3に述べる。触覚フィードバックでは、スキンストレッチモジュールをアレイ状に配置して脇腹に提示する。ここで振動触覚ではなく、皮膚伸縮を採用したのは、皮膚伸縮は脱感作に悩まされることがなく、固有受容感覚としてフィードバックしやすいからである。以下では、使用した触覚フィードバックシステムについて説明する。

#### A.1.1 脇腹への触覚提示

触覚フィードバックは、ウェアラブル多点スキンストレッチ装置を用いて実験参加者に提示される。この装置には、回転刺激を与える接触子が配列されており、それらが協調して目的のスキンストレッチ分布を提示する。我々は、センシングシステムが認識した肩の姿勢を直感的に認識できる触覚刺激を提示するために、触覚刺激を設計し、接触子を調整した。

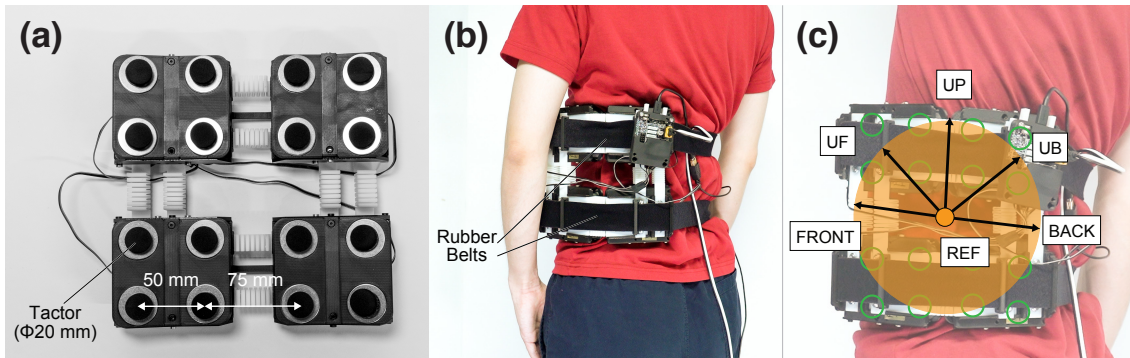


図 A.1: 実装した触覚フィードバックシステム：(a) 装置概要、(b) ゴムベルトで腰部に固定することで安定した接触を行う、(c) 肩の入力状態に応じた触覚刺激

### 多点スキストレッチ装置

開発した脇腹への触覚提示装置は、1つのモジュールに4つの刺激接触子ユニットを搭載している。装置全体で4つのモジュール、合計16個の刺激接触子図 A.1a を有している。各ユニットの接触子はサーボモータとスポンジを取り付けたサーボホーンで構成されている。使用したサーボモータは Futaba RS204MD。接触子のスポンジは、直径20mm、厚さ5mm、アスカ硬度25のクロロプレンゴム製スポンジを選択した。このスポンジは、皮膚との滑りや皮膚への押しつけによる痛みを避けるために選択されたものである。触覚の正確な配置や触覚の大きさ（触覚サイズ：20mm、触覚間距離：50mm）は、連続した動きを錯覚させる先行研究 [211] の装置を参考に選択した。

一般に、触覚フィードバックを安定して伝達するためには、ユーザーの身体とデバイスが安定して接触していることが必要である。なぜなら、身体と触覚の接触が不十分な場合、意図した皮膚感覚が再現されない可能性があるためである。そこで、図 A.1b に示すように、モジュール同士を柔軟な構造で接続し、ゴムベルトで腰部に固定することで安定した接触を確保した。このプロトタイプは最終的に左右ペアで使用する予定だが、今回は左側のみを製作した。

### 触覚刺激設計

我々は、触覚刺激の提示に仮想刺激点のアプローチを選択した。仮想刺激点とは、そこに刺激ユニットがあるかどうかに関係なくユーザーが刺激の中心を知覚する可能性のある点である。刺激ユニットを動かさない代わりに刺激の強さを変化させることで、刺激の中心が移動して知覚されるように制御する。このアプローチは、刺激ユニットを移動できないアレイ状の刺

激装置で一般的に用いられる [211, 212, 213]。

センシングシステムが認識した肩の姿勢をユーザが直感的に認識できるようにするため、システムが認識した方向に対応して仮想刺激点が移動するように提示した。移動する仮想刺激点を生成するために、デバイス上の各触覚は、仮想刺激点への近接度に比例して回転角度が変化するように制御される。このスキストレッチ触覚アレイを用いた仮想刺激点の生成方法については、[211] に詳しく述べられている。

入力姿勢とフィードバック刺激の間に回転座標変換が存在すると、作業効率が低下することが想定される。そこで、入力とフィードバックの座標系を可能な限り一致させることを目指した。本システムでは、肩の動作入力は人体座標系の傍矢状面\*<sup>1</sup>上で行われる。触覚フィードバックを脇腹に提示することで、入力とフィードバックの座標平面を一致させることができる。そのため、刺激点は図 A.1c に示すように、座標系の一致を容易にするために、入力姿勢と同じ方向を辿るように制御される。例えば、REF が入力されると刺激点は装置の中心に移動する。FRONT が入力されると刺激点は前方に移動し、BACK が入力されると刺激点は後方に移動する。また、UP, UF, UB 入力の場合、刺激点は装置中心に対して対応する位置に移動する。刺激点の移動範囲は、装置中心から一定距離の円周上の領域とする。

## A.2 実験

実験について説明する。我々は、システムを使用するトレーニングなしでフィードバックの違いによる効果を比較することに焦点を当てた。3.3 章では、適度なトレーニングによって精度が向上することが示唆されたが、触覚フィードバックによって、トレーニングを受けていないユーザが直感的にシステムを使用できるかどうかを調査したいと考えた。そこで、肩の動かし方などの事前トレーニングの指示や、肩のストレッチなどの事前運動は行わなかった。なお、順序効果を最小化するために、実施する実験条件の順序は実験参加者間でランダムにした。

### A.2.1 実験参加者

実験に参加したのは 12 名（男性 11 名、女性 1 名、22–34 歳：平均年齢 24.6 歳）である。そのうち 4 名は、3.3 章の実験 1 のセンシングデバイスのデータ取得に参加している。しかし、最後にセンシングシステムの実験に参加してから数カ月以上経過していることから、事前にトレーニングを受けていない新規参加者として扱った。

---

\*<sup>1</sup> 胴体を正面から見て左右に分割するような平面

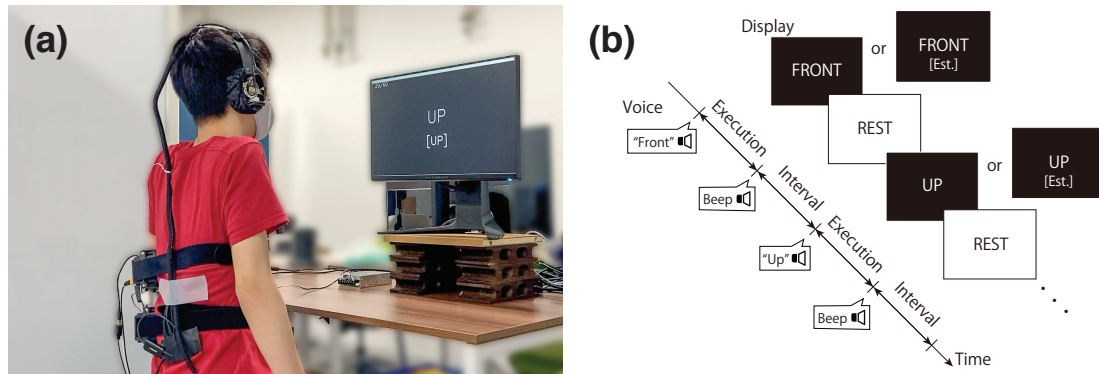


図 A.2: (a) 実験風景、(b) タスクシーケンス

## A.2.2 手順

最初に実験者が参加者に実験の説明を行う。参加者はセンシングデバイス、フィードバックデバイス、赤いシャツ（システムが赤い肩を認識するように訓練されているため必要）を着用した。図 A.2a に示すように、参加者は椅子に座り、ディスプレイの指示に従ってタスクを行う。ディスプレイの高さは、参加者の視線が地面と水平になるように調整した。タスクを始める前に実験者は、フィードバック装置から提示される刺激を参加者が感じることができることを確認した。

実験タスクでは、ディスプレイに表示された肩の姿勢を取る、休息を取る、を3秒ごとに交互に行った（図 A.2b）。1セッションあたり合計60回の試行を行い、1人あたり合計4セッションを実施した。各セッションでは与えられた実験条件で課題を行う。

視覚フィードバックと触覚フィードバックの組み合わせで4つの実験条件を設定した。それぞれ、Blind条件、Haptic条件、Visual条件、Visual&Haptic条件と呼ぶ。Blind条件とVisual条件の違いは、参加者の入力姿勢を指示下の画面に表示するかしないかである。Haptic条件では、触覚デバイスを起動し、A.1.1で述べた刺激をユーザに提示した。Hapticのない条件では、触覚デバイスは使用しない。この実験の主な目的は、触覚フィードバックがユーザの入力の正確さにどのように貢献できるかを調べることである。また、Blind, Haptic, Visualの各条件における順序効果を低減するため、すべての参加者について条件の順序をランダム化した。ただし、Visual&Haptic条件は常に最後のセッションで実施した。

タスクパフォーマンスを測定するために、指示に対する正答率を使用した。また、各セッションの最後に、参加者の主観的なタスク負荷を評価するために、NASA-TLX [139, 140] をベースに日本語に翻訳した6項目7段階のリッカート尺度による質問票に記入してもらった。

### A.2.3 結果

実験結果を、タスクの正確性、主観作業負荷の順に示す (図 A.3)。

図 A.3a に各条件における回答精度を示す。全体平均では、Blind, Haptic, Visual, Visual&Haptic の順に正解率が高くなり、それぞれ 50.7 %, 55.3 %, 76.2 %, 79.2 % であった。精度のばらつきの上限は、Blind, Haptic, Visual, Visual&Haptic の順で同様のパターンとなる。ただし、中央値は、Haptic 条件のスコアが Blind 条件よりも低い値を示している。一元配置分散分析の結果、Blind 条件の精度は Visual 条件、Visual&Haptic 条件と有意に差があった ( $p = 0.0014, 0.001 : p > 0.01$ )。Haptic 条件でも同様に、Visual 条件 ( $p = 0.0109 : p > 0.05$ ) および Visual&Haptic 条件 ( $p = 0.003 : p > 0.01$ ) と比較して有意な差が見られた。Blind 条件と Haptic 条件では、有意差は見られなかった。

図 A.3b に示す混同行列では、Blind 条件と Haptic 条件で全体の正答率に特徴的な差はない。これに対し、Visual と Visual&Haptic の混乱行列は、ほぼ同じような正答率分布を示している。これらの結果は、触覚フィードバックだけでは誤入力の修正に不十分であることを示唆している。つまり、今回のプロトタイプでは、触覚フィードバックは精度に大きな影響を与えない。以上の結果から本実験では、全体的な傾向としては、触覚フィードバックが肩の動き

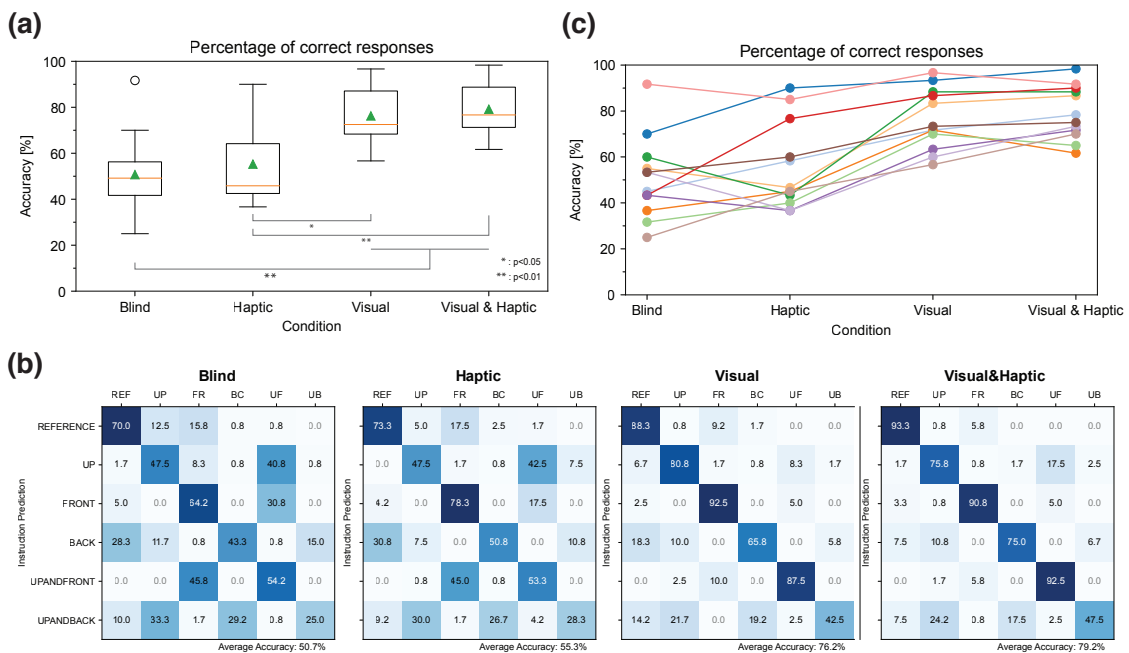


図 A.3: 実験結果 : (a) 正確性の箱ひげ図、(b) 各条件で取得した全データの混同行列。(c) 参加者毎の精度を表す折れ線グラフ

の入力の精度を向上させるという仮説は支持されなかった。

しかし、参加者一人一人のデータを見ると、異なる傾向が見られる（図 A.3c）。Haptic 条件の精度が Blind 条件より高いのは、12 人中 7 人であった。つまり、半数以上の参加者が、Blind 条件よりも Haptic 条件の方が高いスコアを出している。このことから、本プロトタイプで提示した触覚フィードバックは、有意ではないものの、参加者によって精度を向上させることができる可能性を示唆している。

図 A.4 は、被験者が報告した主観的作業負荷の推移を示したものである。縦軸は 7 段階の得点を百聞立に換算した点数である。全体として、各指標に統計的に有意な差は見られなかった。しかし、Haptic 条件と Visual 条件を比較すると、Performance の指標を除くすべての項目で Haptic 条件が低いスコアを示した。特に、有意差はないものの、Temporal Demand の指標は、Visual 条件の方が Haptic 条件より低かった。このように、本実験では、全体的に Haptic 条件が Visual 条件よりも低い傾向にあり、フィードバックのモダリティによって主観的なタスク負荷が影響を受ける可能性が示唆された。

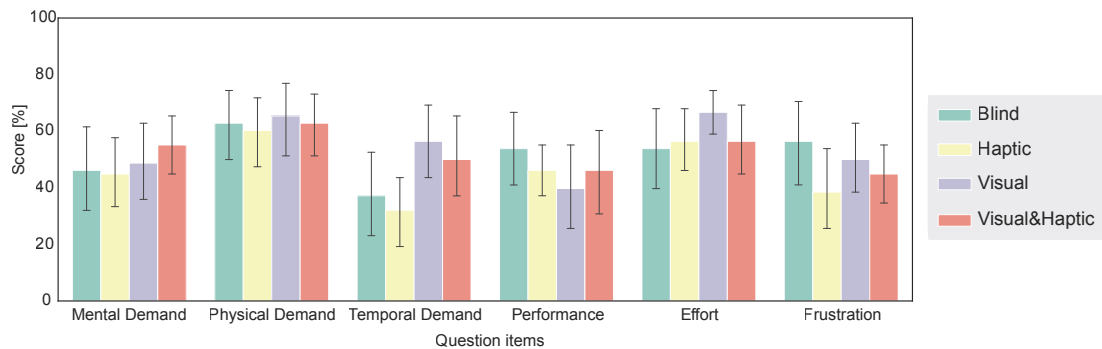


図 A.4: 主観作業負荷の得点（エラーバーは標準偏差）

## 付録 B

# HCR プロトタイプのモデルおよび制御式

ここでは、5章で述べた HCR のプロトタイプにおけるダイナミックモデルと制御設計について説明する。

### B.1 運動モデル

移動ロボットの姿勢ベクトルは、図 B.1 に示すように、グローバルフレーム  $\{R_0\}$  に対して  $P_c = (x_c, y_c, \theta_c)^T$  として示される。 $(x_c, y_c)$  はロボットの中心点の位置、 $\theta_c$  は方位角を表す。移動ロボットは x 軸方向の直線移動と z 軸まわりの回転の 2 自由度を持つ。入力ベクトル  $u = (v, \omega)^T$  は HCR の動きを制御する。 $v$  は直線速度、 $\omega$  は角速度である。

移動ロボットが 2 次元平面上を滑らずに移動するという仮定 (B.1) に基づいて、移動ロボットの運動方程式は次の (B.2) ように書くことができる。

$$\dot{x}_c \sin \theta_c - \dot{y}_c \cos \theta_c = 0 \quad (\text{B.1})$$

$$\dot{P}_c = \begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \theta_c \\ v \sin \theta_c \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} u \quad (\text{B.2})$$

### B.2 問題の定式化

本研究では、トラッキング問題を単純化し、HCR の制御問題に焦点を当てることにした。HCR の理想的なシステムは、対象となる人間の姿勢を追跡するための追跡センサを機械に搭

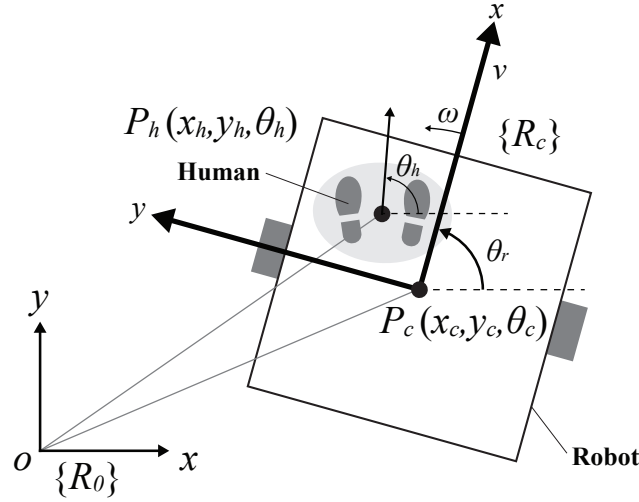


図 B.1: プロトタイプ的设计におけるロボットと人間の座標設定

載し、特別な装置を備えた部屋に制限されることなく、任意の場所で動作できるようなシステムでなければならない。しかし、この最初の研究では、HCR の存在の可能性を、特にその制御性の観点から証明することに主眼が置かれている。そこで、ここでは、人間の姿勢をモーションキャプチャシステムで追跡し、正確な情報を容易に得ることができるとした。

制御問題の定式化は、トラッキングシステムがどこに装備されているかに影響されないことに注意する必要がある。 $P_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$  をターゲット人間  $P_h$  とロボット  $P_c$  の間の姿勢誤差をグローバル静止フレーム  $\{R_0\}$  から  $(x_c, y_c)$  の原点を持ち、Z 軸を  $\theta_c$  の方向としてロボットローカル動座標フレーム  $\{R_c\}$  に変形したとする。グローバルフレームからロボットローカルフレームへの変換は (B.3)、その微分は (B.4) のように定式化することができる。理想系では、対象人物の位置は直接  $P_e$  として追跡される。静止フレームでの制御入力  $u = (v, \omega)$  を決定するために必要な静止フレーム  $(v_h, \omega_h)$  での対象人間の速度は、(B.3) から得ることができる。

$$P_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_h - x_c \\ y_h - y_c \\ \theta_h - \theta_c \end{pmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$\dot{P}_e = \begin{pmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_e \omega_c - v_c + v_h \cos \theta_e \\ -x_e \omega_c + v_h \sin \theta_e \\ \omega_h - \omega_c \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

単純に、HCR 問題は終端状態  $t \rightarrow \infty$  において  $P_e \rightarrow 0$  と定式化できる。しかし、2 輪ロボットは制約条件 (B.1) を持つ非ホロノミックシステムであり、 $P_e$  の 3 自由度すべてが同時

に 0 に収束することはできない。そこで、本研究では、5.3.2 で述べたように、人間が横方向にほとんど動かないという仮定のもと、 $x_e, \theta_e, y_e$  の順に収束の優先順位を高くする。

### B.3 人間の姿勢トラッキング

本研究では、モーションキャプチャシステムにより人間の姿勢を追跡し、カルマンフィルタを用いて速度を推定する。また、同じシステムでロボットの姿勢も追跡し、そのデータを用いてロボットのオドメトリを補正する。追跡システムは、対象人物の位置と姿勢  $P_h(x_h, y_h, \theta_h)$  を捕捉する。そして、加速度が一定であるという仮定のもと、カルマンフィルタを用いて姿勢データから速度ベクトル  $(\dot{x}_h, \dot{y}_h, \omega_h)$  が推定される。推定モデルは (B.5) のように記述され、離散時間系に変換して実装される。なお、状態ベクトル  $x = (P_h, \dot{P}_h, \ddot{P}_h)^T$ 、 $y$  は観測ベクトル、 $A$  はシステム行列、 $C$  は観測行列である。 $I$  と  $O$  はそれぞれ  $\mathbb{R}^{3 \times 3}$  における恒等行列とゼロ行列である。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax, \quad y = Cx \\ \text{where } A &= \begin{pmatrix} O & I & O \\ O & O & I \\ O & O & O \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} I & O & O \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

### B.4 制御設計

以下の HCR 問題は、SMC 法により解くことができる。二輪ロボットの SMC 制御則は、Lee ら [142] によってよく説明される。彼らは、Lyapunov 関数  $V$  とスイッチング関数  $S$  を (B.6), (B.7) として選んだ。なお、注意点として、 $x_e, y_e, \theta_e$  は (B.3) で定義した誤差  $P_e$  の要素である。

$$V = \frac{1}{2} y_e^2 \quad (\text{B.6})$$

$$S = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_e \\ \theta_e + \tan^{-1}(v_r y_e) \end{pmatrix} \quad (\text{B.7})$$

制御入力  $u = (v, \omega)$  は、リアプノフ関数の条件を満たし、かつスイッチング関数がゼロに収束するように (B.8) として決定される。なお、 $\text{sat}(s)$  は -1 から 1 の飽和関数である。

$$\begin{cases} \omega = \omega_h + \frac{\partial \alpha}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} v_r \sin \theta_e + k_2 \text{sat}(s_2) \\ v = y_e \omega + v_r \cos \theta_e + k_1 \text{sat}(s_1) \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

$k_1 > 0$  and  $k_2 > 0$  は、各スイッチング関数要素の収束速度をバランスさせるための設計パラメータである。

Lee ら (2015) [142] の手法では、ターゲットの速度  $v_h$  がゼロのとき、 $y_e$  がゼロに収束することが保証されていないことを指摘している。実際、Lyapunov 関数  $V$  の時間微分は、スイッチング面 ( $S = 0$ ) 上では  $\dot{V} = -v_h y_e \sin(\tan^{-1}(v_h y_e))$  と表せ、それは  $v_h \neq 0$  でなければ負定値にならない。また、位置誤差を小さくする方向として、アプローチ角という言葉を導入した。位置誤差が大きい場合、位置誤差が漸近的にゼロに収束するように、目標ヨー角を切替関数設計のアプローチ角に設定する。しかし、この方法では、特に  $x_e$  が小さく  $y_e$  が大きい場合、位置合わせのために一時的に大きな角度誤差を得ることを許容する必要がある。結論として、B.2 に記載されている優先順位の設定に従って、[142] の方法を選択した。