

運動予測に基づく視覚的運動と自己運動との関連性の認知メカニズムについての分析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 齊藤, 寛人 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20260

明治大学大学院先端数理科学研究科

2018 年度

博士学位請求論文

運動予測に基づく視覚的運動と自己運動との関連性の
認知メカニズムについての分析

Analysis of the Interpretive Mechanism Based on
Motor Prediction about the Relationship between
Visual Motion and Self-Motion

学位請求者 先端メディアサイエンス専攻
齊藤 寛人

要旨

本論文では自己運動と視覚的運動との関連性の認知に自己の運動に対する運動予測がどのように関与するかを検証した研究成果について述べる。

ヒューマンコンピュータインタラクションの分野では、操作者が身体運動によって視覚的対象を操作するインタフェースの有効性が広く知られている。こうしたインタフェースが有効な理由の1つとして、ユーザが自分自身の運動と操作する視覚的対象がもたらす結果との関連性を認知することで、その対象を自己の身体と同一あるいは延長するものとして捉えていることが挙げられる。このような視覚的な対象を自己として捉えている感覚は“自己帰属感”と呼ばれ、インタフェースデザインの分野での重要なキーワードとなっている。また近年は、人の感覚特性を利用したバーチャルリアリティ技術などの発展がめざましく、様々なシステムやコンテンツが制作されている。特に、操作者の実世界における身体や運動をそのままバーチャル空間に再現するだけでなく、それらを拡張・変容して表現するインタフェースが多く提案されている。このような実世界を拡張するインタフェースの設計指針を考える上では、実身体とは見た目や運動が異なる視覚的対象に対して自己帰属感を上手く生起させる条件や、実世界では体験できないような知覚体験を生起させる条件の解明が求められている。

認知科学や脳科学の分野の多くの研究では、自己帰属感の生起には実身体の身体運動と視覚的対象の随伴関係を認知することが重要であると示唆されている。人は自身の身体運動を体性感覚からの情報によって知ることが出来る。この体性感覚によって得られた自己運動の情報と視覚によって得られた運動の情報とが一致するか否かを認知することが自己運動と視覚的運動との関連性の認知における1つの基盤となる。これに加え、能動的に身体を動かす際は、運動の結果得られる感覚フィードバックをあらかじめ予測していることが明らかになっている。したがって、能動的運動時は運動予測と視覚的運動結果とが一致性するか否かを認知することがもう1つの基盤となる。すなわち、能動的運動時には「視覚と体性感覚間の一致性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の2つの基盤が同時に働くといえる。先行研究では、受動的運動時と能動的運動時との比較を行い、能動的運動時の方が運動の関連性を認知しやすいことから運動予測の重要性が示唆されている。ただし、能動的運動時に運動予測がどのように働いているかは詳細には解明されていない。

また、視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚として知られる Pseudo-haptics の生起においても、運動予測が関与することが示唆されている。具体的には Pseudo-haptics が外力として解釈される要因は視覚的運動と運動予測との差を認知することであるといくつかの研究によって主張されている。ただし、運動結果と運動予測との差を認知することが疑似的な外力知覚が解釈される要因となることを直接的には示されておらず、Pseudo-haptics の生起においても運動予測がどのように働いているかの詳細な説明が求められる。

本論文の目的は、ユーザが自己の身体運動を用いて映像内に提示される視覚的対象を操作する際に、自己運動と視覚的運動との関連性をどのように認知し、その認知によってどのような解釈が生じ得るのかを明らかにすることである。特に本論文では能動的に身体を動かすことで生じる運動予測に注目し、自己帰属感と Pseudo-haptics の生起過程に運動予測が具体的にどのように関与するのかを検証する。これらの生起過程に運動予測が関与することは先行研究で示唆されているが、具体的にどのように関わるのかは詳細には明らかにされていない。その最大の理由は、能動的運動時には「視覚と体性感覚間の一致性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の2つの基盤が同時に働くため、それらを個別に検証することが難しいことである。そこで本論文では「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一致性の認知」を分離した検証を行う新規実験系を構築することで自己運動と視覚的運動との関連性の解釈における運動予測による具体的な影響の調査を試みる。

第1章では、これまでの研究によって示唆されている身体感覚を利用したインタフェースの有効性およびその発展と認知科学的視点からの運動予測の重要性についてまとめ、自己の運動と視覚的運動との関連性の解釈メカニズムの説明の必要性を概説する。その上で本研究の目的および本論文の構成について述べる。

第2章では、自己運動と視覚的運動結果との関連性の認知によって生起する自己帰属感と Pseudo-Haptics の2つの知覚現象と本研究で重要視する運動予測についての先行研究を整理し、本研究で取り組む研究対象について説明する。

第3章では、本研究の目的について述べ、自己運動と視覚的運動との関連性の解釈によって生じる自己帰属感と Pseudo-Haptics の生起過程について本研究での具体的な問題意識とその解決手法についてまとめる。

第4章では、「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」はしやすいが、「視覚と体性感覚間の一致性の認知」が難しい条件で、視覚的運動と自己運動との随伴関係の認知ができるかを新規実験系により検証した結果について述べる。具体的には視覚的運動結果を予測しやすい状況を保った上で、視覚と体性感覚間に空間的不一致が生じる状況を作るために、

クランクハンドルによる回転操作を導入した。これは運動方向を右回り・左回りの円運動に限定し、映像内の視覚的対象を実身体に対して回転した位置に提示することでその状況を作るものである。この実験環境では、視覚的対象を回転して提示することで視覚と体性感覚間に空間的な不一致が生じるが、運動方向が限定されることで運動結果は予測しやすい。この新規実験系を用いて、被験者が自己の運動と視覚的運動との随伴関係を認知できるか否かを検証する課題を実施した。その結果、この実験系においては視覚と体性感覚間に空間的不一致が生じることによる課題結果への影響は確認されなかった。この結果は、運動結果を予測しやすければ視覚情報と体性感覚情報が空間的に整合することが自己帰属感の生起する過程で必須ではなく、「視覚と体性感覚間の一致性の認知」が難しい条件であっても運動の随伴関係の認知ができることを示唆するものである。

第5章では、自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する運動の空間的不一致による影響が、実行する運動の様相や視覚的対象の見た目によってどのように変化するかを検証した結果について述べる。具体的には、ペン入力によるポインティング操作において、運動する複数の視覚的対象から被験者の操作に連動する1つを発見させるタスクの正答率を、「実行する運動パターン」・「視覚対象の見た目」・「呈示位置の回転」の3種類を組み合わせた条件で比較した。運動パターンの条件には、第4章の研究で用いた円運動に加え、視覚的運動の呈示位置が回転することで運動結果を予測しにくくなると考えられる直線運動を導入した。その結果、円運動のように視覚的運動結果を予測しやすい条件では、第4章の結果と同様に空間的不一致が生じることによる身体運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する影響は確認されなかった。しかし、直線運動のように空間的不一致が生じることで運動結果を予測しにくくなる条件では運動の随伴関係の認知に差が生じることが確認された。また、視覚的対象の見た目によっても運動結果の予測のしやすさが左右されることが確認された。この結果は、自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知では視覚的運動結果を予測できることが重要であり、その予測のしやすさは運動結果の空間的整合性だけでなく実行する運動の様相や視覚的対象の見た目など様々な要因に影響されることを示唆するものである。

第6章では、運動予測と視覚的運動結果との差を認知することが、Pseudo-Hapticsが外力として知覚される上での条件であるという仮説を立て検証した結果について述べる。この検証方法として、被験者の運動に意図しない運動を無意識化で誘発し、被験者が予測する運動と実際の運動結果が一致しない状況を作り出すことで、視覚と力覚間のクロスモーダル知覚が生じない状況であっても被験者が疑似的な外力を感じるかを調査した。具体的には、マウスを用いたステアリングタスクを被験者自身が行う試行と、他者がタスクを行っている

る映像を観察する試行を交互に実施することで被験者の手の運動に無意識的な運動伝染を誘発した。被験者には自身がタスクを行うときにタスク中に感じた外力の強度を回答させ、運動伝染が起こることでこの強度に変化が生じるかを調査した。その結果、誘発された意図しない運動伴った外力を被験者が感じる事が認められた。この結果は、Pseudo-haptics が外力として知覚される上では、運動予測と知覚された運動結果との差を認知することが重要な要因となっていることを示唆するものである。

第7章では、第4章から第6章で述べた各研究で得られた知見から総合的な議論を行う。各研究で得られた学術的知見から本研究全体の知見についてまとめ、インタフェースデザイン分野、認知科学分野における貢献と、今後の展望として人の身体感覚の特性を利用したヒューマンコンピュータインタラクション技術への本研究の応用可能性について述べる。

第8章では、本論文の成果と貢献について最終的なまとめを行う。本論文全体の学術的貢献は、曖昧に理解されてきた運動予測の有効性について具体的な知見を提供したことである。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.1.1	身体運動を利用したインタフェースの有効性と発展	1
1.1.2	インタフェースによる実世界の拡張	2
1.1.3	運動知覚における予測の重要性	3
1.2	目的	4
1.3	本論文の構成	5
第2章	自己運動と視覚的運動との関連性の認知に関する先行研究	6
2.1	自己帰属感	6
2.1.1	自己帰属感の基礎概念	6
2.1.2	自己帰属感の生起過程	8
2.2	Pseudo-haptics	14
2.2.1	外力知覚としての Pseudo-haptics	14
2.2.2	外力を伴わない Pseudo-haptics	16
2.2.3	Pseudo-haptics の生起過程	18
2.3	運動予測	22
2.3.1	本研究が扱う運動予測の基礎概念	22
2.3.2	意識的な運動予測と運動学習の関係性についての先行研究	23
2.4	まとめ	24
第3章	本研究の目的と手法	27
3.1	能動的な自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知における運動予測の有効性の調査	27
3.2	運動の随伴関係の認知がしやすくなる要因の調査	28
3.3	運動の関連性の解釈に運動予測が与える影響の調査	29
第4章	能動的回転操作における自己帰属感の生起過程の分析	30
4.1	はじめに	30
4.2	関連研究	31
4.3	本章の目的	31
4.4	実験設計	32
4.4.1	検証する上での問題	32
4.4.2	提案手法	32

4.4.3	空間的整合性を崩す仕組み.....	34
4.4.4	実験装置.....	35
4.5	実験 1 多義的な視覚的運動に対する解釈の変容.....	37
4.5.1	目的.....	37
4.5.2	呈示される視覚的運動.....	37
4.5.3	偽の実験説明.....	39
4.5.4	手順.....	39
4.5.5	予備実験.....	39
4.5.6	予備実験の結果.....	40
4.5.7	参加者.....	40
4.5.8	結果.....	41
4.6	実験 2 複数の回転オブジェクト中からの自己操作オブジェクトの特定.....	42
4.6.1	目的.....	42
4.6.2	呈示される視覚的運動.....	43
4.6.3	手順.....	44
4.6.4	参加者.....	44
4.6.5	結果.....	45
4.7	実験 3 操作感についての主観的な評価.....	46
4.7.1	目的.....	46
4.7.2	呈示される視覚的運動.....	46
4.7.3	手順.....	46
4.7.4	参加者.....	47
4.7.5	結果.....	47
4.8	考察.....	48
4.9	本章のまとめ.....	49
第 5 章	視覚的運動の予測可能性が自己帰属感の生起過程に及ぼす影響の調査.....	51
5.1	はじめに.....	51
5.2	背景.....	52
5.3	実験設計.....	53
5.3.1	装置.....	54
5.3.2	タスク.....	55
5.4	実験 1.....	56

5.4.1	視覚フィードバック	56
5.4.2	運動パターン	58
5.4.3	手続き	59
5.4.4	参加者	60
5.4.5	結果	60
5.4.6	考察	63
5.4.7	運動パターンとバーチャルハンドの組み合わせによる影響	63
5.5	実験 2	64
5.5.1	視覚フィードバック	65
5.5.2	参加者	66
5.5.3	結果	66
5.5.4	考察	67
5.6	議論	68
5.7	制約と課題	70
5.8	本章のまとめ	70
第 6 章	運動伝染が生み出す運動予測の変調を利用した Pseudo-haptics の生起条件の調査	
	72	
6.1	はじめに	72
6.2	背景と仮説	73
6.2.1	Pseudo-haptics 生起過程の不明瞭性	73
6.2.2	運動予測に基づいた疑似的な外力知覚についての仮説	74
6.2.3	運動伝染によって生じる運動予測の変調	75
6.3	関連研究	76
6.3.1	Pseudo-haptics	76
6.3.2	運動伝染	77
6.3.3	ステアリングの法則	79
6.4	実験デザイン	80
6.4.1	運動伝染を用いた手法の提案	80
6.4.2	タスクの設計	81
6.5	実験	83
6.5.1	装置	83
6.5.2	タスク	84

6.5.3	手続き	87
6.5.4	参加者	88
6.5.5	分析手法.....	88
6.6	結果	89
6.6.1	ステアリングタスク中の速度変化の分析.....	89
6.6.2	被験者が感じた力覚の主観評価の分析.....	92
6.7	考察	95
6.7.1	運動速度の変化についての考察.....	95
6.7.2	主観的な外力知覚についての考察.....	96
6.8	制約と課題	96
6.9	本章のまとめ.....	97
第7章	総合的な議論.....	98
7.1	本研究の学術的知見.....	98
7.1.1	運動予測が働くことによる視覚と力覚間の空間的不一致の許容可能性の発見 98	
7.1.2	運動予測の構築要因の多様性の発見.....	99
7.1.3	運動予測と運動結果との一致性の認知による解釈への影響の発見.....	100
7.2	展望	101
7.2.1	意識的な運動予測の構築要因の解明.....	101
7.2.2	スポーツおよびリハビリテーション支援技術への応用.....	102
第8章	結論	105

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 身体運動を利用したインタフェースの有効性と発展

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、マウスポインタなどがディスプレイ上に表示され、操作者が身体運動によってそれら进行操作するようなグラフィカルユーザインタフェース (GUI) の有効性が広く知られている。

GUI の歴史は古く、1963 年には計算機科学者のアイバン・サザランドが “Sketchpad” と名付けたシステムを構築している。その後 1968 年に Engelbart がマウスを発明し、70 年代から 80 年代にかけて商用および家庭用コンピュータが急速に普及し、GUI は広く受け入れられるようになった。また、Shneiderman は GUI による情報操作のような直接的に情報を扱えるインタフェースについて “Direct Manipulation” という概念によって論じている [Shneiderman, 1983]。ダイレクトマニピュレーションは直接操作感と訳され、機械そのものを操作しているというよりも、機械の存在は意識せずに、対象そのものを操作していると感じることができるインタフェースのことをいう。



図 1-1 Sutherland の “Sketchpad” (図は[Sutherland, 2003]より引用)

こうした操作者が自身の身体を動かしてそれと連動する視覚的対象を操作するインタフェースが有効な理由の1つとして、ユーザが自分自身の行為や運動とインタフェースを通して操作する視覚的対象がもたらす結果の関連性を認知することで、そのインタフェースを自己の身体と同一あるいは延長するものとして捉えていることが挙げられる。このような視覚的な対象を自己として捉えている感覚は“自己帰属感”と呼ばれ、インタフェースデザインの分野での重要なキーワードとなっている[Watanabe, K., 2015][Watanabe, K., 2017]。したがって、インタフェースデザインの分野では、人がどのようにして自身が行った運動と視覚的にとらえた運動の結果の関連性を認知しているのかを解明することが求められている。

1.1.2 インタフェースによる実世界の拡張

さらに近年のHCIの分野では、人の感覚特性を利用したバーチャルリアリティ（VR）技術などの発展がめざましく、様々なシステムやコンテンツが制作されている。特に、操作者の実世界における身体や運動をそのままバーチャル空間で再現するだけでなく、それらを拡張・変容して表現するインタフェースが多く提案されている。例えば、バーチャル空間内のアバターが、操作者の実身体と異なる形状をしていたり、物理的・身体的制約を超えた運動ができたりするコンテンツが多く制作されている[Ogawa, 2016A] [Sasaki, 2017]。しかし、実際の操作者の身体や運動は変化しないため、このような状況では操作者とアバターとの間で運動結果や身体の見た目に不一致が生じ、アバターに対して自己帰属感を感じにくくなる可能性がある。したがって、実世界を拡張するVRインタフェースの設計指針を考える上では、実身体とバーチャルボディとの見た目や運動の不一致が自己帰属感の生起にもたらす影響について明らかにすることが重要な課題の1つとなる。

また、最近のVRインタフェースに関する研究では、単にバーチャルな対象に対して自己帰属感や操作感を感じるだけでなく、人の感覚特性をうまく利用し、実世界とは異なる知覚体験を脳内に再現するというアプローチが注目されている。特に複数の感覚間の相互作用（クロスモーダル知覚）を利用したインタフェースが多く提案されている[Pusch, 2011][Watanabe, K., 2008]。クロスモーダル知覚とは、ある感覚知覚が異なる感覚知覚の影響を受けて変容される現象である。このクロスモーダル知覚を上手く利用すればと触力覚[Lécuyer, 2000]、味覚[Narumi, 2011]、嗅覚[Narumi, 2014]といった様々な感覚情報提示が簡略化された機構によって疑似的に再現できる。中でも視覚と触力覚間では感覚間の相互作用の影響が強いことが分かっており、これまでに視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚によ

る現象の分析やインタフェースへの応用がなされてきた。そのうちの代表的な例の 1 つが Pseudo-haptics である[Lécuyer, 2000]。Pseudo-haptics は、ユーザの身体運動に同期して動く視覚的対象の位置や運動速度を変調するとユーザが疑似的な触力覚を感じる錯覚現象として広く知られている。この Pseudo-haptics をうまく利用すれば、実際に触力覚を提示するデバイスを用いなくとも視覚的に与えるフィードバックを操作するだけでユーザに触力覚を知覚させることが可能であるためインタフェースデザインの分野で注目されており、数多くの応用例が提案されている。したがって身体運動を利用した VR インタフェースの設計指針を考える上では、視覚的な対象を自己として捉える自己帰属感を感じられるか否かだけでなく、どのような条件が運動に対するユーザの解釈に影響を与え、実世界では体験できないような知覚体験をデザインできるかの解明が求められる。

1.1.3 運動知覚における予測の重要性

認知科学や脳科学の分野の多くの研究では、人が視覚的な対象を自己として捉えられるようになるためには、実身体の身体運動と視覚的対象の随伴関係を認知することが重要であると示唆されている。人は自身の身体運動を体性感覚（自己受容感覚）からの情報によって知ることが出来る。この体性感覚によって得られた自己運動の情報と視覚によって得られた運動情報とが一致するか否かを判別することが自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知における 1 つの基盤となる。これに加え、人が能動的に身体を動かす際は、運動の結果得られる感覚フィードバックをあらかじめ予測していることが明らかになっている[Wolpert, 1995]。したがって、能動的運動時は、この運動予測と視覚的運動結果とが一致性するか否かを判別することがもう 1 つの基盤となる。すなわち、能動的運動時には「視覚と体性感覚間の一致性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の 2 つの基盤が同時に働くといえる[Tsakiris, 2007]。先行研究では、受動的運動時と能動的運動時との比較によって、能動的運動時の方が自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知しやすいことから、自己帰属感が生起する上で、運動予測が重要であることが示唆されている[Tsakiris, 2005]。ただし、能動的運動時に前述した 2 つの基盤がどのように働いているのかは詳細には解明されていない。身体運動を利用したインタフェースをユーザが扱うほとんどの場合では、ユーザが能動的に対象を操作することが前提となる。そのため、インタフェースに対して感じる自己帰属感の生起過程について明らかにするには、この運動予測が能動的運動時にどのような働きをするのかを解明することが重要である。

また、視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚として知られる Pseudo-haptics の生起におい

でも、運動予測が関与することが示唆されている。特に Pseudo-haptics が外力として解釈される上では、視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚という説明だけでは不十分であり、外力を感じる根本的な要因は視覚的運動と運動予測との差を認知することであると示唆されている[Watanabe, J., 2017][Honda, 2013]. ただし、運動結果と運動予測との差を認知することが疑似的な外力知覚が解釈される要因となることは直接的には明らかにされていない。これを明らかにすることは Pseudo-haptics の原理解明のために必要不可欠であり、インタフェースデザインの分野でこの錯覚を応用する上で重要な知見となると期待される。

1.2 目的

本論文の目的は、ユーザが自己の身体運動を用いて映像内に提示される視覚的対象を操作する際に、自己運動と視覚的運動との関連性をどのように認知し、その認知によってどのような解釈が生じ得るのかを明らかにすることである。特に本論文では能動的に身体を動かすことで生じる運動予測に注目し、自己帰属感と Pseudo-haptics の 2 つ生起過程に運動予測がどう関与するのかを検証する。そこで本論文では「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一致性の認知」を分離した検証を行う新規実験系を構築することで自己運動と視覚的運動との関連性の解釈における運動予測による具体的な影響の調査を試みる。これまでの先行研究においても自己運動と視覚的運動との関連性の認知における「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の重要性は主張されてきたが、能動的運動時には「視覚と力覚間の一致性の認知」と混同された状態で曖昧に理解されており、能動的運動時に運動予測が具体的にどのように関与するのかは未解明のままである。

具体的には、まず「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」はしやすいが「視覚と力覚間の一致性の認知」が難しい状況を作り、この状況で自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知できるかを検証する実験によって、能動的運動時の自己帰属感の生起過程における運動予測の有効性を調査する。また実身体と視覚的対象との見た目や向きの違いや、運動結果の空間的整合性、実行する運動の様相の違いなどが自己帰属感の生起のしやすさにどのような影響を受けるかを調査する。さらに視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚を生じさせずに予測に反した運動が誘発される状況を作ることで、Pseudo-haptics が外力として解釈されるが視覚的運動と運動予測との差を認知することであるか否かを調査する。

最終的に、自己帰属感の生起と Pseudo-haptics の生起に運動予測が与える影響について本研究の各調査で得られた結果から総合的に議論し、自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知する上で運動予測がどのように関与し、どのような解釈を与え得るのかをまとめる。

1.3 本論文の構成

本論文は全 8 章で構成される。以下に第 2 章以降の構成を示す。

第 2 章

自己運動と視覚的運動との関連性の認知に関わる先行研究を整理する。ここでは、自己帰属感と Pseudo-haptics および運動予測に関する関連研究を取り上げ、それらの生起過程について未解明な課題について説明し、本研究の位置づけを行う。

第 3 章

本研究の目的について述べる。また自己帰属感と Pseudo-haptics の生起過程について運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知に注目した本論文における具体的な問題意識とその解決手法についてまとめる。

第 4 章

能動的な回転操作における自己帰属感の生起過程を分析した結果について述べる。運動結果を予測しやすくなった条件下で、自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する運動の空間的不一致による影響を分析し、能動的運動時における運動予測の有効性について議論する。本章は関連発表番号[2]の文献を改訂したものである。

第 5 章

自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する運動の空間的不一致による影響が、実行する運動の様相や視覚的対象の見た目によってどのように変化するかを分析した結果について述べる。また分析の結果から、運動結果の予測のしやすさがどのような要因に左右されるかについて議論する。本章は関連発表番号[1][3][5]の文献を改訂したものである。

第 6 章

運動予測の変調による Pseudo-haptics の新たな手法と疑似的な外力知覚の生起要因について検証した結果を述べる。運動伝染と呼ばれる無意識的に予測に反した運動が誘発される現象を用いた新たな実験系によって、Pseudo-haptics が外力として解釈される要因を運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知に基づいた視点から議論する。

第 7 章

本研究で得られた知見についてまとめ、さらに今後の展望として本研究の貢献と応用可能性について述べる。

第 8 章

本論文の成果と貢献について最終的なまとめを行う。

第2章 自己運動と視覚的運動との関 連性の認知に関する先行研究

2.1 自己帰属感

HCI の分野では、マウスポインタなどがディスプレイ上に表示され、操作者が身体運動によってそれら进行操作するインタフェースの有効性が広く知られている。こうしたインタフェースが有効な理由の1つとして、ユーザが自分自身の運動とインタフェースを通して操作する視覚的対象がもたらす結果の関連性を認知することで、そのインタフェースを自己の身体と同一あるいは延長するものとして捉えていることが挙げられる。このような視覚的な対象を自己として捉えている感覚は“自己帰属感”と呼ばれ、インタフェースデザインの分野での重要なキーワードとなっている[Watanabe, K., 2015][Watanabe, K., 2017].

2.1.1 自己帰属感の基礎概念

自己帰属感は、インタフェースデザインや認知心理学など幅広い分野で議論されており、多くの場合、哲学者 Gallagher による自己概念を引用して議論される。Gallagher は基本的な自己意識をまず ‘narrative self’ と ‘minimal self’ の2つに分けて考察している。‘narrative self’ は「自分自身の記憶や他人によって語られることによって永続的に存在する自己」と捉えられ、‘minimal self’ は「経験的な知識がなくても、自己と呼べるような基礎的で一時的な自己」と捉えられる minimal self はさらに sense of Agency と sense of Ownership に分かれる。sense of Agency は、「この運動を引き起こしたのは自分自身である」という感覚を指し、sense of Ownership は、「この身体はまさに自分のものである」という感覚を指す。ただし、sense of Agency と sense of Ownership ははっきりと区別されるものではなく、この運動を引き起こしたのは自分自身であるという sense of Agency を感じる事がこの身体はまさに自分のものである sense of Ownership をより強く感じる要因となるなど相互に密接に関与

すると考えられる。

また、両者の区別の仕方や定義の仕方については研究分野や前提とする背景の違いなどによって異なる場合がある。例えば、インタフェースデザインにおける自己帰属感とは、*sense of Ownership* を引用して議論されており、これは道具などの身体以外の物に対しても自身の運動と随伴性が高ければ、まさに自分の身体であると感じられることに由来している。[Watanabe, 2017]では理想となるインタフェースのあり方は、初歩的な道具のように、使っている最中にはその道具自体を意識せずに身体の一部になったかのようになり、目的に集中できるようにすることであると述べられている。またこのような道具自体の存在を意識せずに身体の一部として扱えるような状態を「透明化」と呼び、この道具の透明化は *sense of Ownership* によってもたらされるものであると考察している。ここでの議論では道具（インタフェース）は本来身体外の存在であることと、その道具を意図的に扱うことで運動を引き起こしたのは自分であるという *sense of Agency* が感じられていることが前提となっている。道具を扱わずに *sense of Agency* を感じていない状態では道具は身体外の物体として解釈され、道具に対する自己帰属感は生起しない。

一方で、認知心理学の分野ではしばしば *sense of Agency* と *sense of Ownership* 両方を自己帰属感 (*self-attribution*) として扱う場合もある[Tsakiris, 2007][Asai, 2009]。この背景には、*sense of Agency* を感じなくても *sense of Ownership* は感じる場合を想定しており、また自己と他者の判別における *sense of Agency* の有効性に注目していることがある。例えば自身の身体に生じた運動が意図的に引き起こした場合と何らかの外力によって非意図的に引き起こされた場合を考えると、どちらの場合においても視覚的にとらえた対象の運動が自己の身体に生じた運動と一致していると知覚されることでその対象が自己の身体であるという *sense of Ownership* を得ることが出来る。しかし、意図した通りに動いたという *sense of Agency* を感じることで、その対象が自己であるという感覚はさらに高いものとなる。

このように自己帰属感の概念は研究分野や研究の背景によって引用される自己概念が異なる場合があるが、それらの定義に矛盾が生じているわけではなく、視覚的にとらえた対象が自己や自己の一部のように感じられる感覚を表していることは共通している。また意図的にその対象を操作して *sense of Agency* を感じることは実身体外の対象を自己として捉えられるようになる上で重要なファクターであるといえる。

以降、本論文内の説明では、*sense of Agency* と *sense of Ownership* を区別せずに視覚的にとらえた外界の対象が自己として捉えられる感覚を指す言葉として「自己帰属感」を用いる。また両者を明確に区別した説明を行う際には「自己主体感 (*sense of Agency*)」、「身体所有感 (*sense of Ownership*)」と表現する。

2.1.2 自己帰属感の生起過程

2.1.2.1 マルチダミーカーソル実験

渡邊らが行ったマルチダミーカーソル実験では、人が自身が操作するカーソル（操作対象）をどのように識別し、カーソルが自分で操作しているものであるという自己への帰属（自己帰属感の生起）がどのような仕組みで起こるのかを複数のダミーカーソルの中から自分自身が操作するカーソルを特定する実験によって検証している[Watanabe, K., 2013-A]。彼らは人が自分が操作しているカーソルを識別する原因としてマウスの動かし方と一致することが重要であるという仮説のもと実験を行った。実験の結果、複数ダミーカーソルの中から被験者は動きの一貫性を認知することのみによって自分自身が操作するカーソルを短時間で検出できることが示唆された。

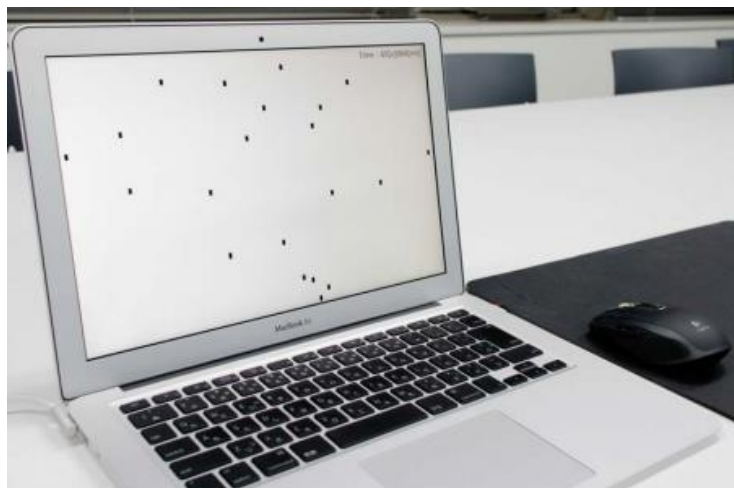


図 2-1 渡邊らのマルチダミーカーソル実験における複数ダミーカーソル環境（図は [Watanabe, K., 2013A]より引用）

またマウスを直接操作する実験参加者には自分自身のカーソルが特定できる一方で、操作をせず他者が操作する状況を観察する実験参加者にはその特定が困難であることを発見した。彼らはこの操作者と観察者間で生じる非対称性を利用した直接的な応用例として肩ごしのパスワード盗聴（ショルダーサーフィン）を防ぐためのシステム”CursorCamouflage” [Watanabe, K., 2012]や”SymmetricCursors” [Watanabe, K., 2013B] を提案している（図 2-2）。

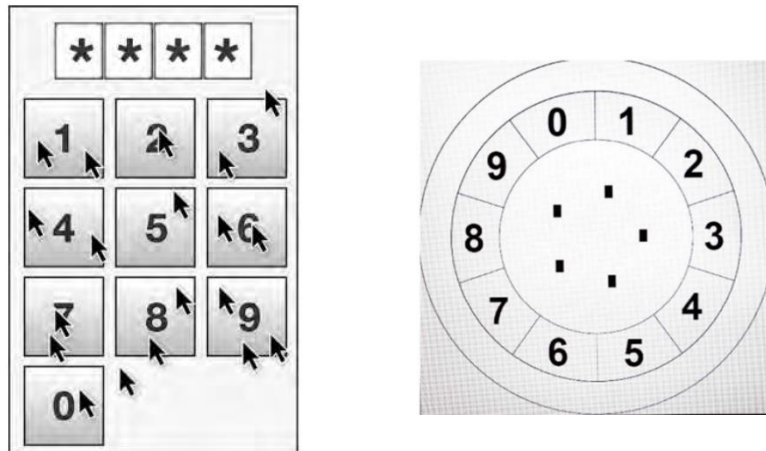


図 2-2 渡邊らによる“CursorCamouflage” (左) と“SymmetricCursors” (右)
 (図は [Watanabe, K., 2012]および[Watanabe, K., 2013B]より引用)

また彼らはこの実験により被験者がマウスによってカーソルを操作している状態が図 2-3 に示すような「A 操作しているが発見していない」状態と「B 発見していて操作している」状態の 2 つに分けられると考察している。彼らの考察では A の状態は、自分で操作しているにもかかわらず、「自分が」操作している感覚は高くなく、B の状態はカーソルを「自分が」操作している感覚があり、この「自分が」操作しているという感覚は、カーソルが自分の運動に連動していると気づくことで発生すると結論付けている。この考察をまとめると、自己帰属感の生起には自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知できることが重要な過程となるといえる。

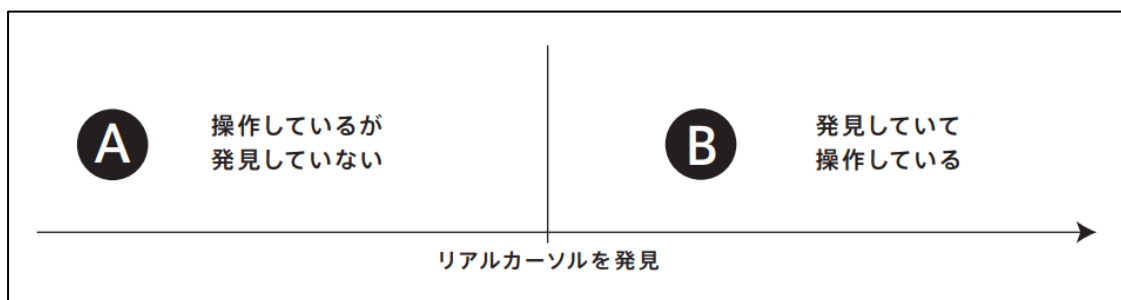


図 2-3 渡邊らのマルチダミーカーソル実験におけるリアルカーソルの発見前と後の状態。(図は [Watanabe, K., 2013A]より引用)

本論文では自己帰属感の生起過程としてこの自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知に注目し、この認知がどのような過程によって得られるのかを認知科学における知見を基に分析を試みる。

2.1.2.2 自己運動と視覚的運動との随伴関係認知における 2 つの基盤

自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知する上では大きく分けて 2 つの基盤があると考えられている。

その 1 つの基盤とは視覚フィードバックと触覚や力覚などの体性感覚フィードバックとの感覚間統合である。この感覚間統合によって生じる有名な錯覚現象の 1 つとして、ラバーハンドイリュージョン (RHI) があげられる[Botvinick, 1998]。これは、自身の手が衝立などによって隠され、ラバーハンドのみが見える状態で、ラバーハンドと自分の手が同期してブラシでなでられるなど同様の触覚刺激を与えられ続けることで、ラバーハンドに対してあたかも自分の手であるような錯覚が生じる現象である。この RHI は視覚刺激と触覚刺激が同期していないと生じないことが分かっている[Botvinick, 1998]。また回転した位置にあるなど空間的にずれのある状態では錯覚が有意に弱まる[Ehrsson, 2004]。これらのことから、視覚と体性感覚間の一致性の認知には両感覚に時空間的整合性があることが重要であると示唆されている。RHI は視覚と触覚の一致性を認知するによって生じる錯覚であるが、身体運動の知覚においては体性感覚の中でも特に力覚（自己受容感覚）が重要であり、自己の身体運動と視覚的運動の随伴関係の認知においても視覚と力覚間に時空間的整合性があることがそれらの一致性を認知する上で重要であることがわかっている [van den Bos, 2002][Shimada, 2010][Koshinbo, 2011]。

もう 1 つの基盤は、自己の運動に対する予測（運動予測）と視覚フィードバックとして得られる運動結果との一致性の認知である。人は能動的に身体を動かす際に、運動の結果受け取るであろう視覚、聴覚、体性感覚といった感覚フィードバックを予測していることが分かっている。この能動的運動時に得られる運動予測についての詳しい説明は 2.3 節にて述べる。この自己運動に対する運動予測は、意図的に自己身体を動かすことによって得られるものであり、自己主体感の生起において重要な役割を果たしていると考えられる。すなわち、能動的運動時には、意図的に身体を動かすことで予測した運動と実際に視覚的に捉えた運動結果とが一致することが、自己運動と視覚的運動とが随伴関係にあると認知し、その運動結果を自身が意図的に生み出したと感じる上で重要であるといえる。

以上のように、自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知には「視覚と体性感覚間の一致

性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の2つの基盤あり、能動的運動時にこれら2つが同時に働くといえる。

2.1.2.3 自己帰属感の生起への運動予測の有効性

前節で述べたように能動的運動時の自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知には、「視覚と力覚間の一致性の認知」との「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の2つの基盤が影響すると考えられる。Tsakirisらは受動的運動時より能動的運動時の方が視覚的に呈示された自己身体の認知を優位に行えることからモーターコマンドがあることによって視覚的運動の結果を予測できることの有効性を示している[Tsakiris, 2005]。彼らが行った実験では、被験者は自身の右手を直接見ることはできない環境下でモニターに映像として提示された手の映像を観察した。この時モニターに提示された手の映像は被験者本人のものあるいは実験者のもののどちらか一方であった。被験者は自身の手の運動とモニターに提示される手の運動の一致性からモニターに提示された手が自分の手であるか実験者の手であるか弁別する課題に参加した。課題の結果、被験者が自分の手を自ら能動的に動かす場合と、別の実験者のよって受動的に動かされる場合で正答率に有意差が生じ、能動的運動時の方が正答率が高いことが確認された。このことから能動的運動時では運動予測と視覚的運動との一致性の認知が自己帰属感が生起する上での重要な要因となっていると考えられる。

また、ShortとWardは視覚的身体のバーチャルハンドの動きを予測できることによって空間的不一致や見た目によらず自己帰属感が生じることを示した[Short, 2009]。彼らの実験では、自己身体と一致する位置にある光点は、光点が自己身体と隣接する位置にあるときよりも反応時間が早くなるという現象[Hari, 1996]について、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を着用し手を利用してバーチャルハンドを操作する環境で「能動的運動との同期性」、「空間的整合性」、「見た目」による影響の検証を行った。その結果、バーチャルハンドが操作者の動きと同期して動くことを十分に学習した後では、視覚的な手が実身体から離れた位置にある、鏡のように向かい合った位置にあるなどの空間的不一致がある場合や、足など実際とは異なる身体部位や抽象的な円錐オブジェクトが提示されるなど実身体とバーチャルハンドの見た目が異なる場合においても光点に対する反応時間が早くなることが確認された。しかし、バーチャルハンドの運動が操作者の動きに同期しない場合には、光点に対する反応時間の短縮は見られなかった。また、この反応時間の短縮率と被験者がバーチャルハンドに対して感じた自己帰属感に対する評価には正の相関がみられた。これらの結果から、視覚的なバーチャルボディに対して自己帰属感を獲得するには能動的に身体を動か

すことで生じる運動予測と視覚フィードバックとして得られる運動結果との一致性を認知できることが重要であり、この一致性の認知が十分に行えれば、実身体と視覚的身体との空間的整合性や見た目の類似性は自己帰属感を感じる上で必須条件ではないことが示唆された。

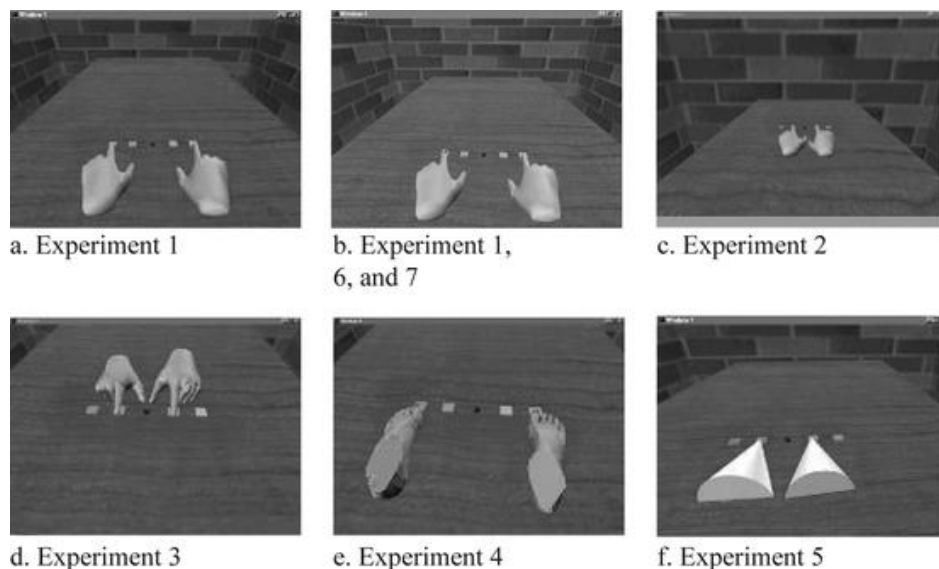


図 2-4 Short と Ward の実験で提示された視覚刺激 (図は[Short, 2009]より引用)

2.1.2.4 自己帰属感の生起への空間的整合性や見た目による影響

Short と Ward の研究[Short, 2009]では、実身体と視覚的身体との空間的整合性や見た目の類似性は自己帰属感を感じる上で必須条件ではないことが示唆されたが、これは自己の能動的運動と視覚的運動との随伴関係を十分に学習した状態であるという前提のものと結果である。したがって、本研究が注目する自己帰属感の生起過程である自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知には能動的運動時であっても実身体と視覚的身体との空間的整合性による影響が生じる可能性がある。例えば[Short, 2010]と同じ実験環境であっても、自己帰属感が生起するまでの学習時間は視覚的な手が実身体から離れた位置にある、鏡のように向かい合った位置にあるといった空間的不一致による影響を受ける可能性が考えられる。

実際に van den Bos らの研究では、予測が働く能動的運動時であっても空間的整合性の影響を受ける結果が得られている[van den Bos, 2002]。彼らは被験者と実験者の手をテーブルを挟んで対称に置き、4種類の回転角度(0° , 90° , 180° , 270°)で回転された映像を提示し、自分の手がどちらかを判断させる実験を行った。その結果、実際の被験者と同じ向きに被験者の手が表示された 0° の条件では、他の条件より自分の手を正しく認知できた。また

180° の条件で誤答が最も多くなることが確認された。また光真坊らの研究[Koshinbo, 2011]においても同様に回転によって自己身体の認知が影響を受ける結果が得られている。彼らの研究では、被験者の手の映像をリアルタイムに撮影し、映像に遅延を入れた状態で視覚的に提示するとき、被験者がその遅延に気づく遅延時間を手の回転要因（0°、90°、180°、270°）と運動要因（能動的運動・受動的運動）を組み合わせた条件で比較した。その結果、回転要因と運動要因の双方による被験者が遅延に気づく遅延時間への影響は確認された。具体的には被験者の実身体から離れた角度に映像提示されるにつれて遅延に気づきにくくことが確認され、また能動的に動かす時は受動的に動かされる時よりも遅延に気づきやすいことが確認された。しかし両要因間の交互作用は確認されなかった。彼らはこの結果から、実身体と視覚的身体に空間的一致性がある時には、実身体の内的な身体イメージの心的回転（Mental Rotation [Shepard, 1971]）をさせることで提示された映像との運動の随伴関係を見ており、また運動予測は身体イメージを形成する時間を早めるもので、心的回転の時間を短くするものではないと結論付けている。この結果は実身体と視覚的身体に空間的不一致

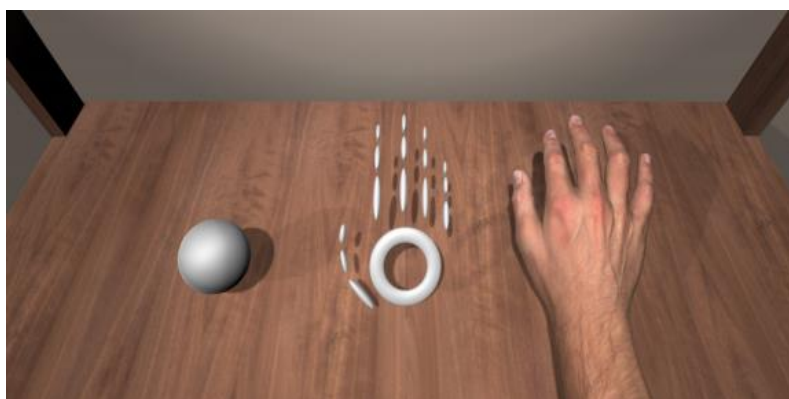


図 2-5 Argelaguet らの実験における 3 種類の形状のバーチャルハンド。

Abstract (左), Iconic (中), Realistic (右). (図は[Argelaguet, 2016]より引用)

が生じると運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知も難しくなることを示唆している。

また視覚的な対象の見た目は、内観的に身体所有感を感じる上では重要な要素であるが、自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知する上では一見それほど重要ではないように思える。しかし、Argelaguet らの研究では、バーチャル環境で身体の見え目が自己主体感や運動の精度に影響することを示唆している[Argelaguet, 2016]。彼らの研究では、バーチャル空間に配置されたオブジェクトをバーチャルハンドで掴んで運ぶタスクの結果を、3種類の形状のバーチャルハンド（Abstract / Iconic / Realistic）で比較した（図 2-5）。その結果、バーチ

ャル空間で呈示される操作者の手に同期して動くバーチャルハンドの見た目が実体に近い方が身体所有感を強く感じるものの、球体など記号的な表現に近いほど操作を速く・精度よく行え、さらに自己主体感を感じやすいことが示唆された。彼らはバーチャルハンドの見た目が実体に近い方が自己主体感を感じにくかったのは、被験者がそのバーチャルハンドに期待する挙動がその見た目によって異なることが要因ではないかと考察している。

2.2 Pseudo-haptics

近年のヒューマンインタフェースにおける情報提示手法では、実世界で起こり得る感覚情報を忠実に再現するのではなく、人の感覚特性をうまく利用し、実際とは異なる知覚を脳内に再現するというアプローチが注目されている。例えば、錯覚現象などでは、人は外界受けた刺激に対して、実際に与えられた刺激とは異なる知覚が生じることがある。特に近年はクロスモーダル知覚を利用したインタフェースが注目を集めている。クロスモーダル知覚とは、ある感覚知覚が異なる感覚知覚の影響を受けて変容される現象である。中でも視覚と触力覚間では感覚間の相互作用の影響が強いことが分かっており、これまでに視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚による現象の分析やインタフェースへの応用がなされてきた。そのうちの代表的な例の1つとして Pseudo-haptics が挙げられる。Pseudo-haptics とは、マウスによって操作されるマウスポインタなどのようなユーザの身体運動に同期して動く視覚的対象に対して、その位置や運動速度を変調するとユーザが疑似的な触力覚を感じる錯覚現象である。この Pseudo-haptics をうまく利用すれば、実際に触力覚を提示するデバイスを用いなくとも視覚的に与えるフィードバックをソフトウェアによって操作するだけで、ユーザに触力覚を知覚させることが可能であるため、インタフェースデザインの分野で注目されており、数多くの応用例が提案されている。

本節ではこの Pseudo-haptics についてこれまでの先行研究で提案されてきた手法と応用例について述べ、本論文で扱う自己運動と視覚的運動との関連性の認知や運動予測との関連性について説明する。

2.2.1 外力知覚としての Pseudo-haptics

Pseudo-haptics は一般的には外部からの触力覚（外力）として知覚される。またその触力覚は、視覚的運動の変調の仕方や背景情報の組み合わせ方などによって様々な解釈を与えられることがわかっている。

Pseudo-haptics という用語の発案者である Lécuyer らは、まずばねの抵抗量に対する知覚をディスプレイ上の視覚的運動の操作によって変容できることを示した。彼らが行った研究[Lécuyer, 2000]では、図 2-6 に示すような Spacetec 社の Spaceball という 3 次元入力装置に繋がったピストンを被験者が押す際に、ピストンを押し込む量に応じてバーチャルなばねの映像をディスプレイ上に提示した。この時、映像中のばねの変形量を変化させることで被験者が知覚するばねの抵抗量を操作することが出来ることが確認されている。



図 2-6 Lécuyer らのばね抵抗の呈示システム (図は[Lécuyer, 2000]より引用)

このような物体の硬さや柔らかさの知覚に対する Pseudo-haptics を用いた提示手法は他にも様々な研究によって示されている。Moody らは外科手術のバーチャルシミュレータで、映像内で提示されるオブジェクトの表面の変形量によって硬さの知覚を操作できることが示唆している[Moody, 2009]。Argelaguet らが提案した“Elastic Images”では、マウスカーソルで画像をクリックした際の画像の変形量を操作することで、画面内の様々なオブジェクトの硬さや柔らかさを表現できることが示唆されている[Argelaguet, 2013]。Punpongsanon らは、“Elastic Images”の手法を応用し、プロジェクションマッピングを用いることで実物体に対する硬さの知覚を変容する手法を提案している[Punpongsanon, 2015]。

また触れたもの硬さや柔らかさに対する錯覚以外にも、操作者の身体動作を反映した視覚的対象の運動結果を調節することで、力覚やそれに付随する感覚が生じる現象が Pseudo-haptics として一般的に広く知られている。その代表的な例が、マウスカーソルを操作する際に、カーソルの動きが何らかの理由で遅くなるとユーザはマウスを操作する手に疑似的な外力を感じる現象が挙げられる。Lécuyer らの研究[Lécuyer, 2004]では、ある領域を通過するようにマウスカーソルを動かす際、マウスの動きに対するカーソルの動きの大きさを調節し、カーソルを加減速させることで凹凸感を提示できることを示唆されている。同様に Mensvoort らは、マウスの動きに対して、表示するカーソルの速度を加減速させることで、

凹凸の触感や重さを呈示できることを示唆している[Mensvoort, 2008]. また Watanabe らはカーソルの動きや形状を画面内で疑似的に再現された環境に合わせて変化させることで、特

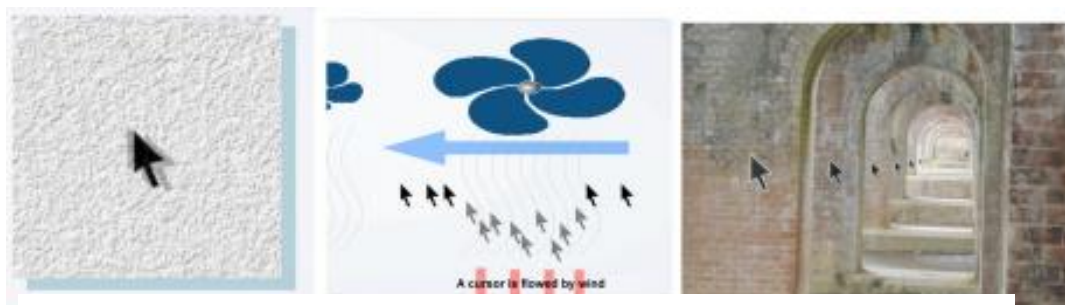


図 2-7 Watanabe らの”VisualHaptics”の例. テクスチャの触感 (左), 空気抵抗 (中), 奥行き感 (右). (図は[Watanabe, K., 2008]より引用)

有の感触を提示する”VisualHaptics”を提案している[Watanabe, K., 2008].

またカーソルを用いた研究はデスクトップ環境下での取り組みであったが、近年では VR 環境などより実空間に近い環境下での応用例も多く提案されている. Pusch らはバーチャル空間において、自身の手が風を受けて移動していく様子を見せることで疑似的な外力を提示可能であることを示した[Pusch, 2008]. その他にも実物体の形状知覚[Ban, 2013], 重量知覚[Hashiguchi, 2016], 重心知覚[Omosako, 2013]など様々な疑似的な外力覚呈手法としての応用例が提案されている.

2.2.2 外力を伴わない Pseudo-haptics

2.2.1 で述べたように Pseudo-haptics は一般的には疑似的に外部からの触力覚 (外力) を提示する手法として注目され、これまでに多くの応用例が提案されてきた. しかし、視覚による触力覚の変容の結果が必ずしも外力として錯覚されるわけではない.

外力を伴わない Pseudo-haptics の代表的な例の 1 つとして Steinicke らが提案した “Redirected Walking”が挙げられる (図 2-8) [Steinicke, 2008] [Steinicke, 2010]. これは実世界で頭を回転させた際に HMD 上では頭を実世界で旋回した角度とは異なる角度の旋回した映像を見せる技術である. この技術では実際のユーザの運動と VR 世界での視覚的運動の間にユーザが気づかない範囲のずれを作り出した映像を提示することで、狭い実空間を歩き回っているにもかかわらず広大な VR 空間での移動が可能となる.

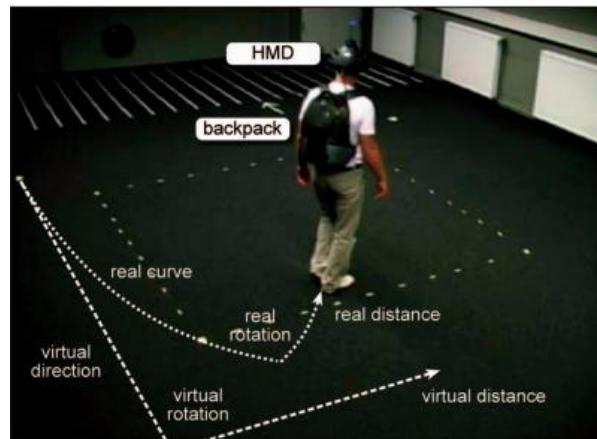


図 2-8 Steinicke らが提案した“Redirected Walking”. ユーザは実世界での経路とは異なる歩行を VR 世界で体験することが出来る.

(図は[Steinicke, 2010]より引用)

また、鳴海は文献[Narumi, 2017]にて“Redirected Walking”の応用研究の新たな展開として、「視触覚リダイレクション」の研究例について述べている。視覚的操作のみを利用した“Redirected Walking”では、まっすぐ歩いているとユーザに感じさせるためには、直径 44m の円弧の上を歩かせる必要があり、現実的な利用は難しいことが問題となっていた。これに対し、触覚刺激を視覚刺激に合わせて与えることで空間知覚をより強力に変容させる取り組みが「視触覚リダイレクション」である。そのうちの 1 つである“Unlimited Corridor”は現実には円形の壁の周りを歩いているにも関わらず、バーチャル空間内ではまっすぐな道と壁を HMD を通して見ることで、ユーザは自らまっすぐ歩いているように感じる VR システムである (図 2-9) [Matsumoto, 2016A][Matsumoto, 2016B]。これは彼らが以前に提案した“Perception-based Shape Display”によって得られた、視覚的操作によって手で触れる物体の形状知覚を変化させられることができるという知見[Ban, 2012]から着想を得て提案されたものである。

また、実空間では平らな床に微小な突起を設置し、VR 空間には階段を昇降する映像を提示することで、階段の昇降感を提示する“Infinite stairs”という「視触覚リダイレクション」手法も提案されている[Nagao, 2017]。このシステムを体験したユーザは実際に自ら階段を昇降しているような感覚を得ることが出来ると示唆されている。

これらの実際のユーザの運動と VR 世界での視覚的運動の間にユーザが気づかない範囲のずれを作り出す技術においては、力覚的な歩行運動の結果は視覚的な運動によって変容されて知覚されるが、この時ユーザには「外力」を受けたという錯覚は生じずに、空間知覚

の錯覚が生じる。したがって、この時に生じた Pseudo-haptics は随意運動の結果、すなわち「内力」として解釈されたと捉えることができる。

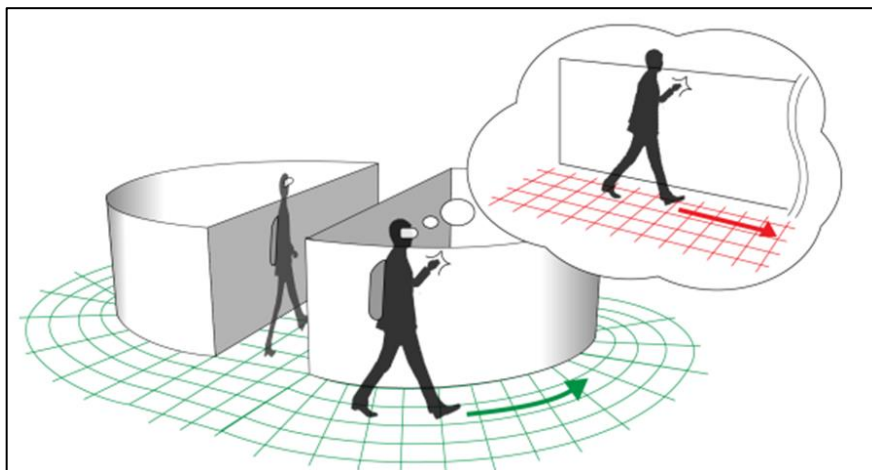


図 2-9 “Unlimited Corridor” の概念図。HMD を通して直線形の壁をと道を見ながら，円形の壁に手を触れながら歩くと，円周状に歩いているにも関わらず，直線的に歩いているように知覚される。(図は[Matsumoto, 2016A]より引用)

2.2.3 Pseudo-haptics の生起過程

Pseudo-haptics を最初に発見した Lécuyer らが 2009 年に発表した文献[Lécuyer, 2009]によると，Pseudo-haptics に関しては以下の 4 つの主張を述べる事が出来る。

- First, pseudo-haptic feedback implies one or more sensory conflicts between visual and haptic information.
- Second, pseudo-haptic feedback probably relies on the sensory dominance of vision over touch when perceiving spatial properties (distance, position, size, displacement amplitude, etc.).
- Third, pseudo-haptic feedback may correspond to a new and coherent representation of the environment resulting from a combination of haptic and visual information.
- Fourth, pseudo-haptic feedback may create haptic illusions, i.e., here, the perception of a haptic property different from the one present in the real environment. ([Lécuyer, 2009], p42)

この 4 つの主張をまとめると，Pseudo-haptics は視覚と力覚間の感覚間衝突によって生じ，空間的特性を知覚する上で優位に働く視覚によって力覚が変容されることで生じる，感覚間相互作用（クロスモーダル知覚）による力覚に対する錯覚であると説明できる。

しかし、この説明だけでは錯覚によって生じた疑似的な力覚が「外力」として知覚される要因を十分に説明することはできない。実際に 2.2.2 では視覚情報によって力覚情報が変容されるが外力知覚が生じない例を紹介した。ここで紹介した事例ではユーザは視覚情報によって変容された力覚を随意運動の結果（内力）として解釈しているといえる。この生じた疑似的な力覚が外力として解釈されるか内力として解釈されるかは、2.1 で述べた自己帰属感と密接な関わりがある。したがって疑似的な力覚が外力として解釈される条件を自己への帰属という視点から解明することがこの錯覚現象を詳細に理解する上においても重要となると考えられる。

以下では Pseudo-haptics を生起させる重要な要因として、空間知覚における視覚の優位性と、運動予測との関連性について説明する。

2.2.3.1 視覚の優位性 (Visual Capture)

文献[Lécuyer, 2009]においても主張されているが、Pseudo-haptics が生起する上で重要な感覚特性として、空間的特性を知覚する上で視覚情報が他の感覚情報よりも優位に働くことが挙げられる。空間知覚において、人の脳で多感覚から得た感覚情報を統合される際に視覚情報が他の感覚よりも優位に働くことは古くから知られており、このような視覚の優位性は visual capture と呼ばれる[Rock, 1964][Hay, 1965]。例えば、目の前にある対象を手で触り、その形状や位置を判断する際に、プリズムやレンズを用いて視覚情報を歪ませると、視覚情報と体性感覚情報に不一致が生じる。しかし、多くの人にはそれに気づくことはなく、視覚的に提示された形状[Rock, 1964]や位置[Hay, 1965]を実際のものとして解釈することが報告されている。このことから、視覚と力覚間のクロスモーダル知覚において、力覚によって視覚が変容されるのではなく、視覚によって力覚が変容され Pseudo-haptics が生じる要因は、空間知覚における視覚の優位性によるものであると考えられている。

また Salomon らは、運動知覚における視覚の優位性が自己帰属感に関連することを明らかにしている[Salomon, 2016]。彼らは、指運動における視覚知覚と運動知覚に不一致が生じた際に双方の知覚が他方に与える影響を同一の環境下で検証する実験を行った。彼らの実験には、被験者は正面のテーブルの上に右手を置き、その上に設置された 3D ディスプレイによって提示されるバーチャルハンドを観察した。課題では被験者は人差し指か中指のいずれかを上下に動かすことを求められ、被験者の指の動きと同期してバーチャルハンドの人差し指か中指のいずれかが運動した。この時、バーチャルハンドは実際の被験者の手と同じ指が運動する場合と、被験者の手とは異なる指が運動する場合があった。課題が開始

されると同時に被験者は自分の手かバーチャルハンドのいずれかが挙げた指がどちらの指であったかをランダムに問われ、できるだけ速く解答するように求められた。実験の結果、バーチャルハンドの指の運動について解答する場合は実際の手とバーチャルハンドの運動する指が一致しているか否かによって正答率に影響は見られなかったが、実際の指の運動について解答する場合は実際の手とバーチャルハンドの運動する指が異なっていた場合に正答率が有意に低下した。また、追加実験として4種類の回転角度(0° , 90° , 180° , 270°)でバーチャルハンドを提示する条件で同様の実験を行い、結果を比較した。その結果、実身体がとりづらい姿勢の条件(180° , 270°)では、実身体の運動を回答する場合においてもバーチャルハンドの運動を回答する場合においても実際の手とバーチャルハンドの運動する指が異なることによって同程度の正答率の低下がみられ、視覚の優位性は認められなかった。また被験者が能動的に指を動かす場合においても、受動的に動かす場合においても同様の結果になること確認された。これらの結果は、運動知覚における視覚の優位性が認められるためには、運動する視覚的対象に対して自己帰属感を感じていることが重要であることを示唆している。

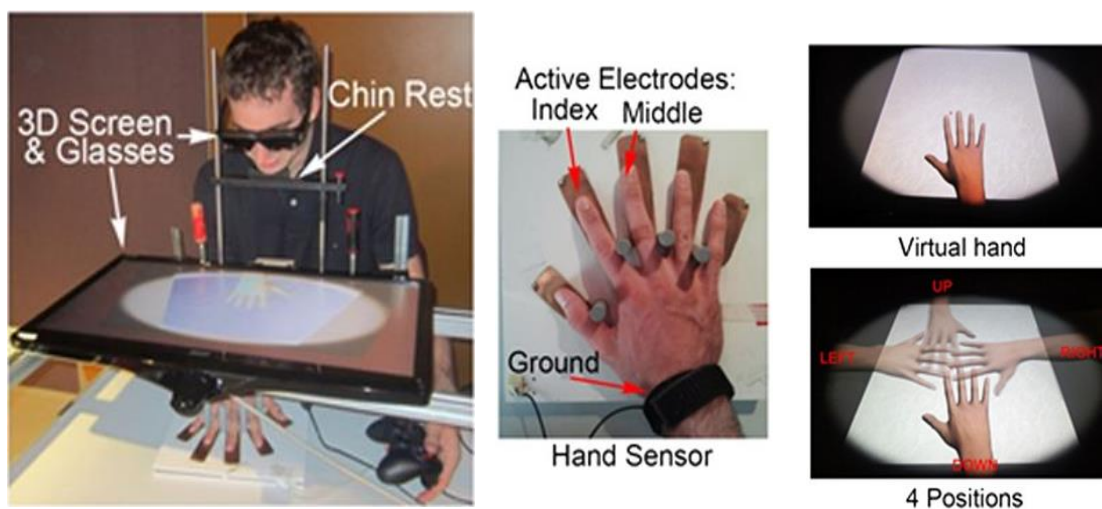


図 2-10 Salomon らの実験環境。(左) 3D スクリーンを用いた実験装置,(中) 指の動きを記録するためのハンドセンサー,(右上) 提示されるバーチャルハンドの例,(右下) 各回転角度(0° , 90° , 180° , 270°)における呈示位置。(図は[Salomon, 2016]より引用)

2.2.3.2 運動予測と Pseudo-haptics の関連性

前述したように、ユーザはクロスモーダル知覚によって生じた疑似的な力覚を「外力」としても随意運動に伴った「内力」としても解釈できるはずなので、視覚によって力覚が変容されるという説明だけでは Pseudo-haptics が「外力」として知覚される要因を十分に説明することはできない。Pseudo-haptics が「外力」として知覚されるためには生じた力覚を「自分が引き起こしたものではない」とユーザが認知することが必要であると考えられる。

文献[Watanabe, J., 2017]では、Pseudo-haptics が外力として解釈される要因を、自己主体感の概念を用いて以下のように考察している。自己主体感を感じている視覚的対象が自身の「意図に反した動き」をすると、視覚的運動結果を実際に起きた運動結果とみなし、何らかの外的要因が自分自身の運動に意図に反した動きをもたらしたと解釈するために疑似的な外力を感じる。すなわちこの主張に則ると、外力としての Pseudo-haptics は視覚的対象が自身の「予測通りに動く」ことで自己主体感を感じていた時に、何らかの要因で「予測に反した動き」をしたという認知が生じることで解釈される現象であるといえる。2.1.2 で述べたように、認知科学の分野では視覚的な対象に対して自己主体感を感じる上では、運動予測と視覚的運動結果との一致性を認知することが基盤となると示唆されている。このことから Pseudo-haptics が外力として知覚される本質的な要因は、運動予測と視覚的運動結果との差をユーザが認知することであり、その際にユーザが視覚的運動結果を実際に起きた運動結果とみなし、何らかの外的要因が自身の運動結果に影響を与えたと解釈することで疑似的な外力を感じるのではないかと考えられる。

Honda らは運動予測との一致性の認知が疑似的な外力知覚に関与することを裏付ける研究結果を報告している[Honda, 2013]。彼らは映像内のポインタを手の運動で操作する際、視覚的運動を 400ms までの範囲で遅延させると、遅延させない場合に比べて質量が大きく知覚される現象を報告したが、この質量知覚の変容が、運動予測と視覚的運動結果との差の認知によるものであると結論付けている。彼らが行った実験では、視覚的運動の遅延について十分に学習した場合とそうでない場合で質量知覚を比較することで遅延による質量知覚の増加が、遅延そのものによるものなのか、それとも、予測との不一致を知覚することによるものかを調べた。その結果、遅延について十分に学習した後では質量知覚の変容の大きさが減少することが確認された。運動予測と感覚フィードバックとの時間的な差は学習することによって許容できることが分かっているため[Asai, 2007]、この結果は視覚的運動と運動予測との差を認知することが疑似的な重量知覚の生起に関与していることを示唆するものである。ただし、この研究で明らかになったことは、視覚的運動と運動予測との差を許容

できる状況では、外力として解釈されにくいという事であり、視覚的運動と運動予測との差を認知することが疑似的な外力知覚を生起させるかということを示せていない。

以上のように、Pseudo-haptics が外力として解釈される要因を説明するには、視覚情報による力覚情報の変容という説明だけでは不十分であり、外力を感じる根本的な要因は視覚的運動と運動予測との差を認知することであると考えられる。前述したいくつかの研究においても、疑似的な外力知覚に対する運動予測の関与が主張されてきたが、運動結果と運動予測との差を認知することが疑似的な外力知覚が解釈される要因となるか否かは直接的には明らかにされていない。これを明らかにすることは Pseudo-haptics の原理解明のために必要不可欠であり、インタフェースデザインをはじめとする様々な分野でこの錯覚を応用する上で役立つと期待される。

2.3 運動予測

本論文では、自己運動の知覚メカニズムのとして運動予測に注目している。ここでいう運動予測とは、能動的に身体を動かすことに伴って生じるものであり、脳内の運動野から筋肉に発せられるモーターコマンドが発せられることによって運動を実行する直前に得られるものである。

本節では、本研究が扱う運動予測の基礎概念として運動学習のモデルについて述べた後に、意識的な運動予測と運動学習の関係性についての最近の先行研究について説明する。

2.3.1 本研究が扱う運動予測の基礎概念

人は、自らの運動意図を決定し、脳から筋肉へモーターコマンドを発する際に、そのモーターコマンドのコピーを脳内に保持している。このモーターコマンドのコピーは遠心性コピーと呼ばれる。人はこの遠心性コピーによって運動の結果受け取るであろう視覚、聴覚、体性感覚といった感覚フィードバックを予測することが可能となると考えられている。

またこのような能動的な運動に対する予測的な知覚メカニズムは順モデル (forward model) と呼ばれる[Wolpert, 1995][Kawato, 1999]。文献[Imamizu, 2012]によれば、人は、過去の経験に基づいて外界でこれから起こる現象を素早く予測し、外界の変化に対して適切な対応をとることができる神経機構を学習によって脳内に獲得している。このような外部世界の仕組みを脳内で模倣・シミュレーションする神経機構は内部モデルと呼ばれる。この内部モデルは、前述したような遠心性コピーから運動結果として得られる感覚フィードバックを予

測する順モデルと、逆モデル (inverse model) に区別される。逆モデルとは、運動予測と実際に起きた運動結果を比較し、望ましい運動結果からそれを実現するために必要な運動司令を計算するものである。

順モデルを用いることで、人は視覚など感覚情報によって得られた結果が、自分の運動によるものか、他者や他の物の運動によるものかを区別する可能であると考えられている。なぜなら、順モデルは自分の運動による感覚フィードバックを予測するので、感覚入力から順モデルによる運動予測を差し引き、その差分を外界の変化として解釈できるためである。

また、この内部モデルは実身体だけでなく道具などの外界の対象物の運動に対しても獲得することができることが示唆されている[Imamizu, 2000]。例えば、使い慣れたマウスを操作する際は、マウスをどの方向にどれくらい移動させればよいか、過去の経験の蓄積に基づいて予測できることが分かっている。

2.3.2 意識的な運動予測と運動学習の関係性についての先行研究

前節では、運動予測を構築する上で基礎となる内部モデルでの運動学習について述べたが、自己運動がもたらす結果に対する意識的な予測を構築する上では、実身体の運動に対する運動学習だけでなく、他の要因が関与している可能性が示唆されている。

研究[Imamizu, 2000]では、内部モデルは実身体だけでなく道具などの外界の対象物の運動に対しても獲得することができることが示唆されている。例えば、使い慣れたマウスを操作する際は、マウスをどの方向にどれくらい移動させればよいか、過去の経験の蓄積に基づいて予測できると示唆されている。この結果は、マウスおよびそれによって操作する画面上のポインタなどの運動と実身体の運動との対応関係を操作者が理解していることが運動結果を予測する上で重要な意味を持つことを示している。

また、最近の研究では、意識的な運動予測と内部モデルで運動学習と完全には一致しないことが示唆されている。

研究[Mazzoni, 2006]では視覚情報に 45° の回転を加えた状態でカーソルを目的のターゲットまで到達させる課題に対して、正しい操作法を教えた場合と、何も教えなかった場合とで運動学習がどのように進むのかの比較を行った。その結果、何も教えなかった場合は、はじめは正しい操作ができなかったが、次第に正しい操作に近づくように学習が進んだ。一方で正しい操作法を教えた場合は、最初は正確な操作ができたが、時間がたつと無意識的な運動学習によって視覚情報に加えられた回転とは反対方向にずれが生じるようになった。また、実験後のインタビューから、被験者は「意識的な戦略によって正しい操作を行おうとし

ているにも関わらず、ずれが生じたことでフラストレーションを感じていた」ことが分かった。この結果は内部モデルでの運動学習は意識的な戦略によらず無意識化で行われることを示唆している。

また、Honda らが示す混成内部モデル(Tandem internal models)[Honda, 2018]では、無意識的なモーターコマンド学習と意識的な運動予測の学習では学習過程が異なることが示唆されている。彼らが行ったプリズムを用いた到達課題では、プリズムを通して観察した特定の位置を指で触れる課題においてプリズムの視差によって生じた到達位置のずれを意識的補正しない場合においても無意識的な運動学習が行われることを示した。

これらの結果から考察すると、自己運動と視覚的運動の関連性を認知する上で重要であると考えられる意識的な運動予測は、2.3.2 節で述べたようなモーターコマンドによって引き起こされた自己の身体運動そのもののみを予測するものではなく、外界の対象物の実身体の運動とは異なる運動結果に対しても予測可能であると考えられる。また、その予測が可能となるには、自身の運動が生じさせる結果を概念的に理解していることが重要であると考えられる。また、たとえ自身のモーターコマンドによって生じさせた運動であっても、知覚された運動結果が運動予測と異なると解釈される場合があると考えられる。

この特性を上手く利用すれば、能動的運動時に自己運動と視覚的運動の関連性を認知する上で働く「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一致性の認知」の2つの基盤を分離した検証を行う新規実験系を構築することが可能であると考えられる。なぜなら、自己の身体運動とは異なる運動結果を予測する状況では、体性感覚によって知覚する自己運動の結果と、予測する運動結果とを異なるものにできるためである。

2.4 まとめ

本章では、自己帰属感と Pseudo-haptics の2つの生起過程および本研究で注目する運動予測に関する先行研究を紹介した。

自己帰属感を感じる上では実身体の身体運動と視覚的対象の随伴関係を認知することが重要であることが多くの研究によって示唆されている。また自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知には大きく分けて2つの基盤があると考えられている[Tsakiris, 2007]。1つは、感覚間の統合によって得られる「視覚と体性感覚間の一致性の認知」である。これに加えて能動的運動時は、「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」がもう1つの基盤となる。すなわち、能動的運動時には「視覚と体性感覚間の一致性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の2つの基盤が同時に働くといえる。先行研究では、受動的運動

時と能動的運動時との比較によって、能動的運動時の方が自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知しやすいことから、運動予測の有効性が示唆されている[Tsakiris, 2005]. ただし、能動的運動時における具体的な運動予測の有効性は解明されていない。

また、実身体と視覚的身体とに空間的不一致が生じると「視覚と体性感覚間の一致性の認知」が難しくなることが分かっている。先行研究では十分な学習を行い「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」ができる状況であれば空間的不一致や見た目の不一致を許容して自己帰属感を感じることが出来ると示唆されている[Short, 2009]. 一方で、別の研究では実身体と視覚的身体に空間的不一致が生じると「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」も難しくなることが示唆されている[van den Bos, 2002][Koshinbo, 2011]. また実身体と視覚的身体との見た目の違いが生じる自己帰属感に影響を与えることも示唆されている[Argelaguet, 2016].

これらの研究による知見をまとめると、「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」できれば、空間的不一致や見た目の不一致を許容して自己帰属感を感じることが出来るが、「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」できるようになるまでの学習過程にも空間的不一致や見た目の不一致が影響を与え得ると考えられる。

また、視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚として知られる Pseudo-haptics の生起においても、運動予測が関与することが示唆されている。Pseudo-haptics は視覚と力覚間のクロスモーダル錯覚の例として広く知られている。この錯覚は視覚と力覚間の感覚間衝突によって生じ、空間的特性を知覚する上で優位に働く視覚によって力覚が変容されることで生じると一般的には説明されている[Lécuyer, 2009].

しかし、Pseudo-haptics が外力として解釈される上では、視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚という説明だけでは不十分である。実際に、視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚が生じても外力を感じない例も存在する[Steinicke, 2010][Matsumoto, 2016A]. またいくつかの研究では、疑似的な外力知覚に対する運動予測の関与が主張されており、外力を感じる要因は視覚的運動と運動予測との差を認知することであると示唆されている[Watanabe, J., 2017][Honda, 2013].

ただし、従来の視覚情報を変調する Pseudo-haptics の提示手法では、「視覚と力覚間の不一致」と「運動予測と視覚的運動結果との不一致」が同時に生じる可能性がある。そのため運動予測と運動結果との差を認知することが疑似的な外力知覚が解釈される要因となることは直接的には明らかになっていない。

本章で挙げた先行研究を俯瞰的に見ると、自己帰属感と Pseudo-haptics の生起過程には密接な関わりがあることが伺える。具体的には、両者は自己運動と視覚的運動との関連性を認

知することで生じる感覚であるといえる。さらに、自己の身体を能動的に動かすことによって生じる運動予測がその生起過程において重要な役割を担っている可能性が示唆されている。しかし、先行研究ではこれらの生起過程に運動予測が具体的にどのように関わるのかは詳細には明らかにされていない。その最大の理由は、能動的運動時には「視覚と体性感覚間の一致性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の2つの基盤が同時に働くため、それらを個別に検証することが難しいことである。

本章ではさらに、本研究で注目する意識的な運動予測の構築には、自身の運動が生じさせる結果に対する概念的に理解などが関与し、モーターコマンドが引き起こす身体運動と完全に一致する訳ではないことを示した。この特性を上手く利用し、体性感覚によって知覚する身体運動とは異なる運動を予測させることによって、「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一致性の認知」を分離した検証を行う新規実験系を構築することが可能であると考えられる。

そこで本論文では、この新規実験系を利用し、自己帰属感と **Pseudo-haptics** の生起過程における運動予測による具体的な影響の調査を試みる。本研究の目的と手法についての詳細は次章にて述べる。

第3章 本研究の目的と手法

本論文全体の目的は、ユーザが自己の身体運動を用いて映像内に提示される視覚的対象を操作するインタフェースを扱う上で、自己の身体運動と視覚的な運動結果との関連性をどのように認知するかを明らかにすることである。特に本論文では能動的に身体を動かすことで生じる運動予測に注目し、自己運動と視覚的運動との関連性を認知するにあたってこの運動予測がどのように関与するかを明らかにすることを目標としている。

そこで本論文では、第2章で紹介した自己帰属感と Pseudo-haptics に関する先行研究を踏まえて、「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一貫性の認知」を分離した検証を行う新規実験系を構築することで自己運動と視覚的運動との関連性の解釈における運動予測による具体的な影響の調査を試みる。これまでの先行研究においても自己運動と視覚的運動との関連性の認知における「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の重要性は主張されてきたが、能動的運動時には「視覚と力覚間の一貫性の認知」と混同された状態で曖昧に理解されており、能動的運動時に運動予測が具体的にどのように関与するのかは未解明のままである。

これを解明するために、能動的な自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知における運動予測の有効性の調査、運動の随伴関係の認知がしやすくなる要因の調査、および運動の関連性の解釈に運動予測が与える影響の調査に取り組んだ。以下では各調査における具体的な問題意識とその解決手法についてまとめる。

3.1 能動的な自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知における運動予測の有効性の調査

視覚的な対象をユーザが自発的に操作することが前提となるインタフェースデザインにおいては、能動的に身体を動かす際にどのように自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知しているのかを明らかにすることが必要である。第2章では能動的運動時における自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知には主に2つの基盤が存在することを示した。1つは

「視覚と力覚間の一致性の認知」であり、もう1つは「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」である。前者は能動的運動時・受動的運動時によらず生じる認知であるが、後者は能動的運動時にのみ生じる認知である。先行研究では視覚的運動と自己運動との随伴関係があるか否かを弁別できるかの課題の結果を能動的運動時と受動的運動時と比較し、能動的運動時の方が優位に弁別できることから「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」の有効性が示唆されている。しかし、能動的運動時の自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知に「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」がどのように関与しているかは詳細には明らかになっていない。これまで詳細に明らかにされてこなかった最大の理由は、能動的運動時には前述した自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知の2つの基盤が同時に働くため、どちらか一方のみの影響を検証することが難しいためである。

そこで本研究では、能動的な自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知における運動予測の有効性について明らかにすることを目的とし、新規実験系を構築することで前述した2つの基盤を分離した検証を試みた。具体的には、運動結果の予測のしやすさを維持した上で、実身体と視覚的身体との空間的整合性を崩し、「視覚と力覚間の一致性の認知」を難しくすることで「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」が運動の随伴関係を認知に有効であるかを調査した。実験の結果からは、運動結果を予測しやすい状況下では空間的不一致によらず自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知することが可能であるという結果が得られた。先行研究においても能動的な身体運動と視覚的運動結果の対応関係を十分に学習し、視覚的運動結果を予測できるようになれば空間的不一致を許容して自己帰属感を感じることが出来ると示唆されているが、自己帰属感が感じられるようになるまでの学習過程については明らかになっていなかった。本研究で明らかにしたのはその学習過程においても運動予測と視覚的運動結果との一致性を認知できることが有効に働くかということである。

3.2 運動の随伴関係の認知がしやすくなる要因の調査

近年、発展がめざましいVR技術などでは、操作者の実世界における身体や運動をそのままバーチャル空間で再現するだけでなく、それらを拡張・変容して表現するものが多く見られる。しかし、この時実世界での操作者の身体や運動は変化しないため、このような状況では操作者と視覚的身体との間で身体の見え方や向き、運動結果などに空間的不一致などが生じ、これらが自己帰属感を感じにくくさせている可能性がある。したがってインタフェースデザインの今後の展開では、実世界の身体や身体運動とは異なる対象や運動に対してうまく自己帰属感を感じさせる方法の解明が重要となる。本研究では特に、能動的運動時の実

身体の運動と視覚的運動結果の一致性の認知における運動予測の有効性に注目しているが、予測のしやすさは実身体と視覚的運動結果の対応関係だけでなく視覚的身体の見た目や向きなどによっても変化すると考えられる。

そこで本研究では、同一の実験環境において、実身体と視覚的身体との見た目や向きの違いや、運動結果の空間的整合性、実行する運動の様相の違いを組み合わせた条件で運動の随伴関係を認知できるかを測る課題を実施した。その結果、運動結果を予測しやすい状況下では空間的不一致によらず自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知することが可能であるという結果を再確認すると同時にその予測のしやすさは視覚的身体の見た目や向きの影響を受けることが明らかになった。

3.3 運動の関連性の解釈に運動予測が与える影響の調査

3.1 節で述べたようにこれまで能動的に身体を動かすことで得られる運動予測の有効性は「視覚と力覚間の一致性の認知」と混同した状態で曖昧に理解されてきた。3.1 節では自己帰属感の生起に運動予測がどのように関わるかについて「視覚と力覚間の一致性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」を分離して検証する必要があることについて述べたが、視覚と触力覚間のクロスモーダル知覚として知られる Pseudo-haptics が外力として解釈される過程においても「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」が関与している可能性が先行研究[Honda, 2013][Watanabe, J., 2017]によって示唆されている。したがって Pseudo-haptics の生起過程について詳細に明らかにする上においても、運動予測とクロスモーダル知覚を分離した検証が必要であると考えられる。

そこで本研究では、Pseudo-haptics の生起についても「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」に注目し、運動予測と視覚的運動結果の差を認知することが疑似的な外力知覚を生んでいるのではないかという仮説のもと検証を試みた。具体的には 3.1 節で述べた手法とは反対に、実身体と視覚的対象との空間的整合性を維持した状態で、運動予測と視覚的運動結果が一致しない時に疑似的な外力を感じるのかを検証した。その結果、運動予測と視覚的運動結果の差を認知することが疑似的な外力知覚の要因となっていることが示唆された。

最終的に、自己帰属感の生起と Pseudo-haptics の生起に運動予測が与える影響について本研究の各実験で得られた結果から総合的に議論し、自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知する上で運動予測がどのように関与し、どのような解釈を与え得るのかをまとめた。また今後の展開として、本研究の知見がインタフェースデザインの分野でどのように応用できるかを議論した。

第4章 能動的回転操作における自己

帰属感の生起過程の分析

4.1 はじめに

これまでの先行研究では自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知を通じた自己帰属感
は、受動的運動時よりも能動的運動時の方が優位に感じられることから、能動的に身体を動かすことで生じる運動予測が有効に働くことが示唆されてきた[Tsakiris, 2005][Tsakiris, 2007][Koshinbo, 2011]. しかし能動的運動時の自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知には、この「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」(以降、本章ではこれを「予測との一致性」と呼ぶ)と「視覚と力覚間の一貫性の認知」(以降、本章ではこれを「力覚との一貫性」と呼ぶ)の2つが同時に行われており、能動的運動時の自己帰属感の生起に対するそれぞれの一致性の認知の影響について個別に検証することは難しく、これまでに実験的な分析を行った例は少ない。

そこで本研究では、能動的運動時の自己帰属感の生起過程において、「力覚との一貫性」と「予測との一貫性」がどのように影響するかを明らかにすることを目的とした実験を行った。具体的には「予測との一貫性」を保った上で「力覚との一貫性」が得られにくい状況を作るために、クランクハンドルによる回転操作を導入した。これは運動方向を右回りおよび左回りの円運動に限定し、入力された回転運動の速度を拡大・縮小することでその状況を作るものである。この手法を基に3つの実験を行い、速度の拡大・縮小によって課題達成率に差が生じないことを確認した。

実験の結果から、本実験環境のように「予測との一貫性」が得られれば、視覚的運動と実運動に空間的不一致があり「力覚との一貫性」が得られにくい状況であっても、自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知が十分に可能であり、視覚的運動結果を自身の運動に関連付けた解釈が生じることが示唆された。このことから、能動的運動時における自己帰属感の生起には「予測との一貫性」が重要な役割を担っていると結論付けた。

4.2 関連研究

石井らは能動的運動が視覚に与える影響を分析するために、対象を自分が操作しているという感覚によって kinetic depth effect の視覚的運動の解釈が変容するかを調べた[Ishii, 2015]. kinetic depth effect とは静止時には奥行き感を知覚することができないが、回転運動することで奥行き感を知覚できる性質を持つ視覚的運動である。しかしその凹凸方向は回転方向と対応して 2 つの解釈が可能である。実験では左右どちらに回転するか 2 つの解釈が成り立つ kinetic depth effect に対して、クランクハンドルを用いた上肢の回転運動によって自分が操作する方向の回転運動であるという解釈が起きやすいことを示した。また同研究では能動的に操作する場合と受動的に運動する場合とで比較を行っており、能動的な運動時の方が受動的な運動時よりも、変容が起きやすいことを示している。

4.3 本章の目的

本研究の目的は、対象の視覚的運動と自己の能動的運動との随伴関係から、その対象が自己の身体の一部という自己帰属感が生起する上で、「力覚との一致性」と「予測との一致性」がどのように影響するかを明らかにすることである。これまでの研究では受動的運動と能動的運動の比較により、能動的運動時には「予測の随伴」が影響すると示唆されてきた。しかし能動的運動時に、「力覚との一致性」と「予測との一致性」が自己帰属感の生起にどう影響するかについて実験的な分析を行った例は少ない。その大きな要因は、力覚と遠心性コピーによる予測によって知覚される自己運動が空間的に一致しているため、それぞれの影響を分離して検証することが難しいためである。

そこで本章では、能動的運動時において、「力覚との一致性」と「予測との一致性」の双方を認知できる場合と、「予測との一致性」は得られるが「力覚との一致性」が得られにくい状況との比較を試みた。これまでの研究から「力覚との一致性」は空間的整合性が崩れるにつれて認知しにくくなることが分かっている。そのため、空間的整合性が取れない運動をさせる事で「力覚との一致性」が得られにくい状況での検証を試みた。

「予測との一致性」を保ちつつ空間的整合性がとれない環境を作る方法として、クランクハンドルによる回転操作を用いた実験をもちいた。具体的には運動を時計回り・反時計回りの円運動に限定した状態で入力に対して呈示する視覚刺激の回転速度を拡大・縮小することで、運動結果は予測しやすいが操作に応じて被験者の手の運動と視覚刺激の運動に空間的不一致が生じる状況を作った。

自己帰属感が生じたかの評価には、自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知することで達成されるタスクを用いた。その課題達成率の分析から実験環境における自己の運動に対する2つの認知の影響を分析した。

4.4 実験設計

4.4.1 検証する上での問題

マウスによるポインタ操作のように2次元運動を操作に用いた場合では自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知として、「力覚との一致性」と「予測との一致性」が関係すると考えられる。

このような場合、この2つの認知過程のそれぞれについて検証することは難しい。それは力覚により知覚される運動と自己運動の予測が空間的に一致しているためである。「予測との一致性」の自己帰属感の生起への影響を検証する手法として身体運動と視覚的運動の空間的整合性を崩すことで「力覚との一致性」が得られにくくすることが有効であると考えられる。しかし通常の2次元平面での運動を利用した場合、身体運動と視覚的運動の空間的整合性を崩すと「力覚との一致性」のみならず「予測との一致性」も得られにくくなると考えられる[van den Bos, 2002][Koshinbo, 2011][Mazzoni, 2006]。能動的運動時の「予測との一致性」の有効性を調査するには、身体運動と視覚的運動の空間的整合性を崩した上で、「予測との一致性」が得られやすい環境を構築する必要がある。

4.4.2 提案手法

「予測との一致性」を保った上で、自己の運動と視覚的運動の空間的整合性を崩す手法としてクランクハンドルによる回転操作を利用し、身体運動による入力に対して視覚的運動の速度を拡大・縮小する方法を本研究では考案した。

図 4-1 はマウス操作時における操作者の運動とポインタの運動の随伴関係のイメージ図である。操作者の運動が図 4-1 の図左の枠内の矢印が示すような軌跡であるとする、ポインタの運動は被験者の運動と等倍の動きをする場合は図右上、被験者の運動を縮小した動きをする場合図右下のような軌跡となる。このようにマウス操作のような2次元運動では、視覚的運動を拡大・縮小することで身体運動と視覚的運動の運動量に差が生じても全体の運動の軌跡は相似となる。そのため、身体運動と視覚的運動の空間的整合性は保たれたまま

となる。

一方クランクハンドル操作時における操作者の運動とそれに対応したオブジェクトの視覚的運動の随伴関係のイメージ図を図 4-2 に示す。回転運動では自己の運動に対して視覚的運動の運動量を拡大し・縮小した場合、運動に伴い双方の回転角に差異が生じることとなる。図 2 に示すように被験者が図左上のような運動をした際、図左下に示すように回転角を縮小するとその軌跡に相似性がなく、2次元平面での操作者の手とオブジェクトの空間的整合性は崩れる。ただし、運動量が異なり操作者の手とオブジェクトに空間的な差異が生じていても、回転方向は変化しないため、「予測との一致性」は保たれる。

本実験ではこのような回転運動を利用した手法を用いて、自己運動と視覚的運動に空間的な差異が生じる状況と、空間的整合性が保たれた状況との結果を比較することで、「力覚との一致性」と「予測との一致性」が自己帰属感の生起にどのように影響するかを分析した。仮に、本実験環境においても「力覚との一致性」による影響が大きいならば空間的不一致が生じることによって自己帰属感の生起に有意差が生じると予想される。

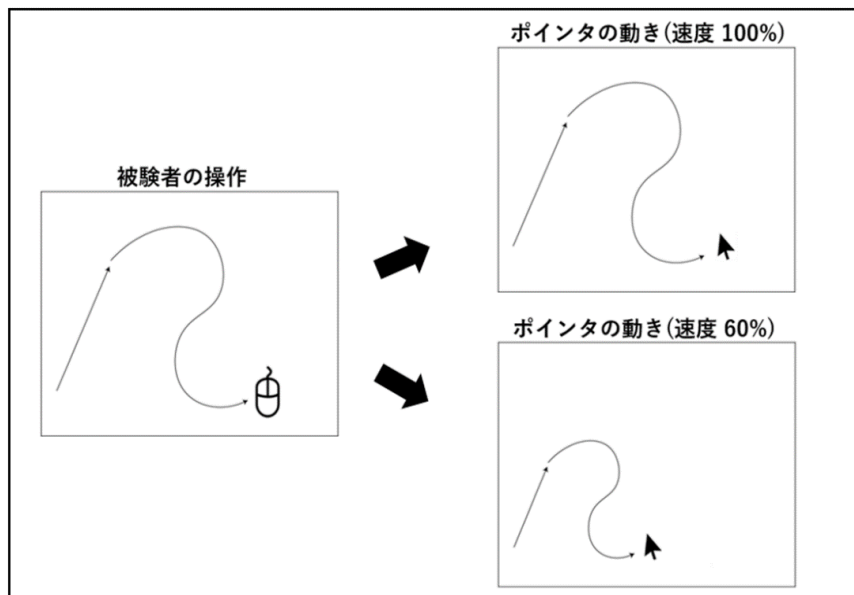


図 4-1 マウス操作時における上肢とマウスマウスの空間移動。入力に対するカーソルの移動量が異なっても空間的整合性が保たれたままである。

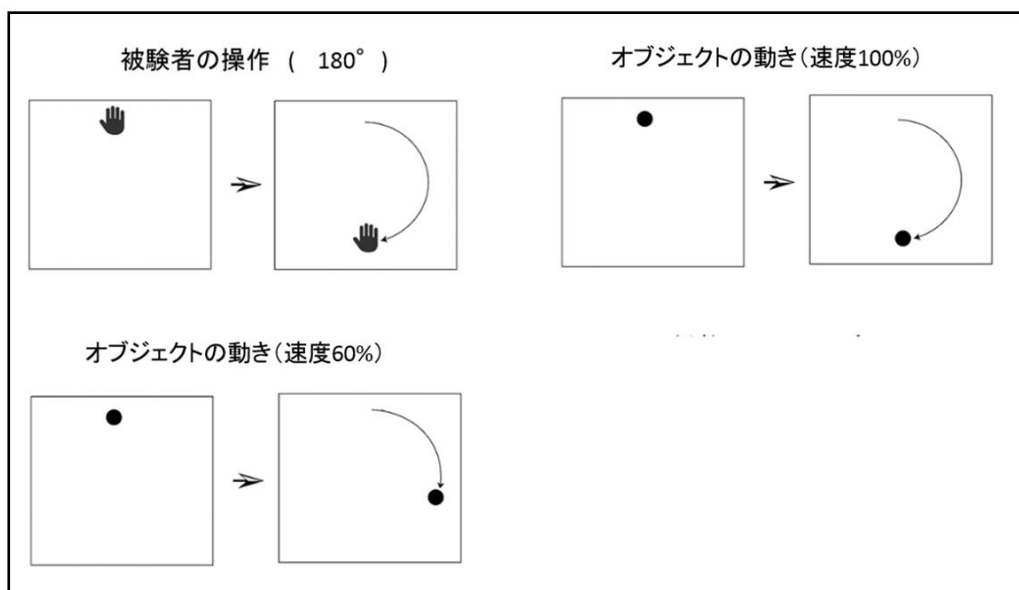


図 4-2 クランクハンドル操作時における上肢とオブジェクトの空間移動. 入力に対するオブジェクトの移動量が異なる空間的整合性が崩れる.

4.4.3 空間的整合性を崩す仕組み

視覚的運動の速度を変えることで空間的整合性を崩す仕組みとして、5 パターンの係数 (1/2, 2/3, 1, 3/2, 2) を用いた. 各実験では被験者の操作による回転運動に対して、これらの係数のうち1つを掛け合わせた結果を視覚的運動の回転運動として呈示した. 以降、これらの係数を回転速度係数と呼ぶ.

図 4-3 は、クランクハンドルによって 180° の回転運動が入力された時点での各回転速度係数によるオブジェクトの二次元平面での空間移動を示したものである. 回転速度係数が「1」の場合では、クランクハンドル操作による上肢運動とオブジェクトの回転運動とは同じ方向に同じ量だけ回転するため、常に身体運動とオブジェクトの空間移動が一致しているが、その他の4パターンの場合では、入力に伴い操作者の手とオブジェクトに空間的不一致が生じる.

また「2」と「1/2」、 「2/3」と「3/2」は身体運動と視覚的運動の空間的な差異について「視覚的運動が先行する場合」と「身体運動が先行する場合」という対応関係を持っている. 例えば、回転速度係数が2であるときは身体運動が 180° 回転したときに視覚的運動が 360° 回転するのに対し、回転速度係数が1/2であるときは視覚的運動が 180° 回転したときに身体運動が 360° 回転する.

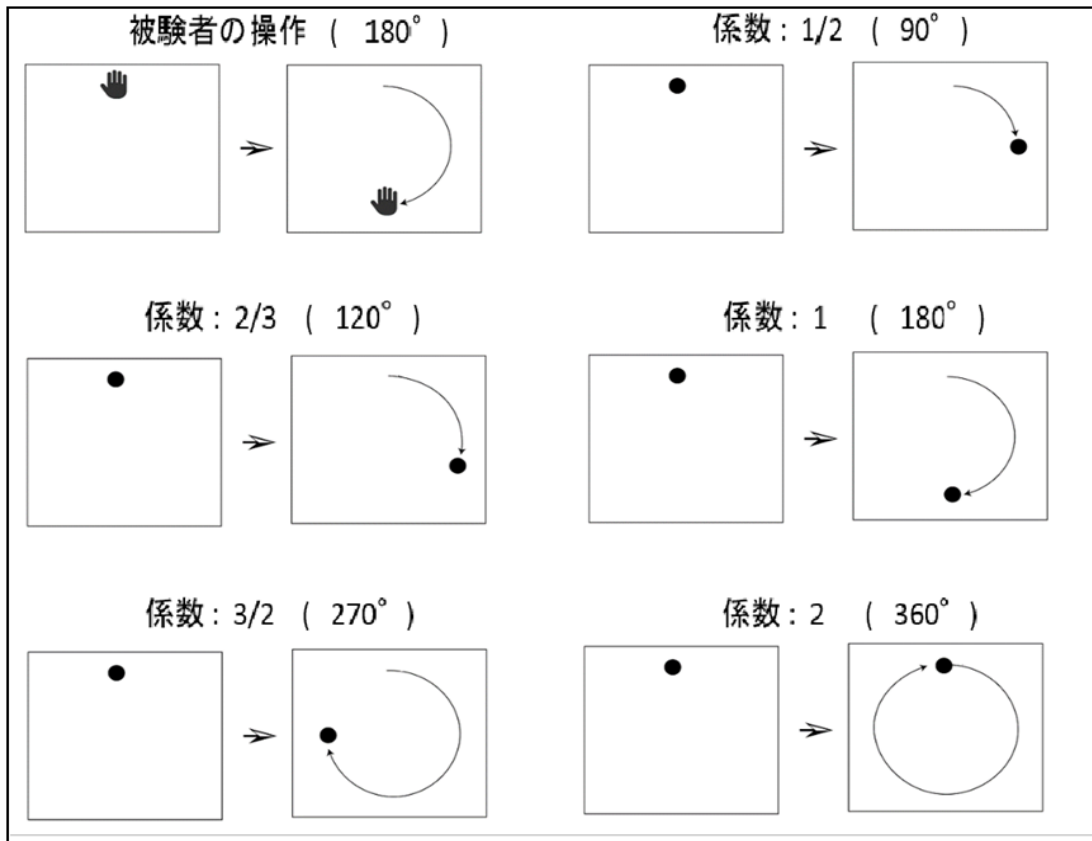


図 4-3 被験者の上肢の空間移動と各回転速度係数における回転オブジェクトの空間移動

4.4.4 実験装置

本実験では、映像呈示用の液晶ディスプレイとクランクハンドル型の入力装置を用いた。図 4-4 に実験の様子を示す。

被験者は椅子に座り、利き手側（普段マウス操作に用いる手側）に設置された入力装置を操作し、液晶ディスプレイによって呈示される映像を見ながら課題を実施する。図 4-5 に入力装置の写真と概略図を示す。回転操作の検出には Griffin Technology 社の PowerMate を用いた。このデバイスは 4° 毎の回転運動の入力が可能である。操作部には写真のようなクランクハンドルを取り付けた。入力装置の回転台の半径は 50 mm であり、上部には直径 25 mm の自由に回転するつまみ（把持部）を取り付けた。装置の中心からつまみの取り付け部までの距離は 40 mm であった。クランクハンドルを回転させる際にかかる重みは 25g 程度で被験

者の操作に準じて滑らかに回転する。この重みは一般的なマウス操作時にかかる重みと同程度であり、被験者はハンドルからの力覚をほとんど意識することなく自由に操作できた。実験時被験者にはつまみをしっかりと持ち、試行中はつまみから手を離さないように指示した。



図 4-4 実験風景

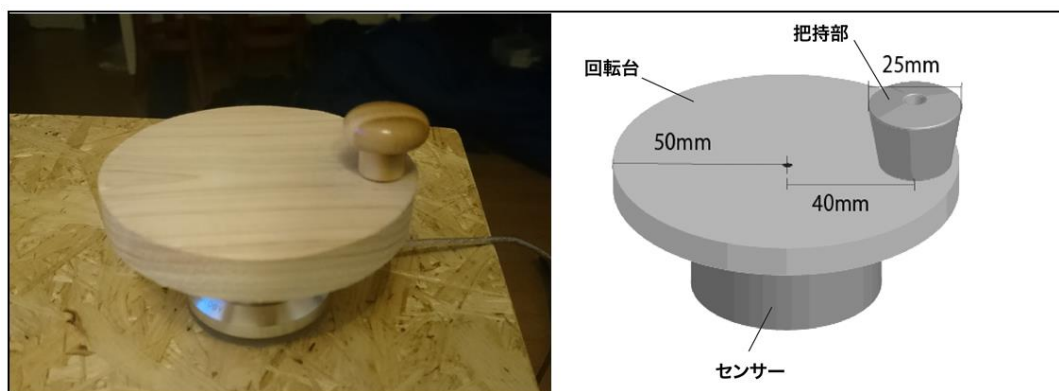


図 4-5 入力装置

4.5 実験 1 多義的な視覚的運動に対する解釈の変容

4.5.1 目的

時空間的に同期したクランクハンドルの操作では、回転方向に多義性を持つ視覚的運動に対する解釈について自己の上肢運動によって解釈が固定されることが先行研究[Ishii, 2015]によって認められている。さらにその変容は受動的運動時よりも能動的運動時の方が優位に生じることから、「予測との一致性」がこの解釈の変容に有効に働いたことが示唆されている。しかし能動的運動時において有効に働いたかはまだ検討されていない。

そこで本実験では、回転方向の解釈に多義性が含まれるアニメーションに対する能動的な操作による解釈の変容について、空間的整合性が崩れることによる影響を分析する。

4.5.2 呈示される視覚的運動

先行研究[Ishii, 2015]の実験に用いられた Kinetic depth effect は回転方向の解釈と同時に奥行き情報が得られるため、回転開始時の解釈が持続的に保たれ、運動中は回転方向の解釈が変わりにくいと考えられる。自己の運動との随伴関係の認知による影響を調査するためには運動中に奥行き情報などの他の情報が解釈に影響しない環境が望ましい。そこで本研究では、奥行き情報などが回転方向の認知に影響しない 2 次元アニメーションを用いて実験を行った。

本実験で呈示する視覚的運動としてまず、図 4-6 の a に示す 2 枚の静止画によって構成されるアニメーションを用いる。このアニメーション刺激は[Wertheimer, 1912]によって紹介された回転方向の解釈について多義性のあるアニメーション刺激を模して作成したものである。これは 45° 毎に回転する運動として知覚されるが左右のどちら向きの回転としても解釈することができ、どちら向きに知覚されるかは様々な条件によって影響されることが知られる。被験者のクランクハンドルの操作によって入力された回転角に、各試行での回転速度係数を掛けた値が、左右どちらかで 45° の倍数を超えるたびに画像を切り替えた。

また回転方向の解釈に偏りが生じる視覚的運動として、3 枚の静止画を用いたアニメーション b, c を用いて実験を行った。b は 3 枚の静止画によって構成されるアニメーションで、画像が切り替わるたびに被験者の操作と同じ方向に 30° 毎の回転運動として知覚することができる視覚的運動である。入力された回転角の 30° 毎に画像を切り替える。c は b と同様

に 3 枚の静止画によって構成されるアニメーションで画像が切り替わるたびに被験者の操作と逆方向に 30° 毎の回転運動として知覚することができる視覚的運動である. b, c についてはそれぞれ意図された方向とは反対方向に 60° ずつ回転する視覚的運動としても解釈することができるが, 順方向に 30° ずつ回転する刺激として解釈する方が回転運動として優位に知覚されることがわかっている[Anstis, 1987].

本実験では, これら 3 つのアニメーション刺激を用いて, 実験目的を知らない被験者に対して, 偽の実験目的を説明した上で実験を行った. 試行中は被験者に自己の意思で自由にクラックハンドルの操作を行わせ, 操作方向とアニメーション刺激の回転方向が同じ方向であるか逆方向であるかの 2 択によって回答を求めた. 呈示映像のフレームレートは 60fps であり, 各試行では a, b, c いずれかのオブジェクトの視覚的運動が 3 秒間呈示された.

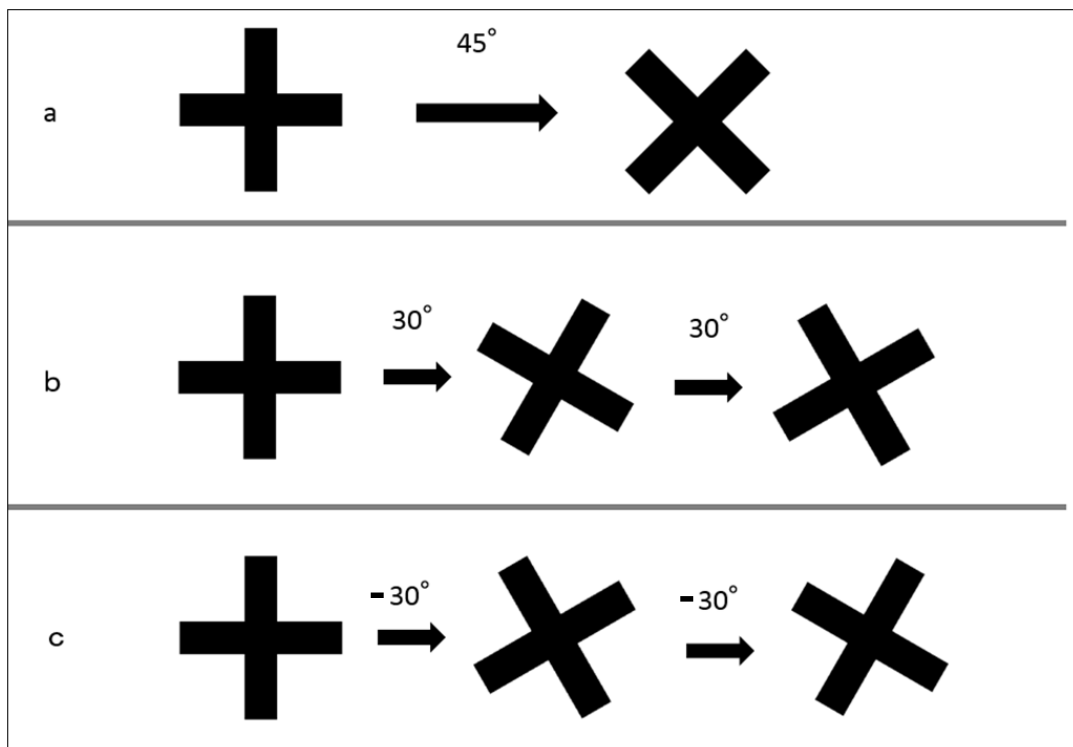


図 4-6 実験 1 におけるアニメーション刺激の種類 (入力が右回りの場合)

4.5.3 偽の実験説明

本実験は実験目的を知らない被験者に対して、被験者には実験で使用する十字形のオブジェクトの静止映像を提示し偽の実験説明として以下のことを教示した。

- 本実験は回転方向の識別を用いた動体視力を測定する実験である。
- 試行が開始すると被験者のハンドル操作に伴って操作と同一の方向か逆方向に回転運動をするアニメーションが 3sec 呈示される。
- 試行毎に操作に対してオブジェクトの回転する速さとアニメーションのパターンが変化し、回転方向の識別への難易度が変化する。
- アニメーション提示後に自己の操作と同じ方向であったか、逆方向であったかをできるだけ正確に回答してもらう。

4.5.4 手順

実験開始前に被験者には 6.4 で述べた偽の実験説明を伝えた。1 回の実験で、30 回 (3 アニメーション×5 係数×2 回) の試行を行った。1 回目の試行での回転速度係数はランダムに選定された。その後は試行毎に回転速度係数を最大 1 段階変化し、アニメーションのパターンは試行ごとにランダムに選定された。各試行の開始前にクランクハンドルを初期位置に戻すように伝えた。実験実施者はクランクハンドルが初期位置にあることを確認した後、被験者に任意のタイミングで口頭により試行開始の指示をさせた。被験者の開始の指示に従い、実験実施者の音声による開始合図とともに画面がホワイトアウトされた。画面がホワイトアウトされた状態で被験者がクランクハンドルの操作を開始すると同時にアニメーション刺激が 3sec 呈示された。呈示が終了すると回答画面に切り替わり、被験者に口頭により、オブジェクトの回転方向が自分の操作方向と同じ方向であったか、逆方向であったかを解答させた。解答は必答とした。

4.5.5 予備実験

実験に使用する視覚刺激の多義性を確認するために、ハンドル操作を用いない等速回転における回転方向の解釈について 5 名の被験者に対して予備実験を行い調査した。予備実験では被験者による入力の代わりに 60rpm の等速回転運動を入力値としたアニメーションが提示された。被験者はクランクハンドルの操作は行わず、自己の操作と「同じ方向であっ

たか、逆方向であったか」を解答する代わりに、「右回転であったか、左回転であったか」を解答する必要があった。その他はすべて本実験と同様の手順であった。

4.5.6 予備実験の結果

3枚の静止画によるアニメーション（図 4-6 b, c）についてはすべての試行で 30° 毎に回転すると解釈できる方向が解答された。図 4-7 は 2枚のアニメーションにおける被験者毎の回答の割合を表すグラフである。この予備実験における回答は左右の 2 択であるのでチャンスレベルは 0.5 である。各被験者の回答結果の平均値は 0.4~0.6 に分布しており、多少左右どちらかに偏った知覚をする被験者が見られたが全体としてはチャンスレベル付近に分布しており、実験に用いた 2枚のアニメーション刺激が回転方向について多義性を持つことが示唆された。

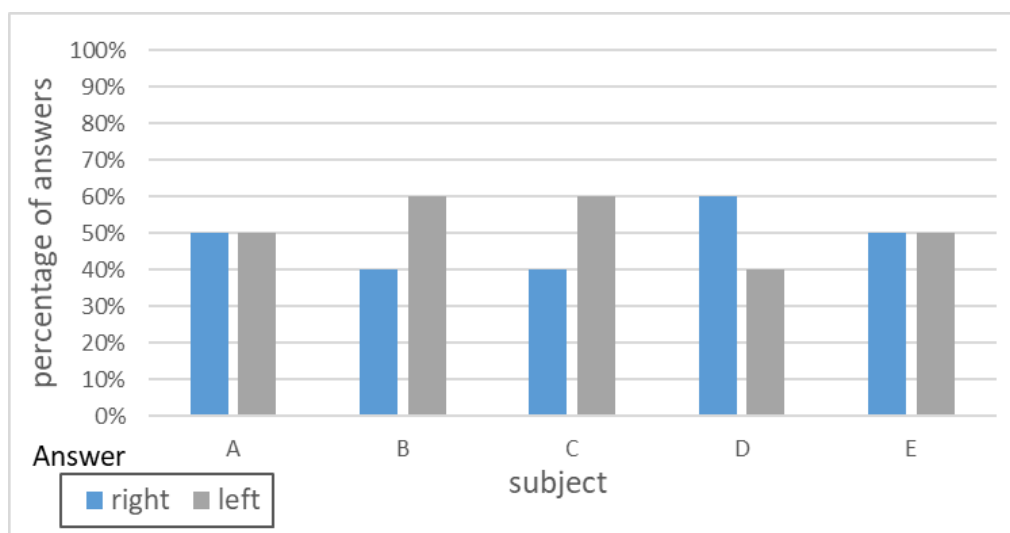


図 4-7 予備実験での各被験者の回答の割合

4.5.7 参加者

本実験には 10 名（男性 6 名，女性 4 名）の大学生および大学院生が被験者として参加した。全ての参加者は正常な視力あるいは矯正視力を有し、利き手は右手であった。

4.5.8 結果

パターン b, c では予備実験と同様に、すべての試行で 30° 毎に回転すると解釈できる方向が解答された。

以下、パターン a が提示された際の回答結果について述べる。図 4-は被験者が自身の操作方向と同じ方向にオブジェクトが回転したと回答した割合を被験者毎に示したグラフである。被験者毎の同じ方向であったと回答された割合は 0.7 から 1.0 に分布しており、全被験者の平均は 0.87 であった。

実験における回答は 2 択なのでチャンスレベルは 0.5 である。このことから、提示されたアニメーションは操作によって操作方向と同じ方向の回転として解釈されやすくなることが確認された。

また、図 4-は自己の操作と同じ方向に回転したと回答された割合を回転速度係数毎に示したグラフである。同じ方向に回転したと回答された割合を回転速度係数（5 水準）毎に分散分析を行ったところ、水準間で有意差は認められなかった ($F(4,36)=0.144, p=.96$)。この結果はその解釈の変容は自己の身体と視覚的運動の空間的整合性が崩れた状況においても同様に発生することが意味する。

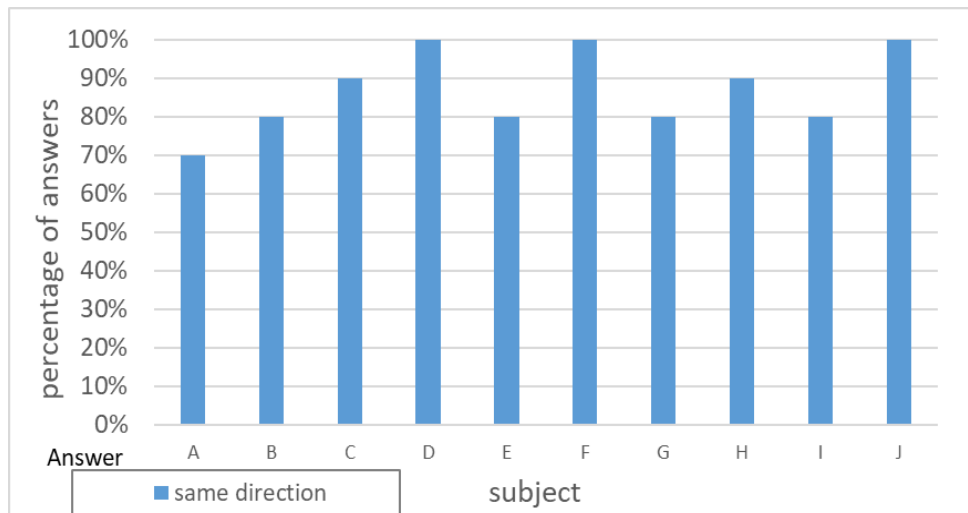


図 4-8 実験 1 における被験者毎の回答の割合

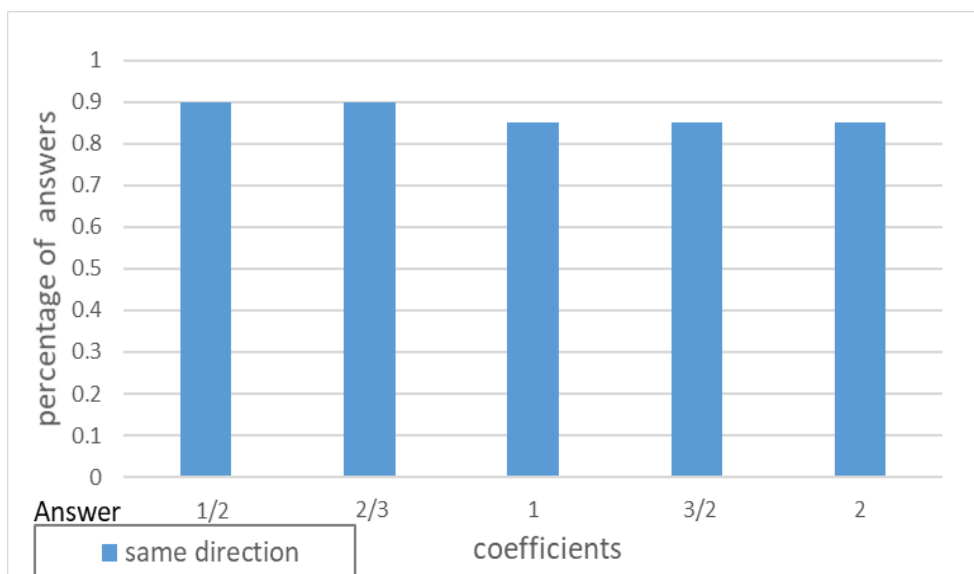


図 4-9 回転速度係数毎の回答の割合

4.6 実験 2 複数の回転オブジェクト中からの自己操作オブジェクトの特定

4.6.1 目的

実験 1 では、視覚的運動の解釈に対する自己の能動的運動による影響が確認された。しかし、能動的な運動による自己帰属感の生起過程について分析するには、運動の随伴関係の認知によって、ある対象を自己が操作していると感じているかを検証する必要がある。運動の随伴関係の認知による自己帰属感の生起過程の分析には先行研究[Watanabe, K., 2013A]のように複数の対象物の中から自己が操作している対象を弁別できるかの調査が有効であると考えられる。

そこで本実験では、複数の回転運動オブジェクトから自己が操作するオブジェクトを特定する課題を用いて検証を行った。実験 1 と同様に課題達成に対する回転速度係数の影響について調査することで自己運動と視覚的運動との空間的整合性が崩れることの影響につ

いて分析する.

4.6.2 呈示される視覚的運動

本実験では視覚的運動として図 4-10 に示す 3 種の回転運動オブジェクトを提示した. a はフレームの中心を軸に周回運動をするドットである. b はフレームの中心を軸に回転運動をし, 矢印のような形状をしている, c は b と同様にフレームの中心を軸に回転運動をし, 十字形をしている. また実験 1 とは異なり, 本実験の回転運動オブジェクトは 30° や 45° など一定の回転角ずつのアニメーションではなく, 被験者の入力に則して滑らかな回転運動をする.

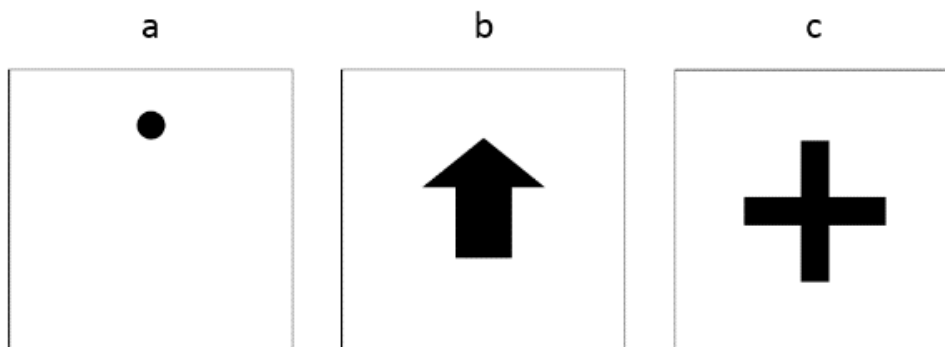


図 4-10 オブジェクトの形状 (a:ドット, b:矢印, c:十字形)

a と b, c では知覚される運動の質について周回軌道を移動するオブジェクトと回転するオブジェクトというような違いがあり, 運動の性質の違いにより操作感の獲得過程に違いが生じる可能性が考えられる. また c は実験 1 のアニメーション刺激で用いたオブジェクトと同形状の点対称図形である.

各試行では図 4-11 のように呈示画面を 6 分割して得られるフレームそれぞれに 1 つずつ回転運動オブジェクトが呈示された. 同時に呈示される 6 つのオブジェクトは被験者のクラックハンドルによる入力値にその試行での回転速度係数を掛けたものを 1 つとそれを左右反転したものを 1 つ, さらに現在の試行での入力値に関係のない 4 つのダミーの運動をするオブジェクトによって構成される. ダミーの運動オブジェクトの設計として, 現在の試行と無関係かつより自然な運動を再現するために, 過去の被験者および現在の被験者の過去の試行でのクラックハンドルによる入力値のログデータを記録し用いた. 各試行でのダミーには, ログデータからランダムに選ばれた 2 つの入力値に回転速度係数を掛けたもの 2 つとそれを左右反転したもの 2 つを用いた. それぞれのオブジェクトの呈示位置は試行ごと

にランダムに選定された。呈示映像のフレームレートは 60fps であり，a,b,c いずれかの回転運動オブジェクトの視覚的運動が 3sec 呈示された。

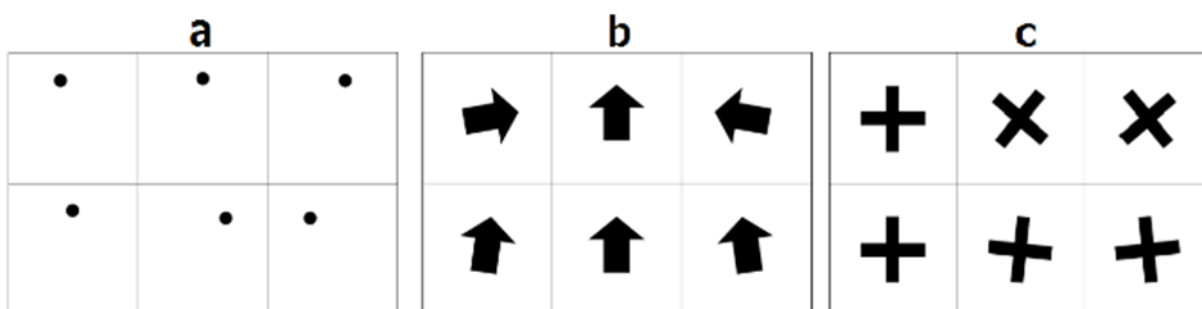


図 4-11 タスクでの呈示刺激（画面が 6 つに分割されオブジェクトが同時に 1 フレームにつき 1 つずつ呈示される。）

4.6.3 手順

実験開始前に被験者には、「被験者によるクランクハンドル操作の開始とともに複数の回転運動オブジェクトが 3sec 呈示され，自らの操作によって自己が操作しているオブジェクトを抽出し，呈示終了後にそのオブジェクトが呈示されたフレームの番号を解答する」ように伝えた。1 回の実験で，30 回（5 係数×3 形状×2 回）の試行を行い，1 回目の試行の回転速度係数はランダムに選定され，その後は試行毎に回転速度係数を最大 1 段階変化させた。オブジェクトの形状は試行ごとにランダムに選定された。各試行の開始前にクランクハンドルを初期位置に戻すように伝え，クランクハンドルが初期位置にあることを確認した。その後，被験者に任意のタイミングで口頭により試行開始の指示をさせた。被験者の開始の指示に従い，実験実施者の音声による開始合図とともに画面がホワイトアウトされた。画面がホワイトアウトされた状態で被験者がクランクハンドルの操作を開始すると同時に複数の回転運動オブジェクトが 3sec 呈示された。呈示が終了すると回答画面に切り替わり，被験者に口頭により，自己が操作するオブジェクトが呈示されたフレームの番号を解答させた。解答は必答とし，解らなかった場合においても必ず 1 つの番号を解答させた。

4.6.4 参加者

本実験には 10 名（男性 5 名，女性 5 名）の大学生または大学院生が被験者として参加した。全ての参加者は正常な視力あるいは矯正視力を有し，利き手は右手であった。

4.6.5 結果

全被験者の回答の平均は正答の回答率が 70%であり，誤答のうち，自己の操作するオブジェクトを左右反転にしたオブジェクトの回答率が 21%，過去の実験データから作成したダミーのオブジェクトの回答率が 9%であった．図 4-12 は，各回転速度係数とオブジェクトの形状における正答率をグラフに表したものである．正答率について回転速度係数（5 水準）とオブジェクト形状（3 水準）の二因分散分析を行った結果，回転速度係数の主効果（ $F(4, 36) = 0.105, p = .98$ ），オブジェクトの形状の主効果（ $F(2, 18) = 2.224, p = .13$ ），交互作用（ $F(8, 72) = 0.574, p = .79$ ）全てにおいて有意差は認められなかった．

本実験でのチャンスレベルは 0.2 未満であり，空間的整合性が崩れている状態であっても高い正答率で操作するオブジェクト特定できることが確認された．また，ドットのように空間移動が分かりやすいものの方が，実運動とオブジェクトの運動とのずれを認知しやすいため，空間的整合性が崩れることの影響を受けやすいと予想されたが，オブジェクトの形状間で有意差は認められなかった．

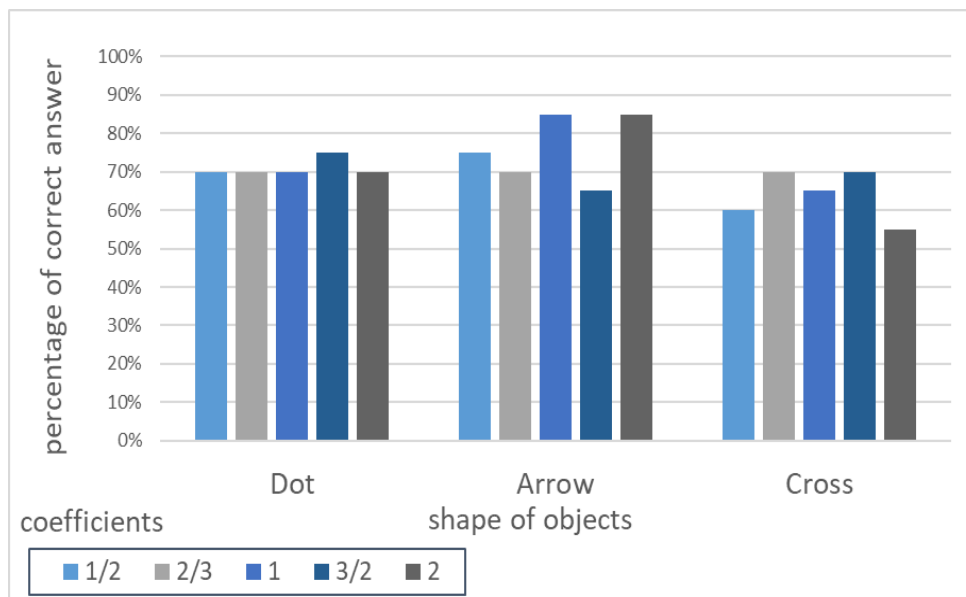


図 4-12 各回転速度係数とオブジェクトの形状における正答率

4.7 実験 3 操作感についての主観的な評価

4.7.1 目的

実験 2 の自己が操作するオブジェクトを特定する課題については空間的整合性が崩れることの影響は確認されなかった。しかし実験 2 の正答率には影響がなくても、操作感についての主観的な評価には影響する可能性が考えられる。

そこで本実験では、被験者の入力に対して複数の回転速度係数を適用し同時に呈示する。そこから被験者の主観によって最も想定した通りに動いたオブジェクトを選択させた。空間的整合性が操作感に影響するとすれば、回転速度係数が 1 に近いほど被験者の主観的な評価が高いと考えられる。

4.7.2 呈示される視覚的運動

本実験では自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知において運動量に随伴関係があることが操作感に有効であることを確かめるために、新しく等速回転をするオブジェクトを導入した。このオブジェクトは被験者が入力した運動と方向のみが同じで、運動量に随伴関係がない。

本実験においても実験 2 と同様にドット、矢印、十字形の 3 種類の形状のオブジェクトを用意し、各試行では呈示画面を 6 分割して得られるフレームそれぞれに 1 つずつ回転運動オブジェクトが呈示された。同時に呈示される 6 つのオブジェクトは被験者のクランクハンドルによる入力値にそれぞれの回転速度係数 (1/2, 2/3, 1, 3/2, 2) を掛けたもの計 5 つと、被験者の入力の方向と同じ方向に 60rpm で等速に回転運動するもの 1 つによって構成され、それぞれの呈示位置は試行ごとにランダムに選定された。

4.7.3 手順

実験開始前に被験者には、「被験者によるクランクハンドル操作の開始とともに被験者の操作に対応した運動をする複数の回転運動オブジェクトが 3sec 呈示され、それぞれのオブジェクトの運動はそれぞれ少しずつ違いがあり、呈示終了後にその中で最も自分が想定する通りに動いたオブジェクトが呈示されたフレームの番号を解答する」ように伝えた。それ

以外は実験 2 と同様の手順で実験を行った。1 回の実験で 30 回の試行を行った。

4.7.4 参加者

本実験には 10 名（男性 5 名，女性 5 名）の大学生または大学院生が被験者として参加した。全ての参加者は正常な視力あるいは矯正視力を有し，利き手は右手であった。

4.7.5 結果

全被験者の試行回数計 300 回のうち，60rpm の等速回転運動をするオブジェクトが選択されたのは計 5 回で，全試行の 98% 以上で操作感の主観的評価が高いオブジェクトとして運動量に随伴関係のあるオブジェクトが選択された。またこの 5 回の回答はそれぞれ異なる被験者によって選択され，1 人の被験者が 2 回以上等速回転運動をするオブジェクトを選択することはなかった。したがって，以下は回転速度係数による影響の分析を行うため，その 5 回の試行を除いたデータを用いる。

図 4-13 はオブジェクトの形状ごとに各被験者が最も想定した通りに操作できたと回答した回転速度係数の平均値および標準偏差を表したグラフである。全被験者が選択した回転速度係数の形状ごとの平均値は，ドットでは 1.227 倍，矢印では 1.267 倍，十字型では 1.307 倍で，全体では 1.267 倍でオブジェクトの形状間に有意差は認められなかった ($F(2,18)=0.748$, $p=.48$)。被験者によって操作しやすいと感じた回転速度係数の平均値にはばらつきがあり，3 形状を合わせたデータにおいて最も高い値となった被験者の回転速度係数の平均値は 1.633 倍であり，最も低い値となった被験者の回転速度係数の平均値は 1.123 倍であった。以上より，本研究の実験環境においては，被験者の主観的な評価が高かった回転速度係数は全体としては 1.2 倍～1.3 倍程度に分布していることが確認されたが，その結果には個人差があることが分かった。この結果は，本実験環境下においてはクランクハンドルを操作する被験者の手の運動と視覚的オブジェクトの運動に空間的整合性が認められることが必ずしも主観的な操作感を高める訳ではなかったことを示唆する。

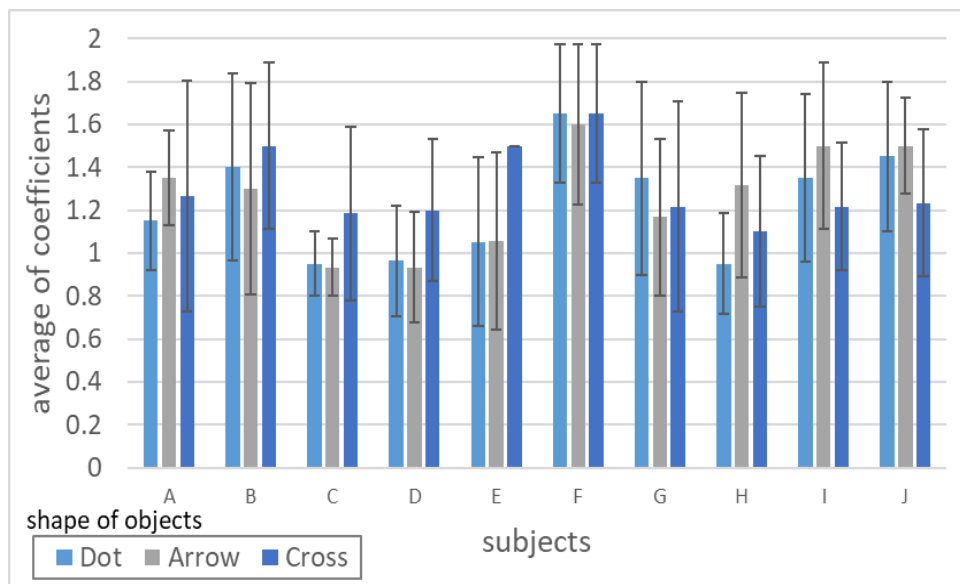


図 4-13 被験者毎の回転速度係数の平均値。エラーバーは標準偏差を表す。

4.8 考察

実験 1 での回転方向が多義的な視覚的運動に対する解釈の変容および、実験 2 での自己が操作する回転オブジェクトの特定においては、クランクハンドルを操作する上肢運動と回転オブジェクトの視覚的運動の空間的整合性を崩しても正答率への大幅な影響は認められなかった。「力覚との一致性」は空間的整合性が崩れることで認知しにくくなることから [Ehrsson, 2004][van den Bos, 2002], 「力覚との一致性」が損なわれる状況においても、「予測との一致性」によって自己帰属感の生起が補われている可能性が示された。

実験 3 の自己操作オブジェクトの操作感についての主観的な評価においては、空間的整合性が保たれたものと崩れたものを同時に提示し、被験者の主観によって最も想定する通りの運動をしたものを選択させた。この実験の結果から、本実験環境においては空間的整合性が認められることが必ずしも主観的な操作感を高める訳ではないことがわかった。

本研究は能動的運動時の自己帰属感の生起過程である自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知として「力覚との一致性」と「予測との一致性」の 2 つに注目して検証を行った。本研究では自己運動と視覚的運動との随伴関係に注目し、抽象的な見た目の視覚的オブジェクトを操作するという限定された環境で実験を行ったが、自己主体感 や身体所有感といった自己帰属感の生起には視覚的対象の見た目などの運動の随伴関係以外にも様々な副次

的情報の影響を受けることが知られている。能動的運動時において自己主体感と身体所有感を同時に扱った Argelaguet らの研究では、VR 空間で提示されるバーチャルハンドの形状について、実身体に近い方が身体所有感を強く感じ、球体など記号的な表現に近いほど操作が上手に行えることが示されている[Argelaguet, 2016]。この研究は「力覚との一致性」と「予測との一致性」の 2 つの基盤に注目して行われた研究ではないが、「力覚との一致性」や「予測との一致性」にも視覚対象の見た目が影響する可能性がある。

本研究のすべての実験では入力装置としてクランクハンドルを用いた。こうした装置を用いたことが実験結果に影響した可能性がある。例えば、実験 3 において主観的な評価が高かった回転速度は入力 of 1.2~1.3 倍程度であったが、装置の大きさにより上肢の実運動と回転量の対応関係が変わることや、装置から受ける力覚が操作感に影響すると考えられる。また、本研究では空間的不一致によるタスクの有意差が出なかったことから運動予測の有効性を考察したが、より信頼性の高い知見を得るには同一の実験環境下で予測が働きにくい条件では空間的不一致による影響が出ることを確認する必要がある。

4.9 本章のまとめ

本章では、円運動を利用することによって、実身体の運動と視覚的運動に空間的不一致が生じても視覚的な運動結果を予測しやすくなった条件下で、身体運動と映像として提示される視覚的運動との随伴関係の認知に対する視覚情報と力覚情報の空間的不一致による影響を調査した。

自己帰属感が生起する上では、身体運動と視覚的運動とが随伴関係にあると認知できることが重要な要因となっており、一般的には、身体運動と視覚的運動との間に空間的不一致が生じるとこの認知が難しくなることが知られている。この認知が難しくなる主な要因としては、視覚と力覚間で感覚情報に不一致が生じることと視覚的な運動結果を自身が行った運動から予測しにくくなることの 2 つが考えられる。しかし、これらの 2 つの要因のどちらがどの程度影響しているのかは明らかになっていなかった。

そこで本章での 3 種類の実験では、クランクハンドルによる回転操作を用いた課題を行うことによって被験者の運動を円運動に限定した。これによって視覚的対象が実身体に対して回転した位置に呈示された場合においても視覚的運動結果を自身の運動から予測しやすい状況を作り出した。この状況で視覚情報と力覚情報との空間的不一致による身体運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する影響を調査した。

その結果、本研究の実験環境では視覚情報と力覚情報とに空間的不一致が生じることに

よる運動の随伴関係の認知への影響は確認されなかった。また、操作する視覚的オブジェクトに対して高い操作感を感じる上で、身体運動と視覚的運動との空間的整合性が保たれることが必須条件ではないことが示唆された。これらの結果から運動結果を予測しやすければ、身体運動と視覚的運動とが随伴関係にあると認知できるようになる過程において、視覚情報と力覚情報とが空間的に整合することは必須条件ではないことが示唆された。

ただしクランクハンドルというデバイスを介したことや、回転速度による空間的不一致は一定ではなく運動量に依存することなどが結果に影響した可能性や、より実身体に近い視覚的対象を操作する場合は結果が異なる可能性があるため、これらを踏まえた詳細な検証を第5章にて行う。

第5章 視覚的運動の予測可能性が自己帰属感の生起過程に及ぼす影響の調査

5.1 はじめに

本章では、映像内の視覚的対象について、実際の手の運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する空間的不一致による影響が、実行する運動パターンの違いや視覚的対象の見え方によってどのように変化するかを検証した。第4章で述べた実験では、視覚的運動結果を予測しやすいクランクハンドルを用いた回転操作であれば、身体運動と視覚的運動との随伴関係にあると認知する上で、視覚情報と力覚情報との空間的に整合することが必須ではないことが示唆された。しかし、クランクハンドルを用いて抽象的な見え方の視覚的対象を回転操作する状況での調査のみに留まっており、空間的不一致がある状況で身体運動と視覚的運動との随伴関係を認知する上で、実行する運動や視覚的対象の見え方の違いによってどのような差が出るかなどの検証は行っていない。そのためどのような条件であれば視覚と力覚間の空間的不一致を許容できるのかについて詳細には明らかになっていなかった。

そこで本章の実験ではこれを明らかにするために、映像内の視覚的対象をペン入力を用いた手の動きで操作する際に、実際の手の運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する運動の空間的不一致による影響が、実行する運動パターンの違いや視覚的対象の見え方によってどのように変化するかを調査した。具体的な方法としては、ディスプレイ上にバーチャルハンドを実際の手に対して回転した位置に呈示した状況で、円運動を含むいくつかの運動パターンで被験者と同期して動く視覚オブジェクトを見つけるタスクの正答率を調査した。これは円運動であれば実身体に対して視覚的なバーチャルハンドが回転した状況においても運動方向が右回りや左回りに限定されて認知できるために「運動予測と視覚的運

動結果の一致性の認知」(以降, 本章ではこれを「予測との一致性」と呼ぶ)が保たれるという4章での結果をもとに設計したものである. また, バーチャルハンドの見た目が自己運動と視覚的運動との関連性の認知に影響する可能性があるため, 抽象的なポインタとフォトリアルな手の映像の2種類の見た目条件を設けた.

実験の結果, 同一の環境下で行ったタスクにおいて空間的不一致の影響を受ける条件と受けない条件の双方が確認された. 抽象的なポインタを円運動で操作する場合などのように実運動とバーチャルハンドの視覚的運動の空間整合性が崩れていても, 視覚的運動結果を予測しやすい条件では空間的整合性が保たれた状況と崩れた状況とでタスクの正答率に有意差が生じなかった. 一方で直線運動を行う場合などのように実運動とバーチャルハンドの視覚的運動の空間的整合性が崩れると運動の予測がしにくくなる条件では空間的整合性が保たれた状況とそうでない状況でタスクの正答率に有意差が生じた. また実身体に近いフォトリアルな見た目のバーチャルハンドが, 実身体とは異なる向きで表示されるか否かにおいても正答率に有意差が生じることが確認された.

この結果から, 4章で述べた研究結果と同様に視覚的運動結果を予測しやすい状況では視覚的運動と実運動との空間的不一致を許容できることが再確認された. それとともに, その運動予測が上手く働くか否かは, 運動のパターンや視覚的な身体の形状など見た目によって変化することが示唆された. これらから導かれる議論として, 自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知過程では「予測との一致性」が重要であり, 運動予測と視覚的運動結果の随伴関係の認知には, モーターコマンドによるフォワードモデルによる予測だけでなく, 運動や身体に対する意識的なイメージが関与すると結論付けた.

5.2 背景

能動的運動時においては, 自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知について「視覚と力覚間の一致性の認知」(以降, 本章ではこれを「力覚との一致性」と呼ぶ)と「予測との一致性」の2つの基盤が影響すると考えられる. 受動的運動時より能動的運動時の方が視覚的に呈示された自己身体の認知を優位に行えることからモーターコマンドがあることによって視覚的運動の結果を予測できることの有効性が知られている[Tsakiris, 2005][Tsakiris, 2007][Koshinbo, 2011]. このことから能動的運動時では「予測との一致性」が自己帰属感の生起の重要な要因であると考えられるが, 自己運動と視覚的運動結果の随伴関係を認知できるようになる上で「力覚との一致性」と「予測との一致性」がどのように関係し, またどちらが優位に働く認知過程かは明らかになっていない. また, これらの認知には運動の随伴

関係があるかだけでなく視覚的身体の見た目などによる影響がある可能性がある

Short と Ward は視覚的身体のバーチャルハンドの動きを予測できることによって空間的不一致や見た目によらず自己帰属感が生じることを示した[Short, 2010].

一方で自己帰属感の生起への視覚的身体と自己身体の空間的整合性の影響を調べた[van den Bos, 2002][Koshinbo, 2011]では、予測が働く能動的運動時であっても空間的整合性の影響を受ける結果が得られている。また[Argelaguet, 2016]では VR 環境での自己帰属感の生起に身体の見目が影響することが示されている。この研究では、バーチャル空間で呈示される操作者の手に同期して動くバーチャルハンドの形状について、見目が実体に近い方が身体所有感を強く感じるものの、球体など記号的な表現に近いほど操作が上手く行え、自己主体感の評価が高いことを示した。

これらの研究結果から運動予測の有無は空間的不一致や見目の不一致がある状況であっても自己帰属感の生起に有効に働くことが示唆される一方で、その予測可能性は空間的整合性や視覚的身体の見た目、長時間の運動学習の有無など様々な要因によって変化すると考えられる。例えば Short と Ward と同じ実験環境であっても、自己帰属感が生起するまでの学習時間やポインティング精度などについては van den Bos らや Argelaguet らの実験のように実身体とバーチャルハンドとの空間的な位置や見目に不一致による影響が出る可能性がある。

また第 4 章での研究では、自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知ができるようになる過程においても「運動予測との一致性」が優位に働くという仮説をたて、運動結果を予測しやすい状況では自己運動と視覚的運動に空間的不一致が生じている状況であっても短時間で自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知が行えることを示した。

これらの知見から、能動的運動時での自己帰属感の生起過程にはモーターコマンドによる予測と視覚的運動の随伴関係を認知できることが重要であると考えられ、実身体と視覚的身体の空間的な位置や見目の違いや運動の性質により変化する運動結果の予測しやすさが自己帰属感の生起にどのような影響を及ぼすかについてより詳細に明らかにしていくことが求められる。

5.3 実験設計

前述した背景を基に本研究では、我々の以前の調査と同様に「予測との一致性」を保ちつつ空間的整合性が崩れた運動をさせる事で「力覚との一致性」が得られにくい状況での検証を目指した。空間的整合性を崩す具体的な方法としては van den Bos らの研究と同様に被

験者の手を回転した映像を呈示する手法を用いた。「予測との一致性」を保つ手段としては、タブレット上でペン入力をする被験者の手の運動を円運動を含むいくつかの運動パターンに限定する手法を用いた。また視覚的な見た目がバーチャルハンドに対する予測に影響する可能性があるため、異なる見た目のバーチャルハンドを用いて比較を行った。自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知ができたかの評価には、複数のバーチャルハンドから自己の運動に同期したものを見つけさせるというタスクを課す実験を実施した。その正答率から実験環境における予測の影響を分析し、能動的運動時における自己帰属感の生起過程について議論した。

5.3.1 装置

本実験では、映像呈示用の液晶ディスプレイ(3M M2256PW)とペンタブレット (wacom Cintiq 22HD)、web カメラ (logicool C910) を組み合わせた入力装置を用いた (図 5-1)。被験者は液晶ディスプレイの正面に置かれた椅子に座り、利き手側に設置された入力装置を操作した。入力装置及び操作する被験者の手は衝立によって被験者の視界から隠されており、被験者は液晶ディスプレイによって呈示される映像のみを見ながら課題を実施する。課題で用いる呈示映像を作成するためにタッチペンでポインティングした位置と操作する被験者の手を上部から撮影した映像を入力情報として記録した (図 5-1A)。被験者からの視認性を考慮して、液晶ディスプレイとペンタブレットはともにテーブル面に対して 15° の傾斜をつけて設置された。

実験中の被験者のペンタブレット上での運動可能領域は厚さ 1.5 mm程の厚紙製のステンシルによって制限され、ステンシルの溝の幅は 5 mmであった。カメラ映像をクロマキー処理するためにステンシルは青色で、溝部分にも同色の映像が投影された。ステンシルの形状や大きさについては後述する。また実験前に全ての被験者はペンの操作方法について十分な説明を受け、操作の際に手首の回転運動を使わずにペンを常に立てた状態で操作するように指示された。これは実験中の被験者の手の運動を統一するためであった。

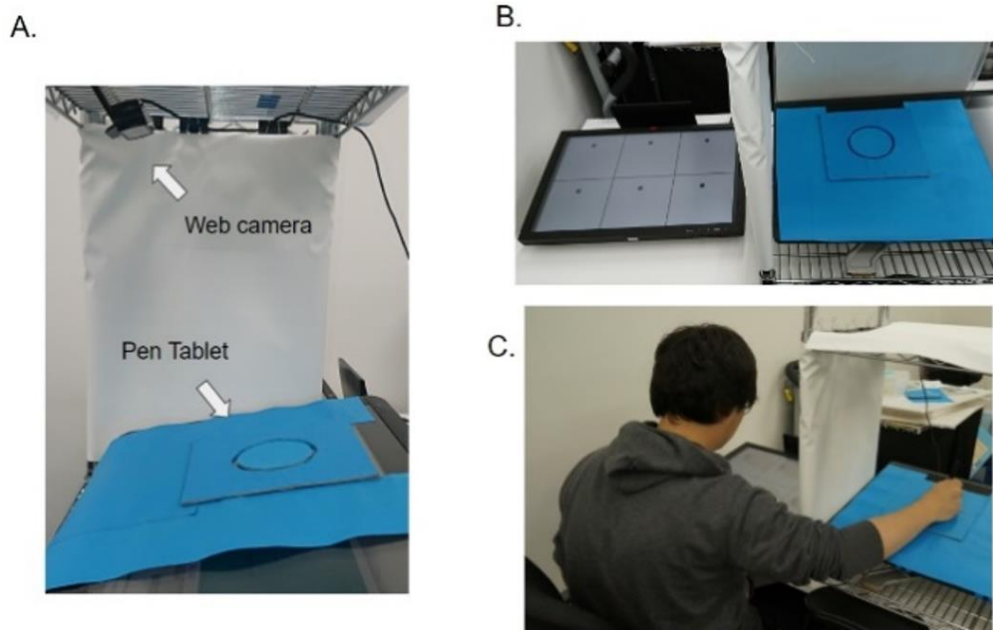


図 5-1 実験装置 (A: 入力装置, B: 入出力装置の配置, C: 実験風景)

5.3.2 タスク

視覚的なバーチャルハンドを自己の身体として帰属させるには、視覚的運動と自己の運動の随伴関係を認知することは重要な過程である。これを検証するには先行研究[Watanabe, K., 2013A]や第4章での実験2のように視覚的運動と自己の運動の随伴関係を認知できるかの評価には複数の運動するオブジェクトから自己の運動と同期するものを見つけるタスクが有効であると考えられる。このようなタスクでは、運動したか否かだけでなく運動のイメージ(速さや方向)が一致しているかについての認知能力を検証することができ、単一のバーチャルハンドが同期か非同期かを2択で回答するタスクに比べチャンスレベルを下げるため結果を評価しやすい。そこで画面上に登場する複数のバーチャルハンドから自己の右手の動きが投影されたものを見つけるタスクを設計し、その正答率を比較した。

呈示する映像としてディスプレイを分割し、各フレームに1つずつ運動するバーチャルハンドを表示した(図5-2)。そのうちランダムに選ばれた1フレームに被験者のペン操作の動きと同じ動きをするバーチャルハンドが呈示され、その他のフレームには被験者の動

きに無関係な運動（ダミー運動）をするバーチャルハンドが呈示された。様々な運動を再現するために、ダミー運動には過去の被験者および現在の被験者の過去の試行での入力値のログデータを記録し用いた。

このタスクでは被験者はステンシルで制限された運動領域内でタッチペンを動かし自己運動に同期して動くバーチャルハンドが呈示されているフレームを探した。実験中、被験者の運動は手首の運動とタッチペンの運動可能領域のみが制限され、スピードや方向は被験者の意志で自由に変更できた。

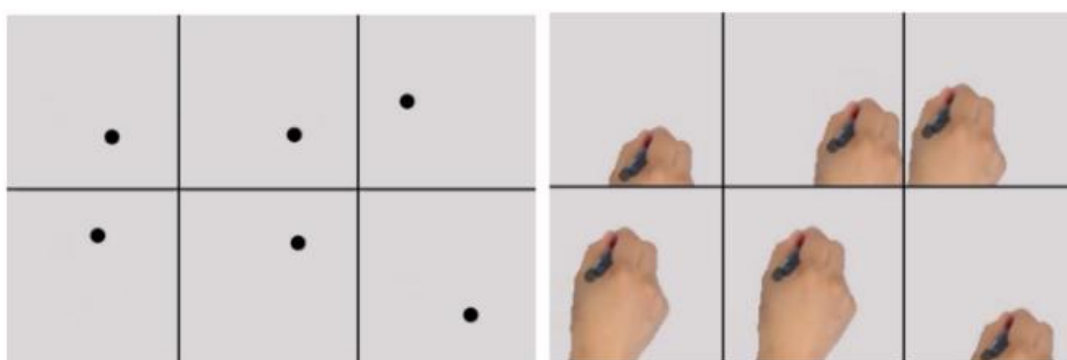


図 5-2 タスクでの呈示映像（左：Abstract, 右：Realistic）

5.4 実験 1

実験 1 では回転角度 4 条件 (0° , 90° , 180° , 270°), 運動パターン 4 条件 (Circle, Square, Semicircle, Line), バーチャルハンドの見た目 2 条件 (Abstract, Realistic) を組み合わせた計 32 条件でタスクの正答率を比較した。

5.4.1 視覚フィードバック

本実験では、被験者の正面に設置されたディスプレイを 6 つのフレームに分割し（横 3 × 縦 2）、各フレームに 1 つずつバーチャルハンドを呈示した（図 5-2）。そのうちの 1 つのバーチャルハンドは被験者のペン入力による運動に同期して運動し、その他の 5 つのバーチャルハンドはダミー運動をする。1 フレームにはペンタブ上での 20cm × 20cm の正方形領域での運動を可視化し、ディスプレイに呈示されたフレームの実寸は 15cm × 15cm だった。

5.4.1.1 バーチャルハンドの見た目

バーチャルハンドの見た目として、Abstract と Realistic の 2 条件を用意した。Abstract は視覚的な身体として抽象的なバーチャルハンドを呈示する条件である（図 5-2 左）。

Abstract では被験者の動きに同期するバーチャルハンドとして灰色の背景にタッチペンでポイントした位置に黒色の円形のポインタを表示した。ポインタの直径は 25 mmであった。ダミー運動は、ログデータを元に呈示位置を決定し、同一のポインタを呈示した。

Realistic は視覚的な身体として被験者の実身体に近いフォトリアルなバーチャルハンドを呈示する条件である（図 5-2 右）。Realistic では被験者の動きに同期するバーチャルハンドとしてカメラでリアルタイムに撮影した被験者の手のカラー映像に画像処理を加えて表示した。クロマキー処理により被験者の手とタッチペンのみを抽出し、背景は Abstract と同じ灰色とした。ダミー運動は、被験者がポインティングした位置座標とログデータの位置座標の差分を元に、リアルタイムの手の映像を平行移動することで表現した。

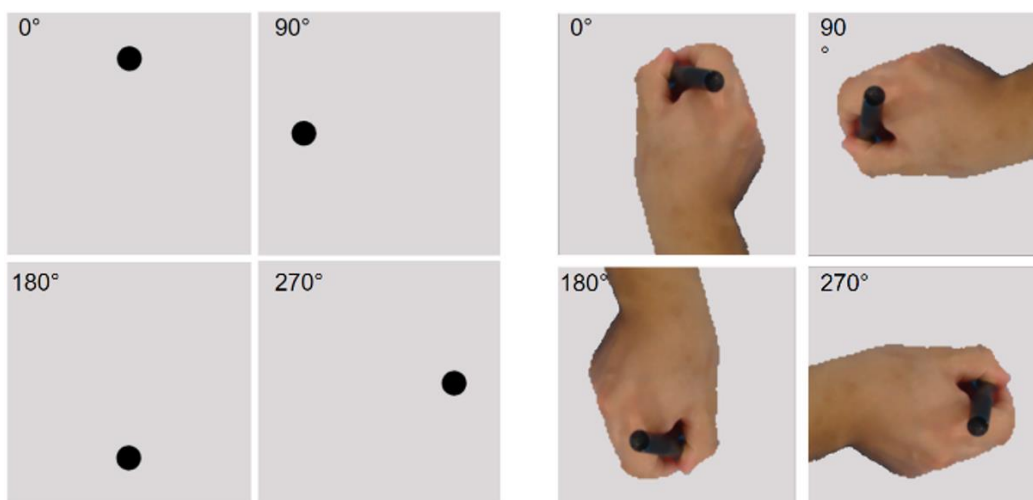


図 5-3 実験 1 でのバーチャルハンドの回転条件（左：Abstract, 右：Realistic. 被験者が初期位置をタッチする時の各回転条件で呈示されるフレームの例）

5.4.1.2 バーチャルハンドの回転

バーチャルハンドの回転条件として 0° , 90° , 180° , 270° の 4 条件を用意した (図 5-3). 各条件は呈示するバーチャルハンドをフレームの中心を軸に反時計回りにその条件の角度だけ回転して呈示するものである. したがって **Realistic** のバーチャルハンドはペンでタッチしている位置も身体イメージも回転する (図 5-3 右). 各試行では, 被験者は何度回転したバーチャルハンドが呈示されるかを事前に伝えられ, ダミー運動のバーチャルハンドも全て同じ角度だけ回転されて呈示された.

5.4.2 運動パターン

第 4 章で示した研究の結果から, 本実験において円運動であればバーチャルハンドが回転して呈示されても予測が保たれるのではないかという仮説を立てた.

そこで予測が変わりうる運動の特徴として運動が「直線運動か円運動か」と「循環運動か非循環運動か」の 2 つに注目し, **Circle**, **Square**, **Semicircle**, **Line** の 4 条件の運動パターンを用意した (表 5-1, 図 5-4). **Circle** では半径 5cm の円の外周を運動することができる. **Square** は 1 辺が 10cm の正方形の外周を運動することができる. **Semicircle** は半径 5cm の半円の弧を運動することができ, その領域は **Circle** の上半分と同じである. **Line** は 10cm の直線上を運動でき, その領域は **Square** の上辺と同じである.

タスク開始時のペンの初期位置は全ての条件で同じであり, 垂直方向は運動可能領域の最上部, 水平方向は中心部であった. ダミー運動には同じ運動パターンのログデータを用いおり, 各回転角度条件における課題開始時の 6 つのバーチャルハンドの位置は図 5-3 の位置であった.

表 5-1 運動パターンの特徴

	円運動	直線運動
循環運動	Circle	Square
非循環運動	Semicircle	Line

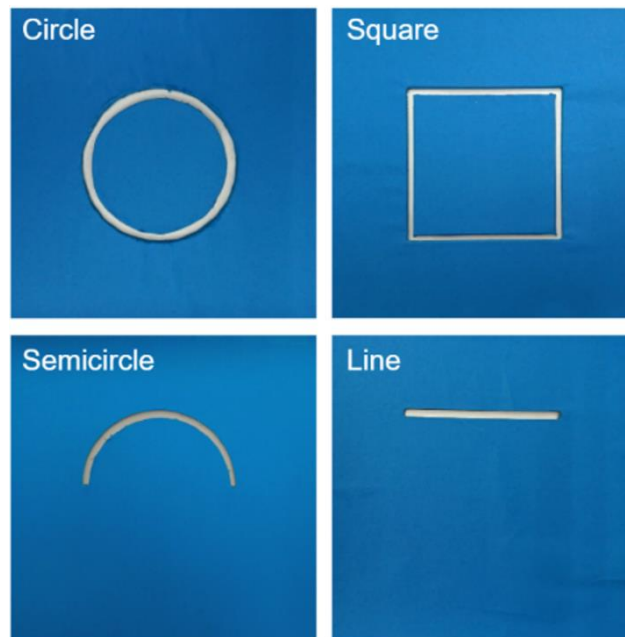


図 5-4 運動パターン（ステンシルの形状）

5.4.3 手続き

被験者 1 人に対するタスクは運動パターン 4 条件 × 見た目 2 条件の 8 セッションからなり、被験者毎にランダムな順番で行った。各セッションは回転角度 4 条件の 4 ブロックからなりセッション毎にランダムな順番で行った。各ブロックはそれぞれ 10 回の試行からなる。各ブロックの最初の試行の前にそのブロックでのバーチャルハンドの回転角度が被験者に伝えられた。実験全体を通して 3200 試行（10 人×8 セッション×4 ブロック×10 試行）を行った。

実験開始前に被験者は実験内容について十分な説明を受けたのちにトレーニングセッションに参加した。トレーニングセッションでは、6 つのバーチャルハンド全てが被験者の手に同期して動き、全ての回転角度条件でのバーチャルハンドの動きを時間無制限で体験できた。

各試行は以下のような手順で行われた。各試行の開始前に被験者はタッチペンを初期位置に置くように指示された。タッチペンが初期位置にあることを実験者が確認した後、実験者の音声による開始合図とともに画面の 6 つのフレームに 1 つずつバーチャルハンドが呈示された。この時 6 つのバーチャルハンドは全て同じ位置に静止した状態で呈示される。被験者がタッチペンを動かし始めると同時に全てのバーチャルハンドが動き出し、2 秒間の視

覚的運動刺激が呈示された。その後解答画面に切り替わり、バーチャルハンドは呈示されなくなり代わりに各フレームに1-6の番号が表示され、被験者は自己の動きと同期したバーチャルハンドが呈示されたフレームの番号を口頭で解答した。解答は必答とし、解らなかつた場合においても必ず1つの番号を解答させた。

5.4.4 参加者

実験には20歳から23歳の健康な大学生10名（男性7名、女性3名）が参加した。全ての被験者は正常な視力（または矯正視力）を有し、右利きだった。

5.4.5 結果

全体の正答率の平均は約68%であった。回転角度毎の正答率の平均は0°では78%、90°では69%、180°では62%、270°では64%であった。運動パターン毎の正答率の平均はCircleでは68%、Squareでは64%、Semicircleでは71%、Lineでは70%であった。バーチャルハンドの見た目毎の正答率の平均はAbstractでは72%、Realisticでは64%であった。

正答率について回転角度（4水準）と運動パターン（4水準）とバーチャルハンドの見た目（2水準）で三要因分散分析（Three-Way repeated measures ANOVA）を行った結果、回転角度の主効果 [$F(1, 9) = 19.456, p < 0.001$] と見た目の主効果 [$F(1, 9) = 19.456, p = 0.002$] のみが確認され、運動パターンの主効果は確認されなかつた [$F(3, 27) = 1.552, p = 0.231$]。Ryan's methodによる回転角度の主効果における多重比較では、180° - 270°間以外の全ての組み合わせにおいて有意差が確認された ($p < 0.001$)。図5-5に各条件での正答率を示す。またどの要因間においても交互作用は確認されなかつたが、運動パターンと見た目による影響について分析するために運動パターン4条件 × 見た目2条件の8条件それぞれでの回転角度の主効果を調べた（One-Way repeated measures ANOVA）。その結果、ほとんどの条件では主効果が確認されたが、「Circle-Abstract」と「Semicircle-Abstract」の2条件では回転角度による主効果が確認されなかつた。

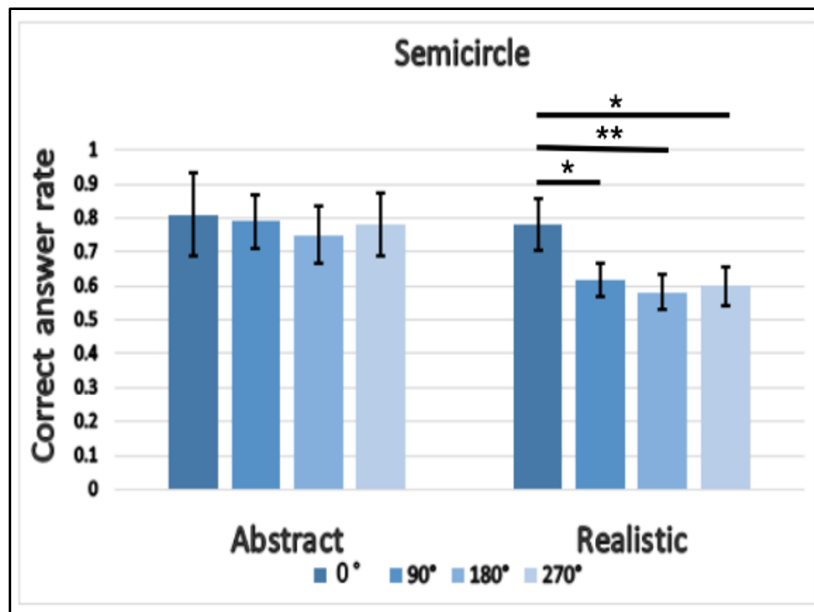
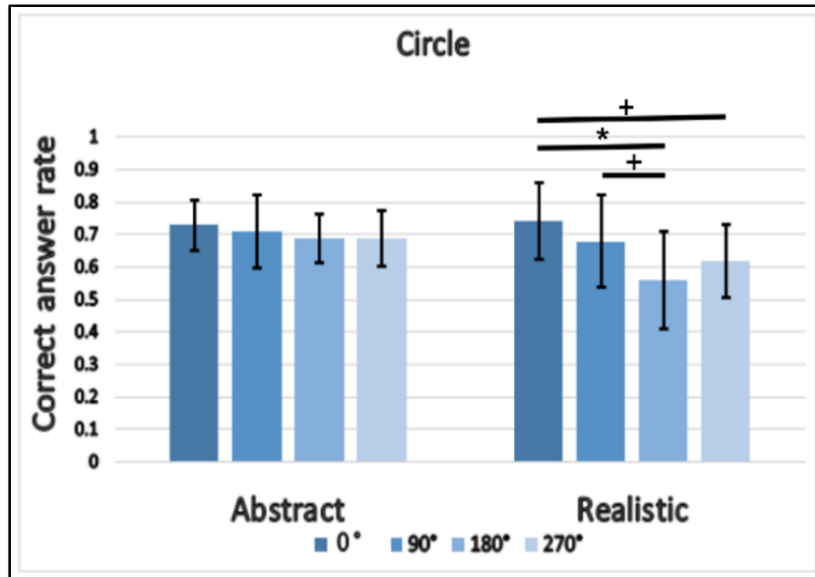


図 5-5 実験 1 で円運動を行った条件の正答率. Realistic では有意差が確認されたが, Abstract では有意差が確認されなかった.

(error bar : 95%の信頼区間, +: $p < .10$, *: $p < .05$, **: $p < .01$)

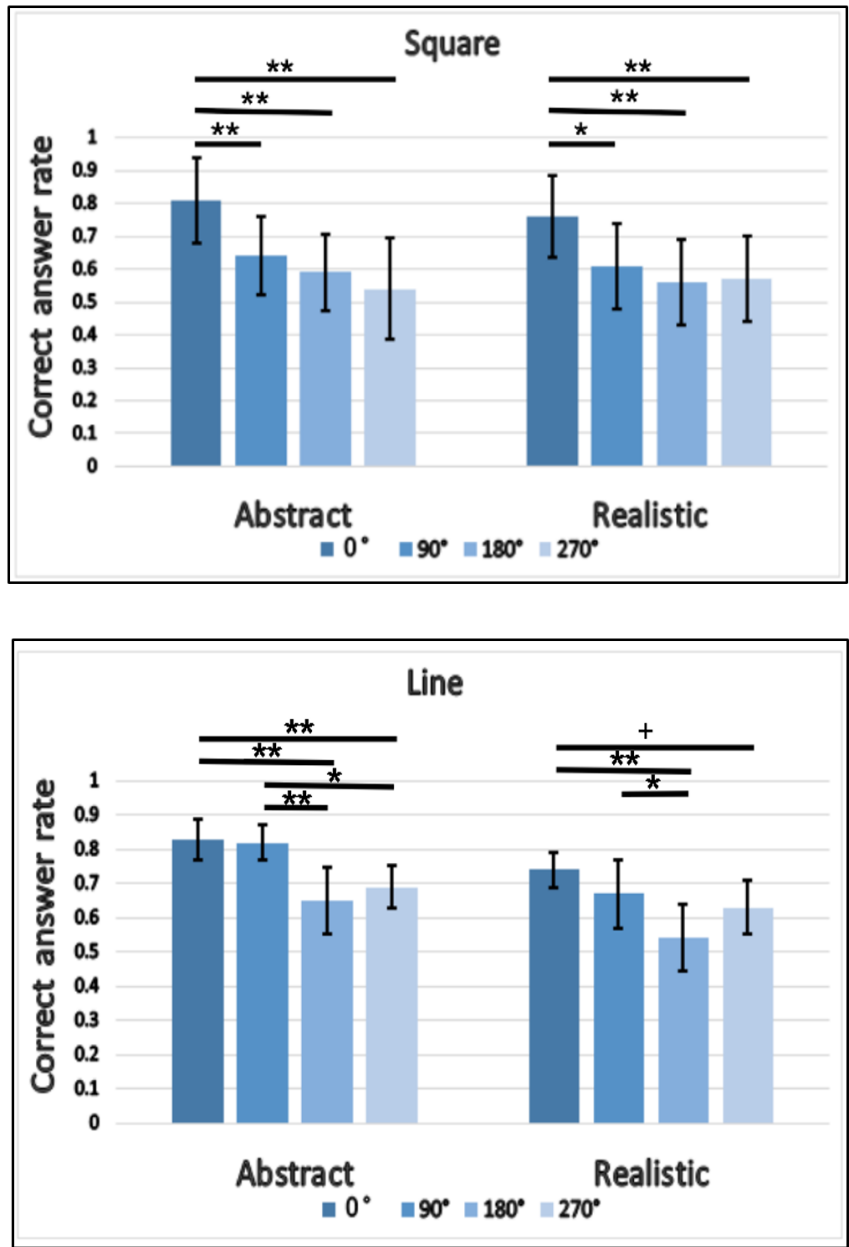


図 5-6 実験 1 で円運動を行った条件の正答率. Abstract と Realistic の双方で有意差が確認された.

(error bar : 95%の信頼区間, +: $p < .10$, *: $p < .05$, **: $p < .01$)

5.4.6 考察

実験 1 全体での正答率は約 68%で、本実験でのタスクのチャンスレベルは 1/6 であるので実験全体での正答率は高く被験者は実運動とバーチャルハンドの視覚的運動との随伴関係を認知できていたと言える。

回転角度の条件で比較すると有意差が認められ、 0° 条件で一番正答率が高くなり、 180° や 270° では低くなった。この結果は触覚刺激や運動感覚と視覚刺激の随伴関係認知において実身体と視覚的身体の空間的不一致に大きさや解剖学的に不可能な姿勢であることが負の効果を生むという過去の研究の結果を支持する[Sekiyama, 2006][Ide, 2002][Koshinbo, 2011]。空間的不一致の大きさが影響を与える要因としては身体の心的回転（メンタルローテーション）にかかる時間が空間的不一致に比例して大きくなることが挙げられる[Shepard, 1978]。また 90° と 270° では実身体と視覚的身体の空間的不一致の大きさは同じだが、本実験では被験者の右手を利用したため解剖学的に不可能な姿勢である 270° 回転した身体は負の効果が大きかったと考えられる。本研究では 180° と 270° の結果に有意差は見られなかったが、過去の研究では 270° の姿勢の方が 180° の姿勢よりも解剖学的に不可能な姿勢であるため負の効果が大きいという結果を報告しているものもあり[Ide, 2002]、空間的不一致の大きさと解剖学的な不可能性の大きさのどちらの影響が強く現れるかは実験条件によって異なると考えられる。

見た目の条件で比較すると、Abstractの方が正答率が高かった。この結果は、Argelaguetらの実験結果を支持している[Argelaguet, 2016]。この要因として、シンプルな Abstract のバーチャルハンドの方が視覚的運動を認知しやすかったことや Realistic の方が回転による負の影響が強かったことなどが考えられる。Argelaguetらはリアルな見た目の方が自己主体感の評価が下がる理由として、見た目が実身体に近くなることでそのバーチャルハンドに期待する動きが変わることの影響の可能性を示唆している。我々の実験においても同じような可能性が考えられ、バーチャルハンドの見た目の違いがそのバーチャルハンドの運動に対して異なる期待や予測を与え、全体の正答率や回転による正答率の変化に結果として現れた可能性がある。

5.4.7 運動パターンとバーチャルハンドの組み合わせによる影響

運動パターンと見た目を組み合わせた 8 条件で回転による影響を調査したところ、空間的整合性の影響を受ける条件と受けない条件の双方が確認された。ほとんどの条件では回

転による正答率への負の影響が確認され、 0° で正答率が高く 180° や 270° で低くなるという結果が得られたが、円運動かつ抽象的な見た目の「Circle-Abstract」と「Semicircle-Abstract」の2条件では有意差が確認されなかった。直線運動の Square や Line の運動パターンでは見た目によらず回転の影響を受けた。また循環運動かどうかでは結果の差が見られなかった。この結果は第4章で述べたクランクハンドルを用いた実験の結果を支持しており、他の過去の研究[van den Bos, 2002][Koshinbo, 2011]では予測が働く能動的運動時も空間的不一致の影響を受けることが示唆されているため、我々は運動が円運動であるこの2条件ではバーチャルハンドが回転して呈示された状況においても「予測との一致性」が容易であったことが要因であると考え。それと同時に予測しやすい状況であれば空間的不一致があっても正答率に影響がないという結果は「予測との一致性」が自己運動と視覚的運動との関連性の認知において優位な過程である可能性を示唆する。

円運動であっても Realistic の見た目条件では回転による影響が認められた。この要因について我々は前述したようにバーチャルハンドの見た目の違いがそのバーチャルハンドの運動に対して異なる期待や予測を与えたのではないかと考える。特に本実験環境において、Abstract のバーチャルハンドは運動位置が回転した分だけずれたと解釈できるが、Realistic のバーチャルハンドでは運動位置がずれただけでなく身体イメージが回転したという解釈が生じることになり予測のしやすさに影響を与えたのではないかと推察する。実験2ではこのことについて Realistic の見た目条件において「身体イメージの回転」と「運動位置の回転」の一方のみを与える回転条件を設計し追加検証を試みる。

5.5 実験2

実験1において円運動を行う条件（Circle, Semicircle）では Realistic な見た目でのみバーチャルハンドが回転して呈示されることによる有意差が確認され、Abstract では確認されなかった。そこで実験2では、Realistic な見た目において追加実験を行うことでその要因の検証を試みた。

実験2では実験1での「運動パターン：Circle-見た目：Realistic」のセッションに対して新たに実験1とは異なる2つの回転方法を設定し、追加検証した。その他の実験設計は全て実験1と同じである。

5.5.1 視覚フィードバック

2つの条件でのバーチャルハンドは、被験者がポインティングした位置座標と回転を加えた後の位置座標の差分を基に、リアルタイムの手の映像に画像処理を加えることで表現した。「身体イメージの回転」の条件では、バーチャルハンドがタッチペンでポイントする位置は被験者がポイントする位置と同じであるが、手の向きが回転する。例えば図 5-6A に示すようにポイントされた場合、90° 回転するブロックでは図 5-6C のようにポイント位置は変わらずに手の向きのみ回転する。「運動位置の回転」の条件では、バーチャルハンドの向きは常に同じであるが、バーチャルハンドがタッチペンでポイントする位置のみが回転する。例えば図 5-6A に示すようにポイントされた場合、90° 回転するブロックでは図 5-6D のように手の向きは変わらずにポイント位置のみ回転する。

したがって実験 2 ではどちらの回転方法においても、0° 以外の回転条件では被験者がリアルタイムに経験する手の動きとは異なる手の動きをするバーチャルハンドが呈示されることとなる。例えば 90° の回転が付加された状態で被験者の手が「奥側から右側」に運動したときに、「身体イメージの回転」では右側からのびたバーチャルハンドの手が「右側 -

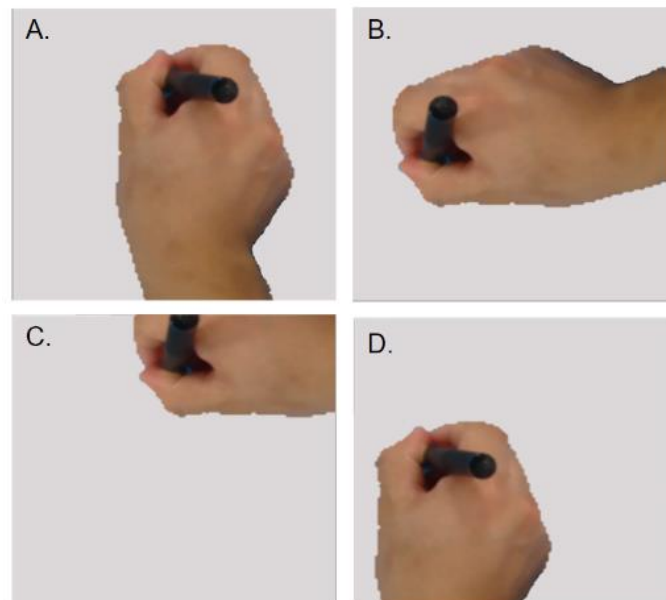


図 5-7 回転方法による見え方の違い。A は回転を付与していない 0° 条件のバーチャルハンドであり、B は実験 1 での回転方法で 90° 回転したもの、C は「身体イメージの回転」で 90° 回転したもの、D は「運動位置の回転」で 90° 回転したものである

手前側」に運動し、「運動位置の回転」では下側からのびたバーチャルハンドの手が「左側 - 奥側」に運動する.

5.5.2 参加者

実験 1 とは異なる 20 歳から 22 歳の健康な大学生 12 名（男性 9 名，女性 3 名）が参加した. 全ての被験者は正常な視力（または矯正視力）を有し，右利きだった.

5.5.3 結果

図 5-7 に各条件での正答率を示す. 「身体イメージの回転」における全体の正答率の平均は約 48%であった. 回転角度ごとの正答率の平均は 0° では 62%, 90° では 47%, 180° では 42%, 270° では 42%であった. 5%有意水準で分散分析を行った結果, 回転角度の主効果 [F(3, 33) = 8.723, $p < 0.001$] が確認され, Ryan's method による回転角度の主効果における多重比較では 0° と他の 3 条件間で有意差が確認された ($p < 0.001$). 「運動位置の回転」における全体の正答率の平均は約 52%であった. 回転角度ごとの正答率の平均は 0° では 59%, 90° では 49%, 180° では 50%, 270° では 52%であった. 5%有意水準で分散分析を行った結果, 有意差は出ず回転角度の主効果は確認されなかった [F(3, 33) = 2.094, $p = 0.120$].

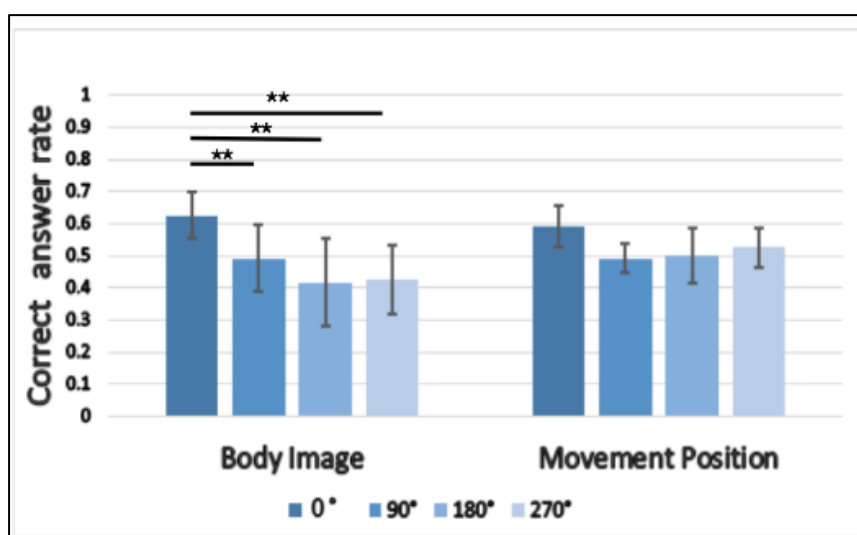


図 5-8 実験 2 の正答率. 「身体イメージの回転」(左) では回転角度毎の有意差が確認されたが, 「運動位置の回転」(右) では有意差が確認されなかった.

(error bar : 95%の信頼区間, +: $p < .10$, *: $p < .05$, **: $p < .01$)

5.5.4 考察

「身体イメージの回転」では被験者のポイント位置とバーチャルハンドのポイント位置は常に同じだったにもかかわらず 0° と他の 3 条件の間に有意差が確認された。これは運動位置の一致性にかかわらず **Realistic** 条件のバーチャルハンドと実身体の身体イメージに不一致が生じることが自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知において負の影響を与えたことを示唆する。また有意な差ではなかったが、 90° の条件に比べて 180° や 270° での正答率が低く、この結果は過去の研究の結果[Sekiyama, 2006][Ide, 2002][Koshinbo, 2011]や実験 1 での結果と一致し、空間的不一致の大きさと解剖学的な不可能性の大きさが関係すると考えられる。

「運動位置の回転」の条件では、 0° に比べると他の 3 条件の正答率が低かったが、回転角度による有意差は確認されなかった。また「身体イメージの回転」とは異なり、 0° 以外の 3 条件の正答率は横ばいであり、空間的不一致の大きさの違いによる差は確認されなかった。 0° 以外の 3 条件で正答率が下がった 1 つの要因としては 5.1 で述べたように 0° 以外の条件ではバーチャルハンドの運動が実身体の手運動と経験的に異なることが影響した可能性がある。また本実験においては被験者の手首の運動に制限を加えてはいたが、リアルタイムの映像に対してポインティング位置を元に画像処理を加えたため、ポインティング位置の移動に影響しない手の細かな動きと画像処理後の運動の間に不一致が生じ、不自然な動きに見えた可能性もある。以上の結果から「運動位置の回転」では実験 1 の **Abstract** の見た目のバーチャルハンドが円運動をする条件と同様にモーターコマンドからの予測のしやすさが、空間的不一致の大きくても自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知に有効に働いた可能性が考えられる。

また実験 2 全体での正答率の平均は約 50%で、実験 1 と比較すると全体的に正答率が低かった。その要因として、新たに設定した回転方法では 0° 以外の条件でのバーチャルハンドの運動が実身体の手運動と経験的に異なることが難しさにつながった可能性が考えられる。一方で、実験 1 と同じ条件である 0° においても正答率が低かったことから、個人差や実験 1 に比べて総実験数が少なかったことによる学習効果の小ささも影響した可能性がある。ただし、各実験内では条件の順番をランダムに決定し、それぞれの実験で被験者内比較を行っているため、角度条件間の差についての分析結果に対しては、個人差や学習効果の影響はないと判断した。

5.6 議論

本実験では、複数の対象から自己の動きに同期するものを見つけるタスクを用いることで、運動したか否かだけでなく運動の種類がもたらす結果の違いを確認することができた。その結果から「予測との一致性」が、自己帰属感の生起過程である自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知において重要であることが示唆された。また視覚的な運動に対する予測はその見た目によっても影響を受ける可能性があり、本実験では実身体に近い見た目のバーチャルハンドは実身体の身体イメージと空間的不一致が生じる場合に運動の随伴関係の認知に負の影響を与えることが確認された。

本研究では、被験者がバーチャルハンドと自分の手の動きの随伴関係を認知できるかどうかを評価の対象としており、実験では自己帰属感についての内観的評価は行っていない。しかし、自己帰属感が生起するには動きの随伴関係の認知が重要な要因となり、本研究の知見が自己帰属感の生起について議論する上で役立つと考える。

本節では既存の VR 研究等を参照した上で、自己主体感や身体所有感の生起について本研究の知見がどのように展開できる可能性があるかを議論する。VR 環境においては、操作者の実世界における身体やその運動を拡張、変容して表現することがよく行われる。そうした表現は通常では味わえない体験をユーザに与えることができる。その一方で、操作者とアバターとの間で、身体や運動イメージの不一致が生じ、アバターに対する自己帰属感を生起させにくくなっている可能性がある。この問題を解決する上で、本実験が示した「予測との一致性」が保たれることが空間的不一致を許容する要因になり得るという知見が役立つのではないかと考える。例えば、小川らは実際の手とは異なる形状でありながら運動が同期しているバーチャルハンドを用いて体験者に実世界では体験できないような奇妙な感覚を生起させるインタフェース「Metamorphosis Hand (えくす手)」を提案している [Ogawa, 2016A][Ogawa, 2016B]。このインタフェースに登場するバーチャルハンドの1つ1つの指の形状や水平方向の位置は実身体と不一致が生じているが、垂直方向の運動が主体のピアノ演奏に対しては自己主体感を感じられることから自分の手の変形したような奇妙な情動が得られると考えられる。この事例について本研究の結果から考察するに実運動から視覚的運動結果を予測しやすいことが空間的不一致がある状況下での自己主体感の獲得に有効に働いていると考える。また、本研究の実験2での「運動位置の回転」においても身体イメージが回転しなかったことにより運動位置にずれが生じても予測しやすかったと考えられる。このように VR インタフェースのデザインでは、空間的不一致が生じながらも視覚的身体の

運動結果をユーザが予測できることが重要なファクターとなると考える。

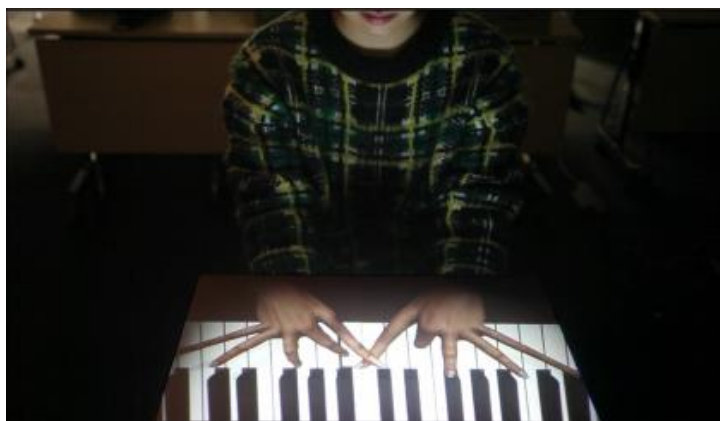


図 5-9 小川らの「Metamorphosis Hand (えくす手)」
(図は[Ogawa, 2016A]より引用)

また、本研究では抽象的な見た目の方が自己運動と視覚的運動との随伴関係をより認知しやすかったという結果が得られたが、視覚的な身体の見た目は身体所有感を感じる上で重要なファクターであるため、抽象化された身体表現が VR インタフェースにおいて必ずしも有効である訳ではない。例えば、視覚的な身体が手の形状をしていることが身体所有感を高めることなどが報告されている[Argelaguet, 2016]。さらに身体所有感を感じることは視覚の優位性 (visual capture) の獲得に関与しており、身体所有感を強く感じているときは視覚の運動を信じやすくなるという報告[Salomon, 2016]や、VR 空間のアバターの見た目により操作者の振る舞いに影響を与えるという報告[Kilteni, 2013]がある。このように、実身体に近い視覚的身体の見た目は特に身体所有感を利用した錯覚を与えるコンテンツで有効に働くと考えられる。しかし、テレイグジスタンスロボットや VR 上のアバターの運動を利用して何らかのタスクを行う場合など操作に精度が求められる状況では、実身体に近い見目がマイナスに働く場合があると考えられる。例えば、操作する視覚的対象がユーザの身体運動を拡張した動きをしたり、ユーザの身体運動を完全に再現できていない状況が起きた場合、実身体に近い見目の対象に対しては自己主体感が低下し、操作の精度の低下が起り得る[Argelaguet, 2016]。このような状況では身体イメージの不一致による影響を受けやすい実身体に近いリアルな見た目を利用するよりも、骨格情報などを持たない抽象的な見た目を利用したり、空間的不一致を補完するようなメタファーを追加するなど身体イメージの不一致を許容しやすくするデザインが必要となると考える。

5.7 制約と課題

ダミー運動を含む複数の選択肢の中から正解を探すタスクが先行研究とは異なる結果を生む要因となった可能性がある。被験者のダミー運動の存在がどのような効果をもたらしたかは定かではない。またその効果は見た目、運動パターン、角度の条件によって異なる可能性がある。

各実験は被験者内要因で調査しているが、実験 1 と実験 2 の被験者は異なったため各実験間の詳細な比較分析は行えなかった。また、見た目の影響については Abstract と Realistic の 2 条件のみしか検証していないため詳細には明らかになっていない。先行研究[Argelaguet, 2016]ではこの 2 条件に加え、骨格情報はわかるがリアルな肌質でないバーチャルハンドを用いた 3 条件での比較を行っており、本研究の実験環境のように空間的不一致を許容する上で「リアルな肌質か」、「骨格情報がわかるか」、「形状から回転角度がわかるか」などの見た目の違いがどのように影響するかは興味深い。今後は実験 1 と実験 2 の条件の比較を可能にし、見た目の条件を増やすことでこれらについてより詳細に検証する予定である。

今回は手のひら部分のみを可視化した。腕までなどもっと大きな身体部位までを可視化した場合にどうなるかというのも興味深いところである。

5.8 本章のまとめ

本章では、視覚情報と力覚情報とが空間的に整合しない状況で、身体運動と視覚的運動との随伴関係をどの程度認知できるかを、運動結果を予測しやすい状況とそうでない状況とで比較を行った。

第 4 章で述べた実験では、視覚的運動結果を予測しやすい円運動であれば、身体運動と視覚的運動とが随伴関係にあると認知する上で、視覚情報と力覚情報とが空間的に整合することが必須ではないことが示唆された。しかし、クランクハンドルを用いて抽象的な見た目の視覚的対象を回転操作する状況での調査のみに留まっており、空間的不一致がある状況で身体運動と視覚的運動との随伴関係を認知する上で、実行する運動や視覚的対象の見た目の違いによってどのような差が出るかは詳細には明らかになっていなかった。

そこで本章の実験ではこれを明らかにするために、映像内の視覚的対象を手の動きで操作する際の、実際の手の運動と視覚的対象の運動との随伴関係の認知に対する運動の空間的不一致による影響が、実行する運動パターンの違いや視覚的対象の見た目によってどのように変化するかを調査した。その結果、円運動のように視覚的運動結果を予測しやすい条

件では、第 4 章の研究と同様に空間的不一致が生じることによる身体運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する影響は確認されなかった。しかし、直線運動のように空間的不一致が生じることで運動結果を予測しにくくなる条件では運動の随伴関係の認知に差が生じた。また、視覚的対象の見た目が実身体と近い条件では、運動結果の空間的整合性だけでなく、視覚的対象そのものが回転することによっても運動結果の予測のしやすさが左右されることが確認された。この結果から、能動的な身体運動と視覚的運動の随伴関係の認知では視覚的運動結果を予測できることが重要であり、その予測のしやすさは実行する運動や見た目など様々な要因に影響されることが示唆された。

第6章 運動伝染が生み出す運動予測 の変調を利用した Pseudo-haptics の生起条件の調査

6.1 はじめに

本章では疑似的な外力知覚として知られる Pseudo-haptics の生起要因について運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知に基づいた視点から検証する。

Pseudo-haptics の生起要因は、視覚と力覚を通じて得られた対象の運動や位置・姿勢についての情報が一致しない場合に、視覚が力覚よりも優位に働き、力覚情報が変容されるためであると一般には説明される。以降、本章ではこの視覚と力覚との不一致を視-力覚間衝突 (visuo-haptic conflicts) と呼ぶ。また、ほとんどの場合この錯覚は外部からの触力覚 (外力) として解釈されることが知られている。この錯覚を利用すれば、力覚提示デバイスを用いなくてもユーザに疑似的な外力を提示可能であるため、Pseudo-haptics を応用した力覚提示手法が多く提案されている。

しかし近年では視-力覚間衝突の結果が外力と錯覚されるのではなく被験者自身の随意運動の結果として錯覚される例が報告されている [Steinicke, 2008][Steinicke, 2010][Matsumoto, 2016A][Narumi, 2017] [Nagao, 2017]。つまり、前述の説明だけでは視-力覚間衝突の結果が外力覚として認識される原因を説明しきれていないことになる。したがって、Pseudo-haptics の生起要因を明らかにするためには、それが外力として解釈されるための条件を特定する必要がある。

私は、Pseudo-haptics が外力として解釈されるためには、自身の運動の結果として知覚された視覚情報と、自身が予測した運動の結果との差が認知されていることが条件となる、という仮説を立てた。また、この仮説が正しければさらに、視-力覚間衝突が生じない状況で

あっても、運動結果と運動予測とが一致しないことをユーザが認知できさえすれば外力の錯覚が生じる可能性が考えられる。

私はこの仮説を検証するために、視-力覚間衝突を起こさずに運動予測と運動結果との間に不一致を作り出し、被験者が外力を感じるかどうかを調べる実験を行った。そのような条件を実現するために同実験では、運動伝染 (motor contagions) と呼ばれる現象を利用した。運動伝染は、他者の運動を観察することで観察者自身の随意運動が無意識的に影響を受ける現象である[Blakemore, 2005]。したがって運動伝染が起こると被験者の運動は無意識に影響されるため、運動予測とその結果との間に不一致が生じるようになる。

本実験では、被験者にマウスを使ったステアリングタスク中に感じた外力の強度を報告させた。この時に、他者が行う同種のタスクを観察させることで運動伝染を引き起こし、被験者の運動を無意識に変容した。それにより運動予測と視覚的運動結果との不一致が生じ、それが外力として解釈されるかどうかを、報告された外力の強度および記録されたマウスの軌道をもとに分析した。

実験の結果、他者の運動の観察によってステアリングタスク中の被験者の手の運動速度が変調され、また運動が変調された方向と同じ方向に外力を感じていたことが確認された。この結果は、視-力覚間衝突が生じない状況であっても、運動予測と視覚的運動結果との不一致が外力として解釈されたことを示している。

この結果から、Pseudo-haptics による外力知覚には、運動予測と知覚された運動結果との不一致を認知することが重要な要因となると結論付けられる。

6.2 背景と仮説

6.2.1 Pseudo-haptics 生起過程の不明瞭性

マウスによって操作されるマウスポインタのようなユーザの身体運動に同期して動く視覚的対象に対して、その位置や運動速度を変調するとユーザが疑似的な力覚を感じる Pseudo-haptics と呼ばれる現象がある。Pseudo-haptics を用いれば、ユーザが操作する視覚的対象の運動に変調をすることで、実際には力覚提示を行わなくても外力を感じさせることが出来るため、GUI や VR インタフェースの分野で様々な応用が提案されている。

一般的に Pseudo-haptics は視-力覚間衝突が生じた際に、視-力覚間で感覚情報を統合するために、空間的特性を知覚する上で優位に働く視覚情報によって力覚情報が変容されることで生じる錯覚であると説明されている[Lécuyer, 2009]。しかし、この説明だけではなぜ

Pseudo-haptics が外力として解釈されるかを十分に説明することはできない。なぜなら、ユーザは生じた擬似的な力覚を外力としてだけでなく随意運動に伴った内的要因の力（内力）としても解釈し得るためである。実際に過去の研究の中にはユーザが視覚によって変容された疑似的な力覚を外力ではなく随意運動の結果として解釈する例を報告しているものもある。例えば、鳴海らは実際のユーザの身体動作と VR 世界でのバーチャルな身体動作の間に気づかれない範囲のずれを作り出した映像を提示することで空間知覚を操作する「視触覚リダイレクション」の例を報告している[Narumi, 2017][Matsumoto, 2016A][Nagao, 2017]。そのうちの1つである“Unlimited Corridor”は現実には円形の壁の周りを歩いているにも関わらず、バーチャル空間内ではまっすぐな道と壁を HMD を通して見ることで、ユーザは自らまっすぐ歩いているように感じる VR コンテンツである。このコンテンツにおいて、力覚的な円運動は視覚的な直線運動によって変容されて知覚されるが、この時に生じた擬似的な力覚は、外力によって向きを変えさせられたという認識を生んでおらず、随意運動の結果、すなわち内力として解釈されたと捉えられる。

以上のように、外力としての Pseudo-haptics が生起する要因は、これまでの研究で示されてきた視覚情報による力覚情報の変容だけでは説明が不十分であり、外力を感じるか否かには別の根本的な要因が存在すると考えられる。この要因が何なのかを明らかにすることは Pseudo-haptics の原理解明のために必要不可欠であり、UI デザインをはじめとする様々な分野でこの錯覚を応用する上で役立つことが期待される。

6.2.2 運動予測に基づいた疑似的な外力知覚についての仮説

渡邊は Pseudo-haptics の生起要因について自己主体感の概念を通して考察している[Watanabe, J., 2017]。自己主体感とは特定の運動を自分が主体的に引き起こしたと感ずる感覚であり、特定の視覚的対象に自己主体感を感じるためには、自分が動かそうとした時にその対象が「意図通りに動く」ことが重要である。渡邊は、自己主体感を感じている視覚的対象が自身の「意図に反した動き」をすると、視覚的運動結果を実際に起きた運動結果とみなし、何らかの外的要因が自分自身の運動に意図に反した動きをもたらしたと解釈するために疑似的な外力を感じると考察している。すなわちこの説明における Pseudo-haptics は視覚的対象が自身の「意図通りに動く」ことで自己主体感を感じていた時に、「意図に反した動き」をしたという認知が生じると、意図した運動と視覚的運動結果との差分を外力として解釈する現象であるといえる。また第2章で述べたように、ある対象に対する自己主体感の生起には、「運動予測と視覚的運動結果の一致性の認知」が重要な基盤となる[Tsakiris,

2005][Tsakiris, 2007]. これらをまとめると, Pseudo-haptics が「外力」として知覚される要因は, 運動予測と視覚的運動結果とが一致しないと認知することで, 運動を「自分が引き起こしたものではない」とユーザが解釈することにあると考察できる.

運動予測と Pseudo-haptics の関係性は文献[Honda, 2013]においても示唆されている. この研究では, 映像内のポインタを手の運動で操作する際にポインタの運動を遅延させることで生じる質量知覚の変容が, 遅延について十分に学習した場合とそうでない場合で異なるかを調べた. その結果, 遅延について十分に学習した後では質量知覚が変容されにくくなることが確認された. この結果は, 学習によって遅延したポインタの運動を予測できるようになると疑似的な外力知覚が生起しにくくなることを示しており, この結果からも「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」が Pseudo-haptics の生起に関与していると考察できる.

本研究では以上の背景から, Pseudo-haptics が外力として知覚される本質的な要因は, 運動予測と視覚的運動結果との差をユーザが認知することであると仮説を立てた. またその際にユーザが視覚的運動結果を実際に起きた運動結果とみなし, 何らかの外的要因が自身の運動結果に影響を与えたと解釈することで疑似的な外力を感じるのではないかと考えた. さらに, この仮説が正しければ, 視-力覚間衝突は必要条件ではなく, 運動予測と運動結果とが一致しないことをユーザが認知できさえすればそれを外力として解釈すると考えられる.

6.2.3 運動伝染によって生じる運動予測の変調

前節で取り上げた先行研究[Watanabe, J., 2017] [Honda, 2013]によって, Pseudo-haptics が外力として解釈される上では, 運動予測と視覚的運動結果との差の認知が重要な要因となるという仮説が得られたが, これらの研究では, 運動予測と視覚的運動結果との差を認知することが疑似的な外力を生起させることを直接的には明らかにされていない. この仮説を検証するためには, 運動予測と視覚的運動結果とが一致しないことによって, 疑似的な外力知覚が起こるのかを調査する必要がある. しかし従来の Pseudo-haptics の提示手法で利用されてきた視覚情報を変調する手法では視-力覚間衝突が生じることになるため, 純粋に運動予測と視覚的運動結果との差を認知することによる影響を検証することは難しい.

そこで本研究では, 運動伝染に注目した[Blakemore, 2005]. 運動伝染とは他者の運動の観察によって, 観察者自身の運動が無意識的に影響を受ける現象のことである. 一般的な運動伝染は, 自身が実行する運動と一致しない他者の運動を観察すると, 観察した運動に引っ張られて自身の運動が変調される[Kilner, 2003] [Blakemore, 2005] [Bouquet, 2007] [Bouquet,

2011]. これは、誘発された運動の運動表現が意識的に阻害できないために生じる、無意識的な模倣として見られている。また、Ikegamiらは、予測誤差を伴う他者の運動を観察すると、観察した運動に引っ張られるのではなく観察した運動から離れるような運動の変調が起こることを示している[Ikegami, 2014][Ikegami, 2018]. この結果は観察する運動に対する予測と実際に観察した運動結果との不一致が観察者自身の運動に対する運動予測と運動結果との対応関係にも無意識的な影響を与えている可能性を示唆している。

運動伝染が生じると観察者の運動は意図通りのものではなくなるが、運動は全て観察者本人によって実行された運動であるので、視覚情報と力覚情報の一致性は保たれた上で意識的な運動予測と実運動の結果との間に不一致が生じる状況を作ることが出来ると考えられる。また、運動伝染によって生じた運動予測と実運動との不一致は他者の運動の観察によって生じた誤った運動学習であるといえる。したがって、この運動予測と実運動との不一致は、運動予測を基準とした見方をすれば、運動予測に対して実運動の結果が変調されるとも捉えることが出来るが、実運動を基準とした見方をすれば、実運動の結果に対して運動予測が変調されるとも捉えることが出来る。ここでは従来の Pseudo-haptics の呈示手法である実運動に対する視覚的運動の変調と区別しやすくするために、実運動に対する運動予測の変調という表現を用いている。

6.3 関連研究

6.3.1 Pseudo-haptics

Pseudo-haptics は視覚的な情報提示によって、力覚提示デバイスを用いずとも操作者に力覚を感じさせることができ、また編集・加工も容易であるため UI デザインの分野で広く応用されている。またその力覚は、視覚的運動の変調の仕方や背景情報の組み合わせ方などによって様々な解釈を与えられることがわかっており、これまでにばね抵抗の呈示[Lécuyer, 2001], テクスチャの凹凸感の呈示[Lécuyer, 2004], 形状の呈示[Ban, 2012][Watanabe, K., 2008], 固さの呈示[Argelaguet, 2013]など様々な力覚や触覚の提示手法が提案されている。

Watanabe は、被験者が動かすポインタの運動結果を変調しない場合においても Pseudo-haptics が生じることを示した[Watanabe, J., 2013]. この研究で行われた実験のタスクでは、ポインタの運動を変調しない代わりに、ポインタが指し示すオブジェクトの運動を変調している。具体的にはポインタの背景で自動的に運動するオブジェクトと被験者が操作するポインタが重なると同時に自動的に運動するオブジェクトの方の速度を変調した。その結

果、ポインタの運動を変調したときと同じように疑似的な外力知覚が生じることが確認された。この結果は操作するポインタの運動知覚において視-力覚間衝突が生じることが、疑似的な外力知覚を生起させる上での必須条件とはならないことを示唆している。ただし、ポインタとオブジェクト間の相対的な移動量の関係性は変化しており、この相対的な移動量の変化を視覚的運動結果として捉えることによって視-力覚間衝突が生じていたとも捉えることが可能である。

6.3.2 運動伝染

運動伝染は、観察者が実行する運動とは異なる動きを観察することによって起こり、観察する運動の性質によって生起量が増減することが分かっている。

Kilner らは、人間の運動を観察する場合とロボットの運動を観察する場合とを比較した [Kilner, 2003]。その結果、自分と一致しない運動を人間が行う時のみ運動伝染が起き、ロボットが行うときには起きないことが示唆された。Bouquet らはシンプルなドットの運動の観察を利用した実験系において、人間がドットを動かした際の運動を観察する場合と、機械的な等速運動を観察する場合を比較した [Bouquet, 2007]。その結果、人間による動きを観察するときのみ運動伝染が生じる事が確認され、人間的な運動を観察することが運動伝染を引き起こす上で重要であることが示唆された。

また Bouquet らは、観察する運動の目標が明示され、どのような運動が実行されるかを観察者が認知できることが生じる運動伝染を増幅させることを示唆した [Bouquet, 2011]。彼らの実験では、被験者は自ら運動しながら実験者が用意した俳優が被験者とは異なる運動を実行するのを観察する。このとき、あわせて俳優の運動の目標を表す点を被験者に示すかどうかで運動伝染の生起量の違いを分析した。その結果、目標点を提示した場合に運動伝染が変化した。また俳優の運動を提示せずに点のみ提示する条件では、運動に変化が生じなかったことから、単なる点の有無ではなく、目標に向かった運動であるか否かが運動伝染に影響することが示唆された。

Ikegami らは、予測誤差を伴う運動を観察することによる新しい運動伝染について報告している [Ikegami, 2014][Ikegami, 2018]。彼らは観察する運動が予測通りか予測に反するかによって、生じる運動伝染の方向が増減することを示唆した。彼らの指差し課題を用いた実験では、被験者は画面上に横方向に並列された 3 本の縦線の内、中央の線をタッチする課題と、俳優が同じ課題を行っている映像を観察する課題を交互に行った。この時、俳優は中央の線ではなく右（または左）の線付近をタッチしたが、被験者には俳優の目標について条件ごと

に別の内容が伝えられた。「俳優は右（または左）の線を狙っている」と伝えられた被験者は、予測した通りの俳優の運動を観察し、従来の運動伝染と同様に俳優の運動に引っ張られるように運動が変調された。一方で、「俳優は真ん中を狙っている」と伝えられた被験者は、予想に反する俳優の運動を観察し、俳優の運動とは逆方向に運動が変調された。この結果は、従来の運動伝染のように観察した運動を無意識的に模倣するだけでなく、観察する運動に対する予測と実際に観察した運動結果との不一致(予測誤差)が、自身の運動に対する運動予測と運動結果との対応関係にも無意識な影響を与えていることを示している。

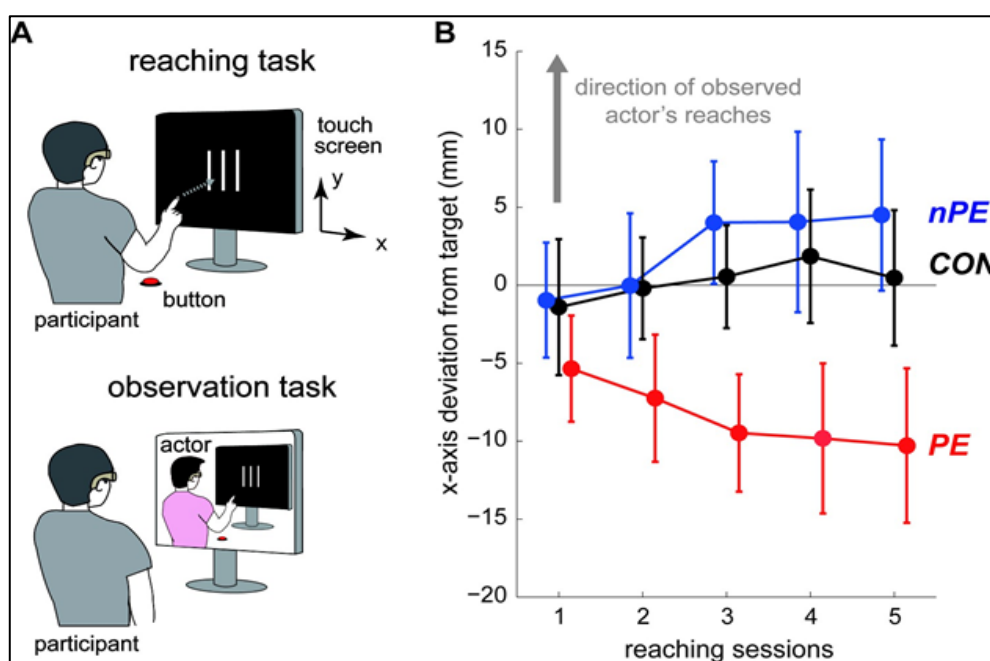


図 6-1 Ikegami らが行った指差し課題を用いた運動伝染実験。A - 上図は被験者自らが指差しを行うタスクの概要図で、A - 下図は俳優が行う指差し課題を観察するタスクの概要図である。B は観察回数が増えることによって被験者の指差し課題の結果に生じた変化を示している。予測誤差がない運動を観察した被験者 (nPE) には観察した運動に近づく変化が生じ、予測誤差がある運動を観察した被験者 (PE) には観察した運動から離れる変化が生じた。(図は[Ikegami, 2018]より引用)

6.3.3 ステアリングの法則

ステアリングの法則はフィッツの法則[Fitts, 1954]から派生した、マウスポインタなどのユーザが操作する視覚対象を幅の細い経路を通過させるステアリングタスクに対するパフォーマンスモデルである[Accot, 1997]. この法則は、間接制御のスタイラス操作[Accot, 1997], マウス, タッチパッド, トラックボール, トラックポイント[Accot, 1999], 直接制御のスタイラス操作[Kulikov, 2005], タッチスクリーン[Senanayake, 2016]など様々な条件に適合することがわかっている. Accot と Zhai は経路の全長 A 幅 W の経路を通過する時間 (MT) が次の式 (1) の関係になることを示している.

$$MT = a + b \frac{A}{W} \quad (1)$$

式中の a , b は実測値の分析によって決定される定数ありフリーパラメータと呼ばれる. また A/W はタスクの難易度を表す指標となり, index of difficulty (ID) と呼ばれる. つまりステアリングの法則に基づくと, 経路の全長 A が長くなるか経路幅 W が狭くなることで経路を通過する難易度 ID が上昇し, 通過時間 MT が長くなる.

また, 経路の幅 W に対する移動速度 V は以下の式 (2) で表現される.

$$V = a + b W \quad (2)$$

すなわち, 経路内の運動速度は経路の幅 W に依存しており, W が大きいほど速くなり, 幅が小さいほど遅くなるという関係がある.

Yamanaka らは, 2 種類の幅の経路が直線的に連結した場合の操作性能について報告している[Yamanaka, 2017]. 彼らの研究では, 経路幅が細くなるか, 太くなるか, 一定であるかによらずに, 以下の式 (3) に示す前半の経路の難易度 ($ID_1 = A_1/W_1$) と後半の経路の難易度 ($ID_2 = A_2/W_2$) を加算するモデルにおいても十分高精度にモデル化できることが確認された.

$$MT = a + b (ID_1 + ID_2) \quad (3)$$

ただし, 単一の経路を通過する場合と比較すると, ユーザが後半の経路を先読みして挙動を変化させていたことが観察された. 具体的には, 前半の経路では後半の経路に備えて, 運動速度を抑制することが確認された.

6.4 実験デザイン

従来からの Pseudo-haptics に関する実験では、視覚対象（マウスポインタなど）の運動をソフトウェアにより変調する手法が主に採用されている。しかしこの手法では視-力覚間衝突と、運動予測と視覚的運動結果との不一致の両方が発生するため、本研究が対象としている後者のみの影響を純粹に検証することは難しい。そのため、視-力覚間の衝突を起こさずに、運動予測と視覚的運動結果とが一致しない状況を作る必要がある。そこで本章で述べる実験では運動伝染を用いてこの状況を作ることを試みた。

6.4.1 運動伝染を用いた手法の提案

前述したように運動伝染は他者の運動を観察することで観察者の主体的な運動に無意識的な影響を及ぼす。この運動伝染が観察者の運動に与える影響を利用することで、本研究を進める上での課題を解決することができる。なぜなら、運動伝染が生じると観察者の運動は無意識的に変調されるため、被験者の予測とは異なる運動結果が生じる。しかし、その運動結果は観察者本人の運動によって生じたものなので、視-力覚間の感覚情報の一致性は保たれたままである。故に、視-力覚間の衝突を避けつつ運動予測と視覚的運動結果との不一致を生じさせられるためである。

また、一般的な運動伝染は、自身が実行する運動と類似はするが一致しない他者の運動を観察すると、自身の運動が観察した運動に近づくように変調されることが知られている。一方 Ikegami らは、他者の運動の結果を被験者に事前に予測させた上で、その予測と異なる運動結果を観察させると、観察した運動に近づくのではなくむしろ離れるように変調されることを示している。

これらの結果、観察者の運動は、予測と反する運動を観察させるか、予測通りの運動を観察させるかの違いによって、生じる運動伝染の方向を制御できることとなる。

以上の考察に基づいた実験デザインについて説明する。本研究の実験では、マウスを用いたポインタ操作（ステアリングタスク）において、マウスを操作する被験者の手の運動速度が運動伝染によって無意識的に変調された時に外力を感じるかを検証した。マウス操作を用いた Pseudo-haptics の実験はすでに存在するが[Lécuyer, 2004][Watanabe, K., 2008]、従来の手法ではマウス本体の移動量（入力値）とポインタの移動量との対応関係を変調することで、視-力覚間衝突を生じさせる。一方で本研究の提案手法では運動伝染によって被験者のマウスを操作する手の運動を被験者の意図に反した運動に変調することで、マウスの入力値

とポインタの移動量の対応関係を変えずに運動予測と運動結果が一致しない状況を作り出した。この時に被験者が外力を感じるのであれば、力覚情報が視覚情報によって変調されなくても運動結果と運動予測とが一致しないことによって擬似的な外力知覚が引き起こされたと言えるため、仮説が正しかったことを立証できる。

また、観察する運動に対する予測誤差が運動伝染や外力知覚にどのような影響を及ぼすかを調査するために、被験者を、予測と反する速度変化を観察する「予測誤差ありグループ (prediction error : PE)」、予測通りの速度変化を観察する「予測誤差なしグループ (no prediction error : nPE)」、および観察を行わない「対照条件グループ (control : CON)」の3グループに分け、グループ間での結果を比較した。

6.4.2 タスクの設計

実験は、被験者自らがステアリングタスクを行う「ステアリングセッション」と、他者が行ったステアリングタスクの記録映像を観察する「観察セッション」からなり (図 6-2)、PE および nPE グループの被験者はそれぞれのセッションに交互に参加した。CON グループの被験者はステアリングセッションのみに参加した (図 6-3)。

ステアリングセッションでは、ポインタを操作して2種類の幅の経路が連結した経路 (図 6-4) を通過するステアリングタスクを行わせた。ステアリングタスクでは、通過する経路の幅に応じて経路内での被験者による運動の速度が変化することが分かっている [Accot, 1997]。また、2種類の幅の経路が連結した経路を用いると、変化する経路幅に備えて被験者が自ら運動速度を変化させることが先行研究によって確認されている [Yamanaka, 2017]。そのため、経路幅の変化によって自身の運動・他者の運動ともにその速度変化を被験者は予測できるものと我々は前提する。具体的には、後半に幅が狭まる経路 (図 6-4A) では後半から運動が減速し、幅が広がる経路 (図 6-4B) では加速すると被験者が予測すると我々は仮定した。

そこで PE および nPE グループの被験者には観察セッションにおいて、経路幅の変化から予測される運動と実際に観察する運動結果が一致するか否かによって方向の異なる運動伝染を生じさせ、自身の運動に対する運動予測と運動結果の対応関係を歪ませた後、ステアリングセッションにおいてその対応関係の不一致を外力として知覚するか否かを調査するため、タスク完了直後に、後半の経路内で感じた外力の強度と方向を被験者に報告させた。

この外力の強度とステアリングセッション中のマウスの運動速度の変化を各グループ間で比較することで結果を分析した。

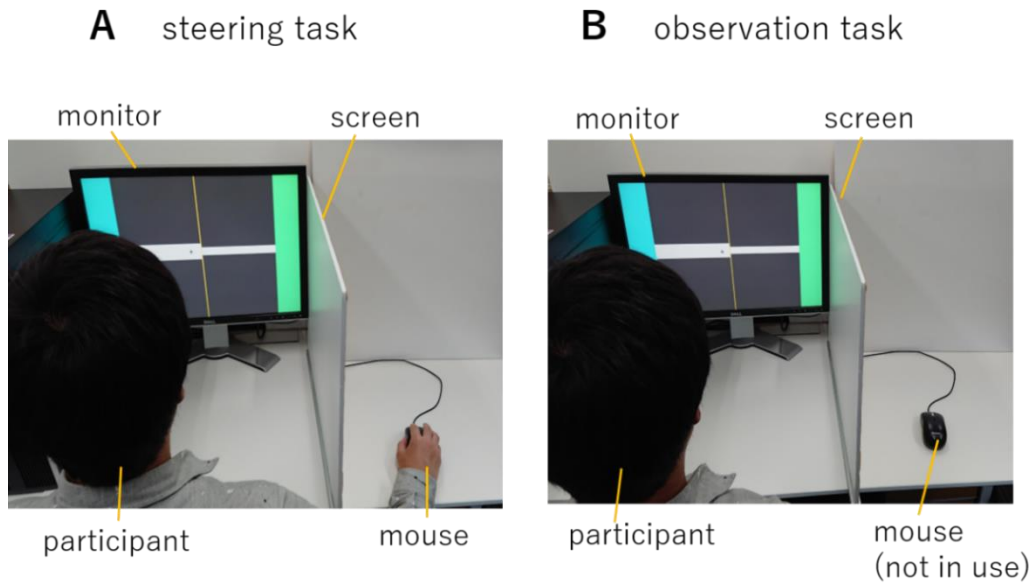


図 6-2 実験でのタスクの構成 (A : ステアリングタスク, B : 観察タスク)

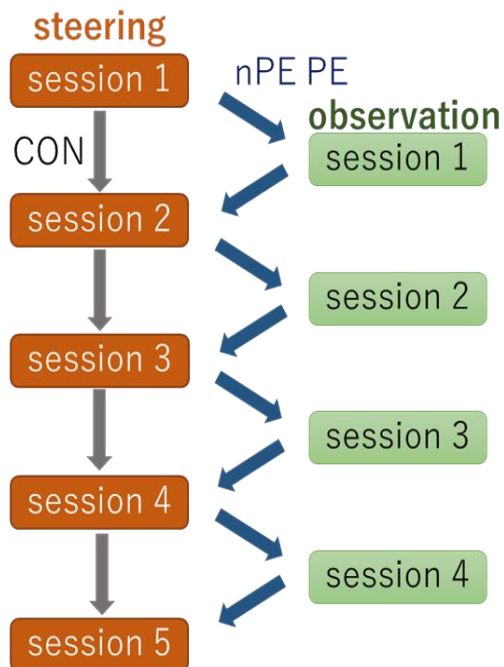


図 6-3 各グループにおけるセッションの順序

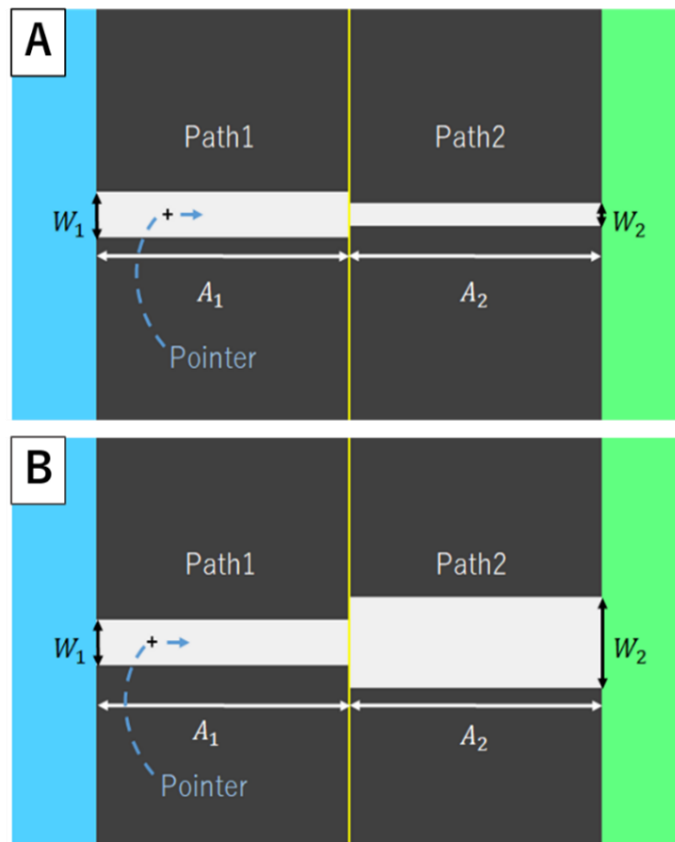


図 6-4 経路条件 (A: 狭まる経路, B: 広がる経路)

6.5 実験

6.5.1 装置

本実験では、映像呈示用の液晶ディスプレイ (Dell U2410, 24 インチ, 518.4×324.0 mm, 1920×1200 pixels) と入力用のマウス (Microsoft MSK-1113) を用いた。被験者は液晶ディスプレイの正面に置かれた椅子に座り、利き手でマウスを操作した。実験中マウスおよびこれを操作する被験者の手は衝立によって被験者の視界から隠されており、被験者は液晶ディスプレイによって呈示される映像のみを見た(図 6-2)。

6.5.2 タスク

タスクには 2 種類の幅の経路が直線的に連結した経路を通過するステアリングタスクを用いた。各グループの全ての被験者は、狭まる経路、広がる経路の 2 つの経路条件での実験に参加した (図 6-4)。また、PE・nPE の 2 グループの被験者はステアリングタスクを行うリングセッションに加え、各ステアリングセッションの間に他者が行うステアリングタスクを観察する観察セッションに参加した。CON グループの被験者はステアリングセッションのみに参加した。

6.5.2.1 経路条件

本研究のタスクに用いる経路条件として狭まる経路 (図 6-4A) と広がる経路 (図 6-4B) の 2 種類の条件を設定した。タスクはマウスによって十字型のポインタを左側の青いエリアから右側の緑のエリアまで、白色の経路の中を通過して水平方向に移動させるものであった。経路は真ん中で黄色いラインによって区切られ、経路の全長は 388.8 mm ($A_1 = A_2 = 144.4$ mm) だった。十字型のポインタのサイズは 8.1 mm × 8.1 mm であった。黄色いラインで区切られた前半の経路幅 (W_1) と後半の経路幅 (W_2) は経路条件ごとに設定された。狭まる経路は後半の経路区間 (Path2) が前半 (Path1) より幅が広い経路条件 ($W_1 > W_2$) である (図 6-4A)。狭まる経路における前半の経路幅 W_1 は 32.4 mm で、 W_2 は W_1 の半分の 16.2 mm であった。広がる経路は後半の経路 (Path2) が前半 (Path1) より幅が広い経路条件 ($W_1 < W_2$) である (図 6-4B)。後半の経路幅 (W_2) 以外の条件はすべて狭まる経路と同じであった。広がる経路における W_2 は W_1 の 2 倍で、64.8 mm であった。

6.5.2.2 ステアリングセッション

各セッションは 1 回のステアリングタスクからなる。このステアリングタスクでは被験者はマウス操作によってポインタを青色エリアから緑色のエリアまで白色の経路内を通過して移動させた。その際、被験者はポインタを白色の経路からはみ出させずにワンストロークで経路を通過させることが求められた。

なお、6.5.3 節にて後述するように、実験前に被験者は後半の経路 (Path2) では進行方向と同じか逆方向に力を感じる可能性があるという説明を受けた。しかし、実際には実験者による外力の提示及びポインタの視覚的運動結果の変調は一切行われず、経路内のどの位置でもマウスの入力値 (実際の手の運動) とポインタの移動量 (視覚的運動) の対応関係は同じで

あった。各ステアリングセッションの後に被験者は Path2 で感じた力の大きさを-5~+5 の 11 件で回答した。スケールは進行方向に同じ側の力（右側）を正、逆側の力（左側）を負としてそれぞれ 5 段階とした。またまったく力を感じなかった場合は 0 と回答した。

なお、本研究では力が加えられていない状態でのポインタの運動のみを被験者に事前に学習させ、実力覚提示などを用いて-5~+5 までの力の大きさの標準化を行わなかった。そのため被験者は自らの主観評価で決定した数値を回答した。標準化を行わなかった理由は、運動伝染を引き起こすためには、5 回のステアリングタスクと 4 回の観察セッションを連続して実施する必要があるため、各セッションの前に実力覚提示などを提示し基準となる力の大きさを学習させることができないためであった。

6.5.2.3 観察セッション

観察セッションでは、nPE および PE グループの被験者は、マウスを操作せずに自動的に動くポインタの動きを観察するタスクに参加した。各セッションは 10 回の観察タスクからなる。ポインタの運動には事前に記録した俳優が行うステアリングタスクでの運動データを用いた。観察する運動には背景の経路と俳優によって操作されたポインタの運動のみが含まれ、俳優やマウスの姿は含まれなかった（図 6-2B）。

観察映像の作成

観察セッションで使用する映像を作成するために、俳優が本研究の 2 つの経路条件でステアリングタスクを行ったログデータから加速運動と減速運動の 2 種類の運動データを作成した。この時、俳優が行ったステアリングタスクは、Path2 で力を感じる可能性があると思われなかったことを除いて全て被験者が行ったステアリングタスクと同じ条件であった。

加速運動は拡がる経路を用いて行ったステアリングタスクにおける俳優の運動データ 20 サンプルから実験者が 1 サンプルを選定した。使用する運動データには垂直軸方向のばらつきが小さく水平方向の速度が平均値に近いサンプルが採用された。採用された加速運動の Path1 での水平方向の平均速度は 166mm/s で、Path2 での平均速度は 256mm/s であった。

また減速運動は同じ俳優が狭まる経路を用いて行ったステアリングタスクの運動データ 20 サンプルから実験者が 1 サンプルを選定した。採用された減速運動の Path1 での水平方向の平均速度は 158mm/s で、Path2 での平均速度は 104mm/s であった。

グループ間の観察映像の違い

表 6-1 nPE および PE グループでのステアリングセッションと観察セッションにおける経路と運動の組み合わせ。観察セッションでは、ステアリングセッションで被験者が実行するであろう運動とは異なる速度変化を観察し、観察する際の経路条件によって観察する運動に対する予測誤差が制御された。

グループ	ステアリングセッション		観察セッション		
	経路条件	実行する運動	経路条件	観察する運動	
nPE	狭まる経路	減速運動	拡がる経路	加速運動	予測通り
	拡がる経路	加速運動	狭まる経路	減速運動	
PE	狭まる経路	減速運動	狭まる経路	加速運動	予測と異なる
	拡がる経路	加速運動	拡がる経路	減速運動	

異なる速度変化

運動伝染は観察者が本来行うであろうものとは異なる運動を観察する際に誘発されることが先行研究で示されているので、観察セッションでは、被験者は自身のステアリングセッションで使用される経路条件ではない方の経路条件で記録されたポイントの運動を観察した。すなわち被験者の運動が減速すると予想される狭まる経路でステアリングセッションを行う場合、加速運動を観察し、加速すると予想される拡がる経路で行う場合、減速運動を観察した。

また、nPE グループと PE グループとでは、観察するポイントの運動そのものは同じであったが、観察セッション中の背景の経路条件が異なっていた。

nPE グループの被験者は俳優がステアリングタスクを行った経路と同じ経路でポイントの運動を観察した。この経路条件から、被験者は俳優の運動が加速（または減速）することを予測し、実際にも加速（または減速）するという予測通りの運動を観察するため、予測誤差は生じないと考えられる。

一方で、PE グループの被験者は俳優がステアリングタスクを行った経路と反対の経路で

ポインタの運動を観察した。この経路条件から、被験者は俳優の運動が加速（または減速）することを予想し、実際には減速（または加速）するという予測に反する運動を観察するため、予測誤差が生じると考えられる。

6.5.3 手続き

全被験者は 2 つの経路条件での実験に参加した。参加する条件の順番は各グループ内でカウンターバランスされ、数分間のインターバルをはさんだ後、続けて実施された。

各経路条件での実験開始前に被験者は実験について以下の説明を受けた後にトレーニングセッションに参加した。

- マウスのドラッグ操作を用いて、画面上のポインタを左端の青色のエリアから右端の緑色のエリアまで白い経路内を通過して移動させるタスクを実施します。
- マウスは途中で止めずにワンストロークで動かし、ポインタが上下の壁にぶつからないようにして下さい。
- なお、後半の経路内では進行方向と同じ側か逆側のどちらかに外力が加えられる可能性があります。
- 各試行後に感じた外力の大きさを進行方向と同じ側に力を感じた場合は正、逆側に力を感じた場合は負とし、 $-5 \sim +5$ の数値で回答してください。数値は主観評価で決めていただきますが、より強い力を感じた時に絶対値の高い数値を回答してください。また、全く力を感じなかった場合は 0 と回答して下さい。
- はじめにマウス操作に慣れるためのトレーニングセッションを行います。このトレーニングセッションでは外力は加えられていません。

トレーニングセッションでは、幅が変化しない経路 ($W_1 = W_2 = 32.5 \text{ mm}$) においてステアリングタスクを無制限で体験できた。トレーニングセッション終了後に、ランダムに決定された経路条件での本実験に参加した。

各経路条件での Honda 本実験では、nPE・PE グループの被験者はステアリングセッション 5 回と観察セッション 4 回に交互に参加した。CON グループの被験者はステアリングセッション 5 回にのみ参加した (図 6-3)。

各ステアリングセッションは以下のような手順で行われた。各試行の開始前に画面には現在のセッションで用いる経路条件の背景のみが表示され、被験者はマウスを初期位置に置くように指示された。マウスが初期位置にあることを実験者が確認したのちに、スタート地点 (青色エリア) にポインタを呈示した。被験者がマウスのボタンを押すとタスクが開始

され、被験者はボタンを押したままポインタをゴール地点（緑色のエリア）まで移動させ、その後ボタンを離した。その後に Path2 で感じた力覚量を口頭で回答した。回答後は間を置かずに、nPE・PE グループは観察セッションに移行し、CON グループは次のステアリングセッションに移行した。5 回目のステアリングセッションが終了するとその経路条件でのタスクが終了となった。

各観察セッションは以下のような手順で行われた。各試行の開始前に画面には現在のセッションで用いる経路条件の背景のみが表示された。実験者の合図とともに、ポインタの運動が提示された。セッションの間、被験者は手を動かさずに、自動的に動くポインタに注目した。ポインタの運動は続けて 10 試行分提示された。観察が終了すると直ちに次のステアリングセッションに移行した。

6.5.4 参加者

実験には 22 歳から 24 歳の大学生 30 名（男性 24 名，女性 6 名）が参加した。全ての被験者は正常な視力または矯正視力を有し、右利きだった。彼らは PE, nPE および CON の 3 つのグループに 10 名ずつランダムに割り当てられた。

6.5.5 分析手法

記録されたマウスの入力値から、経路内でのポインタの水平方向の運動速度を計測した。統計分析のために Path1 での平均速度 (V_1) と Path2 での平均速度 (V_2) から以下の (4) 式で表すような経路間の速度の対数比 (RV) を計算した。

$$RV = \log_2\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (4)$$

対数比を用いた理由は、Path1 の平均速度より Path2 での平均速度の方が速い場合と遅い場合で数値に対称性を持たせるためであった。RV が正の場合、Path2 での平均速度が Path1 の平均速度より速かったことを表し ($V_1 < V_2$)、RV が負の場合、Path2 での平均速度が Path1 の平均速度より遅かったことを表す ($V_1 > V_2$)。ステアリングの法則に従えば、経路内の運動速度は経路幅に依存するため、被験者が狭まる経路条件でステアリングタスクを行う時は、 V_2 は Path1 での V_1 よりも遅くなり ($V_2 < V_1$)、広がる経路条件タスクを行う時は、 V_2 は V_1 よりも速くなることが予想される ($V_2 > V_1$)。ただし、前述したように被験者が運動を抑制することなどが考えられるため、完全に経路幅に依存する訳ではないと考えられる。

俳優の運動の観察回数が増えることによって被験者が感じる Pseudo-haptics の生起量と運動伝染による運動速度にどのような差が出るかを調べるために、被験者が回答した力覚量と RV のそれぞれについて、グループ (3 水準) と経路条件 (2 水準) とステアリングセッションの回数 (5 水準) で混合計画の三要因分散分析 (Three-Way ANOVA) を行った。多重比較は Ryan の方法を用いて実施した。

6.6 結果

6.6.1 ステアリングタスク中の速度変化の分析

表 6-2 第 1 セッションと第 5 セッションでの平均速度の比較。数値は V_1 , V_2 , RV の平均値を表し, V_1 と V_2 の単位は mm/s である。また括弧内の数値は標準誤差を表す。(A: 狭まる経路, B: 広がる経路)

A		V1	V2	RV
PE	session1	123 (14)	103 (11)	-0.249 (0.102)
	session5	138 (13)	104 (14)	-0.493 (0.126)
nPE	session1	130 (11)	113 (11)	-0.233 (0.117)
	session5	144 (13)	144 (16)	-0.014 (0.150)
CON	session1	150 (23)	139 (26)	-0.200 (0.092)
	session5	169 (30)	167 (47)	-0.215 (0.150)

B		V1	V2	RV
PE	session1	180 (15)	204 (22)	0.153 (0.108)
	session5	155 (13)	175 (17)	0.159 (0.090)
nPE	session1	192 (22)	237 (34)	0.270 (0.152)
	session5	173 (15)	190 (29)	-0.170 (0.134)
CON	session1	167 (26)	206 (32)	0.287 (0.119)
	session5	169 (30)	219 (34)	0.403 (0.070)

表 6-2 は各グループ×経路条件の 6 条件での第 1 セッションと第 5 セッションの前後半の経路内での平均速度 (V_1 , V_2) 及び RV を表す. セッション 1 とセッション 5 とで V_1 を比較すると, 加速運動を観察した「PE グループ×狭まる経路」と「nPE グループ×狭まる経路」の 2 条件では増加し (表 6-1A), 減速運動を観察した「PE グループ×広がる経路」と「nPE グループ×広がる経路」の 2 条件では減少している (表 6-1B). 一方で, V_2 に注目すると, グループによって加減速の仕方に変化が生じ, nPE グループでは V_1 以上の増減が生じたのに対して, PE グループでは増減が抑制された. ただし 「PE グループ×狭まる経路」ではほとんど増加しなかったのに対し, 「PE グループ×広がる経路」では V_1 の減少率に近い減少がみられた. CON グループでは, 経路条件によらず V_1 , V_2 の双方が増加した. これにはタスクに対する学習効果が影響した可能性が考えられる. ただし, CON グループでは RV や被験者の力覚知覚にセッション間の有意差は確認されなかったことから, 分析結果に対しては学習効果の影響はないと判断した.

以下ではステアリングタスク中の前半と後半の速度比 RV についての三要因分散分析の結果を述べる.

ステアリングタスク中のポイントの速度変化を表す Path1 と Path2 間の速度比 RV の分析では経路条件による主効果[F(1, 27) = 30.218, $p < 0.001$]と, 三要因 (2 次) の相互作用[F(8, 108) = 2.220, $p = 0.031$]が確認された (図 6-6). また, 各グループでの経路×セッション回数の単純交互作用の多重比較では, nPE において単純交互作用[F(4, 108) = 4.086, $p = 0.004$]が確認された. したがって各グループ×経路条件の 6 条件 (3 グループ×2 経路) でセッション回数による単純・単純主効果の検定を行った. その結果, nPE グループの広がる経路条件でのみセッション回数による単純・単純主効果[F(4, 216) = 3.322, $p = 0.012$]が確認された. また単純・単純主効果の多重比較の結果, 第 1 セッションー第 5 セッション間 [$p < 0.001$]に有意差が確認された (図 6-6B). 「PE グループ×狭まる経路」 [F(4, 216) = 1.054, $p = 0.381$]や「nPE グループ×狭まる経路」 [F(4, 216) = 1.687, $p = 0.247$]においてもセッション回数を重ねるにつれて RV が変化する傾向が見られたが, 有意な差ではなかった (図 6-6A). 「PE グループ×広がる経路」 [F(4, 216) = 0.565, $p = 0.688$], 「CON グループ×狭まる経路」 [F(4, 216) = 0.140, $p = 0.967$], 「CON グループ×広がる経路」 [F(4, 216) = 0.307, $p = 0.873$]では実質的な変化は起きなかった.

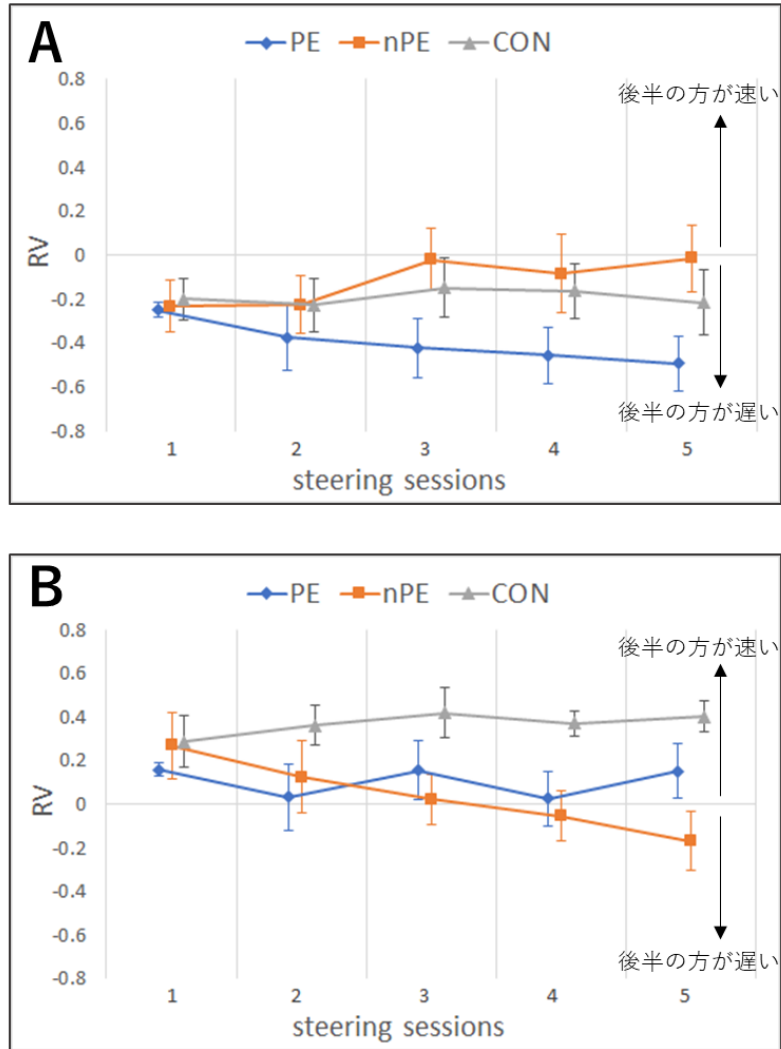


図 6-5 被験者の運動速度の対数比 (RV) の変化. (A: 狭まる経路, B: 拡がる経路). 各点は RV の平均値を表し, エラーバーは標準誤差を表す.

6.6.2 被験者が感じた力覚の主観評価の分析

図 6-6 にタスク中に被験者が感じた外力の推移を表す。観察によって運動の変化が確認された「PE グループ×狭まる経路」、「nPE グループ×狭まる経路」、「nPE グループ×広がる経路」の 3 条件では、観察回数が増えるにつれて運動の変化と同じ方向に外力を感じる傾向が確認された。またこの 3 条件での第 5 セッションで回答されたスコアの最大絶対値は 4 であった。ただし、回答された外力の平均値は決して大きくはなく、最も強い外力が報告された「PE グループ×狭まる経路」の第 5 セッションでのスコアの平均値は-1.50 であった (図 6-6A)。また、30 名の被験者のうち 3 名(PE : 1 名, CON : 2 名)が全てのセッションにおいて全く力を感じなかったと回答した。

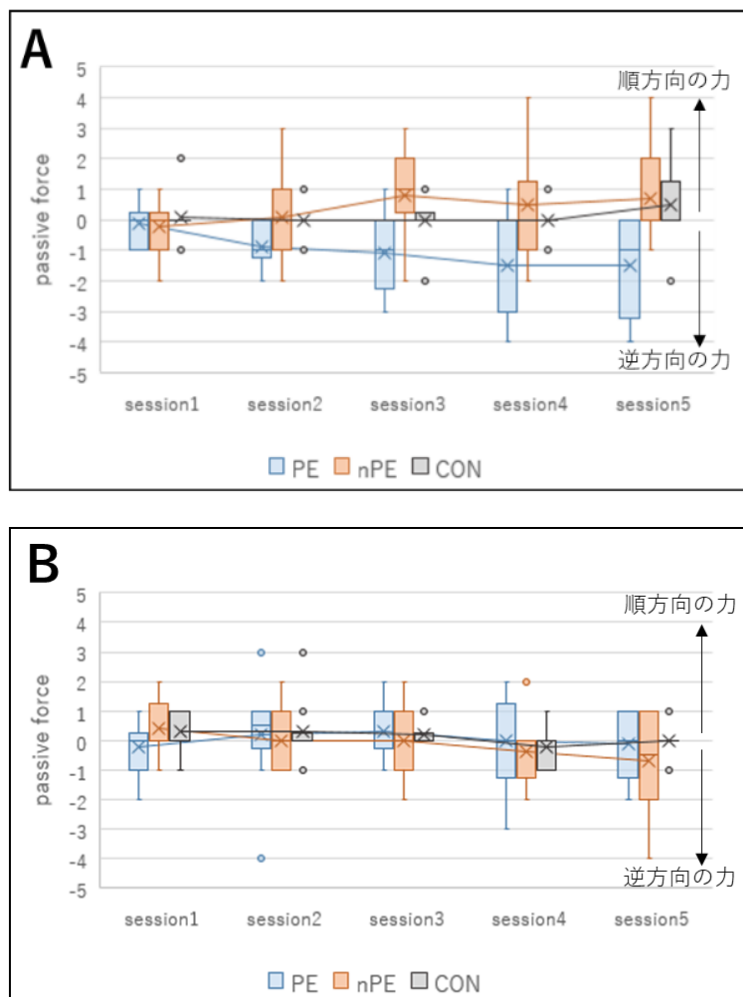


図 6-6 タスク中に被験者が感じた外力の変化 (A: 狭まる経路, B: 広がる経路)。各点は被験者が回答したスコアの平均値を表し、エラーバーは標準誤差を表す。

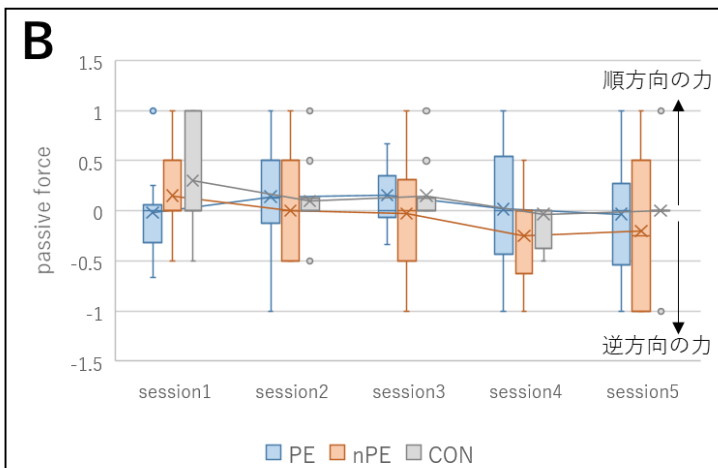
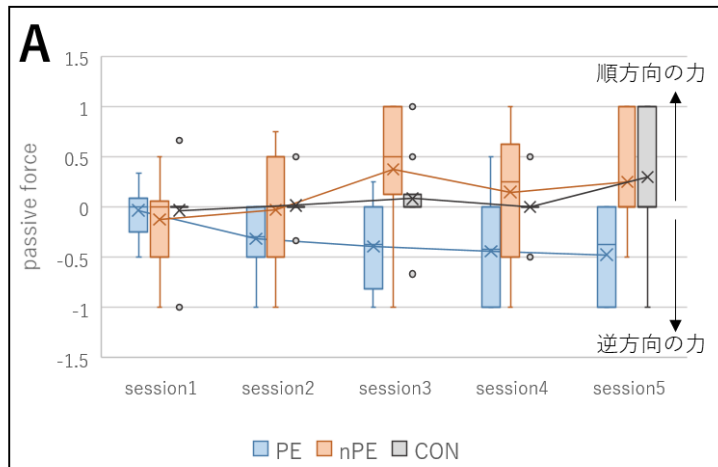


図 6-7 タスク中に被験者が感じた外力の推移. (A: 狭まる経路, B: 拡がる経路). ×は被験者が回答したスコアの平均値を表す.

また本研究では回答するスコアの大きさについて標準化を行えなかったため、各被験者が回答した数値の最大絶対値でその被験者のスコアを割ることで、スコアの大きさの正規化を行った(図 6-7)。この正規化した値においても前述した 3 条件では、観察回数が増えるにつれて運動の変化と同じ方向に値が推移する傾向が確認された。

以上から、回答するスコアの大きさには個人差によるばらつきが生じており、全体として被験者が感じた外力の大きさは決して大きくはないが、誘発された運動の変化に伴った外力を感じる傾向にあったと判断した。

以下では、被験者が回答した主観的な外力知覚の強度について三要因分散分析を行った結果を述べる。

被験者が感じた力覚の主観評価ではグループによる主効果[F(2, 27) = 4.756, p = 0.017]と、三要因(2次)の相互作用[F(8, 108) = 2.178, p = 0.035]が確認された(図 6-5)。また、各グループでの経路×セッション回数の単純交互作用の多重比較では、nPE において単純交互作用[F(4, 108) = 2.448, p = 0.040]が確認された。したがって各グループ×経路条件の6条件(3グループ×2経路条件)でセッション回数による単純・単純主効果の検定を行った。その結果、「PE グループ×狭まる経路」[F(4, 216) = 3.164, p = 0.015]でのみセッション回数による単純・単純主効果が確認された。また単純・単純主効果の多重比較の結果、第1セッションー第4セッション間[p = 0.003]と第1セッションー第5セッション間[p = 0.003]に有意差が確認された(図 6-5A)。「nPE グループ×狭まる経路」[F(4, 216) = 1.687, p = 0.154]や「nPE グループ×広がる経路」[F(4, 216) = 1.696, p = 0.152]においてもセッション回数を重ねるにつれて被験者が感じる力覚量が増える傾向が見られたが、有意な差ではなかった。「PE グループ×広がる経路」[F(4, 216) = 0.410, p = 0.802]、「CON グループ×狭まる経路」[F(4, 216) = 0.448, p = 0.774]、「CON グループ×広がる経路」[F(4, 216) = 0.448, p = 0.774]では実質的な変化は起きなかった。

さらに正規化された値についても同様に三要因分散分析を行ったところ、グループと経路条件間の交互作用のみが確認された[F(2, 27) = 4.668, p = 0.018]。また単純主効果の分析では、狭まる経路でのグループによる主効果[F(1, 54) = 6.504, p = 0.003]と PE グループにおける経路による主効果[F(1, 27) = 8.219, p = 0.008]が確認された。狭まる経路におけるグループの単純主効果についての多重比較の結果、PE-nPE 間 (p < 0.002) と PE-CON 間 (p < 0.005) に有意差が確認された。また、正規化された値においては三要因(2次)の相互作用[F(8, 108) = 1.808, p = 0.083]は有意傾向であったが、観察回数が増えることによる影響を分析するために、正規化する前と同様にセッション回数による単純・単純主効果を調べた。その結果、「PE グループ×狭まる経路」[F(4, 216) = 1.640, p = 0.165]、「nPE グループ×狭まる経路」[F(4, 216) = 2.141, p = 0.077]、「nPE グループ×広がる経路」[F(4, 216) = 1.366, p = 0.247]では被験者が感じる力覚量が増える傾向が見られたが、有意な差ではなかった。「PE グループ×広がる経路」[F(4, 216) = 0.426, p = 0.790]、「CON グループ×狭まる経路」[F(4, 216) = 0.934, p = 0.445]、「CON グループ×広がる経路」[F(4, 216) = 0.918, p = 0.454]では実質的な変化は起きなかった。

6.7 考察

6.7.1 運動速度の変化についての考察

実験の結果、観察回数が増えるにつれてマウス操作の運動速度が変化することが確認された。nPE グループの被検者の運動は観察した運動に近づくように変化し、PE グループの被検者の運動は観察した運動から離れるように変化した。この結果は研究[Ikegami, 2018]での結果を支持しており、背景の経路条件から得られた予測と実際に観察した運動に差があるか否かが運動の変化に影響したと考える。ただし、生じた運動の変化は各条件によってばらつきがあることが確認された。例えば、「PE グループ×広がる経路」では予想と反して加速する方向への運動の変化が確認されなかった。その理由として、広がる経路条件が「Path2 で加速するはず（減速しないはず）」という予測を与える要因として不十分で、被験者間で予測誤差が生じるか否かに差が生じたことが要因であると考えられる。経路が広くなったからといって必ず加速するとは限らず、操作者の意思で等速のまま動かすことも減速させることも容易であるため、経路が広がれば加速するという予測は働きにかかったと推察する。逆に狭まる経路では加速する運動を再現するのは難しく、「Path2 で加速しないはず」という予測が十分に働いたために、「PE グループ×狭まる経路」では減速方向の運動伝染が誘発されたと推察する。

また、nPE グループでは双方の経路条件で観察する運動に近づく変化が確認されたが、狭まる経路では広がる経路に比べて変化が小さかった。この理由としては、狭まる経路で加速することの難しさが影響したのではないかと考える。ステアリングの法則に従えば、通過する経路幅が狭いほど通過する難易度が上昇し、通過する速度は抑制される。したがって、狭い経路内で速くなる方向の変化が生じた「nPE グループ×狭まる経路」では、被験者は速く運動することに難しさを感じ、自ら速度を抑制していた可能性が考えられる。以上から、実験条件によってばらつきは認められるものの、被験者の運動が、他者の運動の観察によって変化することが確認され、本実験環境において運動伝染が生じたと考察できる。特に、減速する方向に変化した「PE グループ×狭まる経路」と「nPE グループ×広がる経路」では運動の変化が顕著であった。

6.7.2 主観的な外力知覚についての考察

観察による運動の変化が見られた「PE グループ×狭まる経路」, 「nPE グループ×狭まる経路」, 「nPE グループ×拡がる経路」の3条件に注目すると, 生じた運動の変化と同じ方向に外力を感じる傾向が確認された. この結果は運動伝染によって生じた無意識的な実運動の速度変化を被験者が外力として解釈したことを示唆する. このことから, 視-力覚間衝突が生じない状況であっても, 視覚的運動結果と予測との差を認知することで外力の錯覚が生じ得るといえる.

また, nPE グループでは運動速度の変化に対して知覚される外力の増加量が小さい傾向にあった. その理由としては, 運動の変化に対する視覚的な慣れが影響した可能性がある. Honda らの研究では学習によって運動結果を予測しやすくなると疑似的な外力を感じにくくなることが示唆されている [Honda, 2013]. 本研究においてもこれと似た影響が生じたと考察できる. すなわち, 観察した運動に近づくように運動が変化した nPE グループでは, 生じた加減速について視覚的に慣れていたことで変化を認識しにくい状況であったと推察する. 逆に, 観察した運動から遠くなるように運動が変化した「PE グループ×狭まる経路」では, 変化を認識しやすく強い力覚を感じたと推察する.

6.8 制約と課題

本実験では, 他者の運動の観察によって被験者の運動が変化することとそれに伴って被験者が疑似的な外力覚を感じる傾向にあることが確認されたが, 観察による被験者の運動の変化は条件間でばらつきがあった. その要因については前章で考察を述べたが, 今後は考察をもとに更なる検証を行い, 観察する条件によってどのような運動伝染が生じるかを事前に確認した上で, 運動伝染がどのような疑似的な外力覚を生み出すのかを詳細に明らかにする必要があると考える. また, 外力知覚の主観評価は被験者毎のばらつきが大きく, 観察による評価への影響は全体としてそれほど大きなものではなかった. 加えて本実験では実験設計の都合上, 本研究の手法による外力の知覚量を実力覚や従来手法と比較することができなかった. したがって, 本実験環境で被験者が感じた外力の知覚量が具体的にどの程度のものであったかについては実力覚や従来手法と比較できる実験を設計し, 今後明らかにする必要がある.

また, 本実験で被験者が回答した主観評価の数値が全体的に低かった要因の1つとして, 入力デバイスとして一般的なマウスを用いたために, 実際は外力が加えられていないこと

を被験者が経験的に理解していたことが認知バイアスとして強く働いた可能性が考えられる。その他にも、外力の錯覚には操作対象の見た目や実行する運動の様相、過去の経験に基づいた先入観、質感を表象させるようなメタファーの存在など様々な要因が関与すると考えられる。したがって、今後はデバイスの物理的特性や、操作対象の見た目などが結果にどのような影響を及ぼすかを解明し、Pseudo-haptics を利用したインタフェースの設計に本研究の知見をどのように展開できるかを検証したい。

6.9 本章のまとめ

本章では疑似的な外力知覚として知られる Pseudo-haptics の生起要因が運動予測と視覚的運動結果との差を認知するという仮説を立て、新規実験系によってこれを検証した。

これまでの研究では一般的な Pseudo-haptics として知られる疑似的な外力覚は、視覚情報と力覚情報とに不一致が生じた際に力覚情報が変調されることにより生じると説明されてきた。しかし、その衝突により生じた Pseudo-haptics は、外力としても随意運動の結果としても解釈することが可能であり、なぜ外力として解釈されるかについて十分に説明はなされていなかった。

本章では運動予測と視覚的運動結果との差を認知することが、Pseudo-haptics が外力として知覚される上での条件であるという仮説を立て検証を行った。この検証方法として、被験者の運動に意図しない運動を無意識化で誘発し、被験者が予測する運動と実際の運動結果が一致しない状況を作り出すことで、視-力覚間衝突が生じない状況であっても被験者が疑似的な外力を感じるかを調査した。具体的には、マウスを用いたステアリングタスクを被験者自身が行う試行と、他者がタスクを行っている映像を観察する試行を交互に実施することで被験者の手の運動に無意識的な運動伝染を誘発した。被験者には自身がタスクを行うときにタスク中に感じた外力の強度を回答させ、運動伝染が起こることでこの強度に変化が生じるかを調査した。

その結果、観察回数が増えるにつれて、マウスの運動速度が変化することが確認された。また、その変化は観察する運動が予測通りか否かによって方向が異なることが確認された。さらに、その運動速度の変化と同じ方向の外力を被験者が感じる傾向にあることが確認された。これらの結果から、視-力覚間衝突が生じない状況であっても、運動予測と運動結果との差が外力として知覚され得ることが示唆された。

第7章 総合的な議論

第4章から第6章では、自己運動と視覚的運動との関連性の認知における能動的に身体を動かすことにより生じる運動予測の重要性と運動予測と運動結果との一致性の認知がもたらす解釈について実験から明らかにした内容を説明した。本章では各研究で得られた知見から本論文全体の知見をあらためて整理し、今後の展望について述べる。

7.1 本研究の学術的知見

7.1.1 運動予測が働くことによる視覚と力覚間の空間的不一致の許容可能性の発見

第4章ではクランクハンドル操作時の被験者の手の運動と視覚的オブジェクトの運動との間の空間的不一致が両者の運動の随伴関係の認知に影響するかを分析した。これは、能動的運動時の自己運動と視覚的運動との認知にする上で重要であると考えられる「視覚と力覚間の一致性の認知」と「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の2つのどちらが有効に働くかを検証するために設計した新規実験系であり、これまでは能動的運動時にこれらの一致性の認知を分離した検証は行われてこなかった。実験ではクランクハンドル操作する被験者の手と映像内の視覚的オブジェクトの空間的不一致による課題への影響を分析した。その結果、空間的不一致が生じる条件と生じない条件で課題結果に差がないことが確認された。この結果は、視覚的対象と自己の運動との関連性を空間的不一致がある状態で意識的に長時間学習することで、その空間的不一致を許容して自己主体感や身体所有感を感じられるようになるという研究[Short, 2010]の知見とは異なり、運動の関連性を認知できるようになる学習過程においても「運動予測と視覚的運動結果との一致性」が認められることで視覚と力覚間の空間的不一致の許容できる可能性を示唆するものである。この結果から自己帰属感の生起過程について考察すると、人が外界の対象の運動が自己の意図的な運動と連動しているかを識別する際は、あらかじめ自分がこう動かしたらこう動くだろうと

いう予測を働かせており、その予測通りに動くことを認知することがその対象は自分が操作しているものであるという自己への帰属が生じる重要な要因となると結論付けられる。

7.1.2 運動予測の構築要因の多様性の発見

第4章の実験では、クランクハンドルによる回転操作を用いたことで「運動予測と視覚的運動結果との一致性」を認知しやすかったことが、視覚と力覚間の空間的不一致を許容して自己運動と視覚的運動との随伴関係にあると認知できる状況を作り出したと考察した。さらに、第5章では、この考察を基に実際の手の運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する運動の空間的不一致による影響が、実行する運動パターンの違いや視覚的対象の見え方によってどのように変化するかを調査した。その結果、抽象的なポイントを円運動によって操作する条件では、第4章の実験と同様に、回転した位置にその対象が提示されても運動結果を予測しやすいため空間的不一致による自己帰属感の生起に対する影響は確認されなかった。しかし、直線運動のように空間的不一致が生じることで運動結果を予測しにくくなる条件では運動の随伴関係の認知に差が生じた。また、見え方が実身体と近いフォトリアルな手の映像を用いた条件では、円運動であっても空間的不一致による自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知への影響が確認された。この要因を検証するために行った追加実験では、運動そのものの空間的整合性が保たれた条件においてもフォトリアルな手の映像が回転されて提示されることによって課題の正答率が低下することが確認された。これらの結果から、自己帰属感の生起過程として重要視される自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知には、自身が能動的に実行する運動から視覚的運動結果を予測できることが重要であることが再確認された一方で、その予測のしやすさには運動結果の空間的整合性、実行する運動の様相、視覚的対象の見え方など様々な要因が関与することが示唆された。特に、先行研究[van den Bos, 2002] [Sekiyama, 2006] [Koshinbo, 2011]では実身体と視覚的身体の向きが異なることが身体所有感の低下させることが示唆されているが、本研究においてもこの身体所有感の低下が自己運動と視覚的運動との随伴関係の認知にも負の影響を与えるという結果が得られた。また、この負の影響は運動結果の空間的整合性によらずに生じることが確認された。

2.3節で述べたように、運動結果の予測のしやすさは必ずしも実身体の運動と視覚的対象の運動の空間的整合性に依存する訳ではなく、過去の経験の蓄積などによって空間的不一致の許容した予測が可能であると考えられる。本実験環境においては円運動という運動の性質を被験者が経験的に理解していたことが空間的不一致を許容して視覚的対象の運動結

果を予測するのに有効に働いたと考えられる。これについては 7.2.1 で先行研究での知見を交え、詳細に議論する。

7.1.3 運動予測と運動結果との一致性の認知による解釈への影響の発見

第 4 章と第 5 章では、運動予測と視覚的運動結果が一致することが、その対象は自分が操作しているものであるという自己帰属感の生起に貢献することを示した。また第 6 章では視覚情報によって力覚情報が変容されることで起こるクロスモーダル知覚として広く知られる Pseudo-haptics が外力として解釈される要因は、運動予測と視覚的運動結果が一致しないと認知することにあるという仮説を立て、実験によって検証した。具体的には他者の運動を観察による運動伝染を利用して被験者自身の運動を無意識的に変調し、その変調された自らの運動を観察することで被験者が疑似的な外力を知覚するかを検証した。その結果、被験者の運動は他者の運動によって変調され、その運動の変調と同方向の外力を被験者が感じることが確認された。本研究の実験では従来の Pseudo-haptics の提示手法のように視覚情報の変調を行っていないため、この結果は視覚情報と力覚情報が一致し、視覚による力覚の変容が生じない状況であっても、運動予測と視覚的運動結果が一致しないと認知することが疑似的な外力知覚の要因となり得ることを示唆する。

本研究では自己帰属感の生起過程と外力知覚としての Pseudo-haptics の生起過程の 2 つを取り上げたが、本研究の目的は一貫しており、能動的運動時の自己運動と視覚的運動結果の関連性の認知に運動予測が与える影響を検証することであった。これまでは「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」は同時に働く「視覚と力覚間の一致性の認知」と混同された状態で曖昧に理解されており、具体的に運動予測が自己運動と視覚的運動との関連性の認知に運動予測がどう関与するのかが未解明のままであった。本論文の第 4 章から第 6 章で行った取り組みは、「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一致性の認知」を分離することで「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」がもたらす解釈を実験的に検証することであった。検証の結果から能動的運動時の自己運動と視覚的運動との関連性は主に運動予測と視覚的運動結果との一致性を見ることによって解釈されることを明らかにした。具体的には運動予測と視覚的運動結果との一致性が高いことが「視覚的对象が自分に連動している」という自己帰属感を感じやすくさせた。また一方で、運動予測と視覚的運動結果との一致性が低いことが自己帰属感を感じにくくさせ疑似的な外力知覚の要因となり得ることが確認された。

本研究の結果は、自己帰属感を感じる上で視覚情報と力覚情報とが一致することが視覚

的対象に対する自己帰属感を高める上で必ずしも重要ではないことを示唆している。実際に視覚情報と力覚情報が一致しない状況の方が高い自己帰属感を感じられるという事例も存在する。Wang らによる手の振戦を患っている人々を支援するための光学シースルー方式の複合現実システム[Wang, 2017]は、震える被験者の手に震えないバーチャルハンドを重ねて表示することでキーボードのタイピング能力が向上することを示唆している。この結果は、彼らのシステムのバーチャルハンドの運動は、実際の手の運動に一致しないにも関わらず、実際の震える手よりも扱いやすく、より高い自己帰属感を得ることができることを示唆している。

本論文での 3 つの研究によって、本研究の目標であった自己運動と視覚的運動との関連性を認知する上で運動予測がどのように関与するかを明らかにすることが出来たと考える。「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一貫性の認知」を分離した検証により自己運動と視覚的運動との関連性を認知する上での運動予測による具体的な影響についての知見を提供したことが本論文全体の貢献である。

7.2 展望

7.2.1 意識的な運動予測の構築要因の解明

第 4 章、第 5 章の実験環境では円運動というなじみのある運動の性質が運動予測の構築に大いに貢献したと考えられる。これは被験者が過去の経験の蓄積から円運動の性質をよく理解していることが予測のしやすさに影響を与えたためであると考えられる。また予測のしやすさは視覚的対象の見た目や向きによっても変化した。これらの結果から自らが行った運動に対する意識的な予測はモーターコマンドによる情報だけでなく日常での経験の蓄積など様々な要因によって構築されるものであると考えられる。例えば、予測に影響を与え得る脳内の表象として運動イメージ (motor imagery) がある。運動イメージとは実運動を伴わずにある動きを想起するものであり、片麻痺患者に対するリハビリの研究[Kaneko, 2016]やブレインマシンインタフェースに対する自己主体感の獲得についての研究[Evans, 2015]などで多く議論されている。本研究の実験においても、運動を実行する前に意識的な運動イメージを想起していた可能性が高く、円運動という運動の性質や、視覚的対象の見た目や向きはこのイメージのしやすさに影響したのではないかと考えられる。

また第 6 章の研究では運動伝染によって無意識的にモーターコマンドを変調することで生じた運動結果を被験者が予測通りでない運動であるとみなし、疑似的な外力知覚が生じ

ることが確認された。この結果からも無意識的に行われる運動学習と意識的に構築される運動予測との間に乖離があることが推察される。

これらの結果をまとめると、運動に対する意識的な予測は過去の経験の蓄積や運動結果のイメージのしやすさなど様々な要因が関与しており、意識的な予測の構築過程は内部モデルで無意識的に行われる運動学習の結果のみによって構築されるわけではないと考えられる。この結果は2.3.2節で述べた先行研究を支持しているといえる。

また意識的な運動予測は自己帰属感や Pseudo-haptics を内観的に感じるかに大きく関与し、無意識的な運動学習は運動の精度の向上に大きく関与すると考えられる。したがって、能動的運動に伴う運動予測についてより詳細に明らかにするには、無意識的な運動学習の過程と意識的な運動予測の構築過程を別々に分析し、それらの関係性を詳細に明らかにする必要があると考えられる。また実身体とは異なる拡張身体に対して自己帰属感を感じ、それを自在に操ることが出来るインタフェースをデザインする上では、意識的に予測する結果と無意識的に学習によってもたらされる結果とを一致させる条件の解明と一致しないことによってどのような解釈が生じ得るかの検証が重要な意味を持つと考えられる。

本研究の今後の展望としては、実身体と空間的整合性のない視覚的な動きに対して内観的に自己帰属感を感じる条件と、高精度の運動結果を生み出せるようになる条件を個別に検証し、得られた検証結果と既存の運動学習に関する事例を基に、実身体の運動と空間的に整合しないバーチャル空間上のアバターの運動に対する意識的・無意識的な学習結果が一致するために必要な条件と、学習の過程で両者が一致しない時にどのような心理や行動が誘発されるのかを詳細に明らかにしたい。

7.2.2 スポーツおよびリハビリテーション支援技術への応用

本研究では、自己運動と視覚的運動との関連性の認知における運動予測の影響に注目し、自己帰属感と Pseudo-haptics の2つを例にとり、「運動予測と視覚的運動の一致性の認知」という同軸上の視点からこれら2つの生起過程について検証した。その結果、自己帰属感を高める上では運動予測と視覚的運動とが一致性していると認知することが重要であり、疑似的な外力を知覚する上では運動予測と視覚的運動との差を認知することが重要であるということが確認された。この結果から考察するに、自己帰属感と外力としての Pseudo-haptics は相対的な関連性であり、自己帰属感が感じられにくくなることが疑似的な外力知覚の要因となっていると考えられる。ただし、2.2.3で述べたように Pseudo-haptics を感じる上ではある程度の自己帰属感を感じている状態にあることが前提となると考えられる。本節では、

この Pseudo-haptics と自己帰属感の運動予測に基づいた関連性を基に、本研究で得た知見をスポーツおよびリハビリテーションを支援する技術にどのように展開できる可能性があるかを議論する。

近年、運動支援技術としてアクチュエータなどによって外部から人の運動を支援する技術の開発が盛んに行われている。また実身体で行える運動の限界を超えた運動をバーチャル空間上で体験することで運動機能向上を促す技術の開発が盛んに行われている。このような実身体で行える運動の限界を超えた運動の体験は実身体の運動能力の向上や改善に効果があることが広く知られており、リハビリテーションなどで取り入れられてきた[Yavuzer, 2008]。Kasahara らは HMD を用いたバーチャル空間で提示される自己身体表現を時間的に操作することで人の物理的な運動や身体感覚に対する内観的な評価がどう変化するかを調べた[Kasahara, 2017]。彼らの研究で興味深い点は、従来の時間操作を用いた研究のように視覚的身体の運動を遅延させるだけでなく、動きを推定することによって被験者が行うであろう近傍未来の視覚的運動の提示を行っている点である。研究の結果、視覚的運動の時間操作によって物理的な運動が変化し、近傍未来の運動を観察した場合はリアルタイムの運動を観察する場合よりも運動量が向上する傾向が見られた。また、身体感覚に対する内観的な評価にも変化が見られ、過去の運動を観察した場合は「身体の重さや調子の悪さ」を感じる一方で、推定された未来の運動を観察した場合は「身体の軽さや調子の良さ」を感じることが確認された。また、研究[Nishida, 2017]では、視覚情報に基づく反応時間よりも速い応答性の運動を生成するシステム“Wired Muscle”が紹介されている。一般的に人が視覚情報に反応して運動を開始するまでには約 250ms ほどの時間を要することが知られている。このシステムでは EMS(電気筋肉刺激)を用いることで自分の意図通りであるが本来の能力よりも速くに筋肉を動かすことが出来る。システムを用いたパイロットスタディでは視覚刺激に対する反応時間が約 60ms ほど短縮される結果が得られた。またシステムを使用した一部の参加者は、運動が電氣的に駆動されても、運動感覚反応が自分の意志で行われたこと錯覚したと報告されている。

本研究では自己帰属感を感じる上で視覚情報と力覚情報とが一致することが必ずしも重要ではないことが確認された。したがって前述したようなアクチュエータによって運動がアシストされた状態や VR 技術によって運動が拡張された状態であっても、運動予測と運動結果とが一致すると認知できれば、外力によるアシストを許容して、自分自身の運動として自己帰属感を感じられるようになると考えられる。しかし一方で、拡張された運動に自己帰属感が生起することで実身体に対する自己帰属感や運動に影響が生じる可能性もある。例えば、アシストされた運動に対して慣れた後に、アシストが解除されるとアシストを考慮し

た運動予測と実身体の運動結果とに不一致が生じ、実身体に対する自己帰属感が低下する可能性がある。またそれにより疑似的な外力知覚が生じたり、実身体の運動の精度が低下する可能性が考えられる。

特に野球の投球精度の向上や、筆記、タイピング、マウス操作などの作業療法では、運動予測と運動結果の一致性をより正確に認知し自己帰属感を高めることで運動精度を向上させることが重要となり、これらを支援する技術をデザインする上では、アシストしている時としていない時とで、運動予測と運動結果との一致性をどのように維持するかが重要な要因となると予想される。こうしたデザインに、本研究の知見が具体的にどう活かせるかを示すためには更なる検証を行う必要があるが、本研究で行った運動予測の変調のようにユーザの運動予測を上手くコントロールすることが運動精度を向上させる支援技術をデザインする上においても重要な意味を持つと考えられる。このような支援技術への応用を目指した本研究の今後の展望としては、まず拡張された運動に慣れた状態からその拡張が解除された場合に実身体に対する自己帰属感や運動精度が時間的にどう変化するかを検証する。これによって拡張された運動に慣れることが実身体の運動にどのような影響を与えるのかを分析し、その結果を運動予測や運動記憶の固定化などの先行研究での知見を交えて考察する。その後は得られた知見を基に運動精度の向上を目的としたアクチュエータ技術やVR技術のプロトタイプの開発を試みる。

第8章 結論

本論文では能動的運動時における自己運動と視覚的運動との関連性の解釈に自己の運動に対する予測がどのように関与するのかを解明すること目的とした研究の成果について述べた。具体的には、自己帰属感の生起と Pseudo-haptics の生起の2つを取り上げてこれらの生起に対する「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」による影響を検証した。「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」の有効性は先行研究においても主張されてきたが、「視覚と力覚間の一貫性の認知」と混同された状態で曖昧に理解されており、能動的運動時の運動の認知に運動予測が具体的にどう関与するのかは未解明のままであった。そこで本研究では「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一貫性の認知」を分離した検証を行うことで自己運動と視覚的運動との関連性の解釈における運動予測による具体的な影響の調査を試みた。

第1章では、これまでの研究によって示唆されている身体感覚を利用したインタフェースの有効性およびその発展と認知科学的視点からの運動予測の重要性についてまとめ、自己の運動と視覚的運動の関連性の解釈メカニズムの解明の必要性を説明した。その上で本研究の目的および本論文の構成について述べた。

第2章では、自己運動と視覚的運動結果との関連性の認知に関係する自己帰属感と Pseudo-haptics についての先行研究を整理し、本研究で取り組む研究対象について説明した。

第3章では、本研究の目的について述べ、自己運動と視覚的運動との関連性の解釈によって生じる自己帰属感と Pseudo-haptics の生起過程について本研究での具体的な問題意識とその解決手法についてまとめた。

第4章では、実身体の運動と視覚的運動に空間的不一致が生じても視覚的な運動結果を予測しやすくなった条件下で、身体運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する視覚情報と力覚情報の空間的不一致による影響を調査した。その結果、本研究の実験環境では視覚情報と力覚情報とに空間的不一致が生じることによる身体運動と視覚的運動との随伴関係の認知への影響は確認されなかった。この結果は運動結果を予測しやすければ、視覚的対象に自己帰属感を感じられるようになる過程において、身体運動と視覚的運動との空間的整

合性が必須条件ではないこと示唆するものである。

第 5 章では、映像内の視覚的対象を手の動きで操作する際の、実際の手の運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する運動の空間的不一致による影響が、実行する運動パターンの違いや視覚的対象の見た目によってどのように変化するかを調査した。その結果、円運動のように視覚的運動結果を予測しやすい条件では、第 4 章の結果と同様に空間的不一致が生じることによる身体運動と視覚的運動との随伴関係の認知に対する影響は確認されなかった。しかし、直線運動のように空間的不一致が生じることで運動結果を予測しにくくなる条件では運動の随伴関係の認知に差が生じることが確認された。また、視覚的対象の見た目によっても運動結果の予測のしやすさが左右されることが確認された。

第 6 章では、運動予測と視覚的運動結果との差を認知することが、Pseudo-haptics が外力として知覚される上での条件であるという仮説を立て検証を行った。この検証方法として、被験者の運動に意図しない運動を無意識化で誘発し、被験者が予測する運動と実際の運動結果が一致しない状況を作り出すことで、視・力覚間に不一致が生じない状況であっても被験者が疑似的な外力を感じるかを調査した。その結果、誘発された意図しない運動伴った外力を被験者が感じることを確認した。この結果から、Pseudo-haptics が外力として知覚される要因は運動予測と知覚された運動結果との不一致にあること示唆された。

第 7 章では 各研究で得られた知見から本研究で得られた学術的知見と今後の展望について議論した。

第 4 章から第 6 章で示した 3 つの研究の結果から自己帰属感と Pseudo-haptics の生起過程のそれぞれについて運動予測と視覚的運動結果との一致性を認知することの有効性が示唆された。各研究で得られた主な学術的知見は以下の 3 つである。

- 第 4 章：運動予測が働くことによる視覚と力覚間の空間的不一致の許容可能性の発見
- 第 5 章：運動予測の構築要因の多様性の発見
- 第 6 章：運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知による解釈への影響の発見

これら 3 つの知見を要約すると、以下のようになる。

能動的運動時には、自身が意図的に身体を動かすことで生じる視覚的な運動結果をあらかじめ予測している。この時、その予測と視覚的運動結果が一致していれば、視覚と力覚間で知覚された運動結果に空間的不一致生じている状況であっても自己運動と視覚的運動が連動していると解釈可能である。また、この運動予測は単に運動を実行するときに生じる脳からの運動指令によってのみ得られる訳ではなく、過去の経験に基づいて構築される意識的な運動に対するイメージなどが関与していると考えられる。さらに、運動予測と視覚的運動結果との一致性が高いことが視覚的対象が自分に連動しているという自己帰属感を感じ

やすくさせ、一致性が低く自己帰属感を感じにくくなることが疑似的な外力知覚の要因となり得る。

これらの知見をまとめた本研究全体の結論は以下のようになる。

能動的運動時の自己運動と視覚的運動との関係性の認知には、意図的に体を動かすことで生じる運動予測と視覚的に捉えた対象の運動結果との一致性の認知が重要な役割を果たしている。この時、視覚と力覚間の感覚間統合からも運動の関連性の認知を行うことが出来るはずだが、運動予測と結果が一致しているか否かの方が優先的に利用されると考えられる。また、この運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知が自己の身体や身体の周りで生じた運動や現象を解釈する上での重要なファクターとなっているといえる。

本論文全体の学術的貢献は、これまで混同された状態で曖昧に理解されてきた「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」と「視覚と力覚間の一致性の認知」を分離して検証を行ったことで、自己運動と視覚的運動との関連性を認知し自己帰属感や Pseudo-haptics などの解釈が生じる上での、運動予測が与える具体的な影響についての知見を提供したことがある。

本論文が提供する知見の限界として、大きく分けて2つの課題が存在すると考える。1つは本研究で明らかにした運動予測が与える解釈メカニズムについての知見が自己帰属感や Pseudo-haptics が生起するか否かに留まっていることである。本研究では自己帰属感と Pseudo-haptics における疑似的な外力知覚が「運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知」という同じ軸によって評価できるという知見を示したが、各知覚の度合いについての評価や、運動が自己に全く帰属されなくなる境界については具体的に明らかにできていない。もう1つの課題は、本研究での知見はすべて単純な上肢運動を用いた評価によって導かれた結果に留まっていることである。本研究で得た知見の具体的な応用を示すためには、全身運動や指先の細かな運動などより複雑な運動での検証を行う必要があると考える。しかし、応用的な研究を発展させていく上で、本研究で行ったような基礎的な環境での検証は必要不可欠であり、基礎的な内容に焦点を絞ったからこそ巨視的な視点からでは明らかにできなかった課題を明らかにすることができたと考えられる。本研究を通して判ったことは決して多くはないが、HCI の分野における難しくかつ重要な課題の一端の重要な一歩となる知見を提供している。

今後の展望として、本研究で得た知見を基により包括的な検証を行い、運動予測の構築要因について詳細に明らかにし、スポーツおよびリハビリテーション支援技術などのインタフェース設計への応用を目指す。

謝辞

本論文は著者が明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻デジタルコンテンツ系博士後期課程および同大学大学院先端数理科学研究科博士後期課程在籍時に行った研究をまとめたものです。研究を遂行するにあたり、明治大学総合数理学部福地健太郎教授には多大なご指導を賜りました。論文執筆のアドバイスや研究についての議論などの直接的なご指導をいただいただけでなく、研究の進め方から論文の執筆、対外発表に対する留意点など、多くのことをご指導ご鞭撻いただきました。心より感謝を申し上げます。

明治大学総合数理学部宮下芳明教授には、明治大学理工学部所属の頃から指導して頂いており、これまでの研究について何度も議論していただきました。さらに本論文の審査を快く引き受けていただきました。

明治大学総合数理学部渡邊恵太准教授には、急なお願いだったにも関わらず本論文の審査を快く引き受けていただきました。また、研究を遂行するにあたって多くの着想を渡邊准教授のこれまでの研究から得ており、本論文を執筆や研究の実験設計をするにあたり渡邊准教授が発表されてきた多くの研究を参考にさせていただきました。

福地研究室の皆様には、研究室ゼミナールなどを通して研究について多くの議論をさせて頂きました。また評価実験のたびに快く参加していただきました。福地研究室の卒業生の皆様にも大変お世話になりました。心より感謝いたします。

明治大学大学院理工学研究科建築・都市学専攻総合芸術系の波戸岡景太教授には新学部への転科に際して、博士後期課程1年時の指導教員を担当していただきました。心より感謝いたします。

明治大学大学院理工学研究科建築・都市学専攻総合芸術系の倉石信乃教授には、常に私の研究のことを気にかけて頂き、議論させていただきました。また博士前期課程時代には所属の違う私を快く研究室ゼミナールに引き入れて頂き、研究に対する多くの着想を得ることができました。心より感謝いたします。

明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス専攻の諸先生方には、研究について多くのご意見を頂きました。心より感謝いたします。

明治大学事務室の皆様には、明治大学の助手としての勤務や様々な手続きで大変お世話になりました。ありがとうございました。

本研究の一部は JST, CREST, JPMJCR17A3 の支援を受けました.

最後に, 現在に至るまでずっと応援し続けてくれた両親と兄に, 心より感謝を申し上げます. 博士後期課程への進学を理解していただき, また健康や精神面など多くのところで私を支え続けていただきました. ありがとうございました.

参考文献

[Accot, 1997]

Accot, J. and S. Zhai. 1997. Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. In Proc. of CHI '97, 295–302.

[Accot, 1999]

Accot, J. and S. Zhai, 1999. Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law. In Proc. of CHI '99, 466–472.

[Anstis, 1987]

Anstis, S. and V. S. Ramachandran. Visual inertia in apparent motion. *Vision Research*, 27, 755–764.

[Argelaguet, 2013]

Argelaguet, F., D. Jauregui, M. Marchal, and A. Lécuyer. Elastic images: Perceiving local elasticity of images through a novel pseudo-haptic deformation effect. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, Vol. 10, No. 3, p. 17.

[Argelaguet, 2016]

Argelaguet, F., M. Trico, L. Hoyet, and A. Lécuyer. The Role of Interaction in Virtual Embodiment. Effects of the Virtual Hand Representation; In Proc. of IEEE VR 2016, 3-10.

[Asai, 2007]

浅井智久, 丹野義彦. 自己主体感における自己行為の予測と結果の関係 — 行為主判別に対する学習課題を用いた検討. *パーソナリティ研究*, 第 16 巻, 第 1 号, 56-65.

[Asai, 2009]

浅井智久, 高野慶輔, 杉森絵里子, 丹野義彦. 自己主体感を測定する尺度の開発と因子構造の探索. *心理学研究*, 第 80 巻, 第 5 号, 414-421

[Ban, 2012A]

Ban, Y., T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying an identified position of edged shapes using pseudo-haptic effects. *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 93–96.

[Ban, 2012B]

Ban, Y., T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying an identified angle of edged shapes using pseudo-haptic effects. *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 25–36.

[Ban, 2012C]

Ban, Y., T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. *2012 IEEE Haptics Symposium*, pp. 211–216.

[Ban, 2013]

Ban, Y., T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying perceived size of a handled object through hand image deformation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 22, No. 3, pp. 255–270.

[Ban, 2015]

Ban, Y., T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. High-definition digital display case with the image-based interaction. *IEEE Virtual Reality 2015*, pp. 149–150.

[Blakemore, 2005]

Blakemore, S. J. and C. Frith. The role of motor contagion in the prediction of action. *Neuropsychologia*. 2005; 43(2):260-7.

[Botvinick, 1998]

Botvinick, M. and J. Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, 391,756.

[Bouquet, 2011]

Bouquet, C.A, T. Shipley, R. L. Capa, and P. J. Marshall. Goal-Directed Actions Are More Contagious

than Non-Goal-Directed Actions. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 58 (1), 71–78.

[Brashers-Krug, 1997]

Brashers-Krug, T., R. Shadmehr, and E. Bizzi. Consolidation in human motor memory. *Nature*, 382, 252-255.

[Brozzoli, 2012]

Brozzoli, C., G. Gentile, and H. H. Ehrsson. That's near my hand! Parietal and premotor coding of hand-centered space contributes to localization and self-attribution of the hand. *Journal of Neuroscience*, 32 (42), 14573-14582.

[Daprati, 1997]

Daprati, E., N. Franck, N. Georgieff, J. Proust, E. Pacherie, J. Dalery, and M. Jeannerod. Looking for the agent: An investigation into consciousness of action and self-consciousness in schizophrenic patients. *Cognition*, 65, 71–86.

[Ehrsson, 2004]

Ehrsson, H. H., C. Spence, and R. E. Passingham. That's my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb; *Science*, 305, 875-877.

[Evans, 2015]

Evans, N., S. Gale, A. Schurger, and O. Blanke. Visual Feedback dominates the sense of agency for brain-machine actions. *PLoS ONE*, 10 (6), e0130019.

[Fitts, 1954]

Fitts, P. M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47 (6), 381–391.

[Gallagher, 2000]

Gallagher, S. Philosophical conceptions of the self. Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Science*, 4, 14–21.

[Hari, 1996]

Hari, R. and V. Jousmaki. Preference of personal to extrapersonal space in visuomotor task. *Journal of Cognitive* (1996).

[Hashiguchi, 2016]

橋口哲志, 片岡佑太, 柴田史久, 木村朝子. R-V Dynamics Illusion : 実物体と仮想物体の異なる運動状態が重さ知覚に与える影響. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 21, No.4, pp. 635–644.

[Hay, 1965]

Hay, J.C., H.L. Pick, and K. Ikeda. Visual capture produced by prism spectacles. *Psychonomic Science*, Vol. 2, No. 8, pp. 215–216.

[Honda, 2013]

Honda, T., N. Hagura, and H. Imamizu. Imposed visual feedback delay of an action changes mass perception based on the sensory prediction error. *Frontiers in Consciousness Research*, October 2013, Vol. 4, 760.

[Honda, 2018]

Honda, T., S. Nagao, Y. Hashimoto, K. Ishikawa, T. Yokota, H. Mizusawa, and M. Ito. Tandem internal models execute motor learning in the cerebellum. *PNAS*, 115 (28) 7428-7433.

[Ide, 2012]

井手正和, 長田佳久. 身体的制約がラバーハンドイリュージョンに及ぼす効果. *立教大学心理学研究*. 54, 13-20.

[Ikegami, 2014]

Ikegami, T. and G. Ganesh. Watching novice action degrades expert motor performance: Causation between action production and outcome prediction of observed actions by humans. *Scientific Reports* volume 4, Article number: 6989.

[Ikegami, 2018]

Ikegami, T., G. Ganesh, T. Takeuchi, and H. Nakamoto. Prediction error induced motor contagions in human behaviors. *eLife* 2018;7:e33392.

[Imamizu, 2000]

Imamizu, H., S. Miyauchi, T. Tamada, Y. Sasaki, R. Takino, B. Pütz, T. Yoshioka, and M Kawato. Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature*, 403(6766); 192-5.

[Imamizu, 2012]

今水寛. 「内部モデル- 脳科学辞典」, <<https://bsd.neuroinf.jp/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%83%A2%E3%83%87%E3%83%AB>>, 2018年10月25日アクセス.

[Ishii, 2015]

石井雅博. 上肢運動が多義的視運動刺激の知覚に及ぼす影響. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム EC2015.

[Jansen, 2017]

Jansen, O., T. A. Schildhauer, R. C. Meindl, M. Tegenthoff, P. Schwenkreis, M. S. Kaiser, D. Grasmücke, C. Fisahn, and M. Aach. Functional Outcome of Neurologic-Controlled HAL-Exoskeletal Neurorehabilitation in Chronic Spinal Cord Injury: A Pilot With One Year Treatment and Variable Treatment Frequency. *Global Spine Journal*, Volume 7, Issue 8, 735-743.

[Kaneko, 2016]

Kaneko, F., T. Inada, N. Matsuda, E. Shibata, S. Koyama. Acute Effect of Visually Induced Kinesthetic Illusion in Patients with Stroke. A Preliminary Report; *Int J Neurorehabilitation*, 3:212.

[Kasahara, 2017]

Kasahara, S., K. Konno, R. Owaki, T. Nishi, A. Takeshita, T. Ito, S. Kasuga, and J. Ushiba. Malleable Embodiment: Changing Sense of Embodiment by Spatial-Temporal Deformation of Virtual Human Body. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 6438-6448

[Kawato, 1999]

Kawato, M.. Internal models for motor control and trajectory planning. *Curr. Opin. Neurobiol*, 9(6); 718-27.

[Kilner, 2003]

Kilner, J. M., Y., Paulignan, and S. J. Blakemore. An interference effect of observed biological movement on action. *Current Biology*, 13, 522–525.

[Kilteni, 2013]

Kilteni, K., I. Bergstrom, M. Slater. Drumming in immersive virtual reality: the body shapes the way we play. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 19(4), 597-605.

[Kokubun, 2014]

Kokubun, A., Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Representing normal and shearing forces on the mobile device with visuo-haptic interaction and a rear touch interface. *Haptics Symposium 2014*, pp. 415–420.

[Koshinbo, 2011]

光真坊悟, 嶋田総太郎. 自己認識における身体映像の回転と遅延の与える影響. *Cognitive Studies*, 18(1), 41-49.

[Kulikov, 2005]

Kulikov, S., I. S. MacKenzie, and W. Stuerzlinger. Measuring the effective parameters of steering motions. In *Extended Abstracts of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '05)*, 1569–1572.

<https://doi.org/10.1145/1056808.1056968>

[Lécuyer, 2000]

Lécuyer, A., S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?. *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000*.

[Lécuyer, 2001]

Lécuyer, A., J. M. Burkhardt, S. Coquillart, and P. Coiffet. “Boundary of illusion”: an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. In *Proceedings IEEE Virtual Reality*.

[Lécuyer, 2004]

Lécuyer, A., J. M. Burkhardt, and L. Etienne. Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)*, vol. 6, 239–246.

[Lécuyer, 2009]

Lécuyer, A. Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 18, 39–53.

[Matsumoto, 2016A]

Matsumoto, K., Y. Ban, T. Narumi, Y. Yanase, T. Tanikawa, and M. Hirose. Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction, In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, 20.

[Matumoto, 2016B]

Matsumoto, K., Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Curvature manipulation techniques in redirection using haptic cues. *IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2016*, pp. 105–108.

[Mazzoni, 2006]

Mazzoni, P. and John W. Krakauer. An Implicit Plan Overrides an Explicit Strategy during Visuomotor Adaptation. *Journal of Neuroscience* 5, 26 (14) 3642-3645

[Mensvoort, 2008]

Mensvoort, K. V., D. J. Hermes, and M. V. Montfort. Usability of optically simulated haptic feedback. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 66, No. 6, pp. 438–451.

[Moody, 2009]

Moody, L., A. Waterworth, J. G. Arthur, A. D. Mc-Carthy, P. J Harley, and R. H. Smallwood. Beyond

the visuals: Tactile augmentation and sensory enhancement in an arthroscopy simulator. *Virtual Reality*, Vol. 13, No. 1, pp. 59–68.

[Nagao, 2017]

Nagao, R., K. Matsumoto, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Infinite stairs: Simulating stairs in virtual reality based on visuo-haptic interaction. *SIGGRAPH2017 Emerging Technologies*.

[Narumi, 2011]

Narumi, T., S. Nishizaka, T. Kajinami, T. Tanikawa, and M. Hirose. Augmented reality flavors: Gustatory display based on edible marker and cross-modal interaction. *Proc. of the 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 93–102.

[Narumi, 2012]

Narumi, T., Y. Ban, T. Kajinami, T. Tanikawa, and M. Hirose. Augmented perception of satiety: Controlling food consumption by changing apparent size of food with augmented reality. *CHI2012*, pp. 109–118.

[Narumi, 2014]

Narumi, T., M. Miyaura, T. Tanikawa, and M. Hirose. Simplification of olfactory stimuli in pseudogustatory displays; *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 504–512.

[Narumi, 2017]

鳴海拓志. Pseudo-haptics 応用インタフェースの展望 — 疑似触力覚提示からその先へ. *システム／制御／情報*, 61 巻, 11 号, 463-468.

[Nishida, 2017]

Nishida, J., S. Kasahara, and K. Suzuki. Wired Muscle: Generating Faster Kinesthetic Reaction by Inter-personally Connecting Muscles. *SIGGRAPH '17 Emerging Technologies*, July 30 - August 03, 2017, Los Angeles, CA, USA

[Ogawa, 2016A]

小川奈美, 伴祐樹, 櫻井翔, 鳴海拓志, 谷川智弘, 廣瀬通孝. えくす手 : 変調バーチャルハンドへの即応的な身体所有感の生起による身体拡張システム. 情報処理学会 インタラクション 2016.

[Ogawa, 2016B]

Ogawa, N., Y. Ban, S. Sakurai, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Metamorphosis Hand. Interactive Experience of Embodying Virtually Transformed Hands, Virtual Reality International Conference (VRIC 2016), Laval, France.

[Omosako, 2013]

面迫宏樹, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行. Shape-COG Illusion : 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象(第2報). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 117–120.

[Ono, 2016]

小野哲夫. 「プロジェクションサイエンス」の視点からの認知的メカニズムのモデル論的理解. 日本認知科学会第33回大会, OS03-2.

[Punpongsanon, 2015]

Punpongsanon, P., D. Iwai, and K. Sato. Soft AR: Visually manipulating haptic softness perception in spatial augmented reality. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 21, No. 11, pp. 1279–1288.

[Pusch, 2008]

Pusch, A., O. Martin, and S. Coquillart. HEMP – Handdisplacement-based pseudo-haptics: A study of a force field application. IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2008, pp. 59–66.

[Pusch, 2011]

Pusch, Y. and A. Lécuyer. Pseudo-haptics. from the theoretical foundations to practical system design guidelines. Proceedings of the 13th International Conference on Multimodal Interfaces, pp. 57–64.

[Ramachandran, 1995]

Ramachandran, V. S., D. Rogers-Ramachandran, S. Cobb. Touching the phantom limb. *Nature*. 1995 Oct 12; 377(6549):489-90.

[Rock, 1964]

Rock, I., and J. Victor. Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science*, Vol. 143, No. 3606, 594–596.

[Salomon, 2016]

Salomon, R., N. B. Fernandez, M. van Elk, N. Vachicouras, F. Sabatier, A. Tychinskaya, J. Llobera and O. Blanke. Changing motor perception by sensorimotor conflicts and body ownership. *Scientific Reports* 6, Article number: 25847.

[Sasaki, 2017]

Sasaki, T., m. y. Saraiji, C. L. Fernando, K. Minamizawa, and M. Inami. MetaLimbs: multiple arms interaction metamorphism. *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*.

[Sekiyama, 2006]

Sekiyama, K. Dynamic spatial cognition: Components, functions, and modifiability of body schema. *Japanese Psychological Research*, 48 (3), 141–157.

[Senanayake, 2016]

Senanayake, R. and R. S. Goonetilleke. Pointing device performance in steering tasks. *Perceptual and Motor Skills*, 122 (3), 886–910.

[Shepard, 1971]

Shepard, R. N. and Metzler, J.. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701–703.

[Shigeyama, 2017]

Shigeyama, J., N. Ogawa, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: Presenting pseudo-haptic feedback in immersive VR environment by modifying avatar's joint angle; *IEEE World Haptics 2017*.

[Shimada, 2009]

Shimada, S., K. Fukuda, and K. Hiraki. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PLoS ONE*, 4, e6185

[Shimada, 2010]

Shimada, S., Y. Qi, and K. Hiraki. Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements. *Experimental Brain Research*, 201, 359–364

[Shimojo, 2003]

Shimojo, S., C. Simion, E. Shimojo, and C. Scheier. Gaze bias both reflects and influences preference. *Nature Neuroscience*, Vol. 6, No. 12, pp. 1317–1322.

[Shneiderman, 1983]

Shneiderman, B.. *Direct Manipulation: A Step Beyond Programming Languages*. *Computer*, vol.16, no. 8, 57-69.

[Short, 2010]

Short, F. and R. Ward. Virtual limbs and body space: Critical features for the distinction between body space and near-body space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1092–1103.

[Steinicke, 2008]

Steinicke, F., G. Bruder, L. Kohli, J. Jerald, and K. Hinrichs. Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback. *International Conference on Cyberworlds 2008*, 217–223, 2008.

[Steinicke, 2010]

Steinicke, F., G. Bruder, J. Jerald, and M. Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics archive*, Volume 16, Issue 1, 17–27.

[Sutherland, 2003]

Sutherland, I. E.. Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System (PhD thesis), preface by Alan Blackwell and Kerry Roddenphone. UK: University of Cambridge, ISSN 1476-2986, Technical Report No. 574, UCAM-CL-TR-574.

[Suzuki, 2016]

鈴木宏昭. プロジェクション科学の展望. 日本認知科学会第33回大会, OS03-1.

[Taima, 2014]

Taima, Y., Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Controlling fatigue while lifting objects using pseudo-haptics in a mixed reality space. Haptics Symposium 2014, pp. 175–180.

[Tanaka, 2016]

Tanaka, R., T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Guidance field: Potential field to guide users to target locations in virtual environments. 3DUI 2016, pp.39–48.

[Tsakiris, 2005]

Tsakiris, M., P. Haggard N. Franck, N. Mainy, and A. A. Sirigu. Specific role for efferent information in self-recognition. *Cognition*, Vol. 96, 3, 215–231.

[Tsakiris, 2007]

Tsakiris, M., S. Schütz-Bosbach, and S. Gallagher. On agency and body-ownership. *Phenomenological and neurocognitive reflections. Consciousness and Cognition*, 16, 645–660.

[Ueda, 2011]

上田祥代. 身体拡張に関わるメカニズムの検討: 受動的/能動的刺激入力による差異、および、ミラーシステムとの関連性. *人間文化創成科学論叢*, 14 217-226.

[Wang, 2017]

Wang, K., D. Iwai, and K. Sato. Supporting Trembling Hand Typing Using Optical See-Through Mixed Reality. *IEEE Transactions and Content Mining*, 5, 10700-10708..

[Watanabe, J., 2013]

Watanabe, J. Pseudo-haptic Sensation Elicited by Background Visual. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, vol. 1, no. 2, 199–202.

[Watanabe, J., 2017]

渡邊淳司. Haptic Design における Pseudo-haptics 技術の役割 および表現分野での事例紹介. *システム／制御／情報*, 61 巻, 11 号, 459-462.

[Watanabe, K., 2007]

Watanabe, K. and M. Yasumura. Flexible brush: A realistic brush stroke experience with a virtual nib. *Adjunct Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 47–48.

[Watanabe, K., 2008]

Watanabe, K. and M. Yasumura. VisualHaptics: generating haptic sensation using only visual cues. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, vol. 246, 405.

[Watanabe, K., 2012]

Watanabe, K., F. Higuchi, M. Inami, and T. Igarashi. CursorCamouflage: multiple dummy cursors as a defense against shoulder surfing. *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, Article No. 6.

[Watanabe, K., 2013-A]

渡邊恵太, 樋口文人, 稲見昌彦, 五十嵐健夫. 複数ダミーカーソル中における自分自身のカーソル特定. *情報処理学会インタラクショナル論文集*, 25-31.

[Watanabe, K., 2013-B]

渡邊恵太, 樋口文人, 稲見昌彦, 五十嵐健夫. SymmetricCursors: 対称的に動くダミーカーソルによる入力操作の隠蔽. *情報処理学会インタラクショナル論文集*, 255-256.

[Watanabe, K., 2015]

渡邊恵太. 融けるデザイン —ハードソフト×ネット時代の新たな設計論 ; ビー・エヌ・

エヌ新社, 161p.

[Watanabe, K., 2017]

渡邊恵太. 自己帰属感とインタフェースデザイン. 基礎心理学研究 第 36 卷 第 1 号, 117-118

[Watanabe, S., 2016]

渡邊翔太, 川合伸幸. 自己身体と操作対象の身体図式の一致はより強い運動主体感・身体所有感を喚起する. 日本認知科学会第 33 回大会, OS03-4.

[Watanabe, T., 2011]

Watanabe, T., K. Inose, M. Ando, T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa and M. Hirose. Digital display case: A study on the realization of a virtual transportation system for a museum collection. The 14th International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 206–214.

[Wertheimer, 1912]

Wertheimer, M.. Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. Zeitschrift für Psychologie. 61, 161-265.

[Wolpert, 1995]

Wolpert, D. M., Z. Ghahramani, and M. I. Jordan. 1995. An Internal model for sensorimotor integration. Science, 269, 1880-1882.

[Yamanaka, 2017]

Yamanaka, S., W. Stuerzlinger, and H. Miyashita. Steering Through Sequential Linear Path Segments. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17), 232-243.

[Yavuzer, 2008]

Yavuzer, G., R. Selles, N. Sezer, S. Sütbeyaz, J. B. Bussmann, F. Köseoğlu, M. B. Atay, and H. J. Stam. Mirror Therapy Improves Hand Function in Subacute Stroke: A Randomized Controlled Trial. Arch Phys Rehabil 89: 393-398.

[Yoshida, 2013]

Yoshida, S., S. Sakurai, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Manipulation of an emotional experience by real-time deformed facial feedback. *Augmented Human 2013*, pp. 35–42

[van den Bos, 2002]

van den Bos, E. and M. Jeannerod. Sense of body and sense of action both contribute to self-recognition. *Cognition*, 85, 177-187.

本研究に関する発表

査読付き学術論文 (2件)

- [1] 齊藤寛人, 福地健太郎. 視覚的運動の予測可能性が自己帰属感の生起過程に及ぼす影響の調査, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.20, No.3, pp.301-310, 2018.
- [2] 齊藤寛人, 福地健太郎. 能動的回転操作における自己帰属感の生起過程の分析, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22 No.1, pp.81-90, 2017.

査読付き国際会議 (2件)

デモ・ポスター発表

- [3] Hiroto Saito, Kentaro Fukuchi. The Effect of Predictability of Visual Motion from Motor Commands on the Recognition Process of Self-Attribution. Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Paper No. LBW124, 2018.
- [4] Hiroto Saito, Kentaro Fukuchi. Analysis of Identification Process of Self Image from Multiple Silhouetted Images. Adjunct Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Visual Interfaces, Paper No. Demo09, 2014.

査読付き国内会議 (2件)

口頭発表

- [5] 齊藤寛人, 福地健太郎. 自己帰属感の生起過程におけるモーターコマンドからの予測可能性による影響の調査, インタラクション 2018 論文集, pp.25-34, 2018.

-
- [6] 齊藤寛人, 福地健太郎. 自己帰属感の生起過程におけるモーターコマンドからの予測可能性による影響の調査, インタラクション 2019 論文集, 採択済み