

視覚運動回轉變換環境下における受動的運動経験が
身体図式および内部モデルに
及ぼす影響に関する研究

A study on effects of passive motor experience under visuomotor rotation on body
schema and internal model.

坂本 貴史

Takashi SAKAMOTO

(2014 年度入学, 14834303)

指導教員 近藤敏之 教授

東京農工大学大学院 工学府 電子情報工学専攻
2016 年度博士論文

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	感覚運動適応に関する従来研究	2
1.2.1	運動制御のメカニズム	2
1.2.2	内部モデルの獲得	3
1.2.3	到達運動の制御モデル	6
1.2.4	受動的な運動	7
1.2.5	本研究の目的	12
1.3	本論文の構成	14
第 2 章	受動的な運動経験が内部モデルの獲得におよぼす影響	15
2.1	はじめに	15
2.2	実験 1	16
2.2.1	被験者	16
2.2.2	実験課題	16
2.2.3	実験手順	18
2.2.4	分析方法	20
2.3	実験結果	21
2.4	考察	25

目次

第 3 章	運動企図のある受動的運動が視覚運動回轉變換学習におよぼす影響	28
3.1	はじめに	28
3.2	実験 2	29
3.2.1	被験者	29
3.2.2	実験手順	29
3.3	実験結果	30
3.4	考察	34
第 4 章	受動的運動が身体図式の変化に及ぼす影響	37
4.1	はじめに	37
4.2	実験 3	38
4.2.1	被験者	38
4.2.2	実験課題	38
4.2.3	実験手順	39
4.2.4	分析方法	43
4.3	実験結果	44
4.3.1	考察	50
第 5 章	運動指令の生成および視覚誤差が運動学習に及ぼす影響	53
5.1	はじめに	53
5.2	実験	54
5.2.1	被験者	54
5.2.2	実験手順	54
5.3	実験結果	56
5.3.1	考察	62
第 6 章	考察	64
6.1	受動的な運動が身体に及ぼす影響	64

目次

第 7 章 結論	71
謝辭	74
参考文献	75

第1章

序論

1.1 はじめに

日常生活を送る上で、我々は種々の複雑な運動を意識せずに行っている。コップを手取る、箸で物体を掴むなど、我々は目的を達成するために身体を巧みに操り、外部世界に働きかけることができる。

これらの動作を行う際、我々の周囲の外部環境は絶え間なく変化している。時には、未経験の環境に直面することも少なくない。それにもかかわらず、我々は意図した身体運動を滞りなく実行できる。すなわち、我々の脳は対象物体の物理特性や周囲環境の動的変化を考慮し、身体運動の精確な制御を実現することができる。

人間の脳は、眼や耳といった身体各部の感覚器官からの情報を統合し、適切な運動指令を実時間で計算することで筋骨格系を制御する。このとき、感覚情報や運動指令、筋骨格系などを関連付けるモデルが脳内に必要となるが、これを身体図式と呼ぶ。ここで、複数の感覚情報の間、例えば視覚と体性感覚の間に大きな矛盾が生じた場合、意図した身体運動の生成は困難になる。しかしながら、その状況下で反復的に身体運動を経験することで、身体図式は適切な形に可塑的に変化する。

新たな環境に対する脳の適応能力は、脳疾患などにより一部の脳内神経回路に問題が生じ、結果的に運動機能障害が発現した場合にも発揮される。例えば、運動麻痺患者のり

ハビリテーションでは、特定の身体運動に対する適切な感覚入力を作業療法士が繰り返し患者に与えることで新たな身体図式の獲得を促し、運動機能の再建を図る。

このような脳の適応的変化過程については、古くから調査されてきた。しかしながら、この未経験環境への適応を実現する脳の情報処理メカニズムは未だ解明されていない。本研究では、心理物理実験を通じて、このような脳の情報処理メカニズムについて調査する。具体的には、上肢到達運動を例に取り上げた視覚運動変換学習実験を行い、その学習過程について考察する。

本章では、まず、次節で人間の感覚運動適応に関する従来研究の概要について説明し、その課題点について述べる。次に、課題点を踏まえた上で、1.3 節で本研究の目的を述べる。最後に、1.4 節で本論文の次章以降の構成を述べる。

1.2 感覚運動適応に関する従来研究

1.2.1 運動制御のメカニズム

人間が身体を動かすとき、たとえそれが単純な動作であったとしても、脳は非常に複雑な計算処理を行わなければならない。たとえば、目の前にあるコップを手にとるという動作を例に取り上げて考えてみる。まず、中枢神経系は視覚情報から手を伸ばす目標位置の座標を決定し、目的を達成し得る無数に存在する軌道の中から、軌道を一意に決定しなければならない。次に、視覚座標系で決定された軌道を身体座標系へ座標変換しなければならない。そして、身体座標系で表現された軌道を実現するための身体各部のトルクや筋の張力を適切に制御しなければならない。随意運動の制御において、少なくともこれらの問題を脳は処理している [1][2]。

中枢神経系の運動制御系は、フィードバック制御系とフィードフォワード制御系の 2 つが考えられている。フィードバック制御の場合、中枢神経系は感覚情報を用いて、実際の軌道と目標軌道の誤差を減らすように実時間で運動指令の修正を行う。一方、フィードフォワード制御では、中枢神経系は感覚情報を必要とせず、運動の目標状態の情報の

みを用いて、その実現に必要な運動指令を算出する。人間の運動制御において問題となるのは、感覚フィードバックの時間遅れである。目や筋紡錘といった感覚器から中枢神経系への信号伝達には数十～数百 ms 程度の時間を要するため、数百 ms 程度で終了する速い運動をフィードバック制御のみで実現することは困難である。そのため、人間が素早く滑らかな運動を行う場合にはフィードフォワード制御が主に働くと考えられている [3, 4]。これに対し、フィードバック制御は突然の外乱への対処や、運動の終端位置のゆっくりとした修正動作に用いられる。

この 2 つの制御において、目標軌道を実現する運動指令を生成するためには制御対象に関するモデルが脳内に表象されていなければならない。このような、脳内に表象される感覚運動連関の内部表現は内部モデルと呼ばれる。内部モデルには、制御対象と同じ入出力関係を持つ順モデルと、その逆の関係を持つ逆モデルの 2 種類があると考えられている。順モデルは中枢神経系が生成した運動指令を受け取り、その感覚結果を予測する。一方、逆モデルは目標状態から必要な運動指令を算出する。この 2 種類の内部モデルの存在を仮定することで、フィードフォワード制御とフィードバック制御を行うことができる [4, 5]。

身体や外部環境が常に激しく変化していることから考えれば、内部モデルは先天的に備わった機能ではなく、学習によって後天的に獲得・修正されることが予想される。

1.2.2 内部モデルの獲得

内部モデルの獲得メカニズムに関しては、近年、様々な心理物理実験によって調査されてきた。多くの先行研究では上肢到達運動のような単純な運動を例に取り上げ、仮想力場環境や視覚運動変換環境への適応過程について調査することで、そのメカニズムについて考察している。本項では、代表的な 2 つの研究事例について概要を述べる。

一つ目は、Shadmehr らによる回転粘性力場下での上肢到達運動学習実験である [6]。彼らの実験においては、被験者は水平面上の上肢到達運動を回転粘性力場下で繰り返し学習する。回転粘性力場環境は、手先速度に比例する外力が手先の進行方向とは異なる

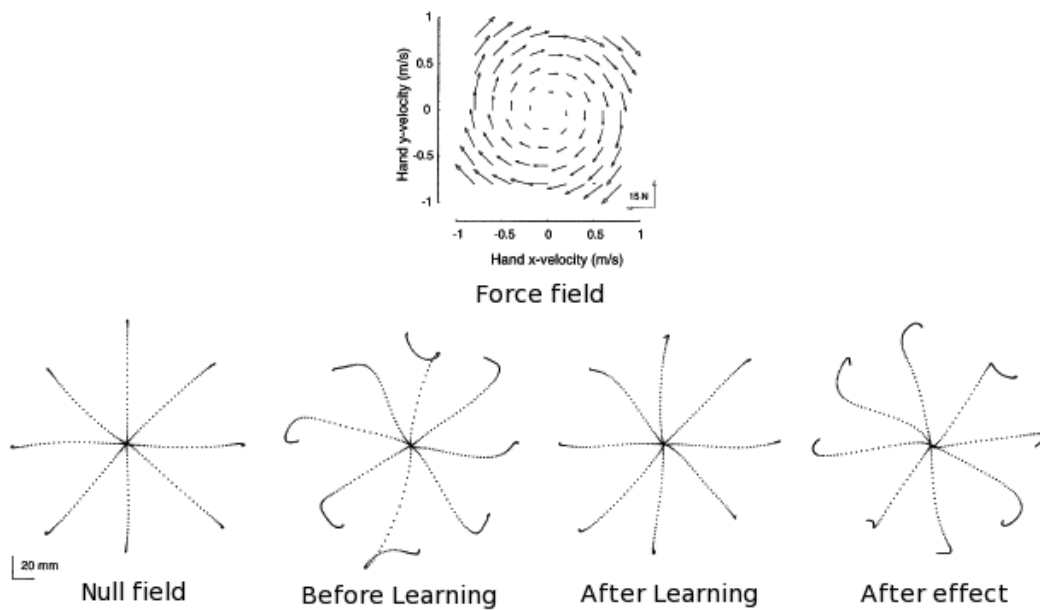


図 1.1 An example of the imposed force field and the resulting movements.
(adapted from [6])

方向に加わる環境である。そのため、学習初期においては、被験者は腕を直線的に動かすことができない。しかしながら、このような環境下で運動を繰り返し経験することで、被験者は外力を補償するような筋力の生成を学習し、まっすぐな到達運動を行えるようになる。ここで力場を突然取り去った場合、到達運動の軌道は外力と反対の方向に曲がる。これはアフターエフェクトと呼ばれ、外力を予測するための内部モデルを被験者が学習し、それによるフィードフォワード制御を行っていることを意味する (図 1.1)。

この実験において、Shadmehr らは、相反する 2 つの回転粘性力場の内部モデルは同時に学習できないことを実験的に示した。例えば、相反する回転粘性力場 A・B での上肢到達運動をそれぞれ課題 A・課題 B とする。まず、すべての被験者に課題 A を学習させ、その 5 min~24 h 後に半数の被験者に課題 B を学習させる。その 1 週間後にすべての被験者に再び課題 A を行わせる。このとき、2 つの課題の内部モデルが並行に獲得されていたのであれば、力場を突然取り去った際にすべての被験者が課題 A のアフターエフェクトを示すはずである。しかしながら、短期間 (5 min ~ 6 h) の間に 2 つの課題を経験した被験者においては、課題 A のアフターエフェクトは示されなかった。この結果

は、課題 B の経験が課題 A の内部モデルの長期記憶への定着を阻害したと解釈することができ、内部モデルの獲得には少なくとも短期的と長期的という段階がある可能性を示唆している。なお、内部モデルが長期記憶として定着することは強化 (consolidation) と呼ばれ、現在も様々な心理物理実験を通して検証が行われている。

このように、相反する 2 つの力場の経験が互いの内部モデルの学習に影響を及ぼし合う現象は干渉 (interference) と呼ばれ、相反する実験課題 A・B を被験者に交互に学習させる実験パラダイム (ABA パラダイム) を通じて広く調査されている。

一方、上述したような力場環境の内部モデル学習ではなく、新たな視覚環境の内部モデル学習についても着目されている。例えば、Krakauer らによる相反する 2 つの視覚運動回転変換下での手先到達運動学習実験があげられる [7]。この実験においては、被験者はスクリーン上に提示された手先と連動して動くカーソルによる到達運動を、手先位置とカーソル位置の間に回転変換が課された状況下で繰り返し学習する。回転粘性力場が課された場合と同様に、学習初期においては、被験者は意図したとおりの到達運動を行うことはできない。しかしながら、被験者は運動を繰り返すことで視覚運動変換環境の内部モデルを学習し、新たな座標系で自在に到達運動を行うことが可能となる。

この実験では、Krakauer らは上述した Shadmehr らの実験パラダイムと同様に、 $\pm 30^\circ$ の視覚運動回転変換下で行う到達運動課題 A と B を交互に連続して学習する被験者群と、課題 A のみ行う被験者群を用意した。課題 A と課題 B の内部モデルを同時に保持することができるのであれば、課題 B の後に再び課題 A に直面した際、すべての被験者が初期段階から低い運動誤差で到達運動を行うことができる。しかしながら、課題 B を経験した被験者は、後に課題 A を行う際に大きな初期運動誤差を示した。この結果は、力場の内部モデル学習だけではなく、視覚的な外乱の内部モデル学習においても干渉が生じることを意味している。

本項で示した 2 つの事例が示しているように、中枢神経系は、身体に加わる力学的・運動学的な外乱に対して、繰り返し試行することで内部モデルを獲得し、適応する。また、相反する 2 つの環境の連続的な経験が干渉を導くように、学習における文脈が重要であ

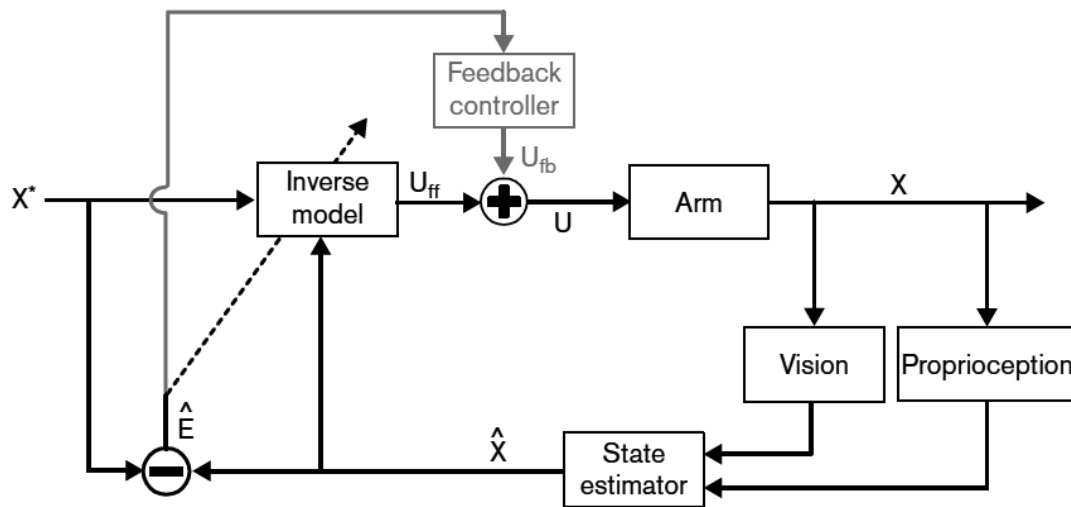


図 1.2 Schematic diagram of the internal models used in controlling arm movements. (created based on [21])

ることもわかる。

近年，この内部モデルに関する研究では，強化や干渉 [8, 9, 10, 11, 12]，汎化 (generalization) [13, 14, 15, 16] が主題として扱われてきた。しかしながら，多くの先行研究では，到達運動軌道の変化に着目する一方で，学習時の課題および身体に対する認知状態を明示的に扱っている例は少ない。特に，視覚変換環境への適応においては，外界の視知覚や手先位置の知覚の変化，運動計画の変化など，認知的な要因についても古くから議論されているにもかかわらず [17, 18, 19, 20]，それらと内部モデル学習の相互関係については未だに明らかにされていない。

1.2.3 到達運動の制御モデル

前項で述べたように，従来の研究においては，内部モデルの獲得・修正のメカニズムは不慣れな仮想環境への適応過程に着目して調査されてきた。このような試みの中では，運動制御の計算モデルについての枠組みも多く提案されている。例えば，Sabes らは Kawato らが提案したモデル [4] を基軸にした上肢到達運動生成モデルを提案している [21] (図 1.2)。

図 1.2 は、フィードフォワード制御によって行われる腕到達運動のモデルである。腕の目標状態である X^* は逆モデルに入力され、逆モデルは予測的に運動指令 U_{ff} を算出する。 U_{ff} はフィードバックコントローラが算出する運動指令 U_{fb} と加算され、最終的に運動指令 U となって腕に伝達される。ここで、 U_{fb} は予測的な運動指令 U_{ff} を修正する役目を果たしている。 U が伝達されたことで実現した腕の状態 X は、視覚や体性感覚によって \hat{X} として予測され、逆モデルへフィードバックされる。そして、 \hat{X} と X^* の間に生じた誤差信号 \hat{E} は逆モデルの修正に用いられると同時に、遅延してフィードバックコントローラに入力される。つまり、この計算スキームでは、内部モデルは誤差信号 \hat{E} による教師あり学習を行う。

脳内経路が損傷し、この計算モデルが部分的に損なわれた場合においては、正常な運動制御や運動学習を行うことができない [7, 22, 23]。しかしながら、運動リハビリテーション訓練で行われるような受動的な運動の場合、図 1.2 における腕の目標状態 X^* の伝達が欠落しているにもかかわらず運動機能の再建がみられることが実験的に明らかにされている。

1.2.4 受動的な運動

前項で示した計算モデルに当てはめて考えた場合、受動的な運動は X^* を生成しないため、 \hat{X} と X^* の誤差 \hat{E} による内部モデルの学習を行うことができない。さらに、運動指令の欠落は運動主体感^{*1}を損い、身体保持感^{*2}にも影響を及ぼす [22, 24, 25]。このため、受動的な運動によって得られる情報、つまり視覚や体性感覚のような求心性の情報のみでは外部環境に適応することは一見すると困難であるように思われる。一方で、Cressman らの実験 [26] のように、特定の状況下で視覚運動回転変換環境下での受動的な到達運動の経験による適応が示された例も報告されている。

Cressman らは、ロボットマニピュランダムによる視覚運動回転変換環境下での上肢

*1 「運動の主体が自分自身であるという感覚」

*2 「これは自分自身の身体であるという感覚」

到達運動学習課題を例に取り上げ、運動の自発性と知覚変化の関係性について調査を行った。

彼女の実験はパート A とパート B の 2 つで構成された。パート A では、視覚運動回転変換のない状態で被験者に到達運動課題を能動的もしくは受動的に経験させ、課題を経験したことによるアフターエフェクトと手先位置知覚の変化を評価した。パート B では、徐々に大きくなる視覚運動回転変換が課された状態で被験者に到達運動課題を能動的もしくは受動的に経験させ、課題を経験したことによるアフターエフェクトと手先位置知覚の変化を評価した。

実験の結果、課題を能動的に経験した群と受動的に経験した群の両方において、到達運動の軌道に課題を経験したことによるアフターエフェクトが見られた。また、手先位置の知覚の変化が確認された (図 1.3)。この結果は、受動的な運動経験が図 1.2 に示す制御モデルの何れかの要素の修正を誘発する可能性を示している。

上記の例のほか、プリズム環境を受動的に経験することでアフターエフェクトが観測された例や、[27, 28, 29, 30] 視覚を遮断した場合の体性感覚が運動の影響を受けて可塑的に変化するという実験結果が報告されている [31, 32, 33]。また、リハビリテーションの分野では、受動的な運動による訓練が一般的に行われており、運動機能の回復に効果があるということも広く知られている。[34, 35, 36]。

近年では、脳機能イメージング技術の発展に伴い、受動的な運動を行う際の脳活動の調査も盛んに行われており、指や手首の受動的な運動によって補足運動野や一次運動野の活性化することや [37, 38, 39, 40]、腕の受動的な運動学習が体性感覚誘発電位の変化を導かないことが報告されている [41] が、受動的な運動がこれらの脳部位に与える影響については未だ不明な点が多い。

1.2.4.1 ロボットリハビリテーション

現状、リハビリテーション訓練は Fugl-Meyer Assessment(FMA)[42] や Functional Independence Measure(FIM)[43] といった指標に基づき実施されている。FMA では運動機能や感覚機能、バランス感覚、関節可動範囲等の観点から障害レベルを評価し、FIM

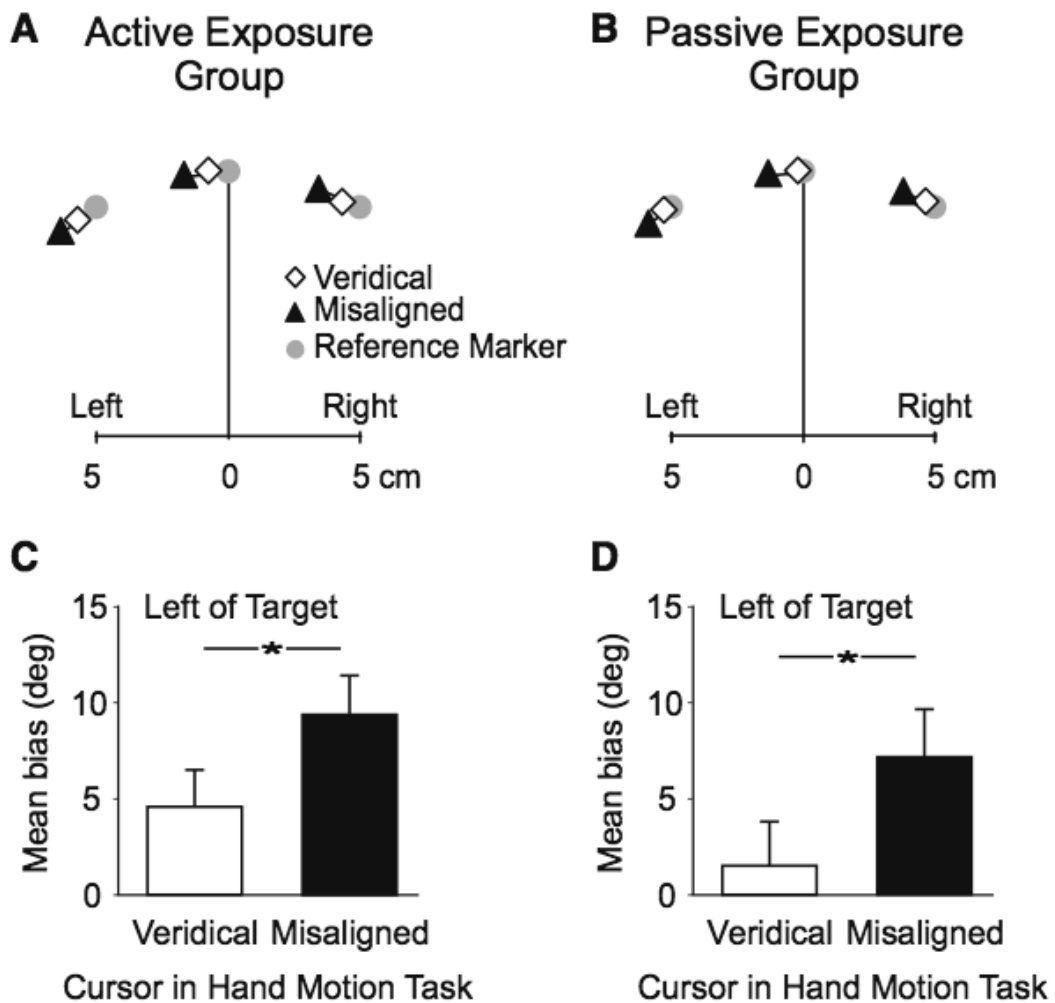


図 1.3 Sensory biases change. (adapted on [26]) A, B:Mean sensory biases on the proprioceptive estimate tasks after subjects were exposed to a veridical or misaligned cursor during the hand motion tasks. C, D:Mean biases averaged across subjects.

では基本的な日常生活動作を行う際に必要とされる介護量から自立度を評価する。どちらの指標も ADL(activities of daily living) 評価の尺度として有効であるが、FMA は身体の可動範囲や発揮可能筋力、FIM は運動自体ではなく機能のみを評価するため、様々な身体運動を麻痺発症以前と同等に発揮することが可能となるか、という本質的な運動機能回復については評価することができない。そこで、近年では、運動学習の知見を利用し、運動機能の回復を評価できるロボットリハビリテーションが注目を集めている。

人工的に脳梗塞を起こしたリスザルを対象とした実験 [44] によって、障害が生じた箇所とは異なる脳部位で運動制御機能を代替するように脳内神経回路が可塑的に変化することが実証されて以来、神経回路の回復を目的としたニューロリハビリテーションが精力的に研究されてきた。脳を損傷した患者のニューロリハビリテーションは、新しい身体に適した内部モデルを再獲得するための運動学習と位置づけられ、ロボットリハビリテーションはその例の一つである [45, 46, 47, 48, 49]。

Krebs らは、彼らが開発した二次元力覚提示型システム (MIT-MANUS:図 1.4) を用いて脳卒中片麻痺患者の上肢リハビリテーションにおける訓練支援ロボットの有効性を検証している [45]。MIT-MANUS によるリハビリテーション訓練では、患者は上肢障害部位で把持したロボットアームを動かし、モニタ上に表示されるリーチング課題を行う。ロボットアームはシステムに制御されており、課題中は患者の運動を補助する外力がロボットアーム先端に加えられる。彼らは、上記の MIT-MANUS でリハビリテーション訓練を行う実験群と、従来手法でリハビリテーション訓練を行う対照群を用意し、それぞれに 7 ヶ月間リハビリテーション訓練を経験させた。その結果、ロボットリハビリテーションが従来手法よりも優れた訓練効果を示したことを報告している。

専門家の定性的評価を元に行う従来のリハビリテーション訓練と比較し、ロボットリハビリテーションは一般的に次のような利点がある。

1. 患者の四肢の運動学的・力学的情報を逐次取得可能

例に挙げた Krebs らの実験のように、ロボットリハビリテーションでは、患者は障害部位にロボットを装着した状態で訓練を行う。この時、ロボットに搭載された各種センサによって四肢の軌道や速度、力を逐次取得することが可能である。

2. 定量的に再現性のある訓練を提供可能

障害部位に装着されたロボットは、予め設定された任意の外力パターンを反復的に出力することが可能である。例えば、上肢二点間到達運動を訓練内容とするロボットリハビリテーションの多くにおいて、訓練における患者の上肢運動軌道が



図 1.4 Schematic diagram of the internal models used in controlling arm movements. (adapted on [49])

躍度最小となるようにロボットが患者の上肢を動かす [50].

上記の利点により、ロボットリハビリテーションでは、患者の障害部位の運動をロボットが読み取り、発揮された筋力と要求された運動軌道に応じた補助を提供することが可能となる。なお、より効果的なロボットリハビリテーション戦略については現在も活発に議論がなされている。1) 訓練時の力覚支援方法と訓練効果の関係 2) 訓練時の四肢の運動における能動性の必要性等について検討されているが、いずれについても明確な結論は出ていない [35, 36].

片麻痺患者は各々の症状が異なるため、症状に合わせた手法で訓練を行う必要があるが [51]、上記の問題に対する答えを明確にし、ロボットリハビリテーションにおける有効なリハビリテーション戦略を提案できれば、個々人の障害レベルに応じた適切なリハビリ

テーション訓練が提供可能となる。

1.2.4.2 受動的運動が健常者の運動学習に及ぼす影響

ロボットリハビリテーションで用いられるような力覚支援が運動学習に及ぼす影響については、健常者を対象とした実験でも調査されている。

Edwin らは、視覚運動回転変換環境下における力覚支援の学習効果について調査している [52]。彼らの実験では、視覚運動回転変換下での二点間到達課題を 1) 能動的に行う (対照群) 2) 受動的に行う 3) 方向の誤差を増幅させる力場下で行う 4) 手先を正しい軌道へ導く力場下で行うという条件で経験する被験者群を用意し、課題経験後の方向誤差を統計的に比較した。その結果、3) の被験者群は方向誤差を対照群と同程度まで減らしたのに対し、2) と 4) の群は方向誤差を減らすことができなかった。この結果は、運動学的な学習が運動時の誤差に基づいて行われる可能性を示すとともに、学習を行う際の力覚支援は練度に合わせて段階的に低減する必要がある可能性を示唆した。

また、Cressman らは受動的に視覚運動回転変換課題を経験させた場合の体性感覚の変化について調査している [53]。Cressman らは、視覚運動回転変換環境下での二次元到達運動課題を腕が自由に動く状態で経験する被験者群と、ロボットによって手先を動かされる被験者群を用意し、それぞれの群の課題経験前後の終端誤差と主観的等価点の変化を統計的に比較した。その結果、課題の経験による終端誤差と主観的等価点の変化が両群で確認され、受動的な運動経験が身体感覚の変化に寄与する可能性が示唆された。

上記のように、近年では、ロボットリハビリテーションを例とする受動的運動が身体に与える影響について盛んに研究がなされており、運動学習の観点からもロボットリハビリテーションの有効性が示唆されている。

1.2.5 本研究の目的

本章では、まず運動学習に関する従来研究の概要を述べた後、ロボットリハビリテーションを取り巻く現状について説明した。さらに、運動学習の分野からみたりハビリテ

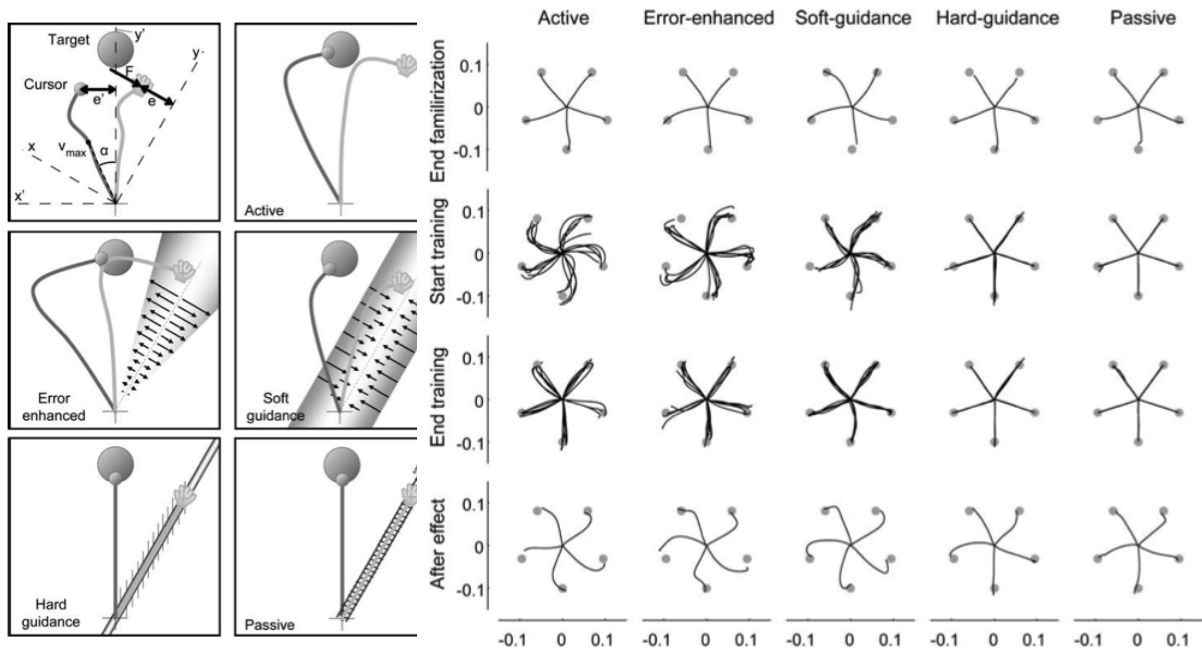


図 1.5 Definitions in the five types of therapeutic guiding forces used(Left), and Representative hand-paths of a subject from each of the groups during training(Right). (adapted from [52])

シヨンの問題点について述べた。

片麻痺患者を対象に従来行われていたリハビリテーションは、一般的に専門家の評価を元に患者の自立度向上を図るものであり、損傷した運動機能の回復が主眼に置かれている訳ではない。それに対し、損傷した神経回路を可塑的に変化させ、運動機能自体の回復を目的としているのがニューロリハビリテーションであり、代表例の一つがロボットリハビリテーションである。

ロボットリハビリテーションは訓練中の患者の身体状態を細かにモニタリングすることが可能であるとともに、定量的で再現性のある訓練を提供できるという点で優れている。しかしながら、1) 患者への力覚支援方法について 2) 運動機能の回復を導く要因について という 2 点について未だ明確ではない。

上記の問題を解決するためには、運動学習の観点からアプローチする必要がある。近年、運動学習の分野において受動的な運動が盛んに研究がなされているが、受動的な運動

における認知状態や求心性の感覚情報の変化と内部モデル学習の関係性については未だ不明な点が多い。

そこで、本研究では、本章で取り上げた到達運動の学習モデルを元に受動的運動を運動企図や運動計画、運動指令の生成、誤差フィードバックといった要素に切り分け、各々が運動学習に果たす役割を明確にすることを目的とする。1.2.2 項で述べた従来研究の内容を踏まえ、視覚的外乱下での上肢到達運動学習に対して、学習時の認知状態や腕の制御様式を変化させた際のアフターエフェクトの変化を分析し、内部モデルの習得メカニズムについて推定する。

1.3 本論文の構成

本論文は、全 7 章で構成する。第 1 章の序論では、本研究の背景および概要について述べた。第 2 章では、運動課題 A を能動的に経験させた後に運動課題 B を能動的もしくは受動的に経験させた場合の干渉現象について調査する。能動的、受動的という学習条件による干渉の大きさやその後の適応過程を解析することで、受動的な運動経験が内部モデルの獲得に影響を及ぼす可能性を検証する。第 3 章では、運動時の認知状態が受動的な運動経験による運動学習に及ぼす影響について調査する。受動的に運動を経験する際に明確な運動企図を付与した場合としない場合で、結果として得られる運動軌道の差を解析する。これにより、運動企図が運動学習に影響を及ぼす要因であるかどうかを検討する。第 4 章では、第 3 章で行った受動的運動による運動学習実験で、受動的に課題を経験した被験者が有意に運動誤差を減少させた原因について調査する。受動的な運動経験によって生じる手先位置の知覚の変化に着目し、身体図式の変化が運動学習に及ぼす影響について考察する。第 5 章では、第 4 章で行った実験について補足する目的で追加実験を行う。そして、第 6 章では、上記 3 つの実験結果を踏まえて総合的に考察する。最後の第 7 章では、本研究に関する成果をまとめる。

第 2 章

受動的な運動経験が内部モデルの獲得におよぼす影響

2.1 はじめに

2.2.4 項でも述べたように、受動的な運動経験は体性感覚の変化 [32, 33] や麻痺患者の運動機能の回復 [34, 45, 46, 47, 48] を導くことが知られている。近年では、被験者の課題達成を補助するロボットによるガイダンスが運動技能の獲得を促進することも報告されている [54, 55]。これらの事実は、受動的な運動経験が内部モデルの獲得・修正に寄与する可能性を示唆している。しかしながら、これらの研究は運動時の認知状態や運動指令の有無を明示的に扱っておらず、受動的な運動経験が内部モデルの獲得に及ぼす影響については未だ明らかにされていない点が多い。

先行研究は、視覚運動回転変換の回転角度を緩やかに変化させた場合、運動指令の欠落した受動的な運動経験が能動的な運動経験と同程度の適応を示すことを報告している [53, 26]。また、一定の回転角度の視覚運動回転変換を受動的に経験した場合においても、パフォーマンスは翌日まで保持されることが示されている [56]。しかしながら、従来行われてきた ABA パラダイムによる内部モデルの強化の検証は行われていない。そこで、本章では、視覚運動回転変換課題 A とその対立課題 B から構成される一般的な ABA パ

ラタイムによる運動学習実験を行い、運動指令を生成しない受動的な運動の経験が内部モデルの獲得に及ぼす影響について調査する。被験者に学習課題 A を能動的に学習させた後に続けて対立課題 B を能動的もしくは受動的に経験させ、対立課題 B を能動的に経験した場合と受動的に経験した場合の干渉の大きさを比較することで、内部モデルの獲得メカニズムについて考察する。なお、本章で行われた実験を実験 1 とする。

2.2 実験 1

2.2.1 被験者

12 人の被験者（平均年齢 20.92 ± 2.5 歳，男性 11 名，女性 1 名）が実験に参加した。彼らは全員右利きであり，実験に関する知識を持たない。

2.2.2 実験課題

被験者はロボットマニピュランダム（manipulator）の正面に設置された背もたれのある椅子に腰掛け、右手で握ったハンドルを操作することで到達運動を行う。カーソルの視覚フィードバックは課題中は常に表示され、手先位置は 200 Hz でマニピュランダムによって記録される。

ロボットマニピュランダムは二軸直動ダイレクトドライブモータから構成され、インピーダンス制御によってハンドルに任意の力場を生成できる。被験者はハンドルを右手で握り、ごく小さな終端インピーダンスで可能な限り高速に到達運動を行う。被験者の右肘はスクリーンの下で補助器具に支えられており、運動中の肘の高さは一定に保たれる。また、マニピュランダムと平行なスクリーンが腕の運動平面の上部に設置されており、被験者は自身の右腕の姿勢を視覚的には確認できない。

課題はマニピュランダム上部に設置されたプロジェクタから投影される。課題では、スクリーン上にカーソルとターゲットが直径 1 cm の黄色の輝点として表示され、同時にホームポジションが直径 2 cm の緑の円として表示される。なお、これらの視覚フィード

バックは試行中のみ表示される。また、課題は視覚運動回転変換下で行われ、カーソル位置 ($\vec{p}_c = (x_c, y_c)$) および手先位置 ($\vec{p}_h = (x_h, y_h)$) の間には以下の変換が施される。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ターゲットはホームポジションを中心とする半径 10 cm の円上に 45° 間隔で並ぶ候補位置に、ビープ音と同時に反時計回りでひとつずつ出現する。本稿では各方向への 1 試行を 1 trial, 全方向への連続した 8 trial を 1 cycle と定義する。

各課題が開始されるとカーソルがホームポジション内に表示され、その状態のまま 1 秒間静止するとターゲットが出現する。被験者はターゲット出現と同時にハンドルを操作し、ターゲットへの到達運動を行う。ここで、カーソルがターゲットに到達する、もしくは試行時間が 1.0 s を超過した場合、その trial は終了となり、被験者の手先は強制的にホームポジションへ戻される。なお、試行時間が 1.0 s を超過した場合は、その trial

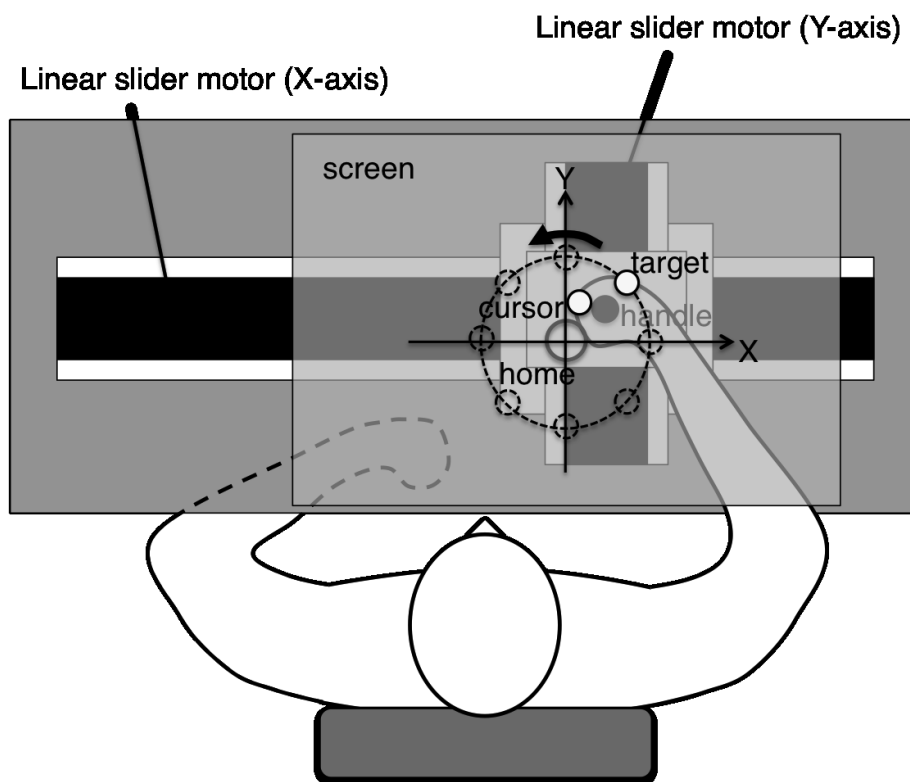


図 2.1 Illustration of the experimental system used in this study.

は失敗とみなされる。さらに、ターゲットの出現から 500 ms 以内にカーソルがホームポジションから離れられなかった場合も trial 失敗となる。

2.2.3 実験手順

被験者は 3 つの群へランダムに割り振られ、以下に示す 10 cycle もしくは 30 cycle から構成される 4 つのフェーズを各々の実験条件のもとで経験した。実験時の各群の詳細な状態は表 2.1 に要約する。

- Phase 1(Familiarization):

機器の操作に慣れるため視覚運動回転変換の無い状態で到達運動を繰り返し経験する。

- Phase 2(Learning):

Phase 1 の直後に行われる。能動的もしくは受動的に繰り返し課題 A (30° visuomotor rotation: CW30) を経験する。

- Phase 3(Interference):

Phase 2 の 10 分後に行われる。能動的もしくは受動的に繰り返し課題 B (-30° visuomotor rotation: CCW30) を経験する。

- Phase 4(Test-day2):

Phase 3 の 1 日後に行われる。干渉および保持の評価を行うため、能動的に課題 A を行う。

ここで、Group N1 はフェーズ 3 を経験しない対照群であり、Group A1 は能動的に、Group P1 は受動的にフェーズ 3 を経験する実験群である。受動的な状態で課題を経験する Group P1 の被験者は、能動的な状態で課題を経験する Group A1 の被験者と同等の感覚フィードバックを得るが、運動は企図せず、随意的な到達運動の遂行を実現する運動指令の生成も経験しない。ここで能動的な状態とは能動的に、受動的な状態とは受動的に到達運動を行うことを意味する。本実験では、マニピュランダムによって直線かつ

表 2.1 Experimental procedure for all groups.

Group(Subject)		N1(4)	A1(4)	P1(4)	
Phase	Cycle	Task(Rotated Angle)	Task condition		
1	5	Null Task (0)	Active	Active	Active
2	30	TaskA (CW30)	Active	Active	Active
3	30	TaskB (CCW30)	-	Active	Passive
4	5	TaskA (CW30)	Active	Active <td Active	

CW30: 30° clockwise rotation; CCW30: 30° counterclockwise rotation

躍度最小の軌道 [50] で自動的に手先がターゲット方向へ動かされる状態を受動的と定義した。なお、ここでは被験者の手先移動速度プロファイルの形状は、視覚運動回転変換の無い状態で能動的に課題を行った被験者の手先移動速度から決定された釣鐘型となるように設定した。

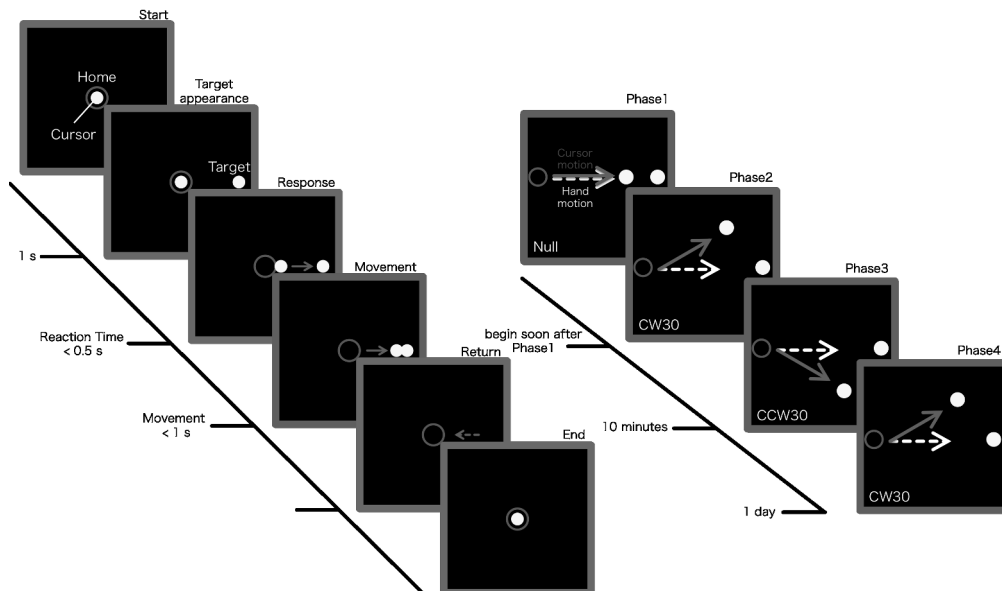


図 2.2 The time sequence of events for each group.

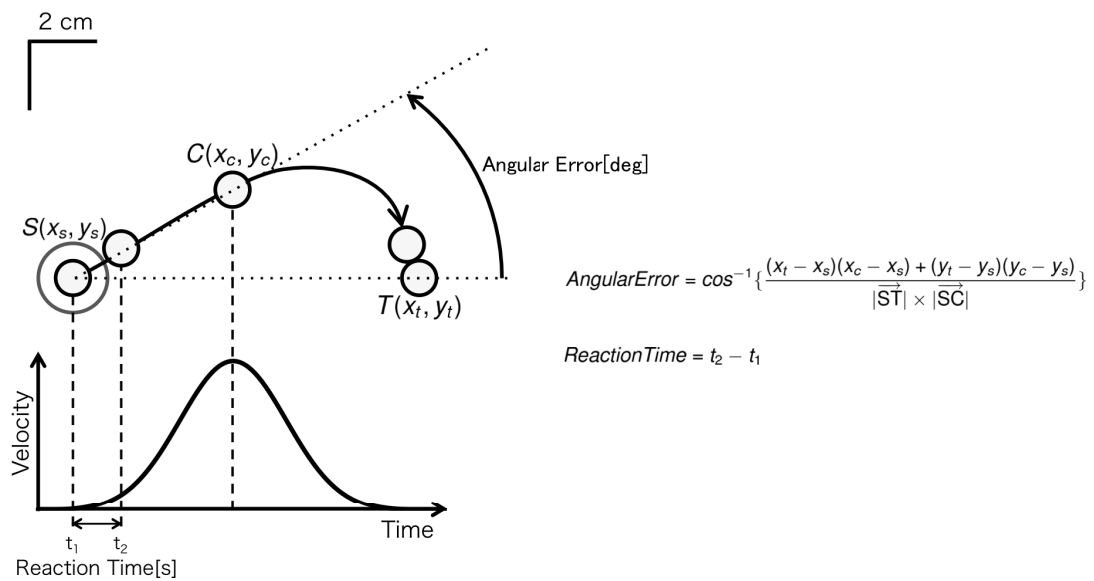


図 2.3 The definition of the angular error and the reaction time.

2.2.4 分析方法

本実験では、被験者のパフォーマンスの定量的な評価指標として角度誤差を用いた。ここで、角度誤差は、カーソル移動速度が最大速度に達した時点での、ホームポジションを原点とするカーソルベクトルとターゲットベクトルの角度差と定義した。さらに、適応の時間推移を明らかにするため、被験者ごとに 1 cycle に含まれる連続する 8 trial の平均角度誤差が算出された。なお、ベースラインにみられる各被験者の方向性の微細な偏り [57] が解析に及ぼす影響を排除するため、フェーズ 1 の最後の 16 trial から算出された各方向の偏りの平均値が視覚運動回転変換下で行われたすべての課題から減算された。

学習の保持について統計的に解析および評価するため、被験者ごとに各フェーズの最初の 16 trial の平均角度誤差を算出し、二元配置分散分析 (Two-way repeated-measures ANOVA) と事後分析 (Tukey-kramer 法) を行った。有意性の閾値は $p < 0.05$ とした。

さらに、ターゲットが出現してから被験者が到達運動を開始するまでの時間を反応時間と定義し、角度誤差と同様に評価した。

2.3 実験結果

図 2.4 に各群の平均角度誤差および平均反応時間の推移を示す。点は cycle ごとの被験者間の平均値を、エラーバーは $\pm 1SE$ を表している。

角度誤差においては、課題 B を経験していない Group N1 はフェーズ 2 で経験した課

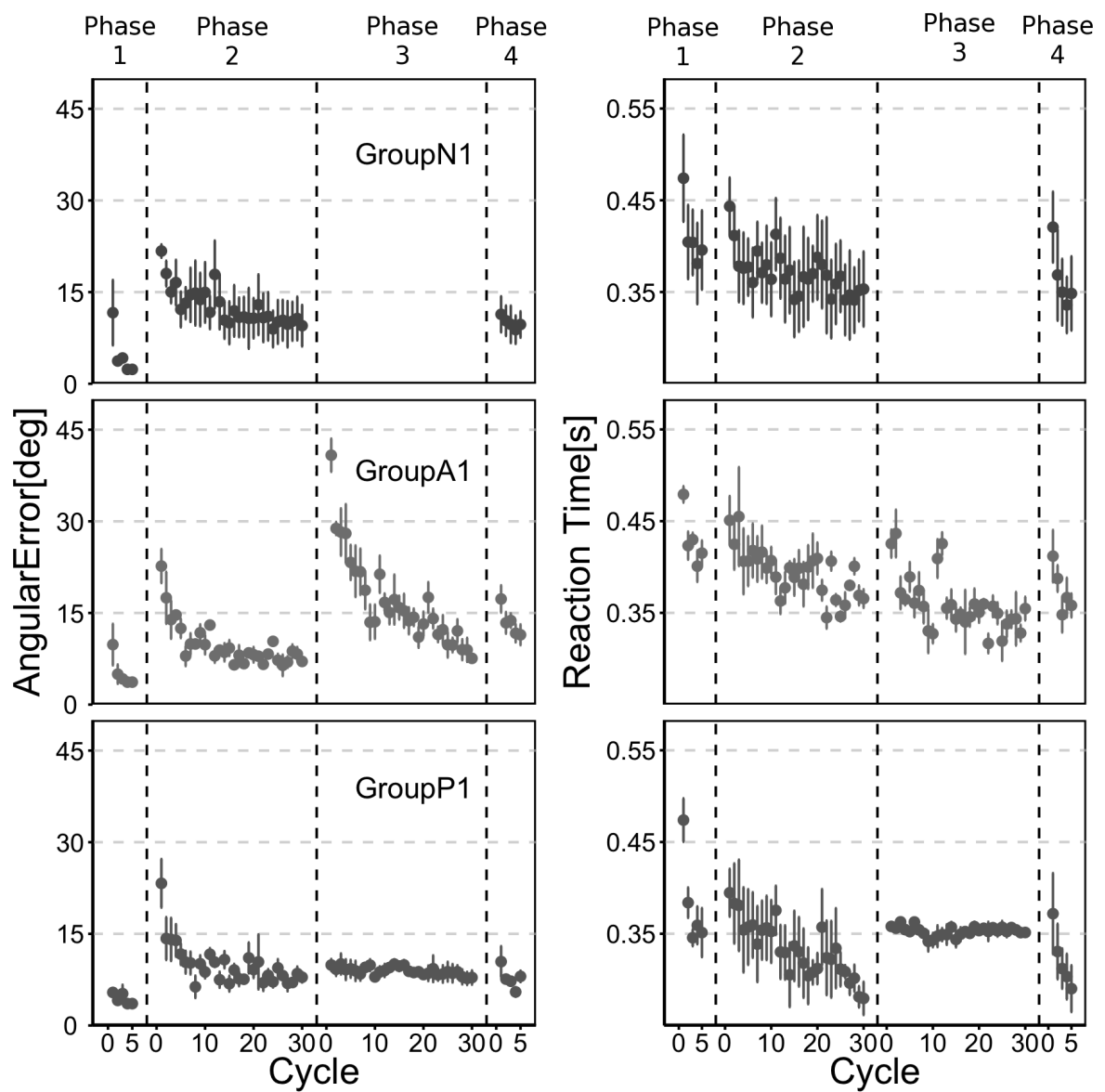


図 2.4 Transitions of angular errors and reaction times

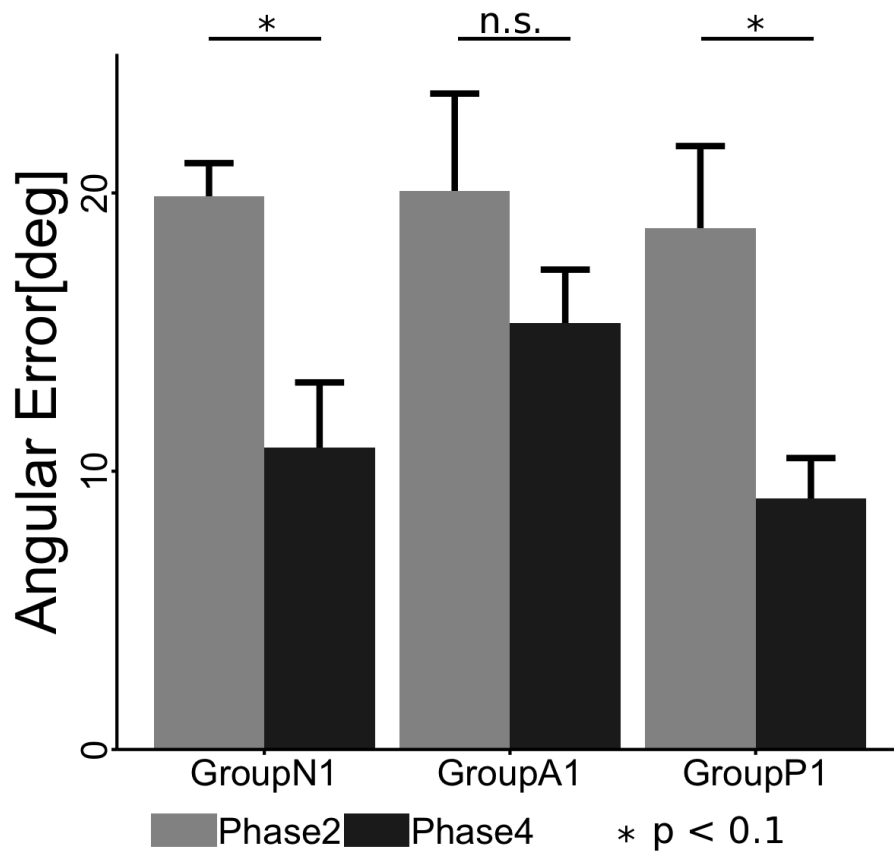


図 2.5 Change in mean angular errors

題 A の明らかな保持をフェーズ 4 で示している。また、フェーズ 3 で課題 B を受動的に経験した Group P1 は、フェーズ 4 において Group N1 と同様に低い初期角度誤差を示している。一方、反応時間においては、どの群もフェーズ 2 とフェーズ 4 でほぼ同程度の初期反応時間を示している。課題 B による干渉が生じたかどうか評価するため、図 2.5 に示すように、各群に含まれる各被験者のフェーズ 2 とフェーズ 4 の初期 16 trial の平均角度誤差と平均反応時間を統計的に比較した。

その結果、角度誤差ではフェーズの主効果 ($F(1, 18) = 18.77, p < 0.001$) が明らかにされた。群の主効果およびフェーズ × 群の交互作用は示されなかった。一方、反応時間では、いかなる主効果も交互作用も示されなかった。

課題 B を能動的に経験した Group A1 のフェーズ 2 とフェーズ 4 の初期角度誤差

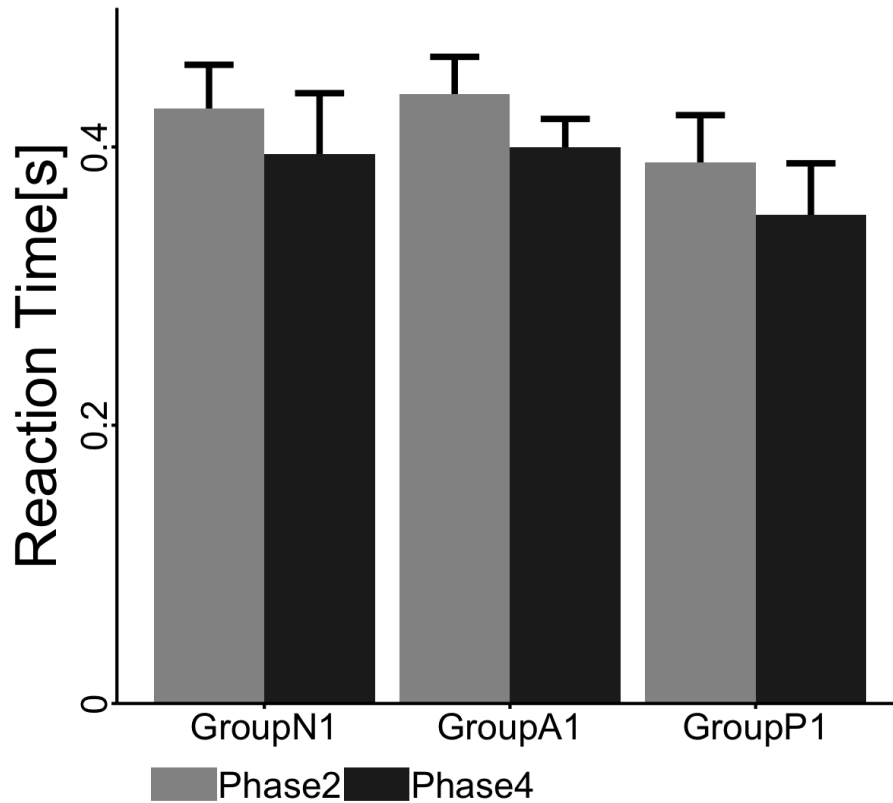


図 2.6 Change in mean reaction time

の間には有意差は見つからなかった。一方で、課題 B を行わなかった Group N1 は、フェーズ 4 においてフェーズ 2 よりも初期角度誤差をわずかながら有意に小さくしていた ($p < 0.1$)。これは、先行研究と同様に、課題 B を能動的に学習した Group A1 では課題 A と課題 B の間に干渉が生じ、結果として課題 A の運動技能が保持されなかったことを意味する。しかしながら、フェーズ 4 において、課題 B を受動的に経験した Group P1 はフェーズ 2 よりも初期角度誤差をわずかながら有意に小さくした ($p < 0.1$)。仮に、Group P1 の被験者が受動的な経験によって課題 B を学習したのであれば、Group A1 と同様に、フェーズ 4 の初期角度誤差に課題 B による干渉の影響が反映されるはずである。ところが、Group P1 は Group N1 と同様に課題 A の運動技能の保持を示した。この結果は、受動的な運動経験が内部モデルの獲得に寄与しないことを示唆する。

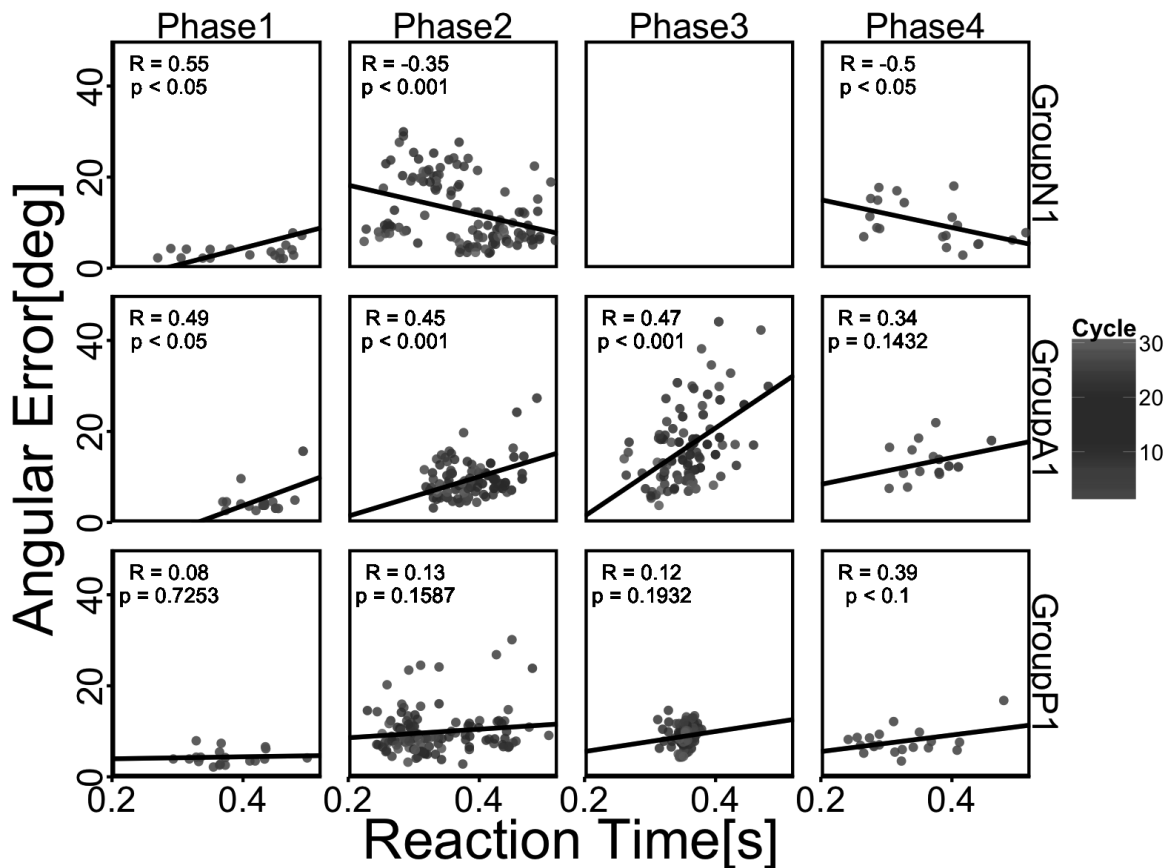


図 2.7 The relationship between the angular errors and the reaction times

反応時間においてはいかなる有意差もみられなかった。つまり、角度誤差とは異なり、反応時間の保持は生じなかったと考えられる。しかしながら、試行を重ねるごとに減少を示す傾向は角度誤差と同様である。この 2 つの関係を調査するため、図 2.7 に示すように、条件ごとに被験者間の角度誤差と反応時間の相関を調べた。

図 2.7 を見ると、Group N1 は回転変換が課された環境下では負の相関を示す傾向にあるのに対し、Group A1 と Group P1 は正の相関を示す傾向にあり、被験者ごとに視覚運動回転変換の学習戦略が異なっている [19] ことがわかる。しかしながら、すべての群においてフェーズ 3 前後での相関の傾向は変わっていない。つまり、対立課題時の能動的・受動的という条件の違いは回転変換に対する学習戦略の変化を導かなかったと考えられる。

2.4 考察

本実験では、能動的な運動を特徴付ける運動企図、運動指令の生成、自発的な筋収縮の要素が欠落した状態で運動を行う Group P1 を用意し、能動的に経験する課題 A と受動的に経験する課題 B 間の干渉に焦点を当てた視覚運動回転変換学習実験を行った。

実験の結果、先行研究 [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] と同様に、2 つの異なる視覚運動回転変換が課された課題 A と課題 B をフェーズ 2 とフェーズ 3 で続けて能動的に経験した Group A1 は、フェーズ 4 で再び課題 A に直面したときに初期角度誤差の有意な増加を示した。これに対し、Group P1 は Group A1 と同等の量の課題 B を受動的に経験したにもかかわらず、Group N1 と同様にフェーズ 4 で初期角度誤差の有意な増加を示さなかった。以上の結果から、本実験においては、受動的な運動経験は内部モデルの獲得や修正を促さなかったといえる。

2.2.3 項で述べたように、従来の計算モデル [4, 21] に基づいて考えた場合、図 2.8 に示すように、運動指令を生成しない状態で課題 B を経験した Group P1 の被験者は運動指令の遠心性コピーに基づく感覚結果予測と実現した運動の感覚結果の間に生じる誤差を検出することができないと考えられる。そのために、本実験においては、Group P1 の被験者は課題 B の内部モデルを獲得することができず、結果として課題 A との間に干渉が生じなかったと考えられる。これは、内部モデルの獲得と修正には目標軌道を実現するための運動指令の生成が重要であるということを示唆する。

言い換えれば、本実験の結果は、運動指令が生成されない状況下で得られる感覚フィードバックは、そのみでは内部モデルの修正を誘発しないことを示唆する。また、このことから、先行研究 [56] でみられた受動的な運動経験による運動技能の向上は内部モデルの獲得によるものではなく、他方で示されているように [19, 53, 26]、運動計画もしくは体性感覚の変化によりもたらされたものである可能性が示唆される。しかしながら、現段階では運動計画の変化と体性感覚の変化を切り分けて評価することは難しい。そのため、どちらの要因が本実験の結果に影響を及ぼしていたのかは判断できない。

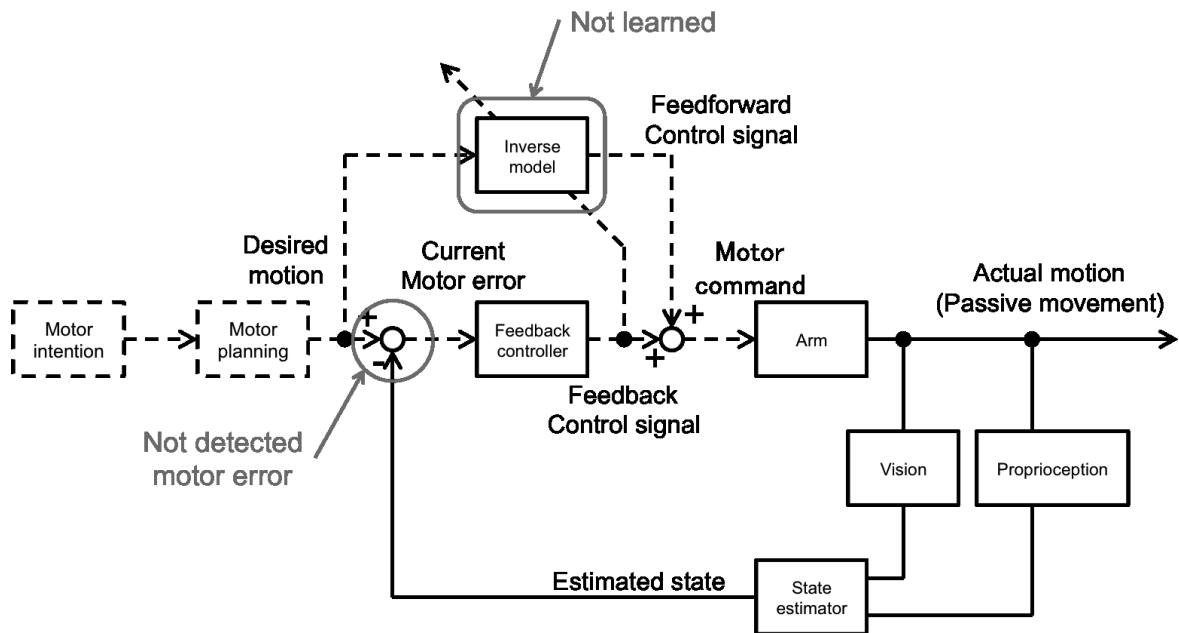


図 2.8 Schematic diagram of the internal models used in passive arm movements of the experiment 1. Dash line shows lacked factor in scheme of the internal model used in controlled arm.

ただし、本実験のフェーズ 4 においては、Group P1 は反応時間の減少とともに角度誤差を減少させる傾向にあった。これは、被験者がフェーズ 4 初期に数度の試行を行ったことで回転変換に気づき、その後探索的に運動を行うことで急速に前日の運動記憶を想起した結果だと考えられる。つまり、フェーズ 2 で構築された運動計画はフェーズ 3 の経験の影響を受けず、保持されていた可能性がある。加えて、すべての群がフェーズ 4 初期においてフェーズ 2 初期と変わらない反応時間を示したことから、反応時間の向上と運動計画の保持は独立して生じることが示唆される。

先行研究 [53, 26] と異なり、運動計画もしくは体性感覚の目に見えた変化が示されなかった原因としては、実験で被験者が得る文脈情報の違いが挙げられる。まず、フェーズ 3 において Group P1 は一連の動作をすべて自動的に行うため、明確に運動を意識する必要がない。つまり、課題に向ける注意の低下が予想される。また、自己の運動の知覚、すなわち身体保持感と運動主体感は、運動の企図や注意に加え、それらの結果として得られる遠心性と求心性の情報と身体図式を統合することによって得られる [22, 24, 25, 58].

身体保持感は受動的な運動を行う際にも感じられるが、運動主体感を得るには運動指令の遠心性コピーが必要となる。本実験で用いられた受動的な運動では、被験者は自身がカーソルを動かしている意識を持つことができない、言い換えれば、自身の手先位置とカーソル位置の関連付けが困難であると考えられる。加えて、先行研究とは異なり、フェーズ 3 において Group P1 の被験者は突然 60° (30° から -30°) の回転変換に直面する。このとき被験者は環境の矛盾を知覚し、さらに大きく身体保持感を損なうことが考えられる。つまり、自身の手先位置の把握はさらに困難になる。この身体保持感の低下に起因する手先位置知覚の曖昧さが原因となり、結果として運動計画の変化が抑制されたと考えられる。しかしながら、身体保持感や回転変換の知覚といった要因が体性感覚の変化に及ぼした影響については不明である。

要約すると、本実験の結果から、課題 A の能動的運動学習の後に続けて課題 B を受動的に経験した場合には逆行性干渉が示されず、受動的な運動経験のみでは内部モデルが獲得されない可能性が示唆された。さらに、身体保持感が損なわれた状態で突然に大きな回転変換に直面した場合は、運動計画の変化が抑制される可能性が示唆された。

第3章

運動企図のある受動的運動が視覚運動回轉變換学習におよぼす影響

3.1 はじめに

前章では、受動的な運動経験が内部モデルの獲得に影響を及ぼさない可能性が示唆された。すなわち、内部モデルの獲得や修正には、運動指令の生成や運動時の認知状態が重要な役割を果たすと考えられる。先行研究において運動時の認知状態が明示的に扱われてこなかったことは2.2.4項で述べた通りである。本章では、運動学習に影響を及ぼすと考えられる認知的要因の中でも特に運動企図に着目する。運動企図のある状態もしくはない状態で視覚運動回轉變換課題を受動的に経験した各被験者群の経験後の成績を比較することで、運動企図が運動学習に及ぼす影響について調査する。なお、本章で行われた実験を実験2とする。

3.2 実験 2

3.2.1 被験者

14 人の被験者 (平均年齢 19.6 ± 2.07 歳, 男性 11 名, 女性 4 名) が実験に参加した。彼らは全員右利きであり, 実験に関する知識を持たない。

3.2.2 実験手順

実験環境, 実験課題および分析方法は, 実験 1 と同様である。本項では, 主に実験 1 と異なる点について説明する。

被験者は 3 つの群へランダムに割り振られ, 以下に示す 10 cycle もしくは 30 cycle から構成される 3 つのフェーズを各々の実験条件のもとで経験した。実験時の各群の詳細な状態は表 3.1 に要約する。

- Phase 1(Familiarization):

機器の操作に慣れるため視覚運動回転変換の無い状態で到達運動を繰り返し経験する。

- Phase 2(Learning):

フェーズ 1 の直後に行われる。能動的もしくは受動的に繰り返し課題 (30° visuomotor rotation: CW30) を経験する。

- Phase 3(Test):

フェーズ 2 の 3 分後に行われる。保持についての評価を行うため, 能動的に課題を行う。

ここで, Group N2 は対照群であり, すべてのフェーズを能動的に経験する。これに対し, Group P2 と Group S2 は受動的にフェーズ 2 を経験する実験群である。なお, 自発的な運動企図に基づいた受動的な運動を実現するため, Group S2 では, 被験者自身

表 3.1 Experimental procedure for all groups.

Group(Subject)			N2(4)	P2(4)	S2(6)
Phase	Cycle	Rotated Angle	Task condition		
1	5	0	Active	Active	Active
2	30	CW30	Active	Passive	Passive+I
3	5	CW30	Active	Active	Active

CW30: 30° clocwise rotation

I: Motor Intention

にカーソルの移動方向と移動開始タイミングを決定させた。受動的な運動に運動企図が付与される条件下では、被験者は左手で 8 つの押しボタンのあるキーボードを操作する。各ボタンはそれぞれのターゲット出現位置に関連付けられており、被験者は出現したターゲットに対応するボタンを左手で押すことで、自身の右腕を自動的にターゲット方向に移動させる。なお、ターゲット出現前はボタンは操作できず、ターゲット出現後は一度しかボタンを押すことはできない。

受動的に課題を経験する Group P2 の被験者は、能動的に課題を経験する Group N2 の被験者と同等の感覚フィードバックを得るが、運動企図と運動指令は生成しない。一方、運動企図のある状態で受動的に課題を経験する Group S2 の被験者は、運動指令を生成せず、自発的な筋収縮を経験しない点以外は Group N2 と同等であると考えられる。

3.3 実験結果

図 3.1 に各群の平均角度誤差および平均反応時間の推移を示す。点は cycle ごとの被験者間の平均値を、エラーバーは ± 1 SE を表している。

角度誤差においては、フェーズ 2 で課題を能動的に学習した Group N2 は課題の明らかな保持をフェーズ 3 で示している。また、フェーズ 2 で課題を受動的に経験した

第 3 章 運動企図のある受動的運動が視覚運動回転変換学習におよぼす影響 3.3 実験結果

Group P2 と Group S2 は、経験した運動をフェーズ 3 で再現できていないことがわかる。一方、反応時間においては、どの群もフェーズ 2 の最後とフェーズ 3 の初期でほぼ同程度の反応時間を示しており、学習した結果を保持している様子が伺える。

運動企図が受動的な運動による運動学習に与える影響について評価するため、図 3.2、図 3.3 に示すように、能動的に行われる課題に対しナイーブな状態だとみなすことができる Group N2 の各被験者のフェーズ 2 の初期 16 trial と受動的に課題を経験した

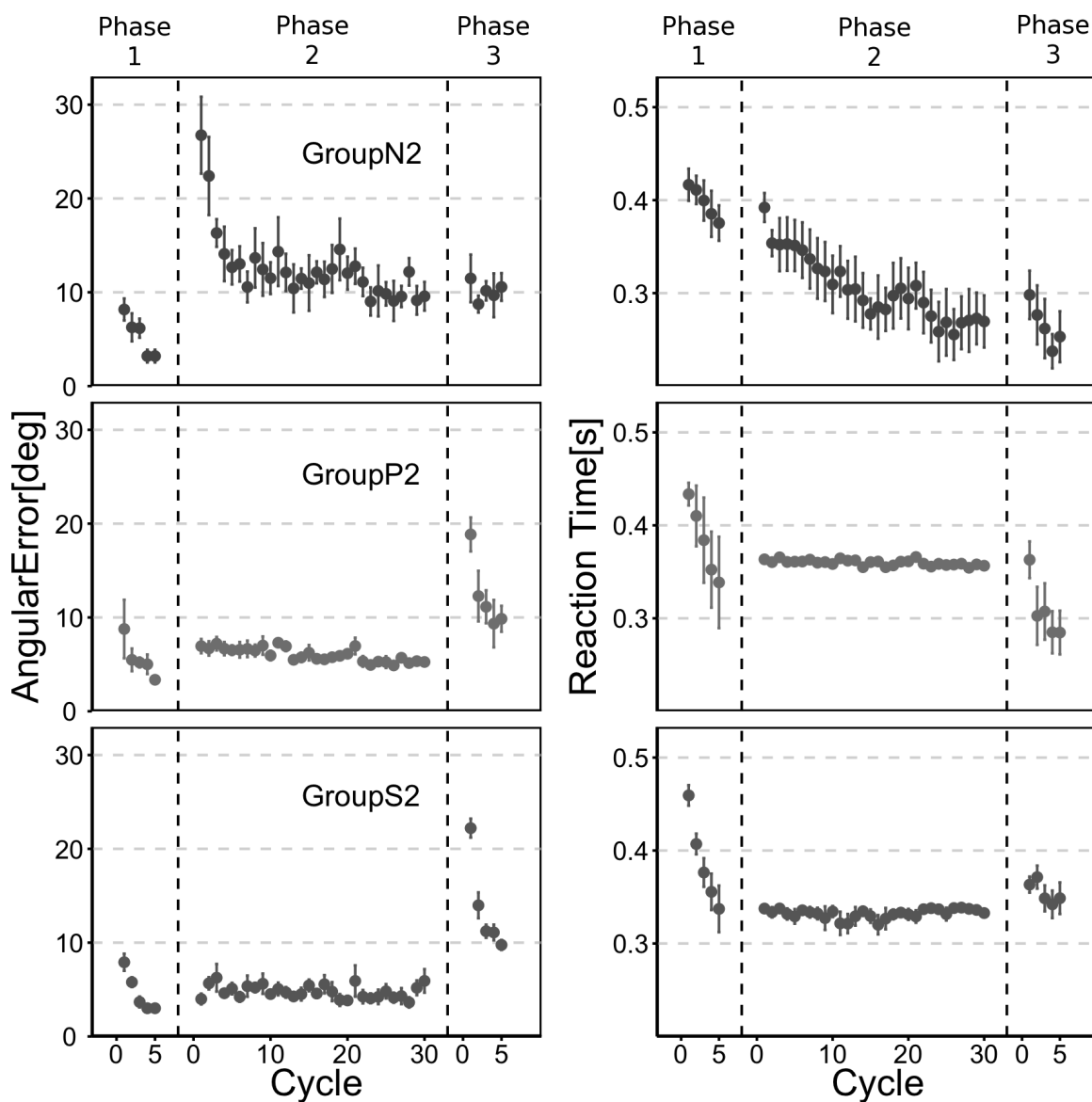


図 3.1 Transitions of angular errors and reaction times

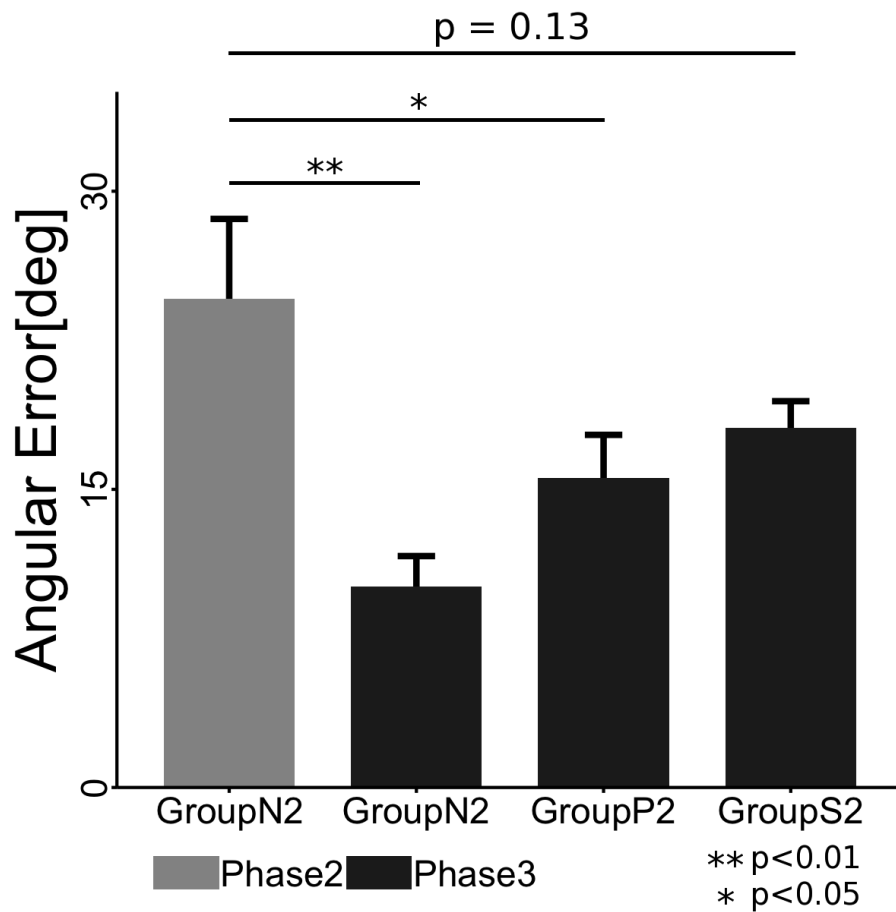


図 3.2 Mean angular errors shift

Group P2 および Group S2 のフェーズ 3 の初期 16 trial の平均角度誤差と平均反応時間を比較した。その結果、ANOVA によって、これらの群間に有意差が示された (角度誤差 $F(3, 14) = 6.65, p < 0.01$; 反応時間 $F(3, 14) = 4.26, p < 0.05$)。

能動的に課題を経験した Group N2 のフェーズ 3 の初期角度誤差は、Group N2 のフェーズ 2 の初期角度誤差よりも有意に小さかった ($p < 0.01$)。また、受動的に課題を経験した Group P2 のフェーズ 3 の初期角度誤差は、Group N2 のフェーズ 2 の初期角度誤差よりも有意に小さかった ($p < 0.05$)。つまり、受動的な課題の経験が初期角度誤差の減少に寄与していることがわかる。

一方、Group S2 のフェーズ 3 の初期角度誤差と Group P2 のフェーズ 3 の初期角度誤差の間に有意差は見つからなかった。さらに、Group S2 のフェーズ 3 の初期角度誤差と

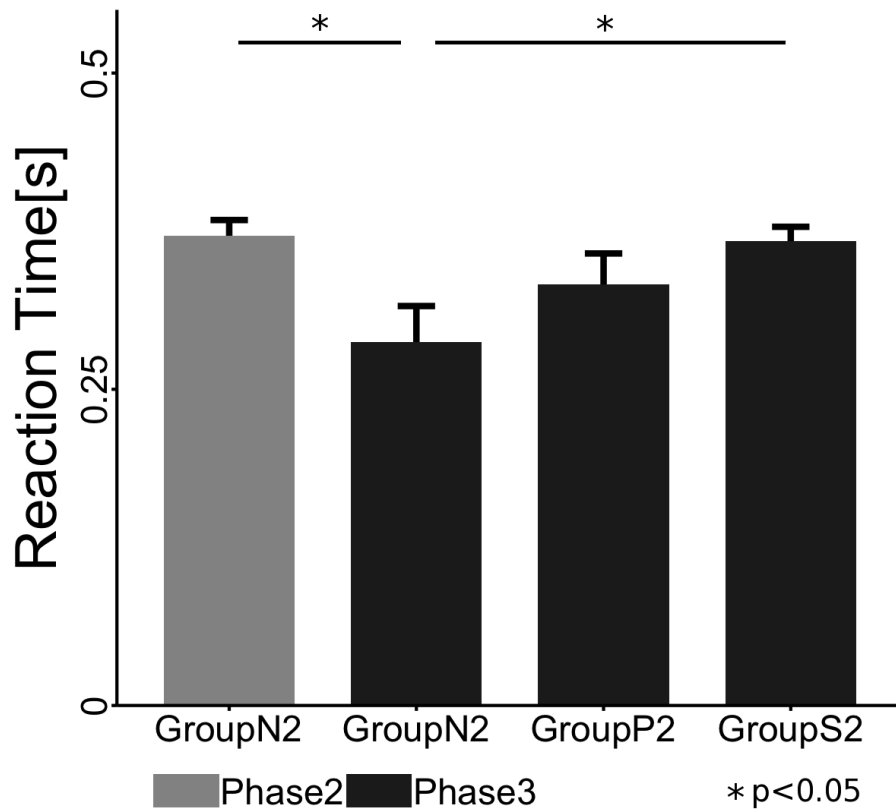


図 3.3 Mean reaction time shift

Group N2 のフェーズ 2 の初期角度誤差の間にも有意差は見つからなかった ($p = 0.13$). この結果は、受動的な学習条件の下では、自発的な運動企図の有無は運動学習に影響を与えない可能性を示唆する。

反応時間においては、Group N2 のフェーズ 2 とフェーズ 3、Group N2 と Group S2 のフェーズ 3 の初期反応時間の間にも有意差がみられた ($p < 0.05$). すなわち、実験 2 においては、フェーズ 3 で Group N2 のみが反応時間の有意な減少を示したことがわかる。

図 3.4 に各条件ごとの角度誤差と反応時間の関係を示す。この図から、フェーズ 3 において、Group S2 以外の群は反応時間と角度誤差を同時に減少させていることがわかる。

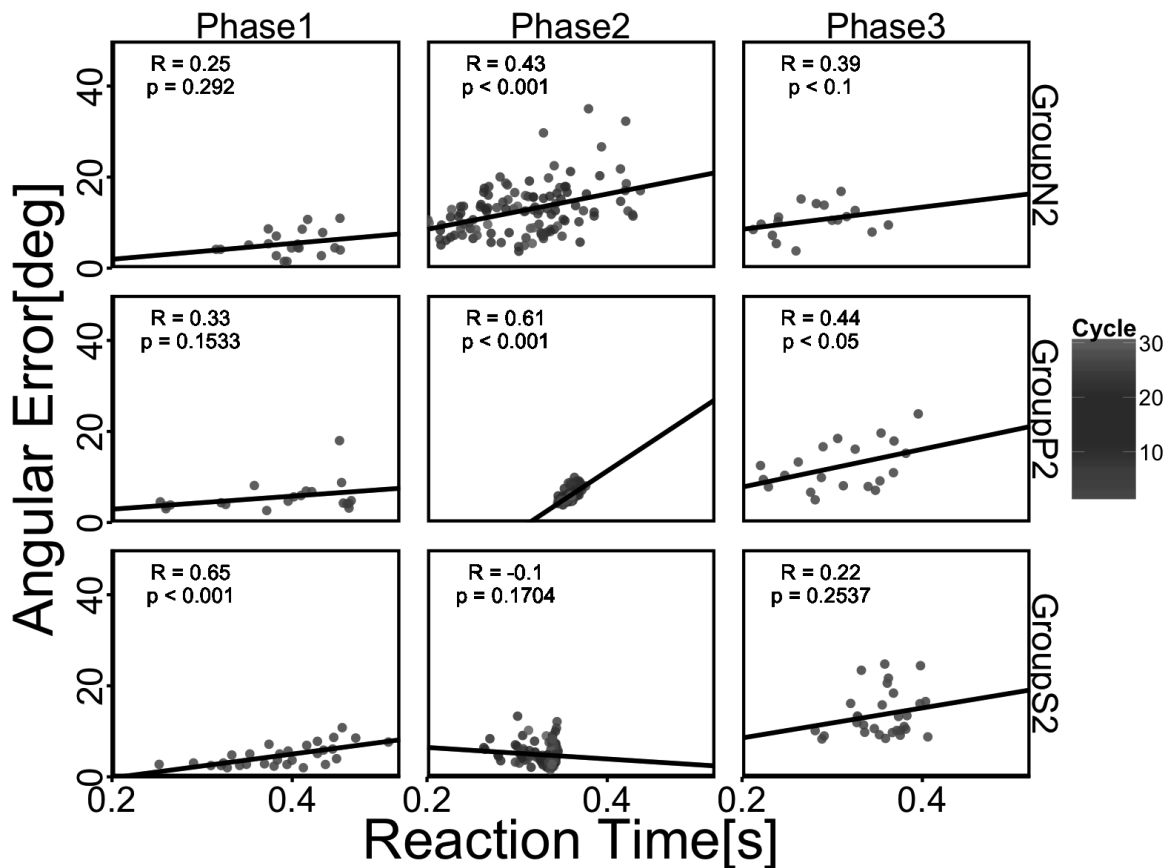


図 3.4 The relationship between the angular errors and the reaction times

3.4 考察

本実験では、受動的な運動を運動企図のない状態で行う Group P2 と、運動企図のある状態で行う Group S2 を用意し、運動企図が視覚運動回転変換学習におよぼす影響について調査した。

実験の結果、Group P2 は課題に対してナイーブだと考えられる Group N2 のフェーズ 2 の初期角度誤差と比較して有意に小さい初期角度誤差をフェーズ 3 で示した。一方、フェーズ 3 の Group S2 はフェーズ 2 の Group N2 と比較して有意差は示さなかったが、初期角度誤差を減少させた。実験 1 の結果から考えれば、フェーズ 3 の初期で示された Group P2 と Group S2 の初期角度誤差の減少は、フェーズ 2 での受動的な運動経験が体

性感覚の変化を導き、それが順行性干渉として反映された結果だと解釈できる。これは体性感覚の変化と運動適応は独立して生じるという主張に一致する [59]。

フェーズ 3 の Group P2 と Group S2 の間には有意差はみられなかった。3.4 節で述べたように、Group P1 の被験者は身体保持感を著しく低下させていたことが予想される。これに対し、Group S2 の被験者は自身の腕運動の方向と開始タイミングを自発的に決定していたため、文脈から自身の腕運動とカーソルの運動の関係性を理解していたと考えられる。しかしながら、フェーズ 3 では Group P2 と Group S2 の間に有意差はみられなかった。このことから、受動的な運動を行う際には、意識的な運動企図や運動に対する注意は運動学習に影響を及ぼさない可能性が示唆される。

運動企図は運動実行に関連する認知的プロセスというよりも、運動実行の前に中枢神経系で運動計画に関連する処理が行われた結果として生じる現象である可能性が示唆されている [60]。この考えに則った場合、フェーズ 2 において Group S2 の被験者は、運動を企図すると同時に運動計画を終えていたと考えられる。それにもかかわらず、結果的に得られた運動技能が Group N2 に及ばなかったことから、運動計画の更新にも随意的な運動実行の経験が必要であることが示唆される。

注意に関しては、回轉變換環境下で能動的に到達運動を学習する場合に適応過程に影響を与えることが示唆されている [61, 62, 63]。これに対し、本実験では Group P2 と Group S2 がフェーズ 3 で示した運動技能に有意差がみられなかった。つまり、運動に対する注意は実験 1 で示唆されたような体性感覚や運動計画の変化には寄与せず、主に随意運動を行った際の身体運動の知覚や誤差の修正に関係すると考えられる。

また、本実験では、課題を能動的に続けていた Group N2 のみがフェーズ 3 で有意に低い初期反応時間を示した。このことから、反応時間の減少は感覚フィードバックや課題に対する注意では導くことができず、運動指令の生成もしくは随意的な筋収縮、つまり能動的な運動経験が必要となると考えられる。

要約すると、本実験では、視覚運動回轉變換学習に対する受動的な運動経験の寄与が確認された。加えて、運動企図の有無は受動的な運動学習には影響を及ぼさず、内部モデルを

獲得するためには随意性のある運動の経験が重要であるという可能性が示された。

第 4 章

受動的運動が身体図式の変化に及ぼす影響

4.1 はじめに

実験 2 では、課題の受動的な経験が後に課題を能動的に再現する際の初期角度誤差の有意な減少を導いたことから、受動的な運動経験が運動学習に寄与することが示唆された。加えて、その結果が運動企図の有無に左右されなかったことから、運動企図は内部モデルの獲得に影響を及ぼさない可能性が示唆された。この結果から、内部モデルの獲得には能動的な運動経験が必要不可欠である可能性が考えられる。受動的な運動が内部モデルの獲得に寄与しないと考えた場合、実験 2 で確認された受動的な運動経験による初期角度誤差の減少は、どのような原理で生じたのだろうか。

Cressman らは、視覚運動回転変換学習において、受動的な運動経験は知覚する手先位置の変化を導き、さらに、アフターエフェクトの変化量と知覚手先位置の変化量は相関関係にあることを報告している [26]。この報告は、受動的な運動経験が視覚と体性感覚の関係性、すなわち身体図式の変化を導き、それが結果として運動軌道に影響を及ぼす可能性を示唆している。彼らの実験では、変換角度が 0° から 30° まで 1° 刻みで変化する視覚運動回転変換環境下で、被験者に等速性の手先到達運動を繰り返し受動的に学習させ、

学習前後の知覚手先位置の変化を測定することで、受動的な運動経験と運動適応の関係性について検証している。

しかしながら、回転変換の変換角度を 1° ずつ離散的に変化させていた Cressman らの実験ではアフターエフェクトが生じたのに対し、回転変換の変換角度が急に 60° 変化した本論文の実験 1 では被験者の手先軌道に受動的運動経験の影響がみられなかった。すなわち、被験者が直面する回転変換の変換角度の大きさが身体図式の変化に影響を及ぼす可能性があり、実験 2 のように、被験者が 30° の回転変換を経験する場合に身体図式が変化するかどうかは明らかではない。

本章では、受動的な運動が身体図式の変化に及ぼす影響について調査する。視覚運動回転変換課題を受動的に経験する前後の手先位置知覚とアフターエフェクトを比較することで、実験 2 において被験者が示した角度誤差減少の原理について検証し、受動的な運動と身体図式の変化、運動適応について考察する。なお、本章で行われた実験を実験 3 とする。

4.2 実験 3

4.2.1 被験者

11 人の被験者 (平均年齢 22.81 ± 1.07 歳, 男性 10 名, 女性 1 名) が実験に参加した。彼らは全員右利きであり、実験に関する知識を持たない。

4.2.2 実験課題

実験環境、実験機器は実験 1 および実験 2 と同様である。本項では、主に実験 1 と異なる点について説明する。

本実験においては、ターゲットはホームポジションを中心とする半径 10 cm の円上に並ぶ 4 つの候補位置 (22.5° , 67.5° , 112.5° , 157.5°) に、ビープ音と同時にあらかじめ定められた順番でひとつずつ出現する。本実験では連続した 4 trial を 1 block と定義し、1

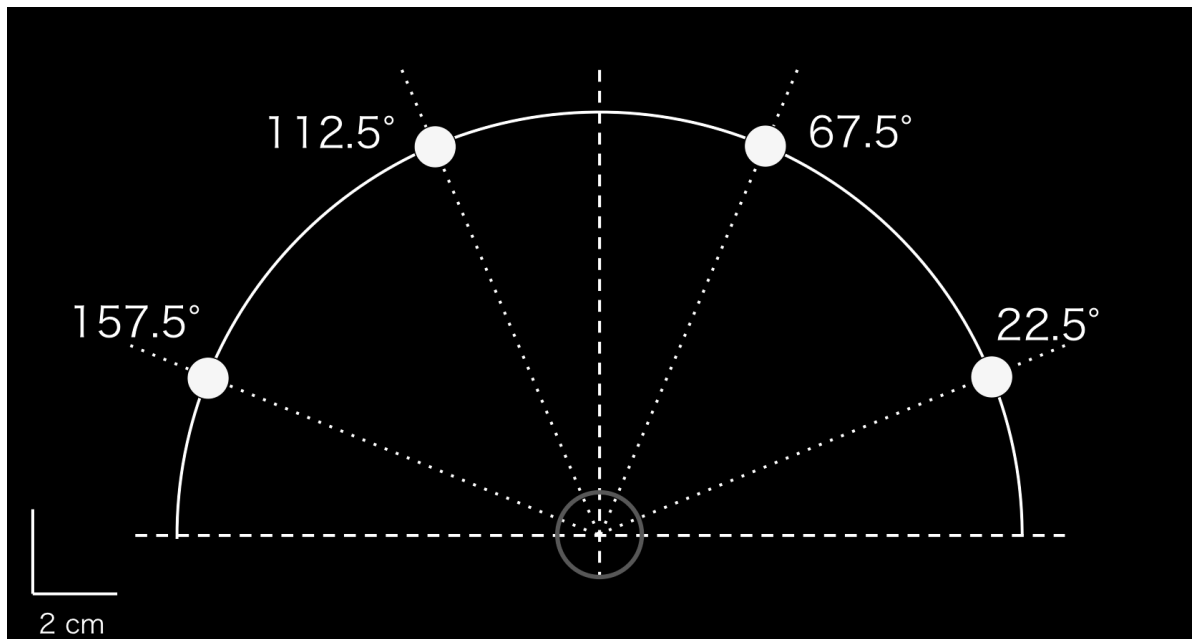


図 4.1 The candidate position where target appears in this experiment.

block 内ですべてのターゲットが一度ずつ出現するよう設定した。

また、各課題が開始されてからの手順も実験 1 や実験 2 とほぼ同様である。しかしながら、本実験においては、運動によるアフターエフェクトをより明確にするため、試行が終了してから被験者の手先が強制的にホームポジションへ戻されるまでに 1.0 s の時間間隔が設けられた。これは、運動軌道は四肢の終端位置に符号化されるという仮説 [64, 65] や、到達運動は運動の終端位置の分散が最小になるように制御されるという仮説 [66] から、四肢の終端位置を長く経験させることでアフターエフェクトの有無がより明確になると考えたためである。

4.2.3 実験手順

被験者は 2 つの群へランダムに割り振られ、2 日間に渡り、以下に示す 10 block もしくは 50 block から構成される 3 つのフェーズを各々の実験条件のもとで経験した。加えて、すべての被験者がフェーズ 2 とフェーズ 3 の前後にそれぞれテストフェーズで評価テストを行った。実験時の各群の詳細な状態は表 4.1 に要約する。

表 4.1 Experimental procedure for all groups.

Group(Subject)		A3(6)	P3(5)	
Day	Phase	Block	Rotated Angle	Task condition
1	1	10	0	Active Active
- All groups : Test Phase1 -				
1	2	50	CW30	Active Passive
- All groups : Test Phase2 -				

- All groups : Test Phase3 -				
2	3	50	CW30	Active Active
- All groups : Test Phase4 -				

CW30: 30° clockwise rotation

- Phase 1(Familiarization):
機器の操作に慣れるため視覚運動回転変換の無い状態で到達運動を繰り返し経験する.
- Phase 2(Learning):
フェーズ 1 の直後に行われる. 能動的もしくは受動的に繰り返し課題 (30° visuomotor rotation:CW30) を経験する.
- Phase 3(Re-Learning):
フェーズ 2 の 1 日後に行われる. すべての群が能動的に繰り返し課題を経験する.
- Test Phase(Assesment): フェーズ 2 とフェーズ 3 の前後に行われる. すべての群がアフターエフェクト課題と感覚評価課題を続けて経験する. アフターエフェクト課題では, アフターエフェクトを測定するため, 被験者は視覚フィードバックを排除した状態で能動的に課題を行う. 感覚評価課題では, 視覚フィードバックを排除した状態で, 被験者の手先をターゲットの左右にランダムに移動させ, 主観的

等価点 (subjective point of equality: PSE) を測定する。

4.2.3.1 学習フェーズ

フェーズ 2 とフェーズ 3 は課題を能動的もしくは受動的に繰り返し経験する学習フェーズである。Group A3 は対照群であり、すべてのフェーズを能動的に経験する。一方、Group P3 は受動的にフェーズ 2 を経験する実験群である。

4.2.3.2 テストフェーズ

テストフェーズでは、すべての被験者がアフターエフェクト課題と感覚評価課題を続けて経験する。

アフターエフェクト課題では、被験者は視覚フィードバックが排除された状態で、各ターゲットへの能動的な到達運動を 3 回ずつ連続して行う。このとき、ターゲットは反時計回りにシーケンシャルに出現する。各課題が開始されるとカーソルがホームポジション内に表示され、そのまま 1 秒間静止するとターゲットが出現する。出現と同時にカーソルは排除され、被験者は即座にターゲットへの到達運動を行う。ここで、カーソルがホームポジションから 10 cm 離れた場合、その試行は終了となり、1.0 s 後に被験者の手先は強制的にホームポジションへ戻される。なお、ターゲットは試行を行っているときのみ表示される。

感覚評価課題では、被験者は視覚フィードバックが排除された状態で、各ターゲット方向への受動的な運動を 50 回ずつ連続して行う。このとき、ターゲットは反時計回りにシーケンシャルに出現する。各課題が開始されるとカーソルがホームポジション内に表示され、そのまま 1 秒静止するとターゲットが出現する。出現と同時にカーソルは排除され、被験者の手先は自動的にターゲットから -30° ~ $+30^{\circ}$ ずれた位置に動かされる。被験者は二肢強制選択法によって、ホームポジションから見た手先の位置がターゲットの右側か左側かを選択する。回答は、左手で 2 つの押しボタンのあるキーボードを操作することで行われる。ボタンを押すことで試行は終了となり、手先は強制的にホームポ

ジションへ戻される。なお、ターゲットは試行を行っているときのみ表示される。

手先が動かされる位置は、加速確率近似 (Accelerated Stochastic Approximation) を用いた階段法 (Staircase method) によって決定される [33, 53, 67, 68].

$$X_{n+1} = \begin{cases} X_n - \frac{c}{n}(Z_n - \phi) & (n = 1) \\ X_n - \frac{c}{2 + m_{shift}}(Z_n - \phi) & (n > 2) \end{cases} \quad (4.1a)$$

$$(4.1b)$$

ここで、 X は刺激強度、 n はステップ数、 c は初期ステップサイズ、 Z は被験者の反応 (正解:1, 失敗:0), m_{shift} は被験者の反応の反転回数, そして ϕ は標的確率である。本実験では、 $c = 30$, $\phi = 0.5$ とした。また、手先の移動方向 (ターゲットの右側, 左側) はランダムに決定され、それぞれ独立して階段法が適用された。試行回数はターゲットの右側, 左側それぞれ 25 回の計 50 回とした。

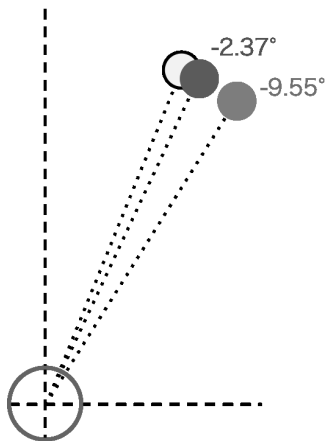


図 4.2 Change in PSE

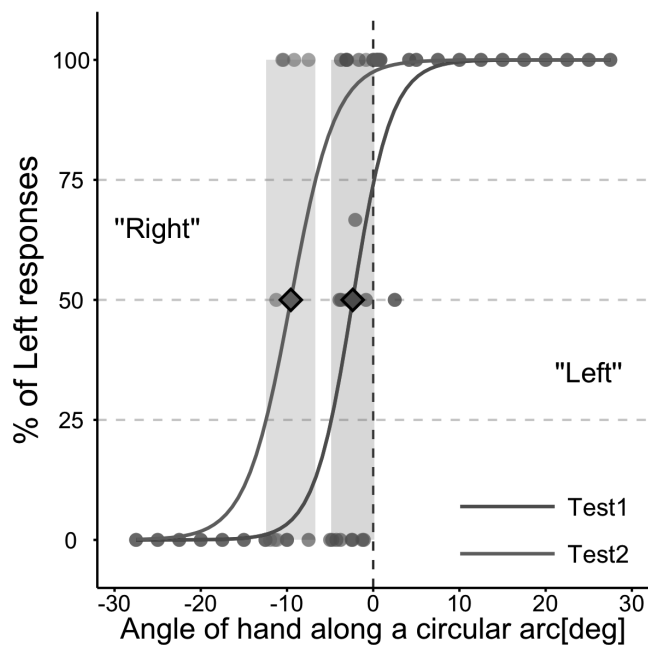


図 4.3 An example of psychometric function

4.2.4 分析方法

学習フェーズの分析方法は実験 1, 実験 2 と同様である。ここでは, 新たに加わったアフターエフェクト課題, 感覚評価課題の分析方法について説明する。

4.2.4.1 アフターエフェクト課題

アフターエフェクト課題においては, 評価指標として角度誤差が用いられた。フェーズ 1 最後の 16 trial から算出された各方向の偏りの平均値をすべての試行から減算することで各被験者の方向性の微細な偏りを排除し, 被験者ごとに各方向の平均角度誤差が算出された。さらに, 被験者ごとに各フェーズの平均角度誤差を算出し, 分散分析および事後分析によって統計的に比較された。有意性の閾値は $p < 0.05$ とした。

4.2.4.2 感覚評価課題

右側を選ぶ確率を y 軸, 刺激強度を x 軸とした心理測定関数にロジスティック関数を当てはめることで, PSE と不確定帯 (Interval of Uncertainty: IU) が算出された。図 4.3 に例を示す。ここで, ひし形の点は PSE を, 網掛けの領域は IU を表している。なお, PSE と IU は, それぞれのフェーズで, それぞれのターゲットに対して, 被験者ごとに算出された。本実験ではターゲットを基準点とし, 基準点からの PSE のズレを感覚バイアスと定義した。

知覚手先位置の変化について統計的に解析及び評価するため, 被験者ごとに各フェーズの平均感覚バイアスを算出し, 分散分析および事後分析によって統計的に比較した。なお, 不確定帯幅が平均値 $\pm 2SD$ の範囲外となった試行で得られたデータは外れ値と考え, 除外した。有意性の閾値は $p < 0.05$ とした。

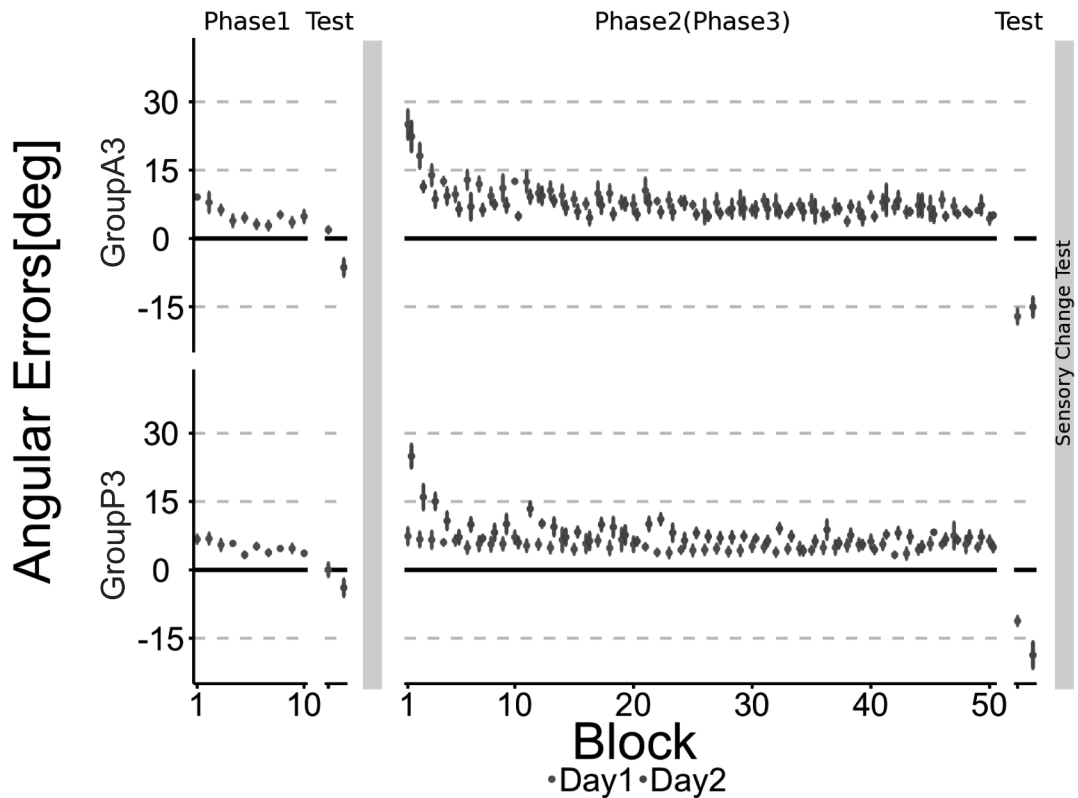


図 4.4 Transitions of angular errors

4.3 実験結果

4.3.0.3 角度誤差と反応時間の変化

図 4.4 に各群の平均角度誤差および平均反応時間の推移を示す。点は Block ごとの被験者間の平均値を、エラーバーは ± 1 SE を表している。

角度誤差においては、すべての群の被験者が、課題経験後のテストフェーズで一定のアフターエフェクトを示していることがわかる。また、この傾向は 1 日目も 2 日目も同様である。一方で、反応時間においては、実験 1 や実験 2 と異なり、課題の経験による顕著な向上はみられない。

図 4.6 に各条件ごとの角度誤差と反応時間の関係を示す。フェーズ 3 においては、両群とも角度誤差と反応時間の間に関連がみられた。しかしながら、両群ともに相関

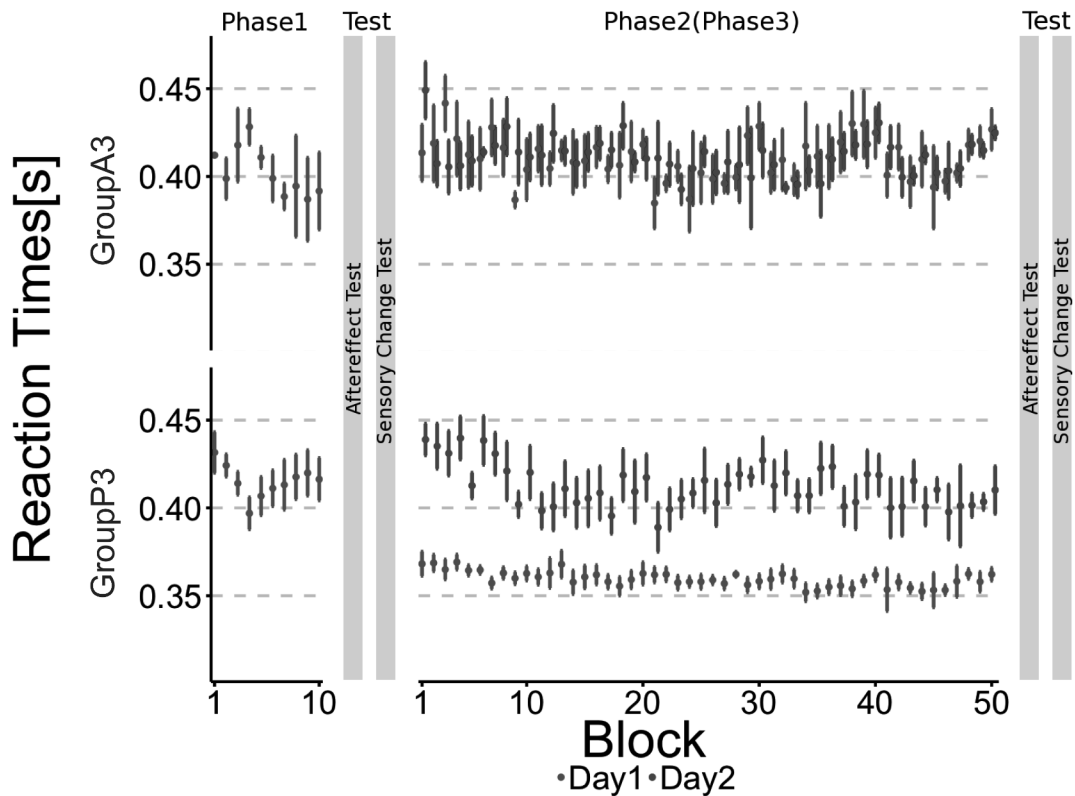


図 4.5 Transitions of reaction times

係数は小さく、傾向も異なっており、角度誤差と反応時間、学習条件の間に特定の法則性はみられなかった。

学習条件が運動学習に与える影響について評価するため、アフターエフェクトについて一元配置分散分析によって各群ごとにフェーズ間で比較した (図 4.7)。その結果、すべての群において、フェーズの主効果が確認された (GroupA3; $F(3, 20) = 57.8; p < 0.001$, GroupP3; $F(3, 16) = 16.67; p < 0.001$)。さらに、フェーズ 2 の前後、すなわちテストフェーズ 1 とテストフェーズ 2 の間に有意差がみられた (GroupA3; $p < 0.001$, GroupP3; $p < 0.01$)。同様に、フェーズ 3 の前後、すなわちテストフェーズ 3 とテストフェーズ 4 の間でも有意差がみられた (GroupA3; $p < 0.001$, GroupP3; $p < 0.001$)。この結果は、課題における学習条件の違いによらずアフターエフェクトが生じたことを意味する。加えて、GroupA3 のみ、テストフェーズ 1 とテストフェーズ 3 の間に有意差が

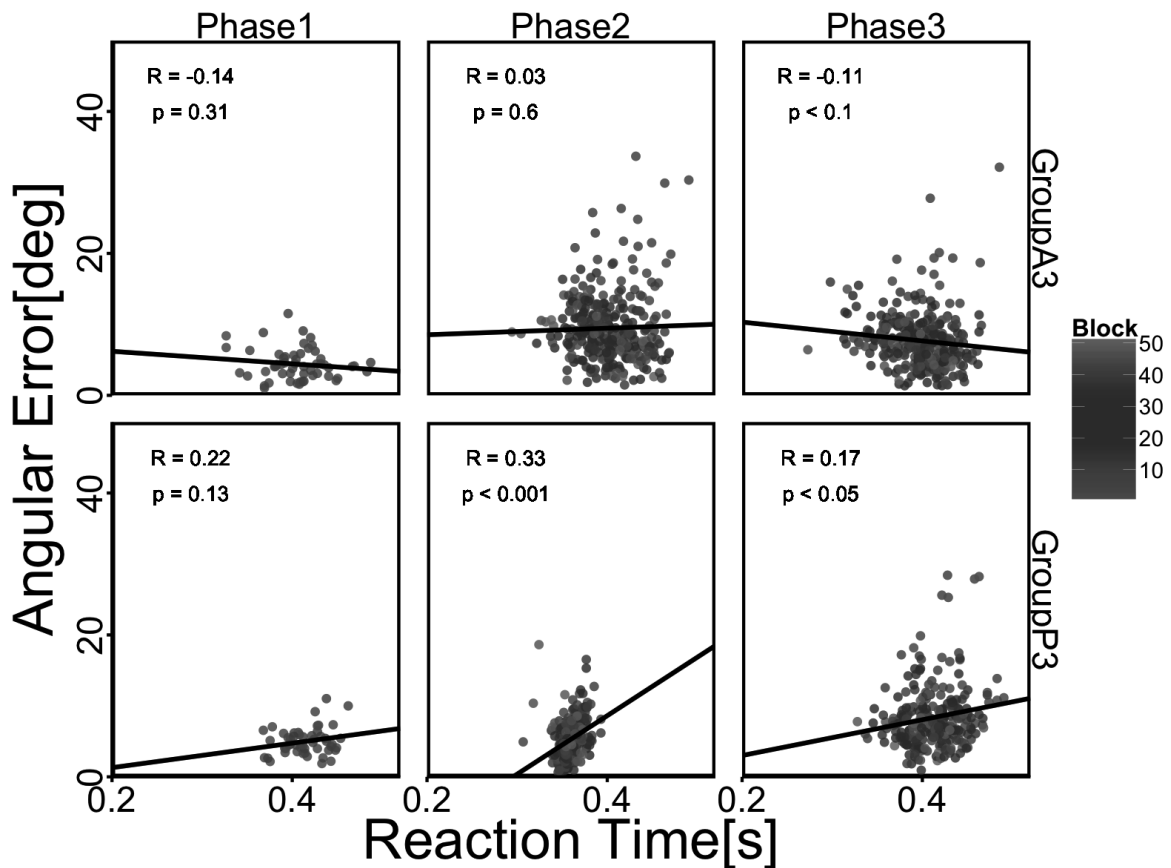


図 4.6 The relationship between the angular errors and the reaction times

みられた ($p < 0.001$) ことから、フェーズ 2 で受動的に課題を経験した GroupP3 はアフターエフェクトを翌日まで保持できなかつたことがわかる。さらに、フェーズ 2 前後のアフターエフェクトの変化量を各被験者ごとに算出し、t 検定によって比較した (図 4.8)。その結果、両群の間に有意差がみられた ($p < 0.01$)。つまり、学習条件がアフターエフェクトの大きさに影響を及ぼすことがわかる。

4.3.0.4 手先位置知覚の変化

図 4.9 は感覚バイアスの変化を表している。この図より、両群ともに、課題を経験したことで PSE が回転変換と逆方向に変化していることがわかる。

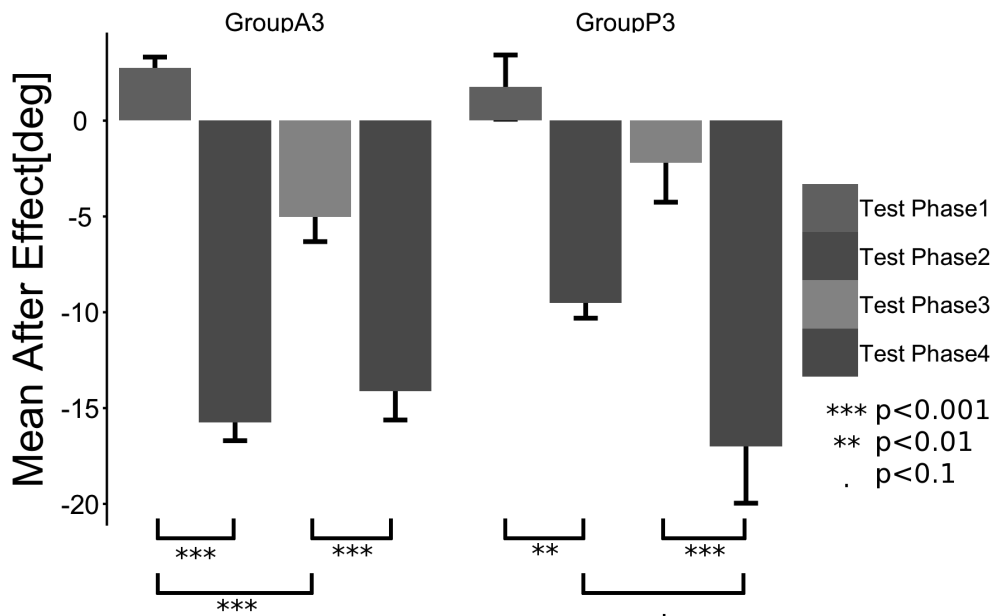


図 4.7 Transition of Mean Aftereffect

学習条件が手先位置の知覚に及ぼした影響について評価するため、感覚バイアスについて一元配置分散分析によって各群ごとにフェーズ間で比較した (図 4.9)。その結果、GroupP3 においてフェーズの主効果が確認された ($F(3, 16) = 4.87; p < 0.05$)。さらに、

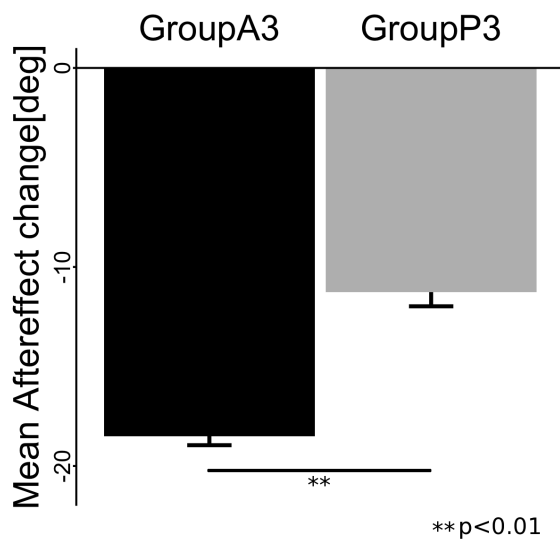


図 4.8 Mean Aftereffect change

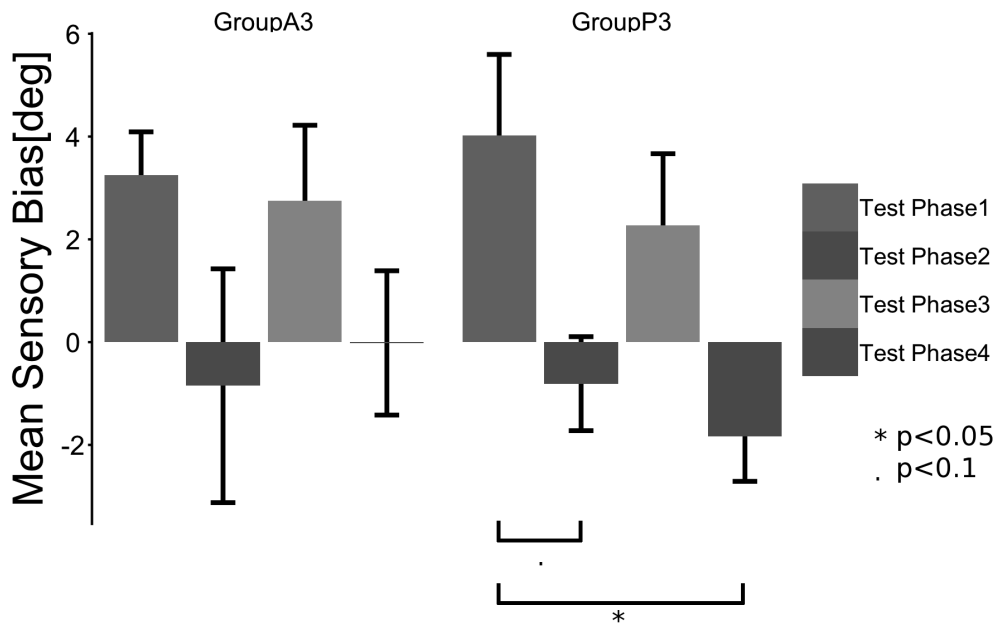


図 4.9 Transition of Mean Sensory Bias

GroupP3 のテストフェーズ 1 とテストフェーズ 2 の間に有意傾向 ($p < 0.1$), テストフェーズ 1 とテストフェーズ 4 の間に有意差 ($p < 0.05$) がみられた. 一方で, GroupA3 においては, すべてのテストフェーズ間に有意差はみられなかった. 両群において, テス

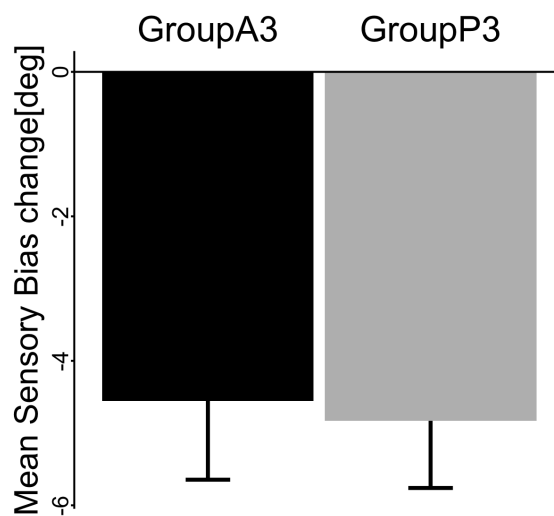


図 4.10 Mean Sensory Bias Change

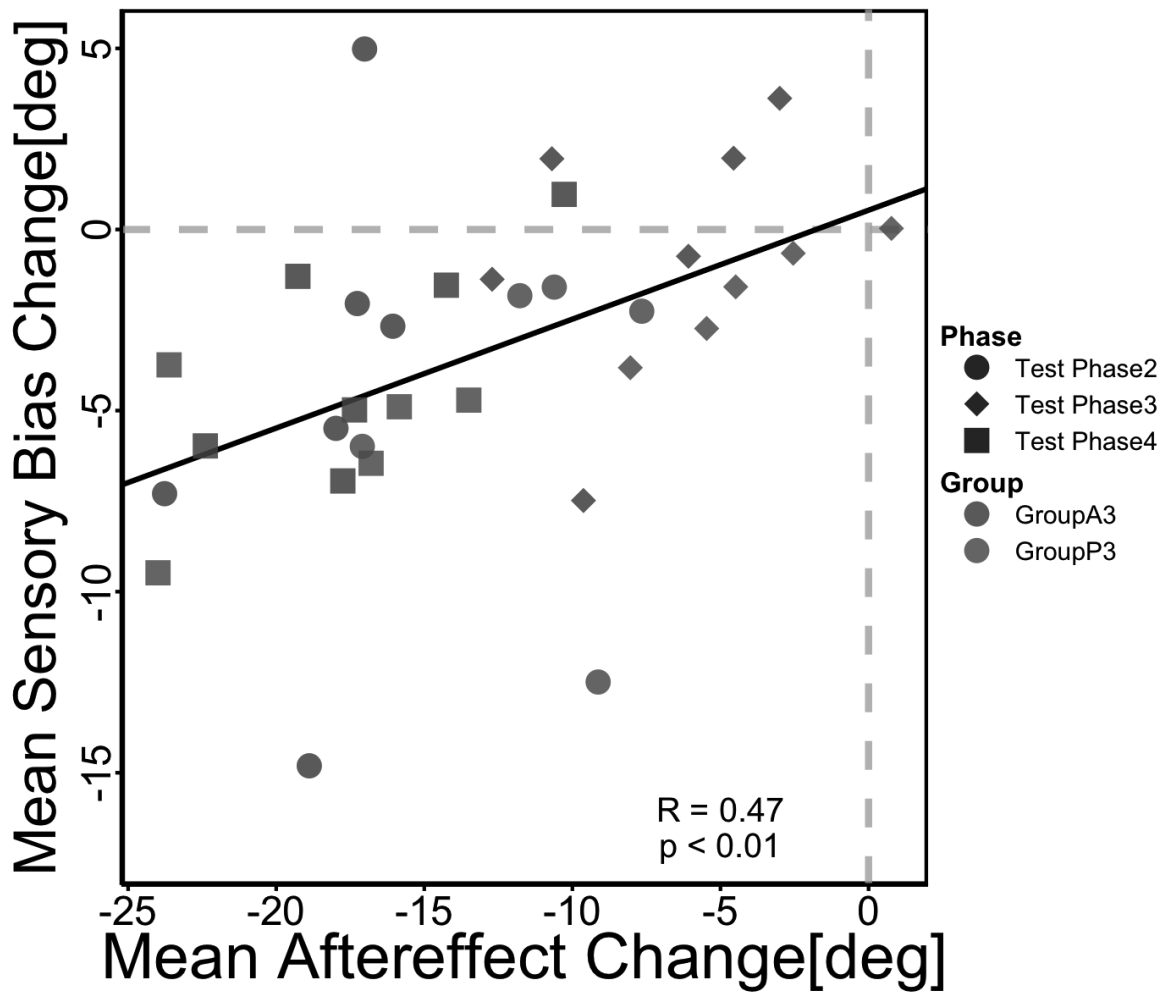


図 4.11 The relationship between the Aftereffect and the Sensory Bias

トフェーズ 1 とテストフェーズ 3 の間に有意差がみられなかったという結果は、身体図式の変化は一時的なものである可能性を示唆する。

上記の分析に加え、フェーズ 2 前後の感覚バイアスの変化量を各被験者ごとに算出し、t 検定によって比較した (図 4.10)。その結果、両群の間に有意差はみられなかった。この結果は、能動的・受動的という学習条件の違いは知覚手先位置の変化に影響を及ぼさない可能性を示唆する。

4.3.0.5 アフターエフェクトと感覚バイアスの関係

図 4.8 と図 4.10 に示したように、すべての群において、課題の学習前後でアフターエフェクトおよび感覚バイアスが増加した。アフターエフェクトと感覚バイアスの関係を調査するため、両者の相関を調べた (図 4.11)。その結果、両者の間には正の相関がみられた ($r = 0.47, p < 0.01$)。つまり、知覚手先位置の変化が大きい被験者ほど大きなアフターエフェクトを示したことがわかる。

4.3.1 考察

本実験では、能動的に課題を経験する GroupA3 と受動的に課題を経験する GroupP3 を用意し、課題の学習前後のアフターエフェクトおよび感覚バイアスを測定することで、受動的な運動経験が身体図式の変化に及ぼす影響について調査した。

実験の結果、テストフェーズ 2 において、GroupA3 はアフターエフェクトを示した。さらに、そのアフターエフェクトはテストフェーズ 3 でも保持されていた。つまり、GroupA3 は内部モデルを獲得し、強化していたと考えられる。一方で、GroupP3 はテストフェーズ 2 でアフターエフェクトを示したが、その大きさは GroupA3 には及ばず、テストフェーズ 3 まで保持されなかった。実験 1、実験 2 の結果に加え、本実験においてアフターエフェクトの変化量と感覚バイアスの変化量の間には正の相関がみられたことから、GroupP3 のアフターエフェクトは手先に関する身体図式の変化に起因すると考えられる。

しかしながら、図 4.8 と図 4.10 から、アフターエフェクトの大きさと感覚バイアスの大きさには差があることがわかる。図 4.12 に、各ターゲットごとに算出された、アフターエフェクトの変化量に対する感覚バイアスの変化量の割合を示す。ここで、値が全データの平均値 $\pm 2SD$ の範囲外になったデータは除外されている。この図より、両群ともに、アフターエフェクトの変化量に対する感覚バイアスの変化量の割合が 50% にも満たないことがわかる。つまり、GroupP3 において、もし受動的な運動経験が内部モデル

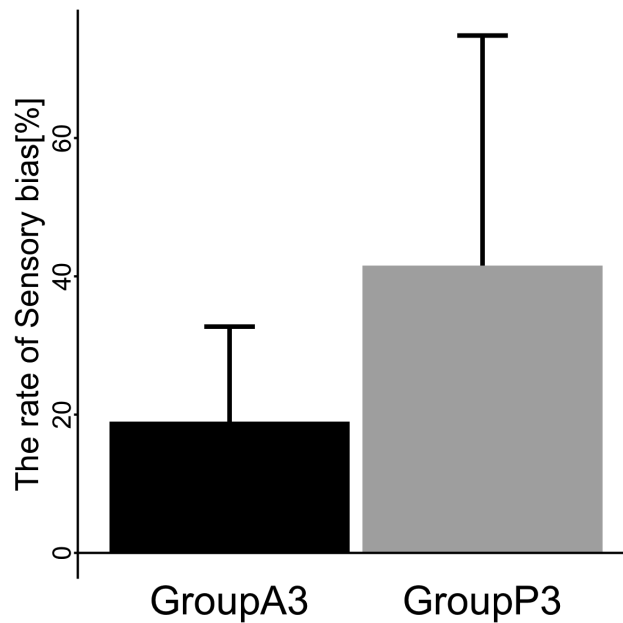


図 4.12 The rate of Sensory Bias with respect to Aftereffect

に全く影響を与えていないのであれば，感覚バイアス以外にアフターエフェクトに貢献している要因が存在すると考えられる．受動的な運動経験によって運動計画が変化した可能性と，内部モデルが部分的に獲得・修正された可能性が考えられるが，本実験のみではこの点については明確にすることはできない．

本実験においても，多くの先行研究と同じように，学習後の時間経過に伴うアフターエフェクトの減少がみられた．一日経過したことで感覚バイアスが学習前の状態にリセットされたことから，この時間経過に伴うアフターエフェクトの減少は，手先に関する身体図式が学習前の状態に戻ったことが原因だと考えられる．すなわち，内部モデルは学習時の身体図式に基いて構築されていることがわかる．

本実験では，GroupA3 と GroupP3 のフェーズ 2 前後の感覚バイアスの変化量の間有意差はみられなかった．すなわち，運動指令の生成によらず，「運動する」ことで身体図式の変化が生じたことがわかる．図 1.2 に基づいて考えた場合，オフラインで感覚フィードバックが State estimator の変化を導いたことが予想される．しかしながら，どのようなメカニズムが働いているかは不明である．先行研究 [59] で示唆されているよう

に、もし、内部モデルと同じく何らかの誤差情報に基づいて修正されるのであれば、視覚と体性感覚、すなわち運動時における筋紡錘からの固有受容性情報やハンドルを握る手に生じる皮膚感覚情報の中の知覚誤差が考えられる。

実験 1 では受動的な運動経験による運動軌道への影響はみられなかった。しかしながら、本実験においては、GroupP3 はフェーズ 2 後に感覚バイアスを変化させ、同時にアフターエフェクトも変化させた。この結果は、被験者の課題に対する認知状態が身体図式の変化に影響を及ぼす可能性を示唆する。すなわち、身体図式の変化には、ラバーハンドイリュージョンに関する多くの研究で示されているように [25, 58, 69, 70]、視覚フィードバックと体性感覚フィードバックを時空間的に一致させ、身体保持感を得る必要があると考えられる。

要約すると、本実験では、受動的な運動による身体図式の一時的な変化が確認された。さらに、被験者の身体意識がこの変化に影響を及ぼす可能性が示唆された。

第5章

運動指令の生成および視覚誤差が運動学習に及ぼす影響

5.1 はじめに

実験1から実験3の結果では、受動的な運動経験による一時的な身体図式の変化が課題のアフターエフェクトを導いたが、内部モデルの獲得・修正は確認できなかった。一方で、能動的な運動経験は従来研究の結果と同じく一時的な身体図式の変化も内部モデルの獲得も示した。では、一体なぜ実験1から実験3で行ってきたような受動的な運動経験は内部モデルの獲得を導かないのであろうか。

実験1から実験3の結果および図1.2で示した計算スキームを元に考えれば、これまで本稿で行ってきた能動的運動と受動的運動の主な違いは運動指令の生成、すなわち自発的な筋収縮の有無である。つまり、ロボットリハビリテーションの従来研究で数多く報告されているように、上肢の随意運動を力覚支援のトリガーに設定するなど、自らが要求した運動を実現させるための自発的な筋収縮を伴う受動的運動ならば内部モデルを獲得できる可能性が考えられる。

さらに、実験1から実験3で対象とした能動的運動と受動的運動の違いについては、課題における視覚的誤差の提示法の違いも考えられる。実験1から実験3の能動的運動で

は、被験者は自由な方向への到達運動が可能のため、自発的に運動を計画してターゲット方向へ手先を動かした結果として、ターゲット方向に対するカーソルの運動方向、すなわち角度誤差を視覚的な誤差としてオンラインで得ることができる。一方で、実験 1 から実験 3 の受動的運動では、被験者はターゲットの方向に常に直線的に手先を動かされるため、視覚的な誤差を得ることができない。そのために内部モデルの獲得・修正が阻害されている可能性も考えられる。

よって本章では、上記に上げた自発的な筋収縮と視覚的誤差の 2 つが運動学習に与える影響について調査する。実験 3 に対して新たに 2 つの実験条件を追加し、実験 3 の結果と比較することで自発的な筋収縮・視覚的誤差と内部モデル学習の関係について考察する。

5.2 実験

実験環境、実験機器、実験課題および実験結果の分析方法は実験 3 と同様である。本項では実験 3 と異なる点のみ説明する。

5.2.1 被験者

10 人の被験者 (平均年齢 22.29 ± 1.10 歳, 男性 9 名, 女性 1 名) が実験に参加した。彼らは全員右利きであり、実験に関する知識を持たない。

5.2.2 実験手順

被験者は 2 つの群へランダムに割り振られ、2 日間に渡り、以下に示す 10 block もしくは 50 block から構成される 3 つのフェーズを各々の実験条件のもとで経験した。加えて、すべての被験者がフェーズ 2 とフェーズ 3 の前後にそれぞれテストフェーズで評価テストを行った。実験時の各群の詳細な状態は表 5.1 に要約する。なお、フェーズ 2 以外のフェーズにおける実施内容は実験 3 と同様である。

表 5.1 Experimental procedure for all groups.

Group(Subject)		PM3(5)	PME3(5)	
Day	Phase	Block	Rotated Angle	Task condition
1	1	10	0	A A
- All groups : Test Phase1 -				
1	2	50	CW30	P+MC P+MC+EC
- All groups : Test Phase2 -				

- All groups : Test Phase3 -				
2	3	50	CW30	A A
- All groups : Test Phase4 -				

A:Active condition; P:Passive condition

MC:Motor command; EC: Endpoint error correction

CW30: 30° clockwise rotation

5.2.2.1 学習フェーズ

フェーズ 2 とフェーズ 3 は課題を能動的もしくは受動的に繰り返し経験する学習フェーズである。実験 3 における Group A3 と Group P3 が対照群であり、本実験における Group PM3, Group PME3 が実験群となる。

運動指令の生成が運動学習に及ぼす影響を調査するため、Group PM3 と Group PME3 の被験者は受動的な運動の開始に自発的な初動が要求される。Group PM3 の被験者は、ターゲットが出現した際に、手先中心をホームポジション中心から 1 cm 移動させることで、自身の右腕を自動的にターゲット方向に移動させる。このとき、手先中心が完全にホームポジションから離れるまでは視覚フィードバックは与えられない。また、視覚フィードバックと体性感覚フィードバックの時間的一致が身体保持感の感得に必要である [71] ことを考慮し、手先移動の検出から受動的運動の開始までの時間間隔は 0.15 s に設定された。

受動的運動の開始までの手順は Group PME3 の被験者も Group PM3 と同様である。しかしながら，Group PM3 の被験者は手先がターゲット方向に移動させられるのに対し，Group PME3 の被験者の場合は，手先は力を加えた方向に移動させられる。そのため，Group PME3 の被験者は Group PM3 の被験者とは異なり，直線軌道ではあるが，実験 3 の Group A3 の被験者と同様に探索的な運動を行う。

5.3 実験結果

5.3.0.2 角度誤差と反応時間の変化

実験 4 の実験結果については，比較のために実験 3 の Group A3 および Group P3 の結果も合わせて記載する。図 5.1 に各群の平均角度誤差および平均反応時間の推移を示す。点は Block 毎の被験者間の平均値を，エラーバーは ± 1 SE を表している。

実験 3 の結果と同様に，すべての群の被験者が，課題経験後のテストフェーズで角度誤

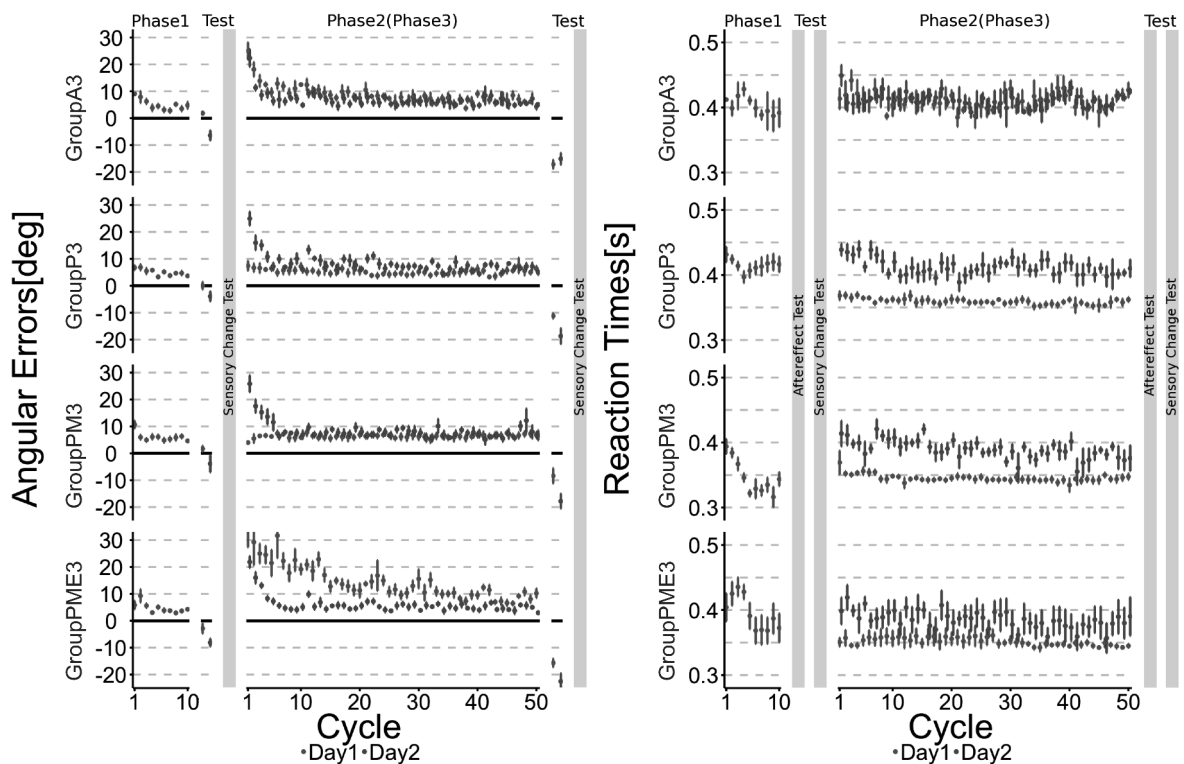


図 5.1 Transitions of angular errors and reaction times

差において一定のアフターエフェクトを示していることがわかる。この傾向は 1 日目も 2 日目も同様である。反応時間についても実験 3 の結果と同様に、課題の経験による変化はみられなかった。

図 5.2 に各条件ごとの角度誤差と反応時間の関係を示す。GroupA3 と GroupP3 の両群はフェーズ 3 において角度誤差と反応時間の間に有意な相関を示したことにに対し、フェーズ 2 で自発的な初動を受動的運動開始のトリガとした GroupPM3 と GroupPME3 の両群では角度誤差と反応時間の間に有意な相関がみられなかった。

学習条件が運動学習に与える影響について評価するため、アフターエフェクトについて一元配置分散分析によって各群ごとにフェーズ間で比較した (図 5.3)。その結果、すべての群において、フェーズの主効果が確認された (GroupA3; $F(3, 20) = 57.8; p < 0.001$, GroupP3; $F(3, 16) = 16.67; p < 0.001$, GroupPM3; $F(3, 20) = 14.38; p < 0.001$,

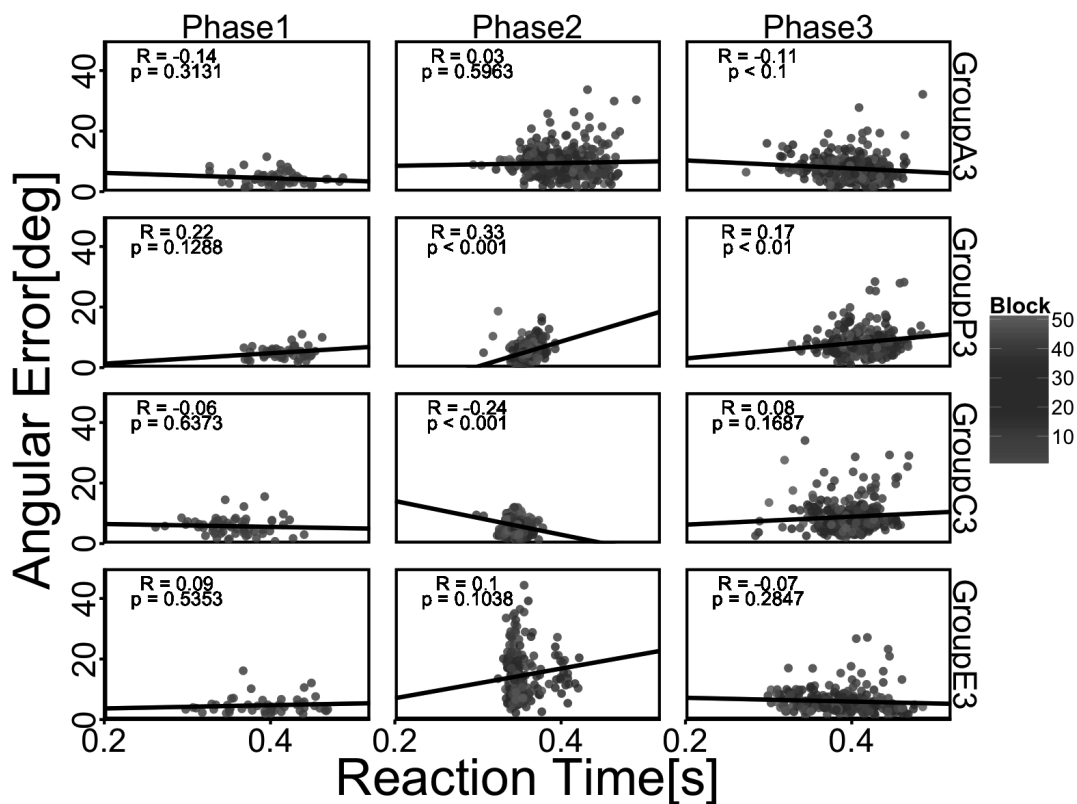


図 5.2 The relationship between the angular errors and the reaction times

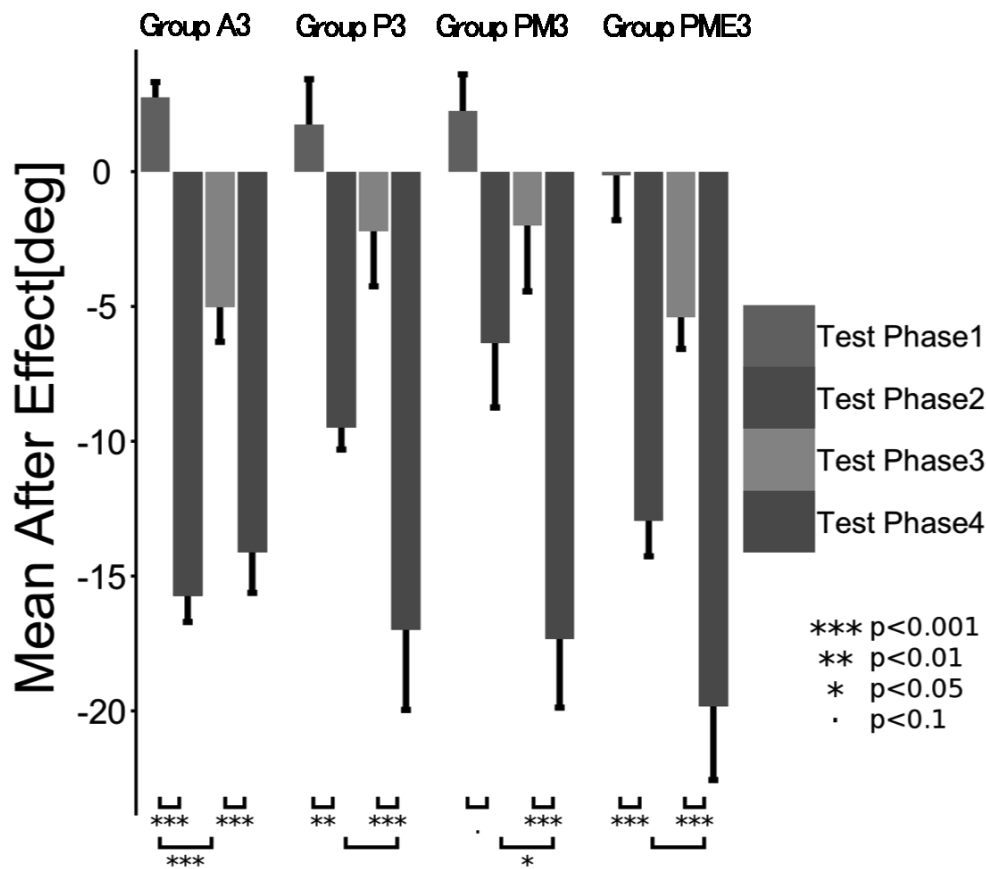


図 5.3 Transition of Mean Aftereffect

GroupPME3; $F(3, 16) = 22.24; p < 0.001$). さらに、すべての群において、フェーズ 2 の前後、すなわちテストフェーズ 1 とテストフェーズ 2 の間に有意差もしくは有意傾向がみられた (GroupA3; $p < 0.001$, GroupP3; $p < 0.01$, GroupPM3; $p < 0.1$, GroupPME3; $p < 0.001$). 同様に、フェーズ 3 の前後、すなわちテストフェーズ 3 とテストフェーズ 4 の間でも、すべての群で有意差がみられた (GroupA3; $p < 0.001$, GroupP3; $p < 0.001$, GroupPM3; $p < 0.001$, GroupPME3; $p < 0.001$). この結果は、課題における学習条件の違いによらずアフターエフェクトが生じたことを意味する。加えて、GroupA3 のみ、テストフェーズ 1 とテストフェーズ 3 の間に有意差がみられた ($p < 0.001$) ことから、フェーズ 2 で受動的に課題を経験した GroupA3 以外の 3 群は

アフターエフェクトを翌日まで保持できなかつたことがわかる。さらに、学習条件の違いがアフターエフェクトに及ぼした影響について調査するため、フェーズ 2 前後のアフターエフェクトの変化量を各被験者ごとに算出し、一元配置分散分析によって比較した(図 5.4)。その結果、グループの主効果が確認された ($F(3, 18) = 4.65, p < 0.05$)。また、GroupA3 と GroupP3 ($p < 0.1$)、GroupA3 と GroupPM3 ($p < 0.01$) の間に有意傾向もしくは有意差がみられた。この結果は、自発的な運動指令の生成を経験し、視覚的な誤差情報が提供された GroupPME3 は能動的に課題を経験した GroupA3 と同等のアフターエフェクトを示した可能性を示唆している。

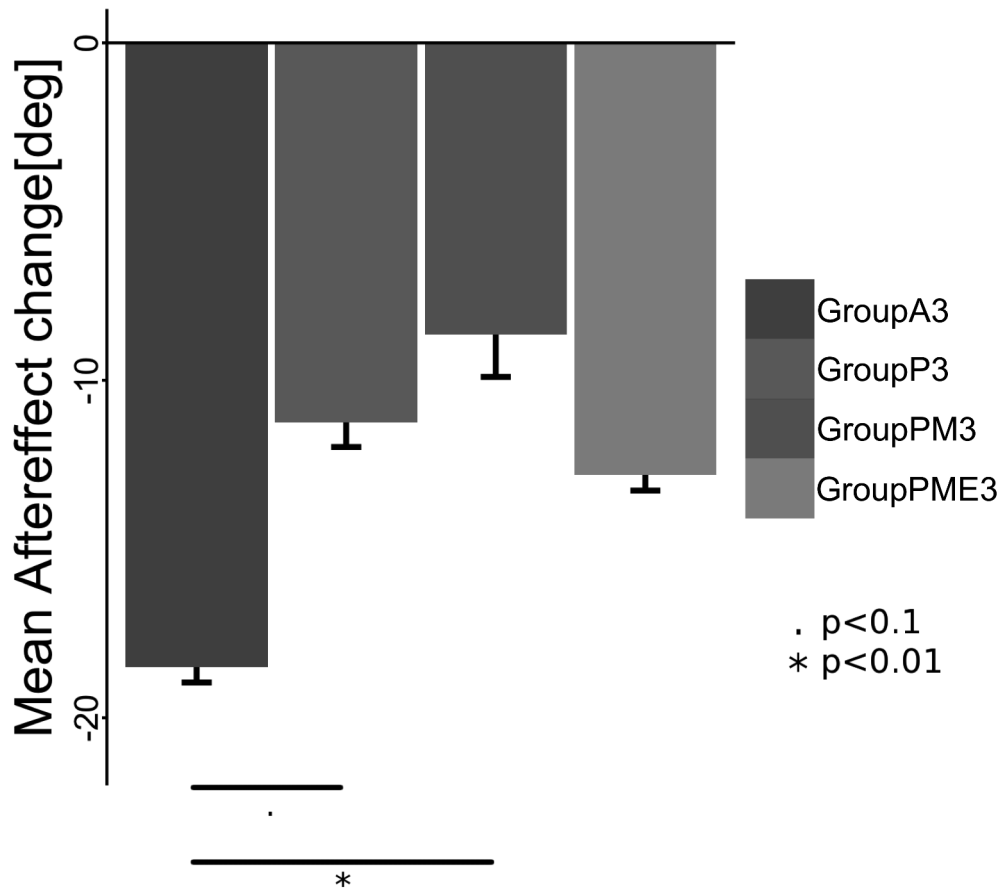


図 5.4 Mean Aftereffect change

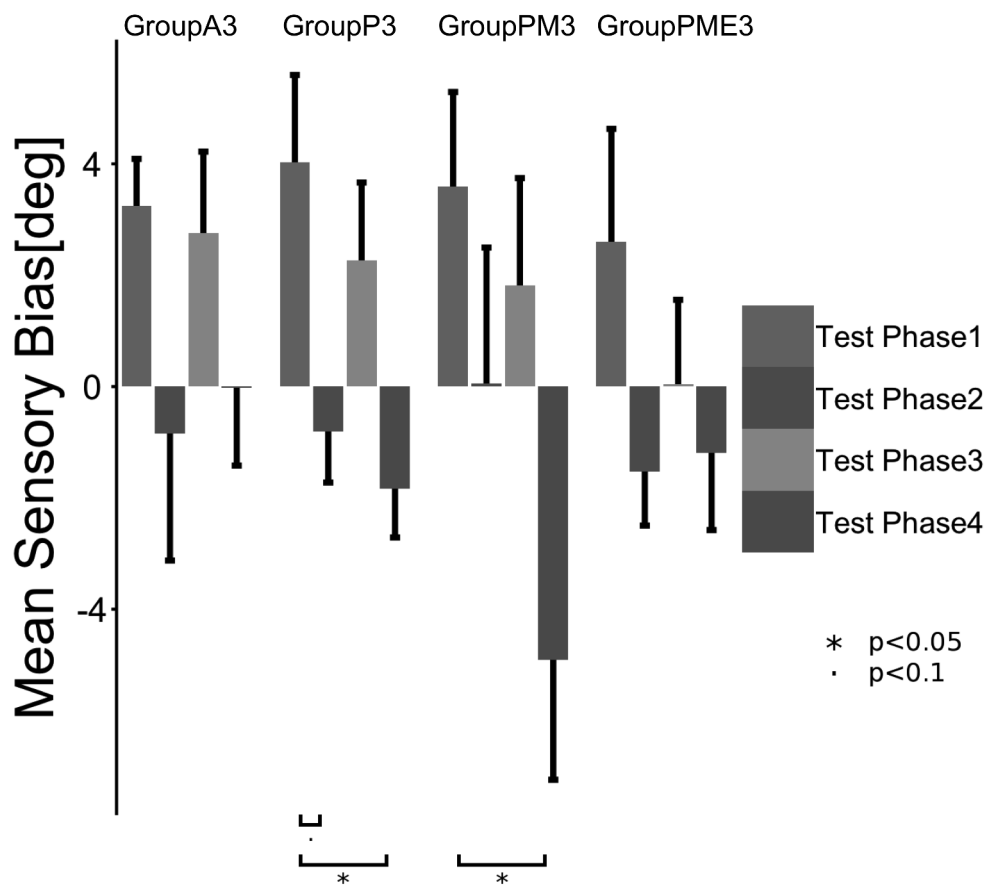


図 5.5 Transition of Mean Sensory Bias

5.3.0.3 手先位置知覚の変化

図 5.5 は感覚バイアスの変化を表している。この図より、すべての群において、課題を経験したことで PSE が回転変換と逆方向に変化したことがわかる。

学習条件が手先位置の知覚に及ぼした影響について評価するため、感覚バイアスについて一元配置分散分析によって各群ごとにフェーズ間で比較した (図 5.5)。その結果、GroupP3 においてフェーズの主効果が確認された ($F(3, 16) = 4.87; p < 0.05$)。さらに、GroupP3 のテストフェーズ 1 とテストフェーズ 2 の間に有意傾向 ($p < 0.1$)、テストフェーズ 1 とテストフェーズ 4 の間に有意差 ($p < 0.05$) がみられた。同様に、

GroupPM3 においてもフェーズの主効果が確認された ($F(3, 16) = 4.87; p < 0.05$). また, GroupPM3 のテストフェーズ 1 とテストフェーズ 4 の間に有意差 ($p < 0.05$) がみられた. すべての群において, テストフェーズ 1 とテストフェーズ 3 の間に有意差がみられなかったという結果は, 身体図式の変化は一時的なものである可能性を示唆する.

上記の分析に加え, フェーズ 2 前後の感覚バイアスの変化量を各被験者ごとに算出し, 一元配置分散分析によって比較した (図 5.6). その結果, すべての群間において有意差はみられなかった. この結果は, 能動的・受動的および自発的な筋収縮の有無, 視覚的な誤差の有無という学習条件の違いは知覚手先位置の変化に影響を及ぼさない可能性を示唆する.

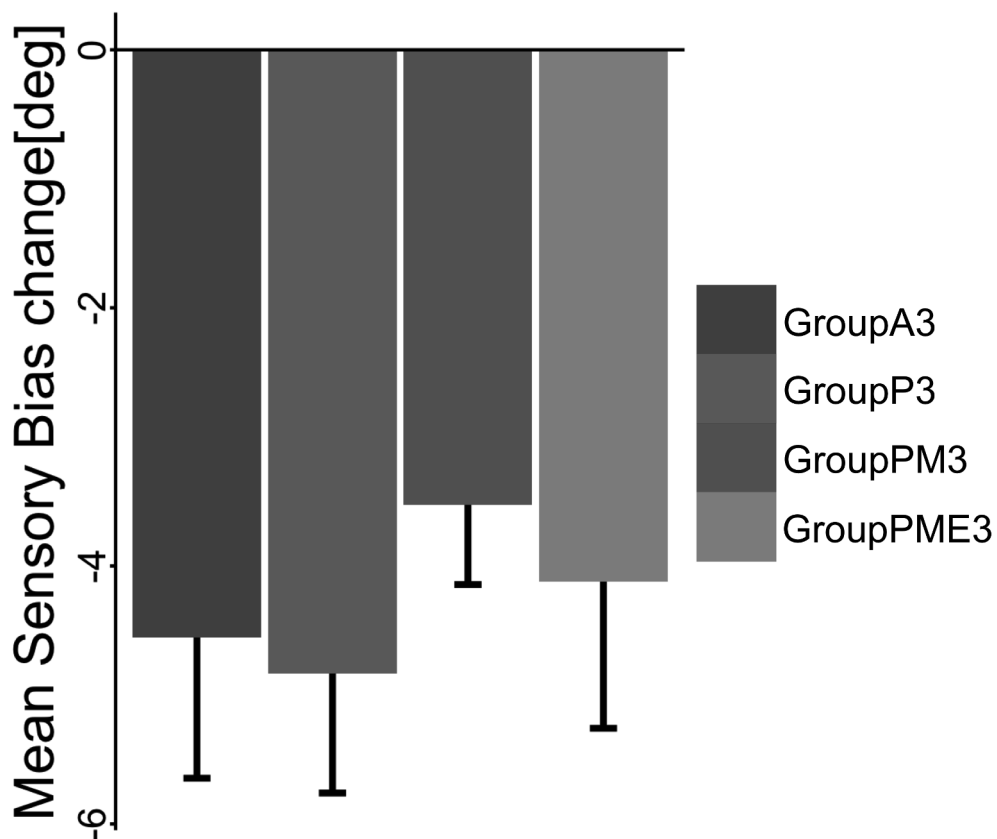


図 5.6 Mean Sensory Bias Change

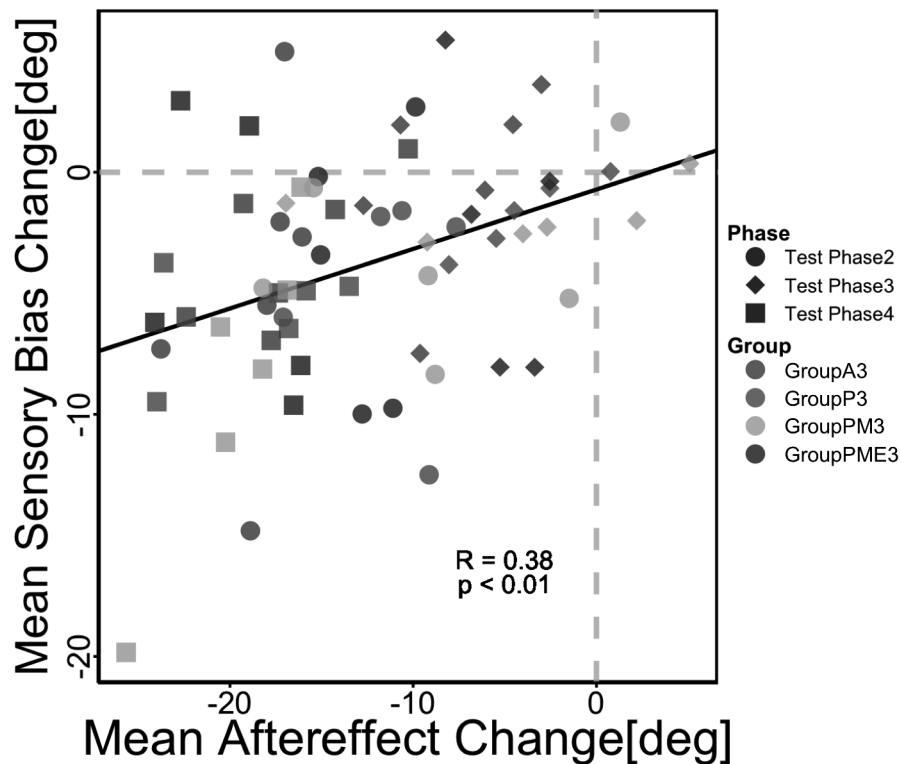


図 5.7 The relationship between the Aftereffect and the Sensory Bias

5.3.0.4 アフターエフェクトと感覚バイアスの関係

図 5.4 と図 5.6 に示したように，すべての群において，課題の学習前後でアフターエフェクトおよび感覚バイアスが増加した。アフターエフェクトと感覚バイアスの関係を調査するため，両者の相関を調べた (図 5.7)。その結果，両者の間には正の相関がみられた ($r = 0.38, p < 0.01$)。つまり，知覚手先位置の変化が大きい被験者ほど大きなアフターエフェクトを示したことがわかる。

5.3.1 考察

本実験では，自発的な筋収縮および視覚的誤差が運動学習に与える影響について検討するため，実験 3 にて検証した Group A3 と Group P3 の 2 群と，新たに用意した Group PM3 と Group PME3 を比較し，調査を行った。

受動的に課題を経験したフェーズ 2 の後のテストフェーズ 2 とテストフェーズ 3 において、角度誤差については Group PM3 は Group P3 とほぼ同様のアフターエフェクトの傾向を示した。しかしながら、Group PM3 のフェーズ 2 前後のアフターエフェクトの変化量は Group P3 ほど大きくなく、受動的な運動開始に自発的な筋収縮を要求したことが課題の学習もしくは身体図式の変化を阻害しているように見える。有意性はないが、この傾向は図 5.5 にも表れている。なお、実験 3 の結果と同様に、アフターエフェクトの変化量と感覚バイアスの変化量の間には正の相関がみられたことから、Group PM3 のアフターエフェクトは手先に関する身体図式の変化に起因すると考えられる。

Group PME3 については、アフターエフェクトにおいて、受動的に課題を経験した被験者群の中で唯一 Group A3 との間に有意差がない。これは、受動的運動に自発的な筋収縮と視覚誤差という要因を加えたことで、能動的運動と同等の学習効果が得られた可能性を意味する。しかしながら、それが内部モデルの獲得に起因するかどうかは本実験の結果のみではわからない。実験 1 で行ったような干渉を利用した実験等が必要である。

第 6 章

考察

6.1 受動的な運動が身体に及ぼす影響

本研究では、4つの心理物理実験を通して、受動的な運動経験による運動学習に影響を及ぼす要因について調査を行った。

実験1では、視覚運動回転変換課題Aとその対立課題Bから構成されるABAパラダイムによる運動学習実験を通して、受動的な運動経験が内部モデルの獲得・修正に及ぼす影響について調査した。課題Bを行わないGroupN1、能動的に行うGroupA1、受動的に行うGroupP1を用意し、すべての群の被験者に課題Aを能動的に学習させた後に続けて課題Bを各条件下で経験させ、その後再び課題Aを行かせた際にみられた干渉の大きさを比較することで、受動的な運動経験が内部モデルの獲得・修正に及ぼす影響について検証した。実験の結果、GroupA1では課題Bによる逆行性干渉が確認されたが、GroupN1とGroupP1では確認されなかった。これは、受動的な運動経験は内部モデルの獲得に対して影響を及ぼさなかったことを意味する。

従来の計算スキームに基づいて考えたものが図2.8である。受動的に課題Bを経験する被験者群は、課題Bの計画およびそれを実現するための運動指令の生成を行わない。その結果、予測した感覚結果と実際に生じた感覚結果の誤差を検出できず、フィードバックコントローラと内部モデルを学習することができない。このため、課題Bに関する内

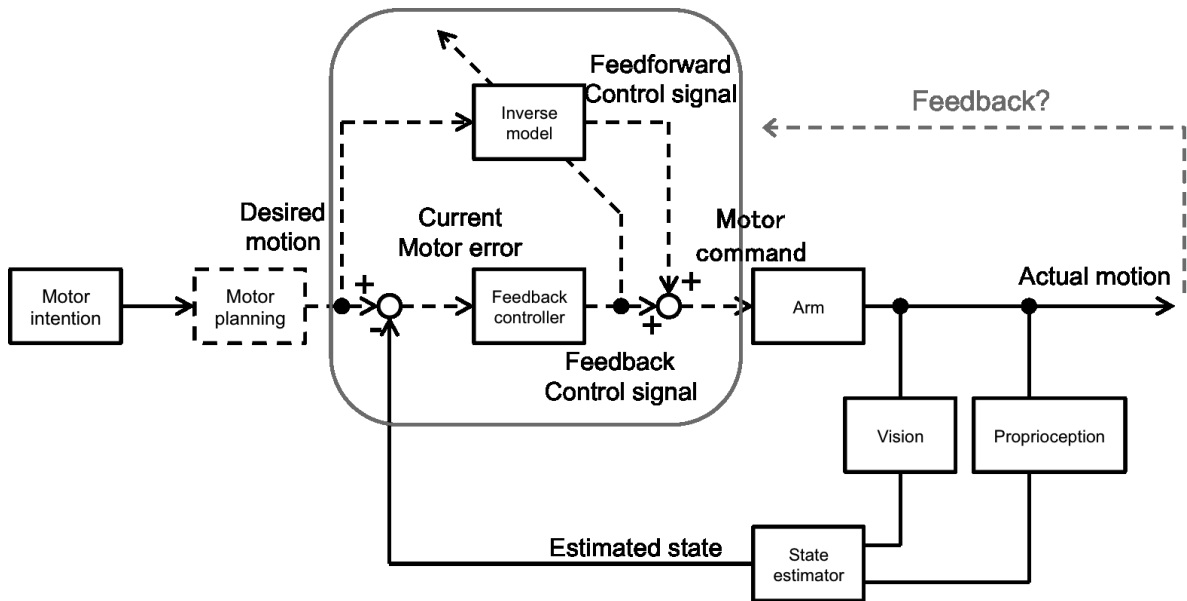


図 6.1 Schematic diagram of the internal models used in Group S2 of the experiment 2.

部モデルを学習することができず、課題 A との間に逆行性干渉が生じなかったと考えられる。

実験 1 の結果より、図 2.8 で示されるような受動的な運動では、運動学習は行われなことが示された。すなわち、図 2.8 の中で欠落している要因こそが内部モデルの獲得に必要であると推測できる。これを踏まえ、実験 2 ではその中でも運動企図に着目した。視覚運動回転変換課題を能動的に学習する GroupA2、受動的に学習する GroupP2、受動的運動の運動方向および開始タイミングを能動的に決定する状態で学習する GroupS2 を用意し、課題経験後の各被験者群に能動的に課題を行わせた際の運動軌道を比較することで、運動企図が運動学習に及ぼす影響について調査した。実験の結果、課題経験後において、すべての群が有意に角度誤差を減少させた。しかしながら、GroupP2 と GroupS2 の間に有意差はみられなかった。これらの結果は、受動的な運動経験は角度誤差の減少を導く、すなわち受動的に運動を行ったときに行われる制御器への何らかのフィードバックが運動技能向上に貢献しており、その運動技能の向上には意識的な運動企図や運動への注意は関与しないことを示唆する (図 6.1)。

実験 1 では、手先運動軌道に受動的な運動経験の影響はみられなかった。しかしなが

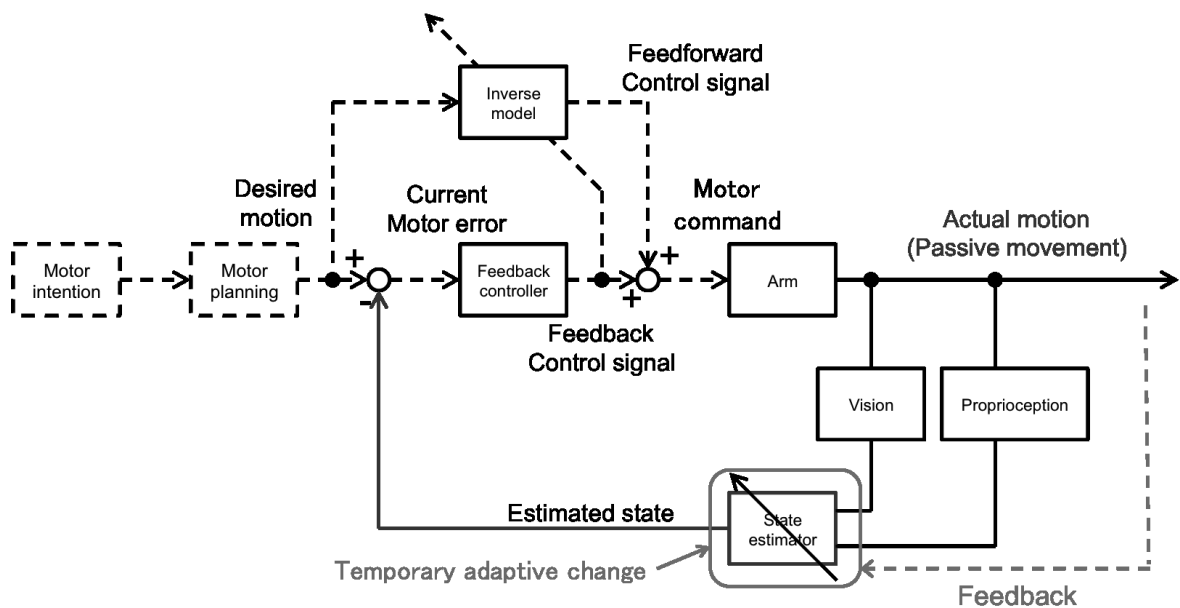


図 6.2 Schematic diagram of the internal models used in Group P3 of the experiment 3.

ら、実験 2 においては、先行研究 [56] と同様に受動的な運動経験による角度誤差の減少が確認された。同じ受動的な運動を経験しているにもかかわらず、結果に違いが生じた原因を明らかにするため、実験 3 では受動的な運動経験が身体図式に与える影響について調査した。視覚運動回転変換課題を能動的に学習する GroupA3 と受動的に学習する GroupP3 を用意し、両群の課題経験前後の知覚手先位置およびアフターエフェクトを比較することで、身体図式の変化が手先運動軌道に与える影響について検証した。実験の結果、GroupA3 には及ばないものの、GroupP3 もアフターエフェクトを示した。また、両群において知覚手先位置の変化が確認され、さらにそれらの間に有意差はみられなかった。加えて、アフターエフェクトと知覚手先位置の変化には正の相関が示された。これらの事実は、身体運動に伴い身体図式は変化し、結果として手先運動軌道にその影響が生じることを意味する。

Group P3 について実験 3 の結果をまとめると図 6.2 のようになる。受動的に運動を行い、感覚フィードバックを受けることで状態推定器が一時的に修正される。この状態で能動的に運動を行った場合、一時的に修正された状態推定器の出力と運動計画の差がフィードバック制御器に入力されるため、状態推定器の状態が元に戻るまでの間はバイア

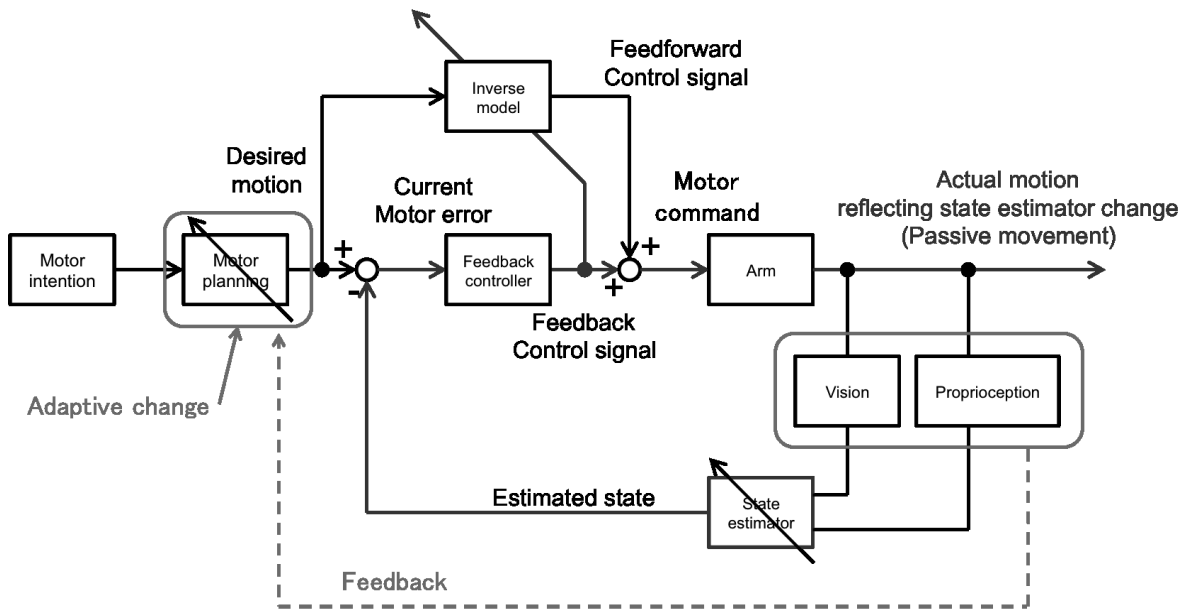


図 6.3 Schematic diagram of the internal models used in Group PME3 of the experiment 4.

スがかかった運動指令が身体に入力されることになる。これが一時的なアフターエフェクトとして実験 3 で観測されていたと考えられる。

実験 4 では、実験 1～3 で着目してこなかった運動指令の生成と感覚フィードバックに着目し、両者が運動学習に与える影響について調査した。実験 3 の被験者群に対して、自発的な運動指令の生成を伴う受動的運動を経験する Group PM3 と、視覚誤差フィードバックが与えられた状態で自発的な運動指令の生成を伴う受動的運動を経験する Group PME3 を新たに追加し、実験 3 の 2 群を含めた 4 群の課題経験前後の知覚手先位置およびアフターエフェクトを比較した。実験の結果、受動的に課題を経験した群の中で Group PME3 のみが、Group A3 と同等のアフターエフェクトを示した。一方で、すべての群において知覚手先位置の変化が確認され、さらにそれらの間に有意差はみられなかった。また、実験 3 と同様に、アフターエフェクトと知覚手先位置の変化には正の相関が示された。これらの結果から、受動的な運動に自発的な運動指令の生成と適切な視覚フィードバックが伴えば、能動的な運動と同等の学習を行うことができる可能性が示唆された。

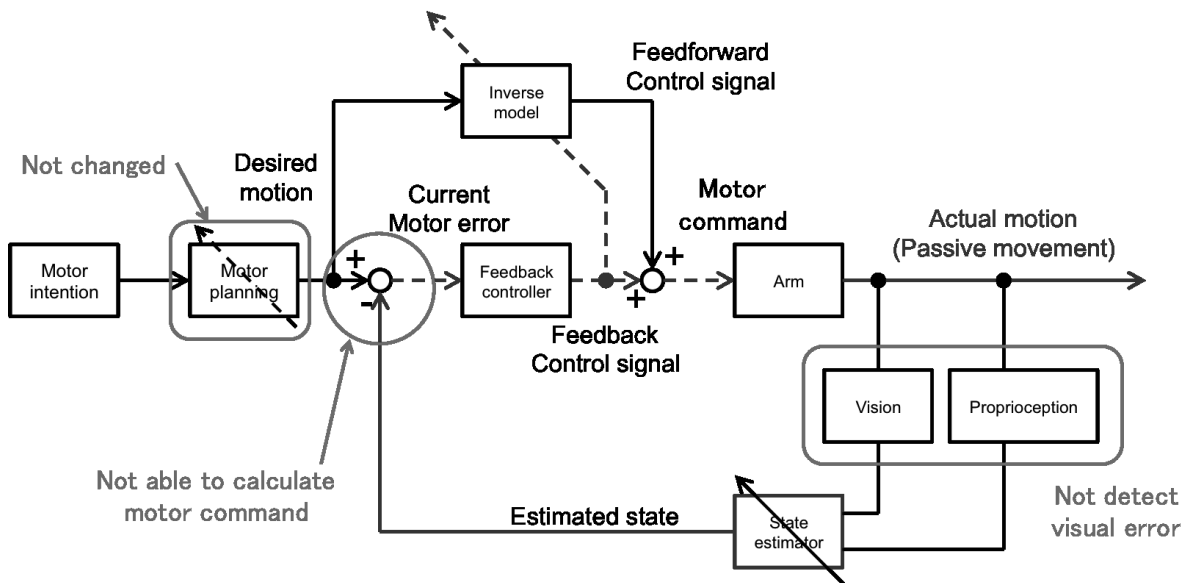


図 6.4 Schematic diagram of the internal models used in Group PM3 of the experiment 4.

Group PME3 の実験条件は図 6.3 のように表せる。ここで、Group PME3 は実現する運動が受動的なものであること以外は Group A3 と同等である。受動的な運動ではあるが、自発的な運動指令の生成を経験するため、運動開始前に予測する感覚結果と実際に得られた感覚結果の間の差を検出することができる。よって、フィードバック制御器と内部モデルを学習することができる。

一方、Group PM3 においては、視覚誤差フィードバックは与えられない。視覚誤差フィードバックが欠落した状態で運動開始前に予測した感覚結果と運動後に得られた感覚結果の間の差の検出が正しく行われると仮定した場合、受動的な運動の経験によって状態推定器が適応的に変化することと、Group PM3 の被験者は課題中に運動指令を生成していることを踏まえれば、フィードバック制御器には変化後の状態推定器の出力の影響を受けた誤差信号が入力されることになる。すなわち、自発的に運動指令を生成すれば、受動的な運動においてもフィードバック制御器と内部モデルは学習される。しかしながら、Group PM3 は Group P3 と同様に、内部モデルの学習を示さなかった。よって、視覚誤差フィードバックの欠落は運動指令の計算を阻害していることが推測できる (図 6.4)。

以上の結果を踏まえ、本稿で対象とした受動的運動に不足している運動企図、運動計画、運動指令といった個々の要素をに関する考察をまとめると次のようになる。

まず、運動企図の有無が受動的運動学習の結果に反映されなかったことから、少なくとも運動企図のみでは運動技能の向上には影響しないことがわかる。

運動計画については、自発的な運動指令の生成と同時に行われるため、結果的に内部モデルの獲得には必要となる。また、運動計画は、視覚的な誤差に応じて修正されている可能性が考えられる。実験 4 において、受動的に課題を経験していた Group PM3 と Group PME3 の結果に差が生じた要因は視覚誤差の有無である。両群の手先位置知覚の変化、すなわち状態推定器の変化に差がないのであれば、視覚的な誤差によって変化した可能性があるのは運動計画と考えるのが妥当である。しかしながら、本実験の結果のみでは、受動的な運動経験や感覚フィードバックと運動計画の関係性については評価できない。

運動指令の生成については、実験 4 のフェーズ 2 前後のアフターエフェクト変化量において、Group PME3 のみが能動的に課題を経験した Group A3 との間に有意差を示さなかったことから、受動的な運動でも自発的な筋収縮を経験し、適切な視覚誤差が与えられれば能動的な運動と同等の運動技能の向上が狙える可能性が示された。しかしながら、Group PME3 と同様に運動指令の生成を経験した Group PM3 のアフターエフェクトは、完全に受動的な運動を行っていた Group P3 のものと全く変わらなかった。すなわち、課題に対して明確な目的意識（ターゲット方向に腕を動かす等）を持たず、ただ運動指令の生成と受動的な運動を関連付けるだけでは学習にならない可能性がある。なお、図 1.2 の計算スキームに基づいて考えれば、内部モデルの獲得に対しては運動指令の生成は必須である可能性があるが、本実験の結果からはこの点については明確にできない。これを確かめるためには、例えば、実験 1 と同様に、ABA パラダイムを行ったときに逆行性干渉が生じるか確認するなどする必要がある。

最後に、状態推定器、すなわち身体図式については、内部モデルの獲得に先んじて外乱に対し適応的に変化することが予想される。先行研究 [19] で報告されているように、

フィードフォワードコントローラ，すなわち逆モデルの変化には時間がかかるのならば，比較的速い速度で生じる身体図式の一時的な変化 [72] を利用することで，人間は突然に課される外乱に対応していることが予想される．本研究の実験 3 および実験 4 においても， 30° の視覚運動回転変換下で受動的な運動を行うだけで手先の知覚位置が変化することが確認できた．他の受動的な運動経験による未経験環境への適応が示された例 [27, 28, 29, 30] でも，この身体図式の変化が働いていたと考えられる．

実験 1，実験 3 の結果は，身体図式の変化は文脈情報の影響を受ける可能性を示唆している．5.3.1 項でも説明したように，身体図式に関する先行研究 [25, 70, 73] の報告から考えれば，身体図式の変化には，複数の感覚間の時空間的な整合性が必要不可欠であると考えられる．仮に，実験 1 において，被験者が 30° から -30° ではなく， 15° から -15° の回転変換を経験していたならば，受動的な運動経験による身体図式の変化が示された可能性がある．

内部モデルは学習時の身体図式に基づいて構築されていると考えられる．つまり，見方を変えれば，身体図式の変化は内部モデル獲得の過程とも解釈できる．

第7章

結論

本論文では、受動的な運動経験が運動学習に影響を及ぼす要因について、視覚運動回転変換環境下での上肢到達運動を例に取り上げた心理物理実験を通して調査した。

第1章では、まず人間の運動適応に関する知見をまとめ、先行研究の課題点について述べた。さらに、ロボットリハビリテーションを取り巻く現状について説明した後、運動学習の分野からみたりハビリテーションの問題点について述べ、本研究の意義、目的について説明した。

第2章では、視覚運動回転変換課題Aとその対立課題Bから構成されるABAパラダイムを用いた運動学習実験を行った。能動的・受動的という学習条件による逆行性干渉の違いについて考察することで、受動的な運動による内部モデル獲得の可能性を検討した。その結果、課題Aを能動的に経験させた後に課題Bを受動的に経験させた場合は逆行性干渉が示されず、受動的な運動経験は内部モデルの獲得や修正を導かない可能性が示唆された。

第3章では、運動企図が受動的な運動経験による運動学習に及ぼす影響を明らかにするため、運動企図のある受動的な運動による運動学習実験を行った。受動的な学習条件における運動企図の有無による手先軌道の違いについて比較することで、運動企図が受動的な運動経験による運動学習に及ぼす影響について考察した。実験の結果、受動的な運動経験による角度誤差の有意な減少が示された。しかしながら、受動的な学習条件下

第 7 章 結論

では運動企図の有無は運動学習に影響を及ぼさなかった。このことから、受動的な運動経験は角度誤差の減少を導くが、その減少に意識的な運動企図や注意は関与しない可能性が示唆された。

第 4 章では、視覚運動回転変換課題を能動的・受動的に学習させ、その前後の知覚手先位置およびアフターエフェクトを比較することで、受動的な運動経験が身体図式に及ぼす影響について検討した。その結果、学習条件によらず知覚手先位置の変化が示された。加えて、その知覚変化とアフターエフェクトの間には正の相関が確認された。上記の結果から、身体運動に伴い身体図式は変化し、その変化が手先軌道に反映されている可能性が示唆された。

第 5 章では、実験 1 から実験 3 で着目しなかった運動指令と感覚フィードバックについて調査するため、実験 3 に対して、自発的な運動指令の生成を伴う受動的運動を経験する被験者群と視覚誤差フィードバックが与えられた状態で自発的な運動指令の生成を伴う受動的運動を経験する被験者群を新たに用意し、実験 3 と同様の実験を行った。その結果、受動的な運動に自発的な運動指令の生成と適切な視覚フィードバックが伴えば、能動的な運動と同等の学習を行うことができる可能性が示唆された。

第 6 章では、本研究で行われた実験結果をまとめ、受動的な運動経験が運動学習に及ぼす影響について考察した。外乱の中での受動的な運動経験が身体図式の一時的な変化を導く可能性を示し、身体図式が変化する条件や、変化の生じる理由について論じた。

本研究の結果から、先行研究で報告されている受動的な運動学習による運動技能の向上には 2 つのパターンがある可能性が示唆された。一つは能動的・受動的という運動時の状態によらず、運動の経験により一時的にみられる状態推定器の適応であり、もう一方は自発的な運動指令の生成と適切な視覚誤差フィードバックが伴う受動的な運動を経験することで生じる内部モデルの適応である。すなわち、ロボットリハビリテーションのような受動的な運動によって運動技能の向上を図るならば、リハビリテーション訓練によってどちらの適応が生じるか判断できなければならない。

第 1 章にて述べたように、現在行われているロボットリハビリテーションにおいては、

第 7 章 結論

1) 訓練時の患者への力覚支援方法 2) 運動機能の回復を導く要因 という 2 点について未だ明確ではない。本研究の結果は、内部モデルの学習を前提としたうえで、この 2 点について基本的な方針が提案できる。まず、1) 訓練時の患者への力覚支援方法については、患者は与えられた訓練課題に対して最小限の力で動かしたい方向を指示し、ロボットはその動きを邪魔しないよう補助するだけで良い、と考えられる。ただ反復的にロボットで四肢を動かしたり、必要以上に四肢の軌道を制限したりすることは、内部モデルの学習に関してはあまり効果がない。2) 運動機能の回復を導く要因については、本研究の結果からは自発的な運動指令の生成と視覚誤差フィードバックの提示であるといえる。すなわち、内部モデルの学習という形で運動技能を定着させるのであれば、1) で示した方法で問題ないを考える。

本研究は、受動的な運動が身体図式の変化を導き、それが感覚運動適応に繋がる可能性を示唆した。本研究の成果は、運動リハビリテーションやスポーツトレーニングにおける新たな手法の提案や既存手法の改善に繋がることが期待される。しかしながら、本研究で得られた知見は、運動学習メカニズムの一側面に過ぎない。脳の情報処理メカニズムを理解するために、今後も様々な角度からアプローチする必要がある。

謝辞

本論文を作成するにあたり，多くの方々にご協力していただきました．ここに，心より感謝の意を表します．

近藤 敏之教授には，近藤研究室に配属以来，研究の魅力や難しさ，考え方，研究に対する姿勢など本当に多くの事柄について懇切丁寧なご指導ご教授を賜りました．本研究においても，常に大変親身なご助言とご支援をいただきました．近藤教授のご助言，ご指導がなければ本論文を完成させることはできませんでした．ここに，深く感謝申し上げます．また，日頃よりゼミなどを通じて数々の有益なご討論やご助言をいただいた同研究室の皆様にも，大変お世話になりましたことをお礼申し上げます．

最後に，実験にご協力していただいた皆様に，心より感謝申し上げます．

参考文献

- [1] M. Kawato, Kazunori Furukawa, and R. Suzuki. A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. *Biological Cybernetics*, Vol. 57, No. 3, pp. 169–185, October 1987.
- [2] N. A. BERNSTEIN. On dexterity and its development. *LEA*, pp. 3–236, 1996.
- [3] D M. Wolpert and R C. Miall. Forward Models for Physiological Motor Control. *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, Vol. 9, No. 8, pp. 1265–1279, November 1996.
- [4] M Kawato. Internal models for motor control and trajectory planning. *Current opinion in neurobiology*, Vol. 9, No. 6, pp. 718–27, December 1999.
- [5] D M Wolpert, R C Miall, and Mitsuo Kawato. Internal models in the cerebellum. *Trends in cognitive sciences*, Vol. 2, No. 9, pp. 338–47, September 1998.
- [6] Reza Shadmehr and T Brashers-Krug. Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 17, No. 1, pp. 409–19, January 1997.
- [7] John W Krakauer, Claude Ghez, and M Felice Ghilardi. Adaptation to visuo-motor transformations: consolidation, interference, and forgetting. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 25, No. 2, pp. 473–8, January 2005.

参考文献

- [8] J W Krakauer, M F Ghilardi, and C Ghez. Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature neuroscience*, Vol. 2, No. 11, pp. 1026–31, November 1999.
- [9] Kelly M Goedert and Daniel B Willingham. Patterns of interference in sequence learning and prism adaptation inconsistent with the consolidation hypothesis. *Learning & memory (Cold Spring Harbor, N.Y.)*, Vol. 9, No. 5, pp. 279–92, 2002.
- [10] Graham Caithness, Rieko Osu, Paul Bays, Henry Chase, Jessica Klassen, Mitsuo Kawato, Daniel M Wolpert, and J Randall Flanagan. Failure to consolidate the consolidation theory of learning for sensorimotor adaptation tasks. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 24, No. 40, pp. 8662–71, October 2004.
- [11] R Christopher Miall, Ned Jenkinson, and Kunal Kulkarni. Adaptation to rotated visual feedback: a re-examination of motor interference. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, Vol. 154, No. 2, pp. 201–10, January 2004.
- [12] Rieko Osu, Satomi Hirai, Toshinori Yoshioka, and Mitsuo Kawato. Random presentation enables subjects to adapt to two opposing forces on the hand. *Nature neuroscience*, Vol. 7, No. 2, pp. 111–2, February 2004.
- [13] Virginia Wigmore, Christine Tong, and J Randall Flanagan. Visuomotor rotations of varying size and direction compete for a single internal model in motor working memory. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, Vol. 28, No. 2, pp. 447–57, April 2002.
- [14] John W Krakauer, Pietro Mazzoni, Ali Ghazizadeh, Roshni Ravindran, and Reza Shadmehr. Generalization of motor learning depends on the history of prior action. *PLoS biology*, Vol. 4, No. 10, p. e316, October 2006.

参考文献

- [15] Andrew a G Mattar and David J Ostry. Modifiability of generalization in dynamics learning. *Journal of neurophysiology*, Vol. 98, No. 6, pp. 3321–9, December 2007.
- [16] Andrew A G Mattar and David J Ostry. Generalization of dynamics learning across changes in movement amplitude. *Journal of neurophysiology*, Vol. 104, No. 1, pp. 426–38, July 2010.
- [17] Teser Wong and Denise Y P Henriques. Visuomotor adaptation does not recalibrate kinesthetic sense of felt hand path. *Journal of neurophysiology*, Vol. 101, No. 2, pp. 614–23, February 2009.
- [18] Danielle Salomonczyk, Erin K Cressman, and Denise Y P Henriques. Proprioceptive recalibration following prolonged training and increasing distortions in visuomotor adaptation. *Neuropsychologia*, Vol. 49, No. 11, pp. 3053–62, September 2011.
- [19] Naoki Saijo and Hiroaki Gomi. Multiple motor learning strategies in visuomotor rotation. *PloS one*, Vol. 5, No. 2, p. e9399, January 2010.
- [20] Pietro Mazzoni and John W Krakauer. An implicit plan overrides an explicit strategy during visuomotor adaptation. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 26, No. 14, pp. 3642–5, April 2006.
- [21] P N Sabes. The planning and control of reaching movements. *Current opinion in neurobiology*, Vol. 10, No. 6, pp. 740–6, December 2000.
- [22] C D Frith, S J Blakemore, and D M Wolpert. Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, Vol. 355, No. 1404, pp. 1771–88, December 2000.
- [23] Catherine E Lang and Amy J Bastian. Cerebellar damage impairs automaticity of a recently practiced movement. *Journal of neurophysiology*, Vol. 87, No. 3, pp. 1336–47, March 2002.

参考文献

- [24] S J Blakemore and J Decety. From the perception of action to the understanding of intention. *Nature reviews. Neuroscience*, Vol. 2, No. 8, pp. 561–7, August 2001.
- [25] Matthis Synofzik, Gottfried Vosgerau, and Albert Newen. I move, therefore I am: a new theoretical framework to investigate agency and ownership. *Consciousness and cognition*, Vol. 17, No. 2, pp. 411–24, June 2008.
- [26] Erin K Cressman and Denise Y P Henriques. Reach adaptation and proprioceptive recalibration following exposure to misaligned sensory input. *Journal of neurophysiology*, Vol. 103, No. 4, pp. 1888–95, April 2010.
- [27] HERBERT L. PICK and JOHN C. HAY. A PASSIVE TEST OF THE HELD REAFFERENCE HYPOTHESIS. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 20, No. 3c, pp. 1070–1072, June 1965.
- [28] WILLIAM B. TEMPLETON, IAN P. HOWARD, and ANN E. LOWMAN. PASSIVELY GENERATED ADAPTATION TO PRISMATIC DISTORTION. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 22, No. 1, pp. 140–142, February 1966.
- [29] John S Baily. Arm-body adaptation with passive arm movements. *Perception & Psychophysics*, Vol. 12, No. 1, pp. 39–44, January 1972.
- [30] Juan Fernández-Ruiz, Rosalinda Díaz, Carlos Aguilar, and Cynthia Hall-Haro. Decay of prism aftereffects under passive and active conditions. *Brain research. Cognitive brain research*, Vol. 20, No. 1, pp. 92–7, June 2004.
- [31] Y Laufer, S Hocherman, and R Dickstein. Accuracy of reproducing hand position when using active compared with passive movement. *Physiotherapy research international : the journal for researchers and clinicians in physical therapy*, Vol. 6, No. 2, pp. 65–75, January 2001.
- [32] V Gritsenko, N I Krouchev, and J F Kalaska. Afferent input, efference copy, signal noise, and biases in perception of joint angle during active versus passive elbow movements. *Journal of neurophysiology*, Vol. 98, No. 3, pp. 1140–54,

参考文献

- September 2007.
- [33] Nicole Malfait, Denise Y Henriques, and Paul L Gribble. Shape distortion produced by isolated mismatch between vision and proprioception. *Journal of neurophysiology*, Vol. 99, No. 1, pp. 231–43, January 2008.
- [34] H Hummelsheim and C Eickhof. Repetitive sensorimotor training for arm and hand in a patient with locked-in syndrome. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, Vol. 31, No. 4, pp. 250–6, December 1999.
- [35] Susan E Fasoli, Hermano I Krebs, Joel Stein, Walter R Frontera, and Neville Hogan. Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic stroke. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Vol. 84, No. 4, pp. 477–82, April 2003.
- [36] Joel Stein, Hermano Igo Krebs, Walter R. Frontera, Susan E. Fasoli, Richard Hughes, and Neville Hogan. Comparison of Two Techniques of Robot-Aided Upper Limb Exercise Training After Stroke. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, Vol. 83, No. 9, pp. 720–728, September 2004.
- [37] C Weiller, M Jüptner, S Fellows, M Rijntjes, G Leonhardt, S Kiebel, S Müller, H C Diener, and a F Thilmann. Brain representation of active and passive movements. *NeuroImage*, Vol. 4, No. 2, pp. 105–10, October 1996.
- [38] F Alary, B Doyon, I Loubinoux, C Carel, K Boulanouar, J P Ranjeva, P Celsis, and F Chollet. Event-related potentials elicited by passive movements in humans: characterization, source analysis, and comparison to fMRI. *NeuroImage*, Vol. 8, No. 4, pp. 377–90, November 1998.
- [39] C Carel, Isabelle Loubinoux, Kader Boulanouar, Claude Manelfe, Olivier Rascol, Pierre Celsis, and F Chollet. Neural substrate for the effects of passive training on sensorimotor cortical representation: a study with functional magnetic resonance imaging in healthy subjects. *Journal of cerebral blood flow and*

参考文献

- metabolism : official journal of the International Society of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, Vol. 20, No. 3, pp. 478–84, March 2000.
- [40] Martin Lotze, Christoph Braun, Niels Birbaumer, Silke Anders, and Leonardo G Cohen. Motor learning elicited by voluntary drive. *Brain : a journal of neurology*, Vol. 126, No. Pt 4, pp. 866–72, April 2003.
- [41] Sazzad M Nasir, Mohammad Darainy, and David J Ostry. Sensorimotor adaptation changes the neural coding of somatosensory stimuli. *Journal of neurophysiology*, Vol. 109, No. 8, pp. 2077–85, April 2013.
- [42] A R Fugl-Meyer, L Jääskö, I Leyman, S Olsson, and S Steglind. The post-stroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, Vol. 7, No. 1, pp. 13–31, January 1975.
- [43] B B Hamilton, J A Laughlin, R C Fiedler, and C V Granger. Interrater reliability of the 7-level functional independence measure (FIM). *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, Vol. 26, No. 3, pp. 115–9, September 1994.
- [44] R J Nudo, G W Milliken, W M Jenkins, and M M Merzenich. Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 16, No. 2, pp. 785–807, January 1996.
- [45] HI Krebs, Neville Hogan, M.L. Aisen, and B.T. Volpe. Robot-aided neurorehabilitation. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 75–87, March 1998.
- [46] D J Reinkensmeyer, L E Kahn, M Averbuch, A McKenna-Cole, B D Schmit, and W Z Rymer. Understanding and treating arm movement impairment after chronic brain injury: progress with the ARM guide. *Journal of rehabilitation research and development*, Vol. 37, No. 6, pp. 653–62, 2000.

参考文献

- [47] Gert Kwakkel, Boudewijn J Kollen, and Hermano I Krebs. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review. *Neurorehabilitation and neural repair*, Vol. 22, No. 2, pp. 111–21, 2008.
- [48] Elena Vergaro, Maura Casadio, Valentina Squeri, Psiche Giannoni, Pietro Morasso, and Vittorio Sanguineti. Self-adaptive robot training of stroke survivors for continuous tracking movements. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Vol. 7, p. 13, January 2010.
- [49] R Riener, T Nef, and G Colombo. Robot-aided neurorehabilitation of the upper extremities. *Medical & biological engineering & computing*, Vol. 43, No. 1, pp. 2–10, January 2005.
- [50] T Flash and N Hogan. The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 1688–703, July 1985.
- [51] Shyam Prabhakaran, Eric Zarahn, Claire Riley, Allison Speizer, Ji Y Chong, Ronald M Lazar, Randolph S Marshall, and John W Krakauer. Inter-individual variability in the capacity for motor recovery after ischemic stroke. *Neurorehabilitation and neural repair*, Vol. 22, No. 1, pp. 64–71, 2008.
- [52] Edwin H F van Asseldonk, Martijn Wessels, Arno H a Stienen, Frans C T van der Helm, and Herman van der Kooij. Influence of haptic guidance in learning a novel visuomotor task. *Journal of physiology, Paris*, Vol. 103, No. 3-5, pp. 276–85, 2009.
- [53] Erin K Cressman and Denise Y P Henriques. Sensory recalibration of hand position following visuomotor adaptation. *Journal of neurophysiology*, Vol. 102, No. 6, pp. 3505–18, December 2009.
- [54] David J Reinkensmeyer and James L Patton. Can robots help the learning of skilled actions? *Exercise and sport sciences reviews*, Vol. 37, No. 1, pp. 43–51,

参考文献

- January 2009.
- [55] Iseult a M Beets, Marc Macé, Raf L J Meesen, Koen Cuypers, Oron Levin, and Stephan P Swinnen. Active versus passive training of a complex bimanual task: is prescriptive proprioceptive information sufficient for inducing motor learning? *PloS one*, Vol. 7, No. 5, p. e37687, January 2012.
- [56] Takashi Sakamoto and Toshiyuki Kondo. Can passive arm movement affect adaptation to visuomotor rotation? In *2012 IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL)*, pp. 1–6. IEEE, November 2012.
- [57] M F Ghilardi, J Gordon, and C Ghez. Learning a visuomotor transformation in a local area of work space produces directional biases in other areas. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 73, No. 6, pp. 2535–2539, 1995.
- [58] Manos Tsakiris, Maike D Hesse, Christian Boy, Patrick Haggard, and Gereon R Fink. Neural signatures of body ownership: a sensory network for bodily self-consciousness. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, Vol. 17, No. 10, pp. 2235–44, October 2007.
- [59] Danielle Salomonczyk, Erin K Cressman, and Denise Y P Henriques. The role of the cross-sensory error signal in visuomotor adaptation. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, Vol. 228, No. 3, pp. 313–25, July 2013.
- [60] Michel Desmurget and Angela Sirigu. A parietal-premotor network for movement intention and motor awareness. *Trends in cognitive sciences*, Vol. 13, No. 10, pp. 411–9, October 2009.
- [61] H a Ingram, P van Donkelaar, J Cole, J L Vercher, G M Gauthier, and R C Miall. The role of proprioception and attention in a visuomotor adaptation task. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation*

参考文献

- cérébrale*, Vol. 132, No. 1, pp. 114–26, May 2000.
- [62] G Wulf and W Prinz. Directing attention to movement effects enhances learning: a review. *Psychonomic bulletin & review*, Vol. 8, No. 4, pp. 648–60, December 2001.
- [63] Jordan a Taylor and Kurt a Thoroughman. Divided attention impairs human motor adaptation but not feedback control. *Journal of neurophysiology*, Vol. 98, No. 1, pp. 317–26, July 2007.
- [64] S Jaric, D M Corcos, G L Gottlieb, D B Ilic, and M L Latash. The effects of practice on movement distance and final position reproduction: implications for the equilibrium-point control of movements. *Experimental brain research*, Vol. 100, No. 2, pp. 353–9, January 1994.
- [65] D a Rosenbaum, R J Meulenbroek, and J Vaughan. Remembered positions: stored locations or stored postures? *Experimental brain research*, Vol. 124, No. 4, pp. 503–12, March 1999.
- [66] C M Harris and D M Wolpert. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, Vol. 394, No. 6695, pp. 780–4, August 1998.
- [67] Harry Kesten. Accelerated Stochastic Approximation. *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 29, No. 1, pp. 41–59, March 1958.
- [68] Bernhard Treutwein. Adaptive psychophysical procedures. *Vision research*, Vol. 35, No. 17, pp. 2503–22, September 1995.
- [69] M Botvinick and J Cohen. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756, February 1998.
- [70] Manos Tsakiris. My body in the brain: a neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia*, Vol. 48, No. 3, pp. 703–12, February 2010.
- [71] S J Blakemore, C D Frith, and D M Wolpert. Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. *Journal of cognitive neuroscience*,

参考文献

- Vol. 11, No. 5, pp. 551–9, September 1999.
- [72] 北川哲生, 福田浩士, 福村直博, 宇野洋二. ヒトの運動における手先の位置知覚の誤差. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, Vol. J89-D, No. 6, pp. 1429–1439, 2006.
- [73] Angelo Maravita, Charles Spence, and Jon Driver. Multisensory integration and the body schema: close to hand and within reach. *Current biology : CB*, Vol. 13, No. 13, pp. R531–9, July 2003.