T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	リズム的能動運動に伴う予測情報が時間知覚に及ぼす影響
Title(English)	
著者(和文)	田中多恵子
Author(English)	Taeko Tanaka
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11857号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三宅 美博,山村 雅幸,石井 秀明,小野 功,瀧ノ上 正浩
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11857号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

リズム的能動運動に伴う予測情報が
時間知覚に及ぼす影響

情報理工学院　情報工学系　知能情報コース

田中　多恵子

令和三年度 博士論文

リズム的能動運動に伴う予測情報が時間知覚に及ぼす影響

東京工業大学大学院 情報理工学院　情報工学系　知能情報コース

田中　多恵子

. . . . . .

THE EFFECT OF PREDICTIVE INFORMATION BY RHYTHMIC VOLUNTARY MOVEMENT ON TIME PERCEPTION

A DISSERTATION SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF DEPARTMENT OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND SYSTEMS SCIENCE, TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY

TAEKO TANAKA

MARCH 2022

. . . . . .

主査教官	三宅　美博	Principal examiner	Yoshihiro Miyake
審査教官	小野　功	Examiner	Isao Ono
審査教官	瀧ノ上　正浩	Examiner	Masahiro Takinoue
審査教官	山村　雅幸	Examiner	Masayuki Yamamura
審査教官	石井　秀明	Examiner	Hideaki Ishii

© 2021 Taeko Tanaka

論文概要

人間が能動的に身体運動を行う際には、運動の結果生じる感覚フィードバックを予測していることが示唆されている。本研究は、リズム的能動運動に伴う予測が時間知覚に及ぼす影響について分析した。その結果、リズム的な繰り返し動作をする視覚刺激（アバター）と同調して能動運動する条件下で、刺激と運動の位相的前後関係を制御すると、アバターへの印象評価が非対称に変化することが示された。さらに聴体性感覚間での時間順序判断課題で能動運動とリズム刺激からの影響を調べたところ、両者はそれぞれ時間分解能の精度を向上させたが、相乗効果は観察されなかった。これらにより、リズム的能動運動に伴う予測情報は時間知覚に影響を及ぼすこと、さらに能動運動とリズム刺激のそれぞれが影響を及ぼすことが示された。(333 字)

論文要旨

人間は、日常生活における活動を迅速かつ的確に行うために、先を読み、予測をしながら行動をしている。人間が能動的に身体を動かす際には、運動の結果生じる感覚フィードバックを予測していることが示唆されている。本論文は、能動運動時に運動指令にともなって生じる予測情報に着目し、時間知覚にどのような影響を及ぼすかについて検討した研究成果について述べる。

私たちを取り巻く環境は絶えず変化しており、外界の情報は感覚器官を通して入力されるとともに、身体内部からの感覚情報が神経中枢へと入力されている。これら情報は脳内で統合され、この感覚統合によって私たちは安定した知覚活動を行うことができている。能動運動の際には、脳内では運動野から筋肉に運動指令が出るとともに、情報のコピーが頭頂葉へと発せられることで感覚フィードバックが予測可能であると考えられている。また各感覚情報は、実際には脳内で処理されるまでの時間に違いが生じているにも関わらず、感覚統合機能によって同一の事象での内容と知覚できることが、先行研究で示唆されている。しかし運動に伴って生じる予測情報が、どのようにこの同時性知覚に関わるのかは明らかになっていない。また、時間知覚は私たちの日常行動の予測と密接に関わりがあるが、その詳細はまだ明らかになっていない。本論文の目的は、これら残された課題に焦点をあて、能動運動に伴う予測情報が時間知覚に及ぼす影響について、実験内容に基づき分析し、明らかにするものである。

本論文はまず序論で、人間が能動的に身体を動かす際に生じる感覚フィードバックの予測に関わる先行研究ついて整理を行う。また本研究で着目する感覚予測について、先行研究で示唆されている内容をもとに同時性知覚との関連性やそのメカニズムの解明の必要性を整理する。以上の内容をもとに、本研究の目的を述べて具体的な問題意識と課題設定についてまとめる。

第 2 章では、序論で設定する課題１　能動運動時の予測情報が知覚に及ぼす影響について検証した実験内容および結果を述べる。実験では、繰り返し動作によるリズム運動を運動

課題とし、自身の動きに同期するアバター映像に対する印象評価を実施した。アバター映像は、参加者が行うリズム運動と同期する動作映像のほかに、参加者よりも遅延または先行して動作するという時間的な不一致をもって提示される映像を加えて、計３種用意した。参加者による印象評価の結果、遅延動作をするアバター映像に対しては、他人のような、親しみにくいなどの違和感を感じる印象であったが、先行動作をするアバター映像に対しては、興味深い、感じのよいという肯定的な印象であった。これらの結果より、リズム的な繰り返し動作をする視覚刺激（アバター）と同調して能動運動をする条件下では、刺激と運動の位相的前後関係を制御するとアバターの印象評価が非対称に変化することが確認できた。また先行動作をするアバターに対する肯定的な印象は、リズム運動に伴う予測情報の内容と符合したことで導かれたことが示唆される。

第３章では、序論で提示する課題２ 能動運動時の予測情報が時間知覚に及ぼす影響について行った実験内容、および結果を述べる。実験課題は、聴体性感覚間による時間順序判断（Temporal order judgment; TOJ）課題である。この実験では、能動運動に伴う予測情報が TOJ 課題の判別に影響し、時間分解能の精度が向上するかどうかについて検証を行った。運動条件は、随意運動条件と不随意運動条件の２条件を設定した。刺激の提示条件は、体性感覚刺激を１回のみ提示した場合と、リズムを伴って複数回提示した場合の２条件を設定した。リズムを伴って提示した条件では、周期的なリズムが刺激到来予測の手がかりとなって時間分解能の精度向上にどの程度影響を及ぼすかについて検証を行った。時間分解能の精度については、丁度可知差異（JND)の値を用いて、各条件間の比較検証を実施した。実験の結果、能動運動とリズム刺激は、それぞれ時間分解能の精度を向上させたことが確認できた。リズム刺激の条件では、周期的なリズムが予測の手がかりとなって時間分解能の精度向上に影響したことが示唆される。随意運動とリズム刺激の組合せ条件では、不随意運動とリズム刺激の組合せ条件との比較において、検定の結果有意差は認められず、随意運動とリズム刺激の相乗効果は観察されなかった。

第４章は総合考察として、各実験内容から本研究における考察内容をまとめ、近年の神経基盤に関する研究内容に観点からも考察も行った。また展望として、能動運動時における人間の感覚知覚および時間知覚の特性を考慮した応用可能性について述べている。

第５章は結論として、第２章、第３章で述べた各実験結果をまとめ、本論文全体の成果を整理した。本論文の成果は、能動運動の遂行時の運動予測とそれに伴う感覚予測の時間知覚への影響について、具体的な事象をもってその知見を提示したことである。(2022 字)

目次

論文概要 iii

論文要旨 iv

目次 vi

図目次 x

表目次 xi

第１章　序論 2

１．１．研究背景 2

１．１．１．同時性知覚と能動運動 2

１．１．２．運動感覚の情報処理プロセス 4

１．１．３．能動運動に伴う予測に関する研究 6

１．２．残された課題 10

１．３．研究目的 11

１．４．研究方針 12

１．５．本論文の構成 13

第２章　リズム的能動運動がアバターの印象評価に及ぼす影響 15

２．１．緒言 15

２．２．背景と目的 16

２．２．１．遅延が人間の心理に及ぼす影響 16

２．２．２．実験の目的 18

２．３．実験方法..... 19
２．３．１．参加者..... 19
２．３．２．実験課題..... 19
２．２．３．装置..... 19
２．３．４．実験条件..... 22
２．３．５．アバターイメージ..... 22
２．３．６．アバター映像表示の時間ずれ設定..... 24
２．２．７．実験手順..... 27
２．３．８．印象評価の実施..... 30
２．３．９．分析方法..... 32
２．４．実験結果..... 33
２．５． 考察..... 36
２．５．１．リズム的能動運動に伴う予測情報の影響..... 36
２．５．２．馴化による影響..... 37
２．６．結言..... 38
第３章　能動運動とリズミカルな刺激提示が　時間知覚に及ぼす影響..... 40
３．１．緒言..... 40
３．２．背景と目的..... 41
３．３．実験方法..... 43
３．３．１．実験参加者..... 43
３．３．２．実験課題..... 43
３．３．３．実験装置..... 45

３．３．４．実験条件..... 47
３．３．５．実験手順..... 50
３．３．６．分析方法..... 53
３．４．実験結果..... 56
３．５．考察..... 66
３．５．１．随意運動の影響..... 66
３．５．２．リズミカルな刺激提示の影響..... 68
３．５．３．随意運動とリズム刺激提示の相互作用..... 70
３．６．結言..... 71
第４章　総合考察..... 73
４．１．本研究から得られた結果のまとめ..... 73
４．２．運動制御モデルの観点からの考察..... 75
４．３．運動に伴う予測情報の時間知覚への影響..... 78
４．４．本研究の結果に見る運動知覚連関..... 79
４．５．神経科学の観点からの考察..... 81
４．６．今後の研究への展望..... 83
４．６．１．視覚情報の評価実施のバリエーション..... 83
４．６．２．評価方法の検討..... 84
４．６．３．本研究知見の応用領域..... 85
第５章　結論..... 87
謝辞 89
参考文献 91

研究業績 104

原著論文..... 104

国際会議論文（査読あり）..... 104

国内会議論文（査読無し）..... 105

図目次

Figure 2.1. 実験装置の概要図

Figure 2.2. swing motion しているアバター

Figure 2.3. 予備実験実施内容と結果

Figure 2.4. 実験手順

Figure 2.5. 実験風景

Figure 2.6. 印象評価分析結果

Figure 3.1. 時間順序判断課題　概要

Figure 3.2. 体性感覚刺激提示デバイス

Figure 3.3. 実験のフローチャート

Figure 3.4. 実験風景

Figure 3.5. 心理物理曲線

Figure 3.6. IM-1T 条件と VM-1T 条件間の比較

Figure 3.7. IM-RT 条件と IM-1T 条件間の比較

Figure 3.8. IM-RT 条件と VM-RT 条件間の比較

Figure 3.9. VM-RT 条件と VM-1T 条件間の比較

Figure 3.10.実験条件別 JND の平均値

Figure 3.11.実験参加者の個人データの分布

表目次

Table 2.1.　アバター動作設定のパラメータセット

Table 2.2.　印象評価のためのアンケート項目

Table 3.1.　実験条件

Table 3.2.　実験条件ごとの JND 値の平均値と標準誤差

Table 3.3.　Wilcoxon 符号付き順位検定の実施結果

第１章

序論

第１章　序論

１．１．研究背景

１．１．１．同時性知覚と能動運動

私たちを取り巻く周囲の状況は、多様であり、絶えず変化をしている。その中で、私たち人間は、感覚器官から必要な情報を取り入れ、周囲を把握しようとする。例えば視覚情報によって動いているものに気づき、また自分と対象物の距離を把握することができる。視覚や聴覚など、異なる感覚情報を組み合わせることで相補的な情報処理を行い、周囲に対してより頑健かつ信頼性の高い知覚を行うことができるのは、感覚器官を通じて入力された複数の情報が脳内で統合される多感覚相互作用によるものである(Ernst,2004)。

ただし、視覚情報と聴覚情報が同一の情報源から同時に生じていても、それぞれの感覚器官からの入力情報が脳内の感覚中枢に達するまでの神経伝達速度は異なっているということがわかっている。一般的には、感覚器官に情報が入力されてからの到達時間は、視覚よりも聴覚のほうが早い。ところが Dixon らが、18～60 歳のイギリス人と 20～43 歳のスペイン人 10 名に、映像と音の非同期性を高める装置を用いて映画とそのサウンドトラックを提示する実験を行ったところ、聴覚としての会話の音声は、唇の動きで示される視覚としての会話の音声に比べて 250 ミリ秒以上遅れたところで非同期性が認識されたことを明らかになった。この結果からは、光よりも音の伝達が遅いために生じる聴覚と視覚の非同期があることがわかる。また、実験の結果、映像より音が先にあるとき、また、誰かが話しているときよりもハンマーが釘を打っているときの方が、非同期性が検出されやすい、という結果が示された(Dixon & Spitz,1980)。Spence らは、視覚と聴覚では、感覚器官で情報を受けてから感覚中枢へと達するまでの伝達速度が異なることを示し、各感覚からの情報が一次感覚野に到達してから知覚が生じるタイミングには、時差が存在することを報告している(Spence & Squire, 2003)。

これら先行研究は、人間は光よりも音の伝達が遅いために生じる聴覚と視覚の非同期性を許容して、時差を伴う複数の感覚情報を一つの事象と解釈することができる、ということを示唆している。人間の脳内には、異なるタイミングで入力されるさまざまな感覚情報が処理される時間的なずれを調整し、多感覚情報を統合して、かつ時間的同時性を知覚するしくみが存在すると考えられている（Slutsky et al.,2001;Meredith,2002)。感覚情報の統合と同時性知覚は、私たちの日常生活を円滑に行うためには不可欠なものである。

五感と呼ばれる「視覚」「聴覚」「触覚」「嗅覚」「味覚」という感覚から得られる情報以外にも、身体を動かす中で発生する知覚や動くことでのみ得られる知覚情報がある。人間は、身体を動かすことで得られる「固有感覚」からの情報をもとに状況を判断することも行っている。例えば、肘や手首にかかる負荷を感じから、物体の量や重さを知ることができる。身体を動かして能動的に行動することで、受け身では得られない情報を収集し、状況を把握して、最適なタイミングで対応できるように探索する。そのためには、能動的な行動が不可欠である。

触れるだけでは感じとることが難しい場合には、手を微妙に動かすことによって、物体の硬さなど質感などを感じ取ることができる。能動的触覚（アクティブタッチ）（Gibson,J.J.,1962）では、探索に手が用いられるが、動きがなく受動的な外的刺激などの場合は、能動的に手で探索するときのような脳活性の部位が見られない（Recanzone et al.,1992)。すなわち、自ら能動的に接触する運動を行うことで生じる感覚を通して得られる情報がある。他の感覚においても、聴覚であれば耳を傾け、視覚では目を動かして見る対象を決めるなど、能動的な身体運動を行うことで、より正確な情報を得て知覚できるようになる。こうした能動的な身体運動により必要な情報を探索するプロセスは日常的に用いられ、収集した情報をもとに私たちは身体の運動状態の調整を行っている。そして、得られた情報により、さらに継続的に最適な運動を遂行することが可能となる。

１．１．２．運動感覚の情報処理プロセス

私たちが身体を動かす際には、運動野から筋肉へと運動指令が出るとともに、運動が実行されたときの状態を事前に予測できることが知られている。

運動に伴う予測は、能動的に身体を動かす際の運動指令に伴って生じ、自身の運動による感覚フィードバックを予測しながら身体を制御していると考えられている。運動時に身体を制御するためには、身体の部位の位置や状態などに関する情報が必要である。Tsakiris らは、受動的運動時と比較して能動的運動時の方が、視覚的に提示された自己の身体認知を優位に行えたことから、運動指令情報があることによって視運動の結果を予測できることの有効性を示す報告を行っている（Tsakiris et al.,2005)。しかし各感覚器官からの感覚フィードバック情報は脳内の感覚中枢に達するまでの伝達速度に違いがあり、また運動制御には不要なものも含まれている可能性があり、かつ遅い。遅れて届く情報は周囲の環境状況を反映していない恐れもあり、フィードバックの遅れは運動中の問題を引き起こしかねない。

能動的運動時には、脳内では運動野から運動指令が筋肉へと送られるとともに、その情報のコピーが頭頂葉へと発せられている。この情報を遠心性コピーという。遠心性コピーに関しては、Sperry は運動指令に由来する知覚に影響を及ぼす情報を仮定し、眼球運動のときの網膜像のぶれを防ぐ目的で、眼球運動に関連する脳の領域に運動指令情報のコピーを送ることで制御を行い、視界の安定をはかっていると考えた（Sperry,1950)。Holst は、ものを見るときに眼球が動いても世の中がぶれないことに対し、運動野から感覚中枢に送られてくる情報を仮定して、運動の結果発生する感覚からの情報が、既に送られてきている情報と等しいときは正しく知覚を生じさせると提唱している（Holst,1954)。運動指令に伴って生じる情報が感覚野に届き、知覚過程に及ぼす影響を扱う研究は多く、さまざまな報告がなされている。

運動制御の内部モデルに基づくと、私たちは能動的な運動に対する予測的な知覚メカニズムである順モデル（フォワードモデル）を有し、身体運動時には、運動遂行の結果である感覚フィードバックが運動指令で計画された内容と一致するかどうか判断する、という働きを持っている（Frith et al., 2000;Sciutti

et al.,2010)。しかし、実行後のフィードバック情報に頼った処理による運動制御では、不一致が検出された場合の修正のために環境の変化への対応に遅れをとってしまう。そこで予測情報と能動的な運動を実行後の感覚フィードバック情報と照らし合わせることで、より早く、より正確な運動制御が行えるようになり、実際の感覚フィードバックに先行して運動状態を維持していると考えられている。

Libet らの報告では、遠心性コピーの影響と考えられる脳内の動きとして、運動の 250ms 程度前から大脳皮質の活動が始まることを示唆する報告を行っている（Libet et al.,2010)。Frith らは、遠心性コピーの情報には、運動遂行の結果受け取るであろう視覚や聴覚、体性感覚といった感覚フィードバックの予測が含まれているという考えを提示した（Frith et al.,2000)。また、Sciutti らの報告によると、遠心性コピーには身体運動の結果受け取る感覚フィードバックの到来タイミングについての情報があり、この感覚到来タイミングの情報も実際の感覚フィードバックよりも先に運動状態の予測と運動制御に用いられると考えられている（Sciutti et al.,2010)。

身体運動時には、こうした遠心性コピーによる感覚フィードバックの予測情報と、実際の感覚フィードバック情報とが比較照合されるとともに、周囲を取り巻く環境に対して適切な運動が継続的に遂行されるように調整、制御され（Bridgeman,1995; Wasaka et al.,2012)、比較照合に基づく判断が行われて、実際の感覚フィードバックと予測内容が一致した場合には、その感覚は自己に帰属することになるとともに、運動制御に利用される。一連の比較照合に関わるプロセスは、比較器モデル（comparator model）として知られている（Blakemore et al.,1999;Synofzik et al.,2008)。人間は日常的にこの比較照合の実施を反復し続けることによって脳内に内部モデルを形成している。感覚情報の比較照合を経て、内部モデルは修正されてより正確になり、誤った運動遂行をすることなく、迅速に次の運動指令に向けての調整が可能となる(Wolpert et al.,1995)。

また、感覚器官からの情報に関しては、自己に帰属する自己由来の感覚と他者・外界に由来する感覚とに区別し、自己に帰属した感覚のみを運動制御に利用するためのメカニズムが脳内に存在することが、これまでの研究によって示されている。複数人と坂道を歩く等の場面を例に取ると、他者の足の位置情報を自

身の視覚のフィードバック情報としてしまうと躓いてしまう危険がある。人間が能動的に行動するときには、体勢や身体の動き、眼球運動など、さまざまな運動に伴う情報が脳領域に届くとともに、視覚野では多くの視覚情報の内容が干渉しあっているとも言われている。感覚フィードバック情報はフィードバックされた全ての感覚情報が利用されるのではなく、得られた感覚のうち自己に帰属された感覚だけがフィードバック制御に利用されると考えられている（Asai,2015;Parker et al.,2020)。

身体は運動を行うと同時に、トップダウンによる脳内情報処理である運動予測と、ボトムアップによる脳内の情報処理を整合し、運動制御や運動学習を行って、外界と脳をつなぐ情報器官としての役割を持っていると考えられている（Norman,D.A.& Bobrow,D.G.,1975)。身体運動とそれに伴う予測情報による感覚フィードバック予測、さらに実際の感覚フィードバックの情報は、外界を的確に把握するうえで綿密に関連しあっており、人間の行動は、運動と感覚知覚との相互作用によって成り立っていると言うことができる。

１．１．３．能動運動に伴う予測に関する研究

私たちは、自身が行う運動と、自身の運動によって発生した自己に帰属する感覚フィードバック情報を統合して、一つの事象だと対応付けて解釈することによって、運動と感覚知覚との関係性を作り上げている。身体運動と感覚フィードバック情報とは密接な関わりがあることから、既存研究では運動内容と感覚フィードバック内容との整合性に着目して、運動主体感や自己帰属感に関する研究が多く見られる。

研究内容の１つに、自分で自分をくすぐるときに刺激のタイミングや角度が予測からずれてしまうと、ずれの程度によってはくすぐったくないと感じることがある、という現象から、身体運動による実際の感覚フィードバックの結果と感覚予測が一致する場合は、その運動を行ったのは自分であると感じるが、実際の感覚フィードバックの結果が感覚予測からずれると、身体運動を行ったのが

自分自身であっても運動主体感が低下することを指摘する報告がある(Blakemore et al.,1999)。

感覚予測に対して実際の感覚フィードバックにずれや遅延が存在すると、Gallagher が提唱した「自分がその現象を引き起こした」という感覚である運動主体感(Gallagher,2000)は感じにくい。内部モデルに基づく比較照合の結果、運動指令と感覚予測、および感覚フィードバックが内容的にも時間的にも整合していれば、感覚フォードバック内容は自分の身体運動に由来するものであると認識することができる。運動主体感についてはまだ十分に研究され尽くしてはいないが、身体運動と感覚フィードバック情報の対応付けにおいては、時間的な整合性があるかどうかが判断の条件になるということができる。

Shimada らによる先行研究に、運動主体感と視覚運動の認知における知覚遅延の影響に関する研究がある (Shimada et al.,2010)。この研究では、遅延する視覚フィードバックに対して同時性判断課題(SJ 課題)を用いた実験が行われた。実験は、実際の手の位置と知覚される手の位置との空間的な整合性が保たれた状態で実施された。そこへ映像遅延装置を用いて、手の動きが遅延して見えるという時間的に不整合な状況を作り出して提示をし、スイッチを押す動作を対象に自身の指の動きと一致していたかどうかを判断させた。実験の参加者への質問は、運動主体について直接的に問うものではなかったが、先行研究において、自分の身体の所有感が生じるためには、視覚と固有感覚・触覚のフィードバックの時間的連続性が重要であることが示されていたことから、参加者が同時性を感じることで運動主体感を反映したとみなすことができるとして、結果の解釈が行われた。

実験の結果からは、不随意運動条件との比較において、随意運動条件の方が、遅延に関する検出の感度が高いことが示された。この結果より、随意運動条件では、運動に伴って生じる予測情報によって、視覚フィードバックの到来タイミングの把握に影響が生じて、遅延検出の感度が高まったことを示唆する内容が報告された。この研究の成果としては、予測された感覚フィードバックと実際の感覚フィードバックの不一致は運動主体性の感覚を減衰させたこと、また予測された感覚フィードバックと実際のフィードバックが、時間的な整合性をもって一致すると、不随意運動条件でも運動主体性が感じられた、という結果も示され

た。随意運動条件では、視覚フィードバックが遅延したにも関わらず同時であったとする回答結果を得ている。さらに、運動に伴う予測情報が、視覚フィードバックとのわずかな時間差を減衰させる可能性があることも報告された。

身体運動時には、感覚フィードバックの予測情報と実際の感覚フィードバックとの誤差検知を行って、その後の運動遂行のために準備を行なうと考えられているが、私たちを取り巻く周囲の環境がダイナミックに刻々と変化するとなると、運動タイミングの予測も重要であるといえる。動きのあるものに対してその動きを予測し、タイミングを合わせるという動作は、日常でもよく行っているが、運動を継続的に遂行するためには、次に行う運動の内容やタイミングを予測して、運動の企画（motor planning）と運動の順序立て（motor Sequencing）をうまく機能させることが必要となる（Kudo et al.,2004)。

視覚刺激による反応時間に関する研究では、一定の時間間隔で２つのランプが交互に点灯するのに合わせて、手首の屈曲動作を行うという課題を行う実験で、交互の連続した刺激提示の途中に、同じランプが続けて点灯する内容を“フェイント”として挿入し、誤反応の発生を観察した内容がある。実験では、刺激提示の規則性や周期性から予測が成立することで、連続した交互の刺激提示に対しては単純反応よりも短い反応時間となったが、フェイントによる刺激提示を含んだ場合は、２２・８％ で誤反応が生じたこと、またフェイントによる刺激に正しく反応した場合でも、直前の反応時間よりも約５０ｍｓ遅れたことが報告されている（河辺,大築,1982)。

視覚刺激に対する別の先行研究では、等間隔で一列に並んだ 7 つの LED に対し、最初の１番目の点灯に対してスイッチを押すという指定動作を行う課題と、７番目の点灯に合わせて指定動作を行う課題とで脳活動を測定したところ、１番目の点灯での課題動作では、一次運動野や補足運動野、前補足運動野で活動が見られたが、７番目の点灯での課題動作では、視覚や空間認知に関連する脳の部位の活動も確認されたとする報告がある（Kudo et al.,2004)。順番に点灯するのを待つという課題であることから、出現する刺激にタイミングを合わせるために注意を向けたことによる結果とも考えられるが、日常的には、迅速な反応と正確なタイミングによる反応の両方が、環境に対してとるべき反応への準備のために必要であると考えられる（Schmidt and Lee,1999)。

感覚刺激と運動の同期メカニズムに関する研究で示された実験結果では、同期タッピング課題(Synchronization Tapping Task)の実施において、タッピング動作の開始が対応する刺激提示の開始に対して数10ms先行するという現象が生じることが知られている（Dunlap,1910;Aschersleben & Prinz,1995)。この現象は、「負の非同期(Negative Asynchrony)」と呼ばれているが、能動的な身体運動に伴って生じる感覚フィードバック予測の情報に基づいた、時間遅れに対する予測的な挙動であるとも考えられている（小松・三宅,2003)。

タイミング反応などに関連する時間の知覚は、私たちの日常行動を円滑に行うためには不可欠であるが、いわゆる五感の中に時間という感覚は存在しない。また、時間情報は聴覚や視覚刺激が耳や目などの感覚器官を通じて処理されるのとは異なり、物理的な実態がなく、特定の感覚器や受容体をもっていない。例えば、光の刺激が一定時間提示され続けた場合は、刺激提示によって知覚が継続した長さを時間として用いることができるかもしれないが、刺激が消えてから次の刺激が出現するような場合は、時間に対応する明確な感覚が存在しない。そのような状態であっても私たちが日常的に活動する中で、変化に反応し対応できるのは、感覚情報の到来やタイミング把握のメカニズムが存在していることが想定される。既存の研究において提案されてきた時間知覚のモデルには、入力刺激に対応する感覚とは関係なく感覚器官から独立した1 つのクロックが脳内にあり、それが時間タイミングの基礎となることを仮定している説が存在する（Treisman,1963;Droit-Volet,2013）が、時間知覚に関わるのは、異種感覚間の同時性知覚や身体運動の制御モデルを前提に、脳内の神経基盤の関与が指摘されている（Ivry et al.,1988;Merchant et al.,2013;Gu et al.,2014)。

１．２．残された課題

これまで議論してきたように、人間が能動的に身体運動を行う際に、運動に伴って生じる感覚フィードバックの予測情報は、さまざまな知覚や認知に関わっている。

能動運動に伴う予測情報は、時間知覚にも影響を及ぼすことが考えられる。例えば、フィットネスゲームなどには、繰り返し動作による運動をリズムに合わせて行うコンテンツがある。繰り返し動作による運動であれば、初めて画面を見て取り組むユーザーであっても、画面に示されるアバター等の映像を見ながらリズムに合わせて運動をすることが可能である。このように運動を行いながら予測的な知覚を行っている場面は、日常生活によく見られる。しかし、画面に示される運動の映像と音楽という多感覚入力による同時性知覚に、運動に伴う予測情報がどのような影響を及ぼしているのかについては明らかになっていないことが多い。

１．３．研究目的

視覚や聴覚などの感覚器官からの入力情報と、それに対応する応答出力としての身体運動の感覚情報と運動内容との連関については、これまでも数多くの研究が行われている。しかし能動運動に伴って生じる予測情報が、どのように多感覚統合の過程に影響を及ぼすのかについては、明らかにされていない内容が多い。また時間知覚については、運動主体感を認識する条件となる時間的整合性の観点から、同時性判断、時間順序判断への影響についても整理する必要がある。

そこで本研究の目的を、能動運動に伴う予測情報が、時間知覚に及ぼす影響の検討とする。

能動運動を行う際に生じる予測情報は、運動の結果得られる感覚フィードバック情報の予測情報と考えられており、人間はその情報をもとに運動内容を制御し、継続的な運動遂行ができている。本研究は、能動運動時の予測情報が、時間知覚に及ぼす影響について検討し、実験内容に基づき分析を実施する。

１．４．研究方針

１．３節で示した目的を達成するために、本研究は次の２つの課題を設定し、各々実験を実施する。

課題１では、リズム的な繰り返し動作をする視覚刺激（アバター）と同調して能動運動を行う実験課題を実施し、能動運動時に生じる予測情報が、アバター動作の印象評価に及ぼす影響について検討を行う。

課題２では、２つの異なる感覚刺激を提示して「どちらの刺激が先であったか」を判断させる、時間順序判断課題（TOJ 課題）を実施し、時間知覚に対する能動運動とリズム刺激からの影響について検討を行う。

本研究では下記の観点をもとに、能動運動に伴う予測情報が時間知覚に及ぼす影響について分析を行う。

・能動運動過程の感覚フィードバックの予測と実際の感覚フィードバックとに、時間的不整合が生じた場合、どのような影響が見られるか？

・能動運動過程の情報である感覚フィードバックの予測情報は、時間順序判断課題において時間知覚の分解能を向上させることに影響するか？

１．５．本論文の構成

本章に続く第２章から第３章までは、実験的検討である。

第２章では、課題１「リズム的能動運動がアバターの印象評価に及ぼす影響」に対応した実験の目的、方法と結果を説明し、結果に関する考察を行う。実験は、リズム的な繰り返し運動を行い、その運動に同調して動作するアバター映像への印象評価を実施する。実験で提示した時間変調を加えたアバター映像に対する印象評価をもとに分析を行い、能動運動時に生じる予測情報の影響について考察を行う。

第３章では、課題２の「能動運動とリズミカルな刺激提示が時間知覚に及ぼす影響」に対応した実験の目的、方法と結果を説明し、結果に関する考察を行う。実験は、能動運動時に生じる予測情報が時間知覚に与える影響について検討を行うことを目的とする。運動の遂行時には、感覚フィードバックの予測に加え、感覚の到来タイミングの予測に関わる情報をもとに時間知覚が変容し、適応的に対処していることが考えられる。実験課題は、聴体性感覚間での時間順序判断課題を実施して、能動運動とリズム刺激が時間知覚に及ぼす影響を分析を行い、両者がそれぞれ時間分解能の精度を向上させるか観察する。リズム刺激は、感覚到来の予測が手がかり情報となって時間分解能の精度向上につながるかどうか、また能動運動とリズム刺激を組合せた場合の時間分解能への影響についても検討を行う。

第４章では、第２章から第３章までの実験的検討において得られた各結果に基づき、本研究で取り上げたリズム的能動運動に伴う予測情報が時間知覚に及ぼす影響について、総合的な視点で考察を行う。また、能動運動による神経機構に関する観点からも検討を行う。最後に、本研究において残された課題を整理するとともに、本研究で得られた知見から期待される展望や、発展的な活用に関する提案を述べる。

第５章では、本研究で報告する実験結果をまとめて結論を述べる。

第２章

実験１：
リズム的能動運動がアバターの
印象評価に及ぼす影響

第２章　リズム的能動運動がアバターの印象評価に及ぼす影響

２．１．緒言

私たちが日常での活動を行う際には、感覚器官からの情報や身体運動に伴う感覚情報の統合は、脳内の重要な働きである。この感覚器官からの情報と自身が行う身体運動による感覚情報とを対応付けるには、両者の時間的な整合性が必要である。

本実験は、能動運動に伴う予測が時間知覚に及ぼす影響を見るために、運動結果を認識する情報としてアバターの動作映像を実験参加者に提示して行う。アバターの動作映像は、自身の運動と同調して動く映像のほか、時間的な整合性が損なわれたアバター映像を提示して、それぞれの動作映像に対する印象評価を実施する。

２．２．背景と目的

２．２．１．遅延が人間の心理に及ぼす影響

人間と人工物とのインタラクションにおいて、外部刺激に対する人工物の反応が遅延することは、人間の心理に良くない影響を与えることは、多くの既存研究で報告されている。

人工物が人間の意図通りに作動しない場合は、目的とする動作を行う際の障害の原因となったり、自身の動作によって制御しているという感覚を損なうなどの問題が生じる可能性がある。Klein は、コンピュータ応答時間の遅延が心理に悪影響を与えることを指摘している（Klein,1999)。Pearson、Powersa は、発話遅延における心理影響に関する調査を行い、1 秒以上の遅延は心理的に悪影響を与え、また会話の声が大きくなる傾向があることを見出した（Pearson,2008; Powersa,2011)。Mori や Kramer は、人工のエージェントの登場や発話時間と心理との影響について研究し、時間遅れが生じるほどに心理に悪い変化を与えることを示した（Mori,2003; Kramer,2007)。Takasugi や Yamamoto は、人とロボットの会話によるやりとりにおいて、ロボットの発話開始時間と頷きタイミングが人間の心理に与える影響を調査し、反応が遅れると人間に悪い感情をもたらずことを指摘した（Takasugi,2010; Yamamoto,2008)。

これらの研究では、人と人工物とのインタラクションにおいて、外界からの刺激に対する人工物の反応が遅延して現れることが、人間の心理に良くない影響を与えると述べている。この影響は、人間が人工物を利用するときのユーザビリティに関わることから重要な問題である。またこれらはコミュニケーションにおける問題を扱っており、人と人工物との動きのインタラクションにおける時間遅延が、人間の心理にどのような影響を与えるかについては議論されていない。

また昨今では、AR や VR 技術において、遅延の発生は、ユーザーの没入感が低下することや、遅延への違和感は「simulator sickness」と呼ばれる、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）照射時のシミュレータ酔いの現象に影響を及ぼすものとも考えられている（Robert et al.,2001; Jason et al.,2011)。

遅延に関する研究の多くは言語コミュニケーションを扱う内容であったが、映像の遅延も重要な研究対象であり、遅延の大きさとユーザーパフォーマンスとの関係や、ユーザーが知覚可能な遅延の内容に関する研究もある。ただし、動きのインタラクションにおいて遅延のような時間的な不整合が生じた際に、人間の心理にどのような影響を与えるかについての議論は多くない。また、人間の動きと同調したアバターの動作遅延や、先行動作をするアバター動作に対する視覚印象の心理評価についても調べられていない。

２．２．２．実験の目的

本実験の目的は，自己の能動的運動と対象のアバター動作との随伴関係を前提に、アバター映像に時間変調を加えて提示をすると、アバターの動作への印象評価にどのように影響するかを検証し、分析を行う。

本実験で扱う能動的運動は、体操などでよく見られる両手の上げ下げをするswing motionとする。

アバターの動作に対する印象評価では、実験参加者が自分の動きを反映して動くアバターの映像を見て、どのような印象をもったかについて、アンケート調査を行う。参加者が両手の上げ下げをする動作を行う際に、参加者の能動運動よりもアバターの動きが遅れている状態（以下、delay動作とする）は、どのような印象なのかを調べる。このdelay動作への印象の特徴を得るために、delay動作と異なる動きを用いる。参加者の能動運動とアバター動作が同調している状態（以下、synchro動作とする）と、参加者の能動運動よりもアバター動作が先行している状態（以下、lead動作動作とする）という2種類の動作である。この２種類の動作についても同様に、アバター映像を見て、どのような印象をもったかについてアンケート調査を行って回答データを収集し、印象評価内容の比較を行う。

２．３．実験方法

２．３．１．参加者

実験の参加者は、20-30 代(平均年齢 31.3 歳)の 14 名　(女性 3 名、男性 11 名) の大学院生であった。参加者は事前に実施したアンケートで，すべての被験者は正常な視力（または矯正視力）を有していること、また当日の体調および実験課題である運動を行うことに問題がないことを確認した。

２．３．２．実験課題

実験課題は、メトロノーム音に合わせて、繰り返し両手の上げ下げをする swing motion によるリズム運動の実施である。本実験では、この運動１パターンでの検証とした。繰り返し動作である、ということは、運動結果を予測しやすいということを意味する。また、自己の運動と視覚的運動結果（アバター）との随伴関係を認知しやすいと考えた。

２．２．３．装置

実験で使用したハードウェアは、被験者の動きを計測するための「Microsoft Kinect for Windows sensor」、実験参加者の動きをもとにアバターの動きを生成する PC、アバターを表示するためのプロジェクターとスクリーンで構成した。

ソフトウェアは，Kinect で撮影した深度データから人間の動きを得るためのライブラリである Kinect for Windows SDK と，アバターの描画には、Microsoft XNA Game Studio 10 を使用した。Kinect for Windows SDK は、実験参加者の動作データを取得し、そのデータを Microsoft XNA に転送することで、参加者と同じ動きをアバターに実装することが可能となる。

アバターの映像（視覚情報）が参加者の前面に提示できるように、プロジェクタ（LCD プロジェクタ）とスクリーン（スクリーンサイズ：ワイド 82 型）を設置した。Figure 2.1.にアバター映像の提示を行った実験装置の構成を示す。

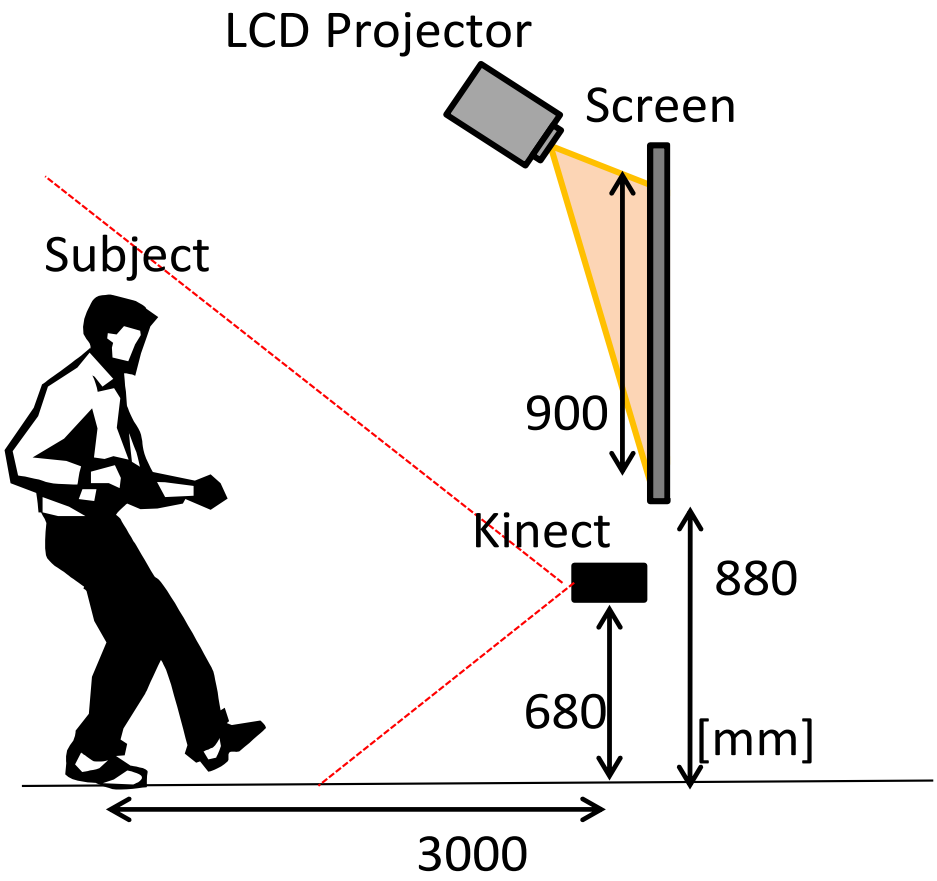


Figure 2.1. 実験装置の概要図

実験参加者に提示するアバター画像（視覚情報）は Kinect を用いて作成し、LCD プロジェクタで、参加者の前面に設置したスクリーンに提示した。参加者には、スクリーンと Kinect の前に、3000mm の距離を置いて立つように指示をした。

２．３．４．実験条件

印象評価を行う対象は、実験参加者が行うリズム運動と同期したアバターの動作映像と、参加者の運動よりもアバター動作が遅延した映像、アバター動作が先行した映像の計３種のアバターに対する印象評価を実施した。自己の運動動作とアバターの動作に時間的なずれが生じる映像に対しては、違和感を感じる、不快、自分に思えないなどの印象評価が想定された。

２．３．５．アバターイメージ

Figure 2.2.は、実験中に参加者に表示したアバター映像である。アバターが、運動を行う人間の実際の身体と極端に異なる形状をしている場合、運動を行う人間とアバターとの間で身体イメージ（body image）に不一致が生じてしまい、自分とアバターとの同期を感じにくくなることが想定されることから、本実験では、アバターはいくつかの種類を用意し、予備実験を経て男性型を選択した。

Kinectは、フィルター処理により、その後の動きを遅らせたり進めたりすることで、実際の動きからの遅延時間をコントロールできる機能を有している。アバターの遅延動作を実現するため、本実験では、Kinect for Windows SDK v1.8に含まれるデジタルフィルタのパラメータの調整を試みた。このフィルターは、Holt Double Exponential Smoothing法をベースにした関節位置ジッター用のフィルターで、平滑化機能と補正機能を備えており、Kinect の測定条件の乱れなどにより発生した測定データの誤差を除去するために使用されている。

このフィルタのパラメータを変更することで、Kinect で取得した参加者の動作データに平滑化や推定効果を持たせ、動作の遅延や先行が可能となる。実際に動作を遅延させたデータをアバターに実装することで、アバターの動きが参加者の実際の動きよりも遅延することが確認できたことから、次節に述べるアバター映像表示の時間ずれ設定について検討を行った。

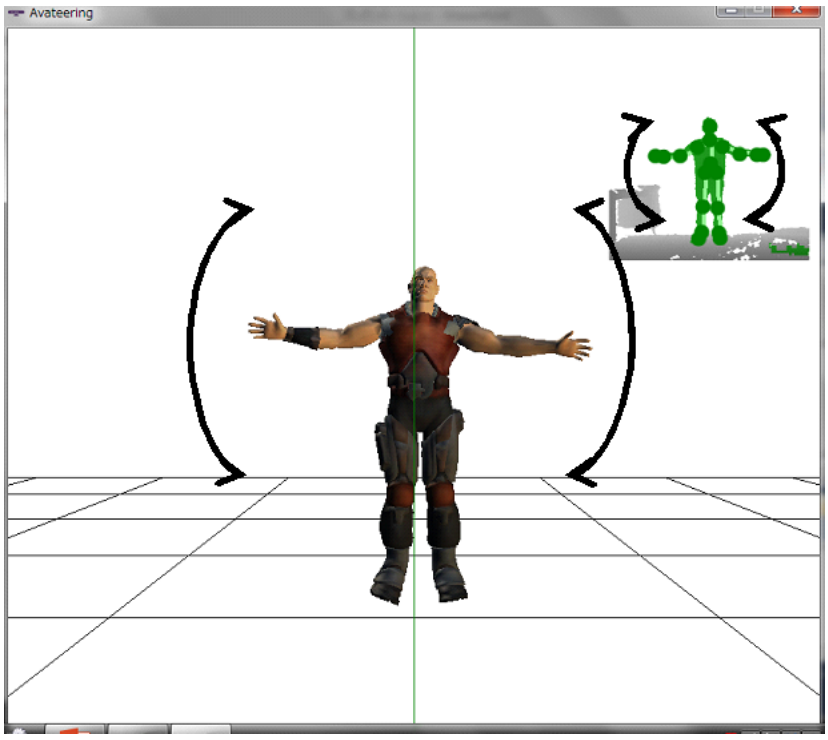


Figure 2.2. swing motion しているアバター

(図の右上はスケルトンモデル)

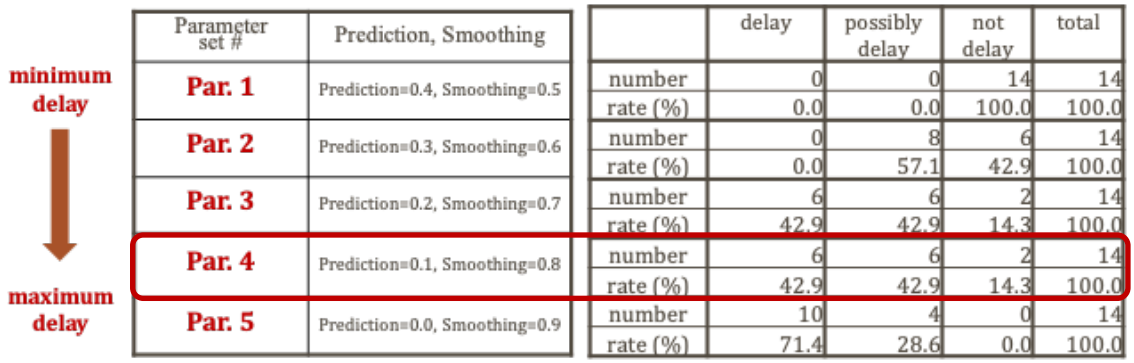
２．３．６．アバター映像表示の時間ずれ設定

アバター映像に対する時間ずれの設定は、Kinect の機能を利用して、動きに変化を生じさせるパラメータである Prediction と Smoothing によって、実際の動作との時間的なずれをコントロールすることを検討し、以下の試行を経て実験の設定条件について決定した。

Prediction の値は動きを予測するフレーム数であり、デフォルト値は 0.0、0.5 付近から動きの速さによってはオーバーシュート傾向があるが、別途予備実験を実施して、0.75 と 1.0 という 2 つの値で参加者の反応を確認した結果をもとに、アバターが先行する lead 動作では、最大値の 1.0 を採用、アバターの動きが被験者の動きよりも進んでいるように見える状態として設定した。

Smoothing の値は平滑化指数であり、値が大きいほど平滑化の程度が大きくなる。デフォルト値は 0.5 である。Smoothing のパラメータを大きくしていくと、アバターの動きは参加者の動作に追いつかなくなり、動作が鈍くなる。アバターがあまり動かない状態になるところが最大遅延（maximum delay）で、1.0 で遅れが最大となる。アバターが遅延する delay 動作については、別途予備実験を実施し、Smoothing の値が 0.5 から 1.0（最大遅延）までの 5 段階のパラメータセットを用意して、参加者がアバターの動きに「遅れ」を感じるのはどの段階からか確認した結果をもとに、設定値を決定した。

アバターが同調する synchro 動作については、厳密にはアバターと参加者の動きは同期することはない。Kinect では参加者の動きを計測した後にアバターの動きを生成し、その後にアバターが動作するため、参加者が知覚しているかどうかに関わらず、アバターの動作開始には遅れが生じている。Kinect のフィルタ処理を行って、Prediction は 0.5 、Smoothing はデフォルト値 0.5 で設定し、被験者とアバターの動きが同調しているように見える状態とした。アバターの動作が参加者の動作と同調して見える Smoothing のデフォルト値 0.5 は、最小遅延（minimum delay）である。



Parameter set #	Prediction, Smoothing
Par. 1	Prediction=0.4, Smoothing=0.5
Par. 2	Prediction=0.3, Smoothing=0.6
Par. 3	Prediction=0.2, Smoothing=0.7
Par. 4	Prediction=0.1, Smoothing=0.8
Par. 5	Prediction=0.0, Smoothing=0.9

	delay	possibly delay	not delay	total
number	0	0	14	14
rate (%)	0.0	0.0	100.0	100.0
number	0	8	6	14
rate (%)	0.0	57.1	42.9	100.0
number	6	6	2	14
rate (%)	42.9	42.9	14.3	100.0
number	6	6	2	14
rate (%)	42.9	42.9	14.3	100.0
number	10	4	0	14
rate (%)	71.4	28.6	0.0	100.0

Figure 2.3. 予備実験実施内容と結果

予備実験は、遅延の度合いを把握することを目的に実施した。5 つのアバターの動作遅延を設定したパラメータセットを用意し、Par. 1 から Par. 5 へと 5 秒ごとに、段階的に変化させた。実験参加者は、各パラメータセットに対し、遅延している、遅延しているような気がする、遅延していない、の 3 つの選択肢から回答した。回答データを集計、分析し、遅延が発生したと感じたパラータセットについて把握した。予備実験では、Par. 5 のとき、参加者の約 7 割が明確にアバターの動作遅延を認識したという結果となった。検討の結果、実験 1 で設定する遅延は Par. 4 を採用することとした。

Table 2.1.　アバター動作設定のパラメータセット

Parameter set #	Prediction, Smoothing
delay	Prediction=0.1, Smoothing=0.8
synchronization	Prediction=0.5, Smoothing=0.5
lead	Prediction=1.0, Smoothing=0.5

２．２．７．実験手順

実験前には、すべての実験参加者に実験内容について十分な説明を行った。その後１名づつ、Kinect が参加者の全身を検出できるように、スクリーンと Kinect の前に 3000mm の距離を置いて立つように指示をした。次にトレーニングセッションとして、参加者に実験で行う繰り返し動作によるリズム運動を、説明内容のとおりに動作するよう指示をし、メトロノームの音にあわせて約 5 秒間実施した。これは実験中の運動内容に対する理解を確認するとともに、自身の運動に連動して動作するアバター映像がどのようなものか、参加者に理解してもらうためでもある。その後、正式な実験開始の合図を確認したのちに、参加者はメトロノーム音（100BPM＝1.67Hz）に合わせて、両手の上げ下げをする繰り返し動作によるリズム運動を開始した。参加者は、リズム運動を 30 秒間を１回として３回実施した。アバター映像は、参加者がリズム運動を実施するごとに前面に設置したプロジェクタにスクリーンに表示した。

実験の流れは、Figure 2.4.で示した。

アバター映像の表示順は、１回目は遅延する動作映像（delay 動作）とし、２回目は同調する動作映像（synchro 動作)、３回目は先行する動作映像（lead 動作) をスクリーンに提示した。各回のアバターの動きは１０秒ごとに次のパターンで変化させた。

1 回目：遅延 delay 動作　→ synchro 動作　→ delay 動作

2 回目：同調 synchro 動作　→ synchro 動作　→ synchro 動作

3 回目：先行 lead 動作　→ synchro 動作　→ lead 動作

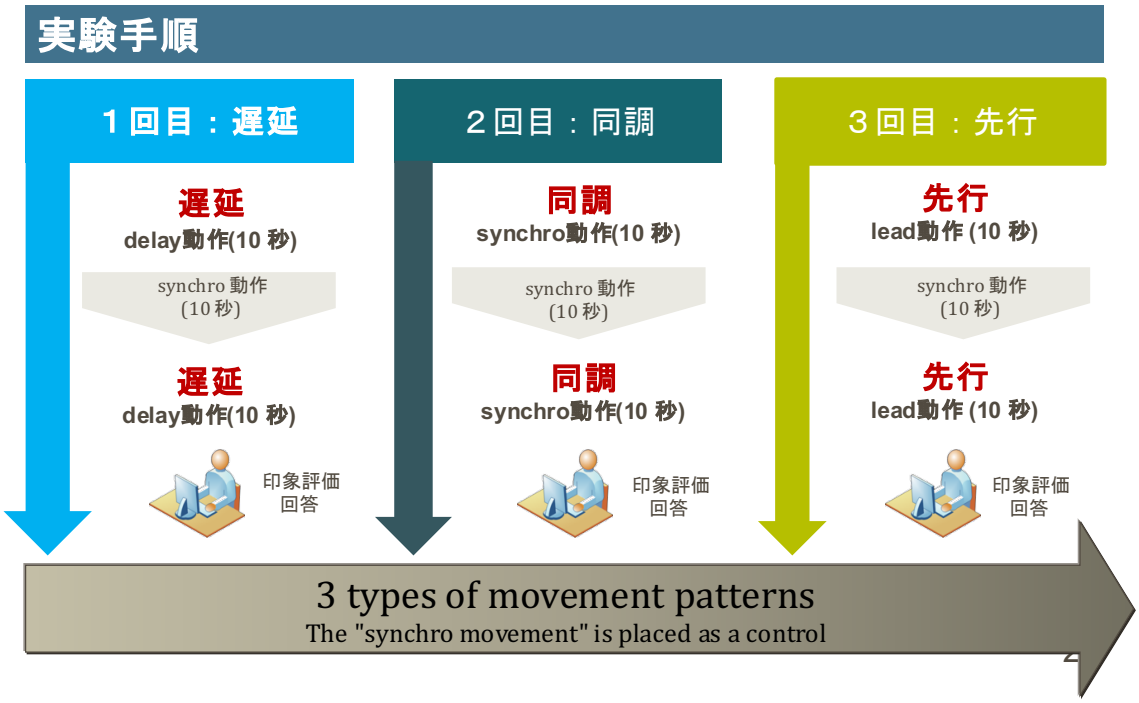


Figure 2.4.　実験手順

Figure 2.4 は、実験手順の流れを示している。実験の順序は全被験者が[１回目:遅延]を終えた後に[２回目:同調]を実施し、この後に[３回目:先行]を実施した。１回目の遅延では、実験参加者の動作に対してアバターの動作に遅延が生じている映像を提示、２回目の同調では、参加者の動作とアバター動作が同調して見える映像を提示した。３回目の先行では、アバターの動作が参加者の動作よりも先に動作する映像を提示した。２回目の同調で提示しているアバター映像は、コントロールとして配置した。

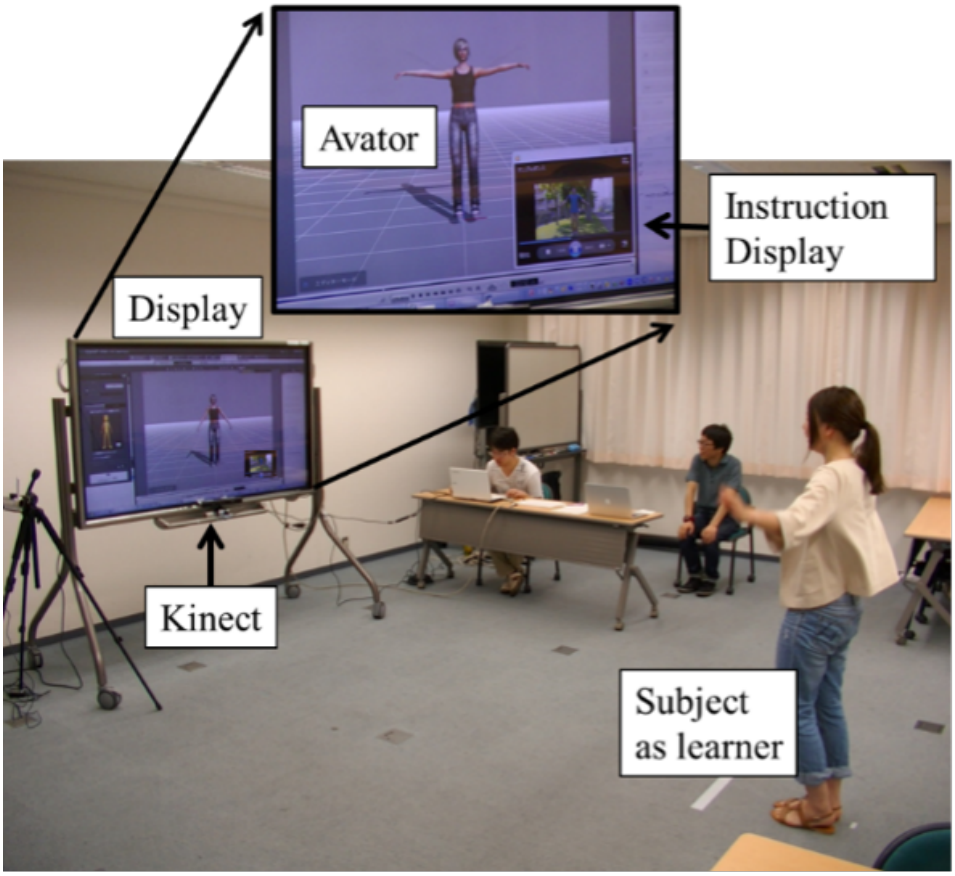


Figure 2.5. 実験風景

Figure 2.5.は、実験中に、参加者がスクリーンに表示されるアバター映像と同調してリズム的能動運動を行っているところを表している。実験参加者は、スクリーンに映るアバター映像を見ながら運動を実施した後に、印象評価の回答を行った。

２．３．８．印象評価の実施

参加者は 30 秒間の動作終了ごとに、3 種のアバター映像に対してそれぞれどのような印象を持ったか回答を行った。

アンケートは SD 法（Semantic Differential）で実施した。印象評価のために提示した形容詞対は、ロボットの動きの印象評価に関する先行研究（Kanda,2002；鈴木&木村,2013）を参考にして、印象の 3 つの基本要素（活性、効力、評価）を適用した 13 の形容詞対による評価項目を用意した（Table4)。

参加者は、各形容詞対に対して 7 段階で評価を行った。アンケートは、PC 画面に設問を表示して、実験参加者に直接入力をしてもらう形式で実施した。

Table 2.2.　印象評価のためのアンケート項目

評価項目			
1	速い	⇔	遅い
2	滑らかな	⇔	ぎこちない
3	自分らしい	⇔	他人のような
4	想定内の	⇔	想定外の
5	快適な	⇔	不快な
6	柔らかい	⇔	硬い
7	突発的な	⇔	突発的でない
8	感じのよい	⇔	感じの悪い
9	興味深い	⇔	退屈な
10	激しい	⇔	穏やかな
11	敏感な	⇔	鈍感な
12	親しみやすい	⇔	親しみにくい
13	自然な	⇔	不自然な

２．３．９．分析方法

アンケート回答の集計結果をもとに、各動作への回答から、それぞれの印象評価との関係性を調べるため、次元縮約を行う方法としてコレスポンデンス分析を実施し、結果を可視化した。コレスポンデンス分析では、クロス集計表の行変数と列変数の関係を可視化して表現することができる。この分析の目的は、2つの名義変数の関係を低次元空間に記述すると同時に、各変数のカテゴリー間の関係を記述することにある。

コレスポンデンス分析（Correspondence Analysis）は、対応分析法（AFC：Analyse Factorielle des Correspondances）としてBenzécriによって1960年代の初期に提唱された。この対応分析法は、コレスポンデンス分析の名称で統計解析のソフトウェアに搭載されたことが影響して、その後広く普及した。

Benzécri はクロス集計の独立性の検定で用いるピアソンのカイ二乗統計量に注目し、ピアソンのカイ二乗統計量とクロス表の項目間の関連性（対応）を測る方法を考えたと言われている。コレスポンデンス分析は、質的データによる主成分分析を応用した手法ということができる。分析では、カイ二乗検定の判定結果から行・列のカテゴリにスコアを与え、クロス集計表の列項目列と行項目列の相関が最大になるように並べ替えを行って、グラフ化する。グラフ(2次元マップ)では、原点からの向きが近いほど評価項目間の関連性が強く、評価の対象となったアバターの動作名称に近い位置に配置される評価項目は、類似度が高いと解釈することができる。

今回、実験参加者には評価項目として１３の形容詞対を提示し、それぞれの形容詞対でどちらの印象が当てはまるかという質問に対して、7段階による評価を実施してもらった。１～３，５～７のいずれかの評価を得た形容詞を１（そうでない方は０）としてデータを集計した。回答で４段階目は「どちらともいえない」を意味することから、対となった形容詞の双方を０とした。

２．４．実験結果

リズム的な能動運動の実施中に視覚刺激として提示したアバター映像に対する印象評価を分析した結果、運動を行う自分の動きよりもアバター動作が遅延する「delay 動作」に対しては、「他人のような」、「早い」、「想定外の」、「遅い」、「穏やかな」、「親しみにくい」という形容詞で印象が評価された。遅延動作の印象に「早い」という形容詞が含まれていることについては、アバターの動作開始時に、急にアバターが動き出した状態をとらえたものと解釈した。全体的な印象としては、参加者はアバター動作が遅延する映像に違和感を感じていることが確認できた。

運動を行う自分の動きよりもアバター動作が先行する「lead 動作」に対しては、「想定内の」、「硬い」、「感じのよい」、「興味深い」、「激しい」という形容詞で印象が評価された。運動を行う自分の動きとアバター動作が同調する「synchro 動作」に対しては「柔らかい」、「自分らしい」、「親しみやすい」、「自然な」、「突発的な」、「滑らかな」、「快適な」という形容詞で印象が評価された。

同調動作の印象に「突発的な」、先行動作の印象「硬い」という形容詞が含まれえていることについては、予備実験の際にパラメータ設定を調整する過程で、遅延動作の設定値よりも Smoothing の値を下げたことで平滑化のフィルタ効果が弱まる状態となり、オーバーシュート（行き過ぎる動作、行き過ぎて戻ってくる状態）がみられた。同調動作および先行動作では、Smoothing の値が小さくなる(Prediction の値が大きくなる)にしたがって、動きのインパルス性（速さや突発性）が出る傾向にあったことが印象評価に影響を及ぼしたものと解釈した。

評価対象の各動作と、その印象評価との関係性を調べるために、コレスポンデンス分析を実施した結果を Figure 2.6.に示す。各アバター動作（delay 動作、synchro 動作、lead 動作）ごとに、印象評価の回答としてあげられた形容詞がプロットされ、動作の印象に対応する評価内容を読み取ることができる。

この結果より、実験参加者はアバターの遅延動作（delay 動作）に対しては違和感を感じていることが明らかになった。一方、アバターの先行動作（lead 動作）については、遅延動作（delay 動作）との比較において、良い印象を示す回

答が見られることが確認ができた。先行動作（lead 動作）は、身体運動と視覚的運動結果であるアバターの映像との間に時間的な整合性が損なわれていた状況でありながら、遅延動作（delay 動作）への印象評価との比較において対照的な結果となった。

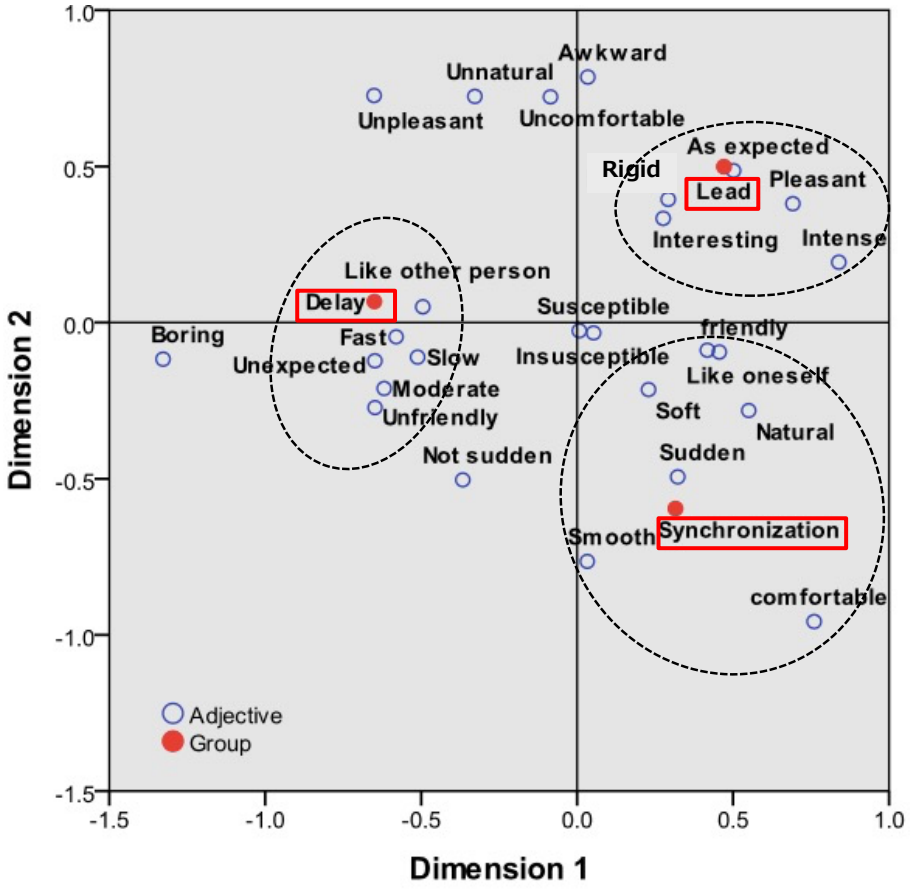


Figure 2.6. 印象評価分析結果

コレスポンデンス分析を行った内容を２次元マップで表示した。コレスポンデンス分析では、クロス集計の行と列の相関関係が最大となるような配置（各行、列の項目の順序、相対的な位置）を求めて二次元の図に付置する。類似度の高い項目は近くにプロットされ、原点からの向きが近いほど項目間の関連性が強い、と解釈し、軸に対する解釈は通常行なわない。

２．５．考察

繰り返しのリズム運動時に提示した視覚刺激であるアバター映像への印象評価が、遅延動作（delay 動作）と先行動作（lead 動作）では対照的な結果となった。アバターの遅延動作（delay 動作）に対しては、違和感を感じるという印象であったが、先行動作（lead 動作）に対しては、興味深く感じるという印象であった。

本実験の結果からは、アバター映像に加えた２種の時間変調に対する印象の違いを確認することができた。すなわち、繰り返しのリズム運動に同期しない２種のアバターの動作では、先行動作（lead 動作）は遅延動作（delay 動作）よりも良い印象を与えているということである。

２．５．１．リズム的能動運動に伴う予測情報の影響

リズム的能動運動に伴う予測情報の影響を考える観点からは、アバターの先行動作が、リズム運動に伴って生じる感覚フィードバック予測の内容と整合したことが影響している可能性について検討した。

感覚運動同期の研究で行われる同期タッピング課題(Synchronization Tapping Task)では、視覚や聴覚、体性感覚などの外部からの感覚情報入力とその応答としての運動出力を繰り返すという動作において、周期的な感覚刺激に対して身体反応が数 10ms 前後先行するという「負の非同期(Negative Asynchrony)」現象が報告されており(Dunlap,1910;Aschersleben & Prinz,1995)、序論でも触れたとおり、この現象では、同期すべき感覚刺激よりも応答としての運動反応の方が早く起きており、運動が実際の感覚フィードバックに先行することから人間の予測的行動を示す例と考えられている（小松・三宅,2003)。本実験では、実験参加者がリズム運動をする際に視覚刺激（アバター）が運動結果として表示される仕組みであったが、リズム運動時には予測情報が発せられて、感覚フィードバックの予測が生じた状況であると考えると、アバターが参加者よりも先行した動作を行う映像は予測情報と整合し、肯定的な印象評価につなが

った可能性が考えられる。一方、遅延動作（delay 動作）では、リズム運動時に発せられた予測情報と、運動結果であるアバター映像との不整合に違和感を感じ、予測誤差を認識することとなったと考えられる。

実験１で得られた結果は、能動運動に伴う予測情報の時間知覚への影響を示唆するものと考える。ただし本実験では、１パターンのリズム運動による検討であり、別の繰り返し動作によるリズム運動で実施した結果については、新たな調査を行う必要がある。

２．５．２．馴化による影響

実験ではすべての実験参加者が手順に従って、まず遅延動作（delay 動作）の印象評価を行った後に、同調動作「synchro 動作」、先行動作（lead 動作）の印象評価を順次実施した。視覚や聴覚情報の知覚においては、同一の刺激が連続して提示されることによって、知覚が弱まるという馴化が起きることが知られている（Baldeweg, 2006）。アバターの先行動作（lead 動作）への評価が実施順序としては最後にあたっていたことから、実験の実施過程で繰り返し視覚刺激が提示されたことで、視覚刺激への反応が弱まる馴化の現象が生じた可能性が考えられる。将来的には、試行順序をランダム化し、結果について確認するべきと考える。

２．６．結言

本章の実験では、能動運動に伴う予測が時間知覚に及ぼす影響を見るために、運動結果を認識する情報としてアバターの動作映像を参加者に提示して行った。アバターの動作映像は、自身の運動と同調して動く映像のほか、時間的整合性が損なわれたアバター映像を提示して、それぞれの動作映像に対する印象評価を実施した。

実験の結果、リズム的能動運動の際に提示された視覚刺激のアバター動作が遅延した「delay 動作」への印象評価は、「他人のような」「想定外の」「親しみにくい」という結果となった。自身の行うリズム運動とアバター動作が同期せず、またリズム運動に伴う予測情報と、運動結果を示すアバター映像との時間的不整合を認識し、違和感を感じるという印象となった。アバター動作が先行する「lead 動作」への印象評価は、「興味深い」「想定内の」「感じのよい」という結果となった。視覚刺激であるアバターの動作が、リズム的能動運動を行う実験参加者の動作よりも先行する内容で表示されたことが、リズム運動に伴う予測情報と整合したと考えられ、肯定的な印象評価となった。実験課題である繰り返しのリズム運動は、運動結果の予測が容易であり、視覚刺激（アバター）との随伴関係も認知しやすい。遅延動作（delay 動作）と先行動作（lead 動作）という時間変調が生じた 2 種類のアバター動作に対する印象の違いは対照的である。この結果より、能動運動に伴う予測情報が印象評価に影響するという可能性が示された。

第３章

実験２：
能動運動とリズミカルな刺激提示が
時間知覚に及ぼす影響

第３章　能動運動とリズミカルな刺激提示が時間知覚に及ぼす影響

３．１．緒言

実験１では、能動運動に伴う予測情報が印象評価に影響することを示唆する結果を得た。

本実験２では、能動運動に伴う予測情報の時間知覚への影響について、随意運動と不随意運動という異なる運動条件で時間順序判断課題を実施し、時間分解能の指標である丁度可知差異（Just Noticeable Difference; JND）の値に着目して検証を行う。また、時間知覚に影響を及ぼす要因としてリズムを取り上げ、周期性のあるリズムが予測の手がかりとなることによる時間知覚への影響について、JND 値に着目して検証を実施する。

さらに、随意運動とリズム刺激の２条件を組合せ、相乗効果となって時間分解能の精度向上に影響を及ぼすかどうかについても検証を実施する。

３．２．背景と目的

複数の感覚情報を統合する際の時間知覚に影響を与える要因については、これまでさまざまな研究が行われてきた。その第１の要因としては随意運動の遂行がある。Haggard らは、随意運動時における時間知覚の特異性として、能動的な運動とそれに対する感覚刺激のフィードバックとの間の時間経過は、受動的な運動の場合よりも短く知覚されることを明らかにした (Haggard et al.,2002)。また、Shi らは、随意運動をしているときとしていない時という２つの運動条件下で、視触覚間で時間順序判断(Temporal Order Judgment; TOJ) 課題を実施して検証を行っている。この研究では、随意運動が時間知覚に及ぼす影響を明らかにする目的で視触覚間による TOJ 課題を実施した。その結果、随意運動条件と不随意運動条件とでは、随意運動条件で刺激間のズレの弁別閾を示す指標である丁度可知差異(Just Noticeable Difference; JND)の値が低くなったという結果を得たことから、随意運動条件では時間分解能が高まったと報告している (Shi et al.,2008)。西らは聴体性感覚間で TOJ 課題による実験を実施し、随意運動条件で JND 値が低くなる結果を得たことから、随意運動を時間分解能の精度向上の要因として報告している (Nishi et al.,2014)。

第２の要因としては、刺激情報の提示方法がある。リズムのある刺激は知覚タイミングの予測に寄与し、複数の感覚情報間の時間知覚の精度を向上させると考えられている (Thaut,2008; Thaut et al,2015)。Thaut らによる先行研究では、単一の感覚モダリティによる同期タッピング課題において、刺激音に周期的な変化を加えて実施した条件で、応答周期が刺激周期に対して 1 ステップ遅れて追従することが確認された。この結果は、実験参加者が直前の刺激提示の周期を用いて次の刺激提示タイミングの予測を可能としたことを示唆している (Thaut,1998)。リズムには時間的規則性があることから、その知覚の仕組みは長らく研究の対象となっている。一方、TOJ 課題を実施した先行研究には、リズムを用いて刺激を提示したところ、リズムによる予測の影響を想定したにも関わらず時間分解能の精度は改善しなかったとする報告がある。Kitagawa et al. らは、感覚事象の生起時点の手がかりとして聴覚刺激の前に 500 ms の間隔で同

じ白色雑音を 3 回提示したが、時間分解能の精度向上は見られなかったと結論づけた。ただし著者らは報告の中で、聴覚刺激の提示間隔について先行研究の内容（Halpern and Darwin,1982）と確認を行った結果、実施した実験での提示間隔は先行研究で報告されたものよりも長かったことを確認している（Kitagawa et al.,2016)。この内容は、TOJ 課題における JND の精度向上に、リズム刺激が影響を与える可能性を示しつつも、その実証には検討の余地があることを示唆している。本研究では上記内容をふまえ、リズム刺激が TOJ 課題における JND の精度向上に有効かどうかについて検証を実施する。

複数の感覚情報を統合する際の時間知覚に影響を与える要因と考える随意運動とリズム刺激の２要因は、既にそれぞれ異なる先行研究によって時間知覚へ影響を及ぼすことが報告されている。TOJ 課題においては、随意運動は JND 値の精度向上に関連することが報告されているが、リズミカルな刺激の提示で TOJ 課題における時間分解能の向上が見られるかどうかはまだ調べられていない。また２要因を組み合わせることによって、JND にどのような影響を与えるのかについても明らかになっていない。

本研究の実験２の目的は、聴覚と体性感覚間の TOJ 課題を実施し、能動運動とリズム刺激からの時間知覚への影響を検証することとし、それぞれ時間分解能の精度向上にどのような影響が見られるか、また、随意運動とリズム刺激の組合せによって時間分解能の精度が向上するかどうかという観点からも比較検証を行う。

３．３．実験方法

３．３．１．実験参加者

実験の参加者は２０～３０代（平均年齢 27±9.01）の１７名（女性４名，男性１３名）の大学院生であった。参加者は全員，聴力，体性感覚知覚能力に問題がなく、また正常な視力（または矯正視力）を有していることを確認した。また事前に実施したアンケートで，常用手は右手であること、右手の人差し指を動かすことに問題がないこと、ならびに本実験への参加以前に、聴覚と体性感覚による TOJ 課題を行った経験がないことを確認した。

３．３．２．実験課題

本実験の課題は、わずかな時間差をおいて提示される２種類の刺激、聴覚刺激と体性感覚刺激との時間順序を判断する TOJ 課題を実施した。

同時性知覚の研究では、次の２つの課題がよく用いられる。同時性判断(SJ)課題と時間順序判断（TOJ）課題である。人間は刺激が２つ与えられると、２つの刺激の関係性を判断することができる。SJ 課題は、２つの刺激がさまざまな時間差（Stimulus Onset Asynchrony：SOA）をもって提示されたあとに、参加者は提示された 2 つの刺激が同時か否かを回答する。

TOJ 課題は、わずかな時間差で提示される提示される 2 つの刺激に対して、どちらが先の提示であったか、時間的順序を判断して回答する。この課題の実施によって、時間分解能を評価する指標となる JND 値のほか、主観的同時点（Point of Subjective Simultaneity: PSS）の値を算出して得ることができることから、実験条件間での比較検証を行うことが可能となる。ただし、この課題の留意点としては、TOJ 課題の実施において先行入力効果があることが、先行研究で報告されている(Spence et al.,2001; Zampini et al.,2005)。

そこで本実験で実施した TOJ 課題では、この先行入力効果の影響を受けないよう、参加者の注意をいずれかの刺激に向けることを考え、先行研究の実施内容参考に、実験参加者への質問では「聴覚刺激が先に来たかどうか」という質問形式を用いて、参加者には聴覚刺激に注意を向ける問いかけを行った。

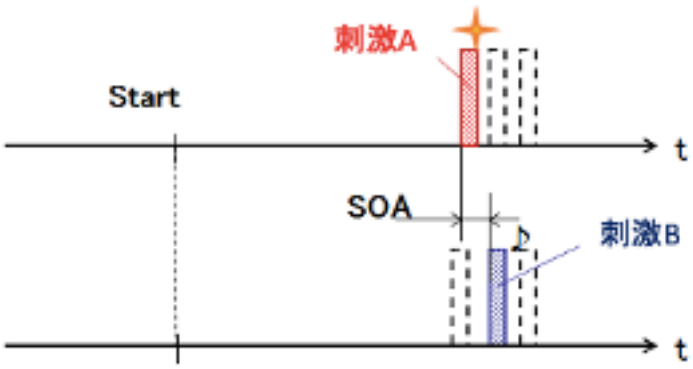


Figure 3.1. 時間順序判断課題　概要

時間順序判断（temporal order judgment task; TOJ） 課題では、ペアとなった２つの刺激が SOA と呼ばれる時間的なズレを伴って提示される。刺激 A、B に対して、どちらの刺激が先に提示されたのかを判断する。

３．３．３．実験装置

本実験で実施した TOJ 課題では、参加者に体性感覚刺激と聴覚刺激の２種類の刺激を提示した。

体性感覚刺激の提示で使用したのは、PHANToM Desktop というデバイス（Sensable Technologies 社製）である。このデバイスは、リンク機構のアームにペン型のコントロールユニットを搭載している。反力呈示アームを通しては、1,000 Hz の時間解像度で反力の呈示と計測を行い、0.023mm の空間解像度でアーム先端位置の計測を行うことができる。体性感覚刺激は、反発からくる振動刺激として矩形波パルス（3N,15ms）を右手人差し指の掌側に提示した。刺激提示のときに生じる時間誤差は、1ms の誤差で制御されている。デバイスに右手を装着した状態は、Figure 8 に示す。

聴覚刺激は、残響の影響が少ないとされるホワイトノイズ（刺激強度 50dB, 持続時間 15ms, 刺激周波数 2,000Hz）を、ヘッドフォンを介して参加者の両耳に提示した。

これらの刺激提示では、PC 上（HP xw4600/CT; Hewlett-Packard, Palo Alto, CA, USA）に開発ツールとして OpenHaptics Toolkit（SensAble Technologies）を組み込んだプログラム（Microsoft Visual C++ 2008 プラットフォーム）によって制御を行った。

Figure 3.2. 体性感覚刺激提示デバイス

体性感覚刺激は、実験参加者の右手人差し指の掌側に矩形パルス（5N、10ms）を提示した。刺激提示には、PHANToM Desktop というデバイスを使用した。接地型のデバイスでは、リンク機構のアームにペン型の操作部をもつ PHANToM シリーズ（SensAble Technologies 社製）が普及している。今回使用したデバイスは、机などに設置でき、装置の持ち手（ペン部分）を操作者に装着することで、持ち手に刺激を提示することができる。また操作が簡便なことも利点である。本研究の実験では、左写真のようにサポーターを用いて右手および右手人差し指をデバイスのペン部分に装着した。また運動条件では、右写真のように人差し指を矢印の方向（掌側）に動かした。

３．３．４．実験条件

実験は運動条件と刺激提示方法の組合せによる計４条件を設定して実施した。以降、運動条件と刺激提示条件からなる実験条件は、それぞれの条件を示す記号をハイフンでつないだ表記で表す。例えば、随意運動（**V**oluntary **M**ovement）を示すVM条件のときに、リズミカル（**R**hythmical）に体性感覚（**T**actile）刺激を提示することを示すRT条件を組合せた実験条件は、VM-RT条件と表現する。Table 3.1.に、実験条件について整理した内容を示した。

■運動条件

運動条件は、随意運動条件（Voluntary Movement：VM条件）と不随意運動条件（Involuntary Movement：IM条件）の２つの条件を設定した。随意運動条件は、実験装置のPHANToMに装着した右手人差し指を完全に伸ばした状態で、掌の側へ動かす。不随意運動条件は、実験装置の体性感覚刺激提示デバイスPHANToMによって右手人差し指が掌の側へ動かされる。

＜VM 条件/IM条件＞

VM条件では、参加者の右手と右手の人差し指にPHANToMを装着し、音声による合図の後に人指し指を自発的かつ自然に動かすように指示した。人差し指は右から左へ、完全に伸ばした状態から手のひら側に曲げた状態へと水平に移動させる。これにより右手の人差し指の腹側に体性感覚刺激が提示される。

IM条件では、参加者は右手と右手の人差し指にPHANToMを装着し、固定した状態で、机の上に右肘をついて着席して待機した。そのまま静止した状態で各試行を開始する合図音を待ち、合図音のあとPHANToMが動いて、右手の人差し指が動かされる。

■刺激提示条件

提示順序を判断する刺激（触覚または聴覚のいずれか）は、開始音の合図の後にランダムな遅延（600～700ms）を伴って提示される。体性感覚刺激の提示は、VM 条件の場合は、参加者が合図音の後に、指を自発的に動かしたときに体性感

覚刺激が提示され、IM 条件の場合は PHANToM によって参加者の人差し指が動かされることで、人差し指に体性感覚刺激が提示される。

＜１T 条件/RT 条件＞

１T 条件は、聴覚刺激と触覚刺激が各１回提示され、その組合せにおける提示順序を判断して回答する。RT 条件では、聴覚刺激が１回、体性感覚刺激がリズミカルに５回提示され、リズミカルな体性感覚刺激の 5 回目と 1 回の聴覚刺激を対象に、提示順序を判断して回答する。リズミカルな体性感覚刺激を提示する RT 条件では，連続する刺激提示が手がかりとなって、時間順序判断に影響するものと考えた。

VM 条件と RT 条件の組合せでは、参加者が人差し指を自発的に 5 回動かすと、自発的な動きに応じて右人差し指に触覚刺激がリズミカルに５回提示される。参加者は、リズミカルな体性感覚刺激の 5 回目と 1 回の聴覚刺激を対象に、提示順序を判断して回答した。

IM 条件と RT 条件の組合せでは、参加者の人差し指が PHANToM によって 5 回動かされ、その動きに応じて右人差し指に体性感覚刺激がリズミカルに５回提示される。参加者は VM 条件のときと同様に、体性感覚刺激の 5 回目と 1 回の聴覚刺激を対象に、提示順序を判断して回答した。

刺激を発する時間間隔では、聴覚刺激と触覚刺激の提示時間のずれとして 9 種類の時間間隔（SOA：±240，±90，±60，±30，0ms）として SOA（Stimulus Onset Asynchrony）を設定した。SOA の正の値は，聴覚刺激が触覚刺激よりも先に提示されたことを示し，負の値は、触覚刺激が先に提示されたことを示す。SOA が 0 の場合は、物理的に同期していることを示す。すべての実験条件（VM-1T、VM-RT、IM-1T、IM-RT）において、参加者は、９種の時間間隔をおいて提示される 2 つの刺激に対して「聴覚刺激が先に提示されたかどうか」を判断する。

Table 3.1. 実験条件

		刺激提示条件 Tactile	
		リズム刺激 Rhythm	単発刺激 1-time
運動条件	随意運動 Voluntary-Movement	VM-RT条件	VM-1T条件
	不随意運動 Involuntary-Movement	IM-RT条件	IM-1T条件

実験は運動条件と刺激提示方法の組合せによる計４条件を設定して実施した。運動条件は、随意運動条件（Voluntary Movement：VM 条件）と不随意運動条件（Involuntary Movement：IM 条件）の２つの条件を設定した。刺激提示条件は、体性感覚刺激をリズミカルに 5 回提示する条件と１回提示する条件の２つの条件を設定した。実験条件は、それぞれの条件を示す記号をハイフンでつないだ表記で表す。例えば、随意運動を示す VM 条件のときにリズミカル（Rhythmical）に体性感覚（Tactile）刺激を５回提示することを示す RT 条件を組合せた実験条件は、VM-RT 条件と表現する。

３．３．５．実験手順

実験は外部からの光を遮断した防音室で行われた。室内では出来る限り消音の下で実験を行い、周囲の騒音は最大限に抑制した。提示した聴覚刺激は、ホワイトノイズ（50dB, 15ms）を両耳に装着したヘッドフォン介して提示した。実験参加者は実験装置の前に右肘を机の上につけて着席し、右手を体性感覚刺激を提示する PHANToM に装着した。体性感覚刺激が人差し指の腹に当たるようにサポーターで固定した後に、全員に装置の使用方法について説明した。

参加者は、実験を正式に開始する前に、実験装置と課題内容に慣れることを目的に各実験条件ごとに最大３０回の動作練習を行っている。動作練習は、参加者が「十分練習を行って準備ができた」と言った時点で終了とした。参加者による動作練習の後、４つの実験条件をランダム順に実施した。なお体性感覚刺激の提示デバイスの起動音が気にならないようにするために、背景にホワイトノイズを流した。Figure 3.3.は、実験のフローチャートである。

各実験条件は、聴覚刺激の合図音（Cue 音）によって開始が知らされる。合図音のあと、VM 条件では参加者自身が運動を開始、IM 条件では体性感覚提示デバイスによって右手の動作が開始し、その後に 2 種類の刺激が提示された。1 つ目の刺激（触覚または聴覚のいずれか）は、開始の合図音から 600～700ms を経て提示される。その後、体性感覚刺激の提示時点を起点として、SOA だけずらした時点で（1 つ目の刺激とは異なる）２つ目の刺激が提示された。聴覚刺激と体性感覚刺激の持続時間はそれぞれ 10ms とした。

参加者は提示された聴覚刺激と体性感覚刺激を対象に、どちらの刺激が先に提示されたかを強制二択により判断し、フットペダルを使って回答を行った。なお、実験参加者には正誤のフィードバックは行っていない。

運動が完全に停止して、9 種類の SOA を１セットとする回答が完了した後には 1 分間（1000ms）のインターバルを設けた。その後、実験参加者に再開の意思を確認後に、次の施行を実施する、という流れで実験を進めた。課題は実験条件ごとに、それぞれ 9 種の SOA 条件での提示を１セットとして、３セット、計 27 回の時間順序判断を実施した。

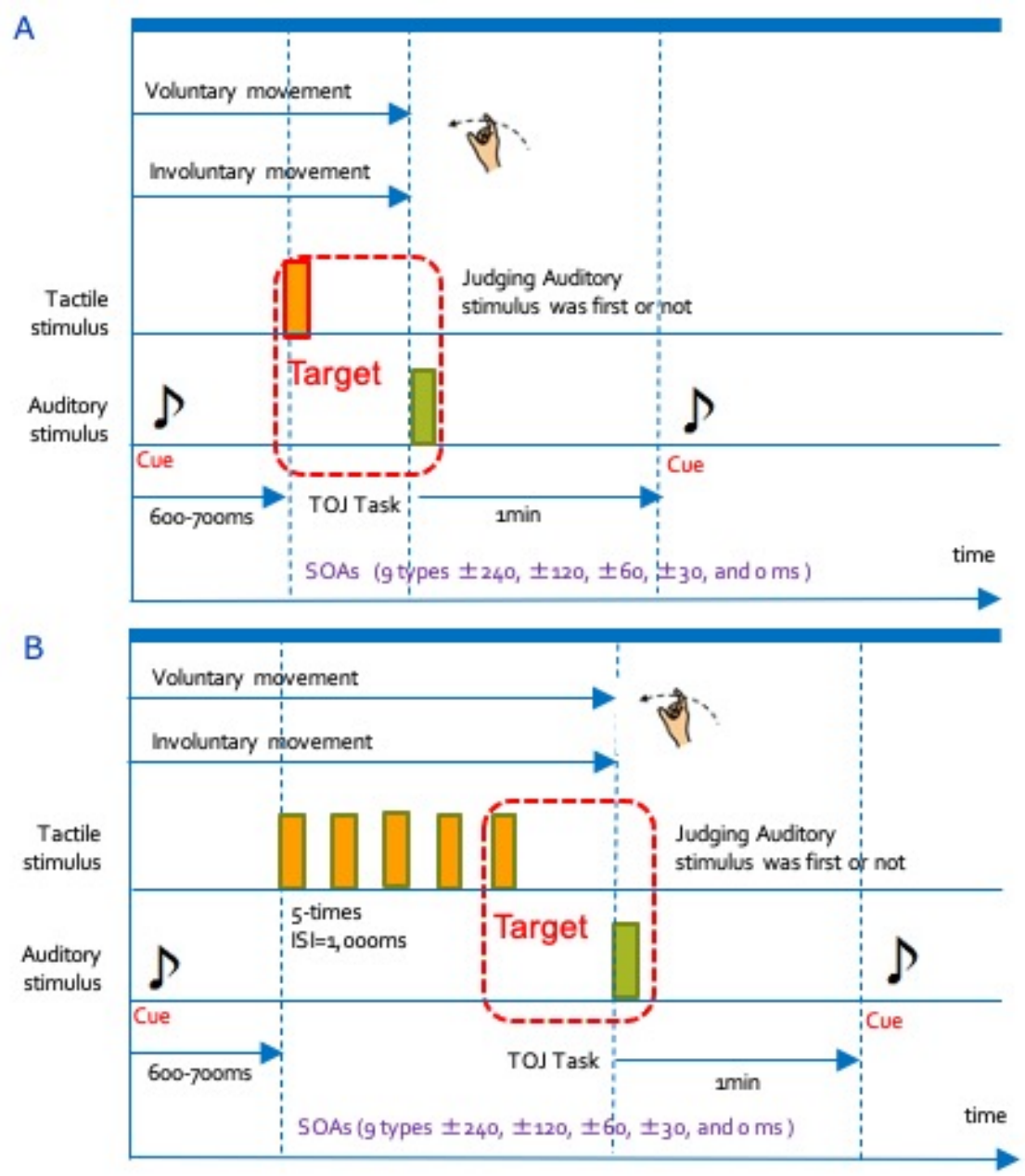


Figure 3.3. 実験のフローチャート

上図 A は、聴覚刺激（１回提示）と体性感覚刺激（１回提示）で TOJ 課題を実施、下図 B は、体性感覚刺激は一定の間隔で連続５回提示し、５回目に提示された体性感覚刺激と聴覚刺激（１回提示）で TOJ 課題を実施することを示している。1 つ目の刺激（触覚または聴覚のいずれか）は、開始の合図音（Cue）から 600～700ms を経て提示される。その後、体性感覚刺激の提示時点を起点として、SOA だけずらした時点で(1 つ目の刺激とは異なる) ２つ目の刺激が提示された。

Figure 3.4. 実験風景

実験は外部からの光を遮断した防音室で行われた。参加者はモニター及び刺激装置の前に座り、右手人差し指を体性感覚を提示するデバイスに装着しサポーターで固定した。聴覚刺激はヘッドフォンを介して両耳に提示した。

３．３．６．分析方法

データの分析とグラフ（心理物理曲線）の表示には、MATLAB の Statistics Toolbox (MathWorks, Natick, MA, USA)を使用した。収集した回答データから、練習中の回答データを除外し以降の分析を行った。まず９種類の各 SOA に対し、聴覚刺激が先行して提示されたと回答した割合を算出し、縦軸には聴覚刺激が先であると回答した割合を、横軸には SOA をプロットした。また参加者の回答に対し、先行研究と同様の方法で一般化線形モデルに基づきロジスティック曲線により回帰した（Finney,1952)。Figure 3.5.として、回帰した心理物理曲線について例示した。

回帰式は以下の式を用いた。y は正答率、x は SOA の値を表す。αは主観的同時点（PSS）の推定値である。

$$y = \frac{1}{1+e^{\frac{\alpha-x}{\beta}}} \qquad (1)$$

解析には TOJ 課題の時間分解能の指標である丁度可知差異（Just Noticeable Difference; JND）を用いた。回帰によって得られるβを用いて、JND は以下の式により定義される。

$$JND = \frac{(x_{0.75} - x_{0.25})}{2} = \beta \log 3 \qquad (2)$$

このとき，x_p は聴覚刺激が先と回答した割合(縦軸 y の値)が $_p$の時の刺激間のズレである SOA の大きさ(x 軸の値)である。JND は、聴覚が先と回答する割合がそれぞれ 75%、および 25% となる SOA の差の 2 分の 1 と定義される。

JND の値が小さいほど刺激のペアの弁別閾は狭まり、時間的な判別精度が高いことを示す。データは 4 条件（IM-1T, IM-RT, VM-1T, VM-RT）ごとに統計的に検定を行った。統計解析は、IBM SPSS version 26 (IBM Corp.Armonk, NY, USA)

と R（version 4.0.3）を用いて行った。検定では、分析対象のデータが正規分布に従わなかったため、ノンパラメトリック検定を実施した。

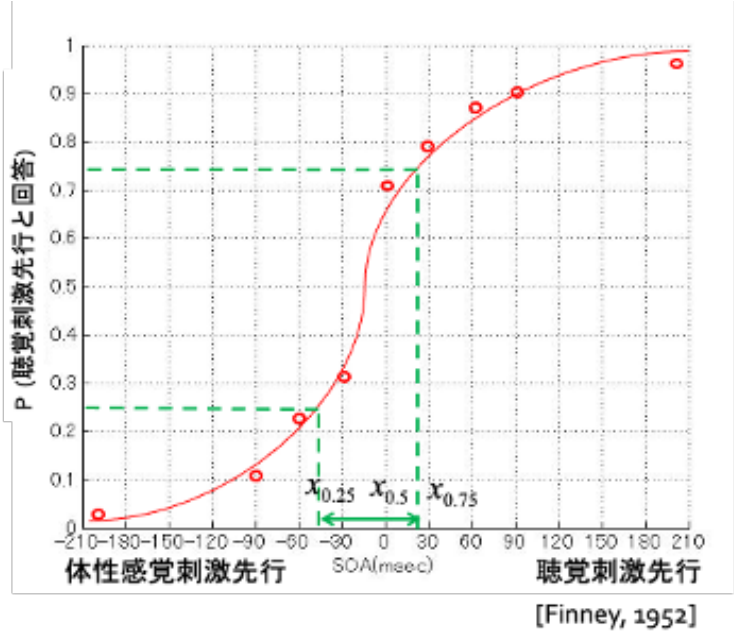


Figure 3.5.心理物理曲線

x_p は聴覚刺激が先と回答した割合が p の時の刺激間のずれの大きさである。JND は「聴覚刺激が先である」とする回答者の割合がそれぞれ 75%と 25%となる SOA の 2 分の 1 と定義した。

３．４．実験結果

Figure 3.6.～3.9.では、各実験条件で得られた回答データを平均し、回帰した心理物理曲線を示している。曲線の傾きからは各条件間での違いをみることができる。不随意運動条件下で刺激をリズミカルに提示した IM-RT 条件では、JND の領域に値する部分の幅が狭くなっている（Figure 3.7.）。リズミカルな刺激によって刺激提示タイミングの手がかりが得られたことで、時間分解能が高まったことを示す結果となった。

Figure 3.10.は、4 つの実験条件の JND の平均値を棒グラフで示したものである。Table 3.2.は、各実験条件それぞれについて、JND 値の平均値と標準誤差をまとめたものである。また Figure 3.11.として、4 つの実験条件ごとに参加者の個人データの分布を散布図で示した。

分析では、収集データの正規性を確認し、正規分布に従わないデータであったため、ノンパラメトリック検定を実施した。検定は 4 つの実験条件（IM-1T、IM-RT、VM-1T、VMRT）を比較する Friedman 順位和検定を用いて有意な差が確認された（p＝0.039）。次に、Benjamini-Hochberg（BH）補正調整を用いたウィルコクソンの符号付き順位検定（Wilcoxon signed rank test）を実施し、条件間の組合せに有意な差があるか確認した。検定結果は、Table 3.3.として表示した。

検定結果からは、5%水準で有意差ありと判断することができる組合せを３つあげることができる。まず、不随意運動条件下で刺激提示方法の違いがある条件である IM-RT 条件と IM-1T 条件の組合せで、5%水準で有意差あり（$p = 0.038$）と判断することができる。この結果からは、IM-RT 条件の JND 値はリズム刺激による影響ありと解釈できる。次に、刺激提示が 1 回の条件下での運動条件の違いがある条件で IM-1T 条件と VM-1T 条件の組合せで 5%水準で有意差あり（$p = 0.039$）と判断することができる。この結果からは、VM-1T 条件の JND 値は随意運動による影響ありと解釈できる。3 点目として、不随意運動(IM)と単発刺激(1T)の組合せである IM-1T 条件と随意運動(VM)とリズム刺激(RT)条件の組合せの VM-RT 条件で 5%水準で有意差あり（$p = 0.040$）となった。

随意運動時(VM)とリズム刺激(RT)条件の組合せである VM-RT 条件と、随意運動時(VM)と単発刺激(1T) の組合せである VM-1T 条件では、有意な差を確認することができなかった（p = 0.516)。

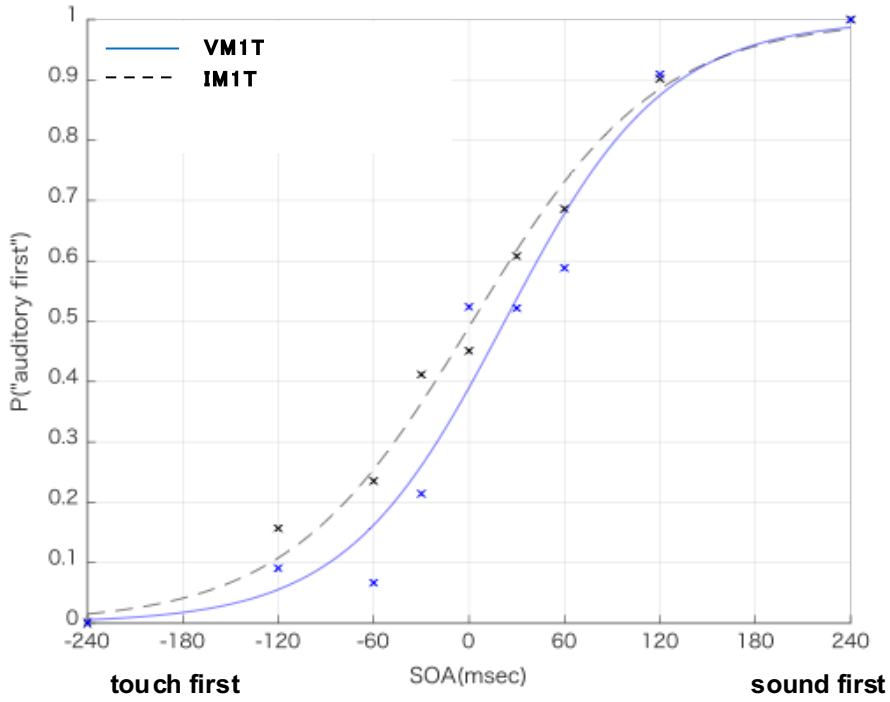


Figure 3.6. IM-1T 条件と VM-1T 条件間の比較

・ともに単発刺激提示の条件下で、運動条件の違いによる比較では、検定結果から IM-1T 条件と VM-1T 条件では、JND 値は有意差ありという結果であった。
・随意運動条件が同時性知覚の時間分解能を高めることを確認する結果となった。

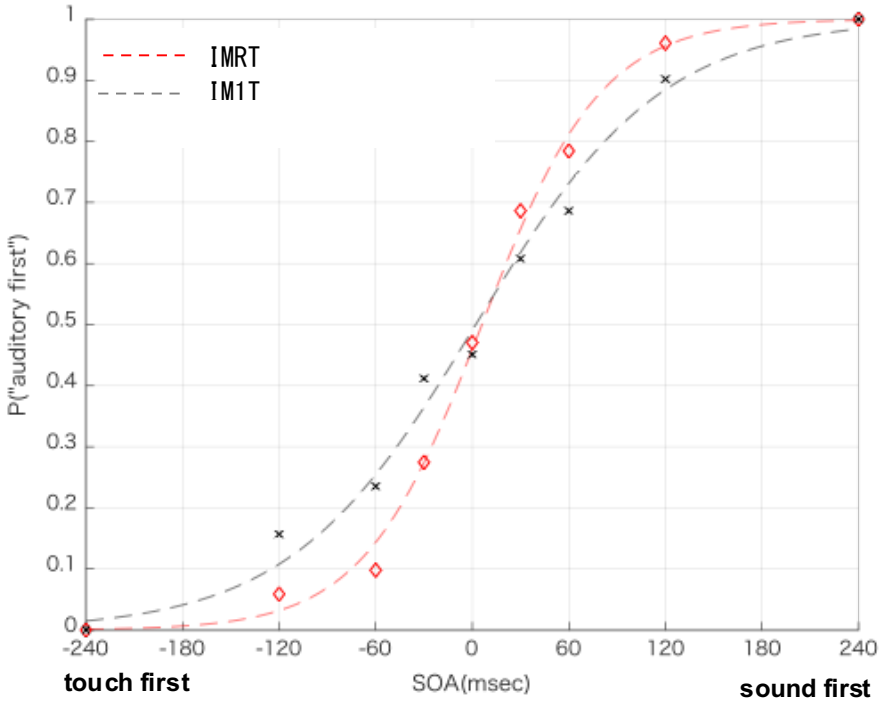


Figure 3.7. IM-RT 条件と IM-1T 条件間の比較

・ともに不随意運動条件下で、刺激提示方法の違いによる比較では、刺激をリズミカルに提示した IM-RT 条件では心理物理曲線の傾きが急になっている。
・検定結果からも、IM-RT 条件と IM-1T 条件では、JND 値に有意差が認められた。
・リズミカルな刺激によって刺激提示タイミングの手がかりが得られたことで、時間分解能が高まったことが示された。

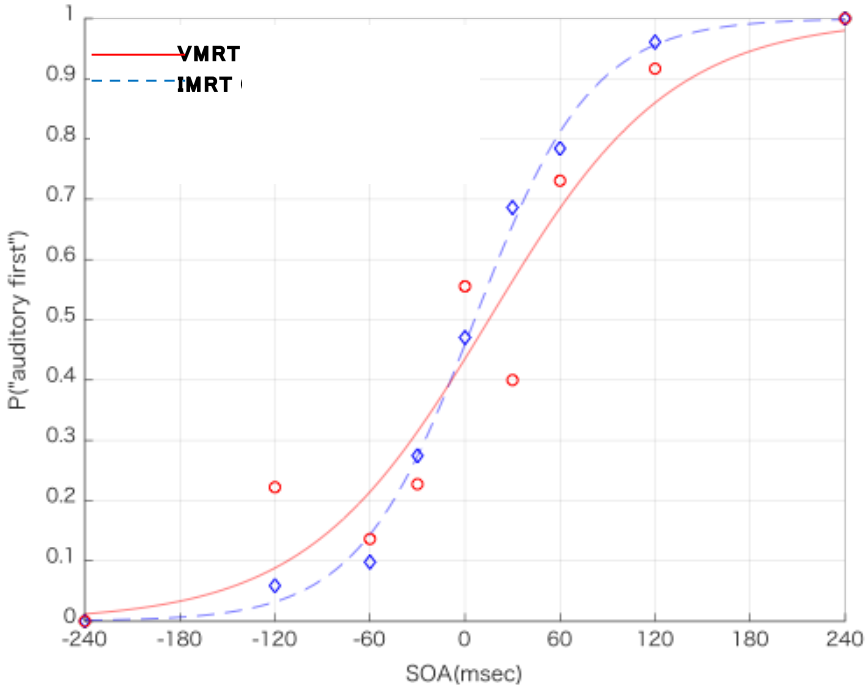


Figure 3.8. IM-RT 条件と VM-RT 条件間の比較

・この組合せでは、ともにリズミカルな刺激条件により刺激提示タイミングの手がかりが得られることから、運動条件の違いによって時間分解能が向上するかどうか検証を行ったが、検定の結果、IM-RT 条件と VM-RT 条件では、JND 値に有意差は認められなかった。

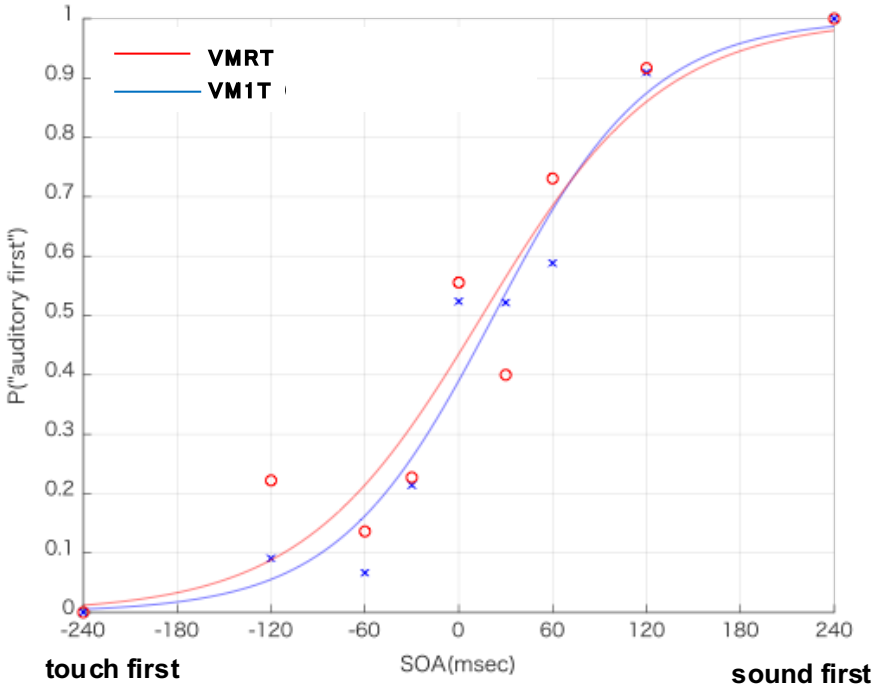


Figure 3.9. VM-RT 条件と VM-1T 条件間の比較

・この組合せではともに随意運動条件下において、VM-RT 条件では、随意運動条件とリズミカルな体性感覚刺激提示の組合せが相乗効果となって時間分解能が向上するかどうか検証を行ったが、検証結果からも VM-RT 条件と VM-1T 条件では JND 値に有意差は認められず、VM-RT 条件での相乗効果は観察されなかった。

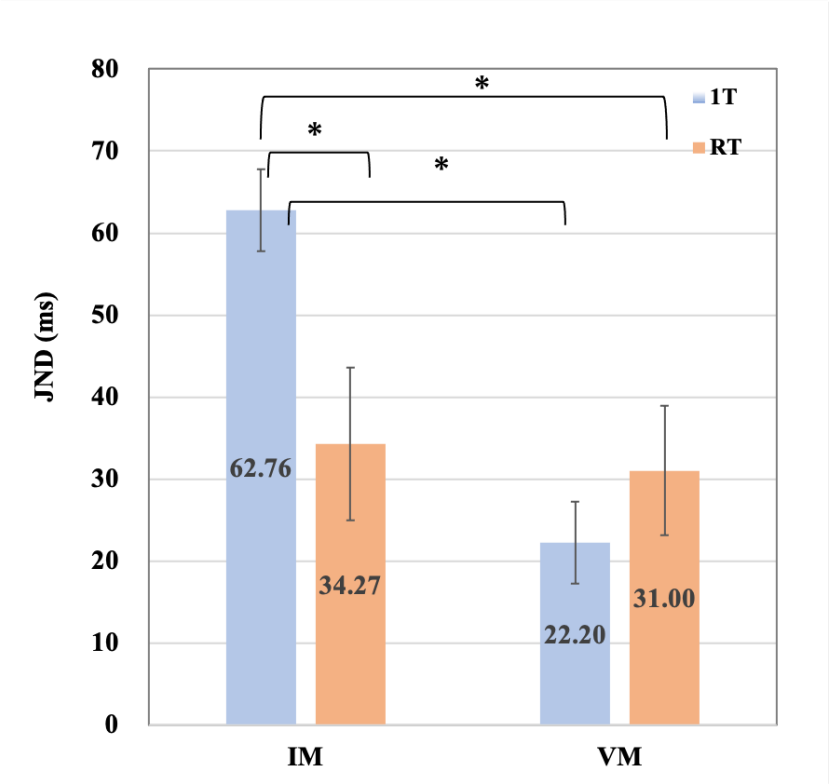


Figure 3.10. 実験条件別 JND の平均値

17 名の実験参加者による実験条件ごとの JND の平均値とエラーバー表示した。また、検定は ウィルコクソン符号付順位正確検定を実施し、検定の結果、5%水準で有意であると判断した　組合せは、*をつけて表示した。

Table 3.2.　実験条件ごとの JND 値の平均値と標準誤差

条件名	IM1T	IMRT	VM1T	VMRT
運動条件	不随意運動	不随意運動	随意運動	随意運動
体性感覚刺激 提示方法	単発	リズム	単発	リズム
JND 平均値（ズレの弁別閾）	62.76	34.27	22.20	31.00
JND標準誤差	8.97	7.74	8.84	7.89

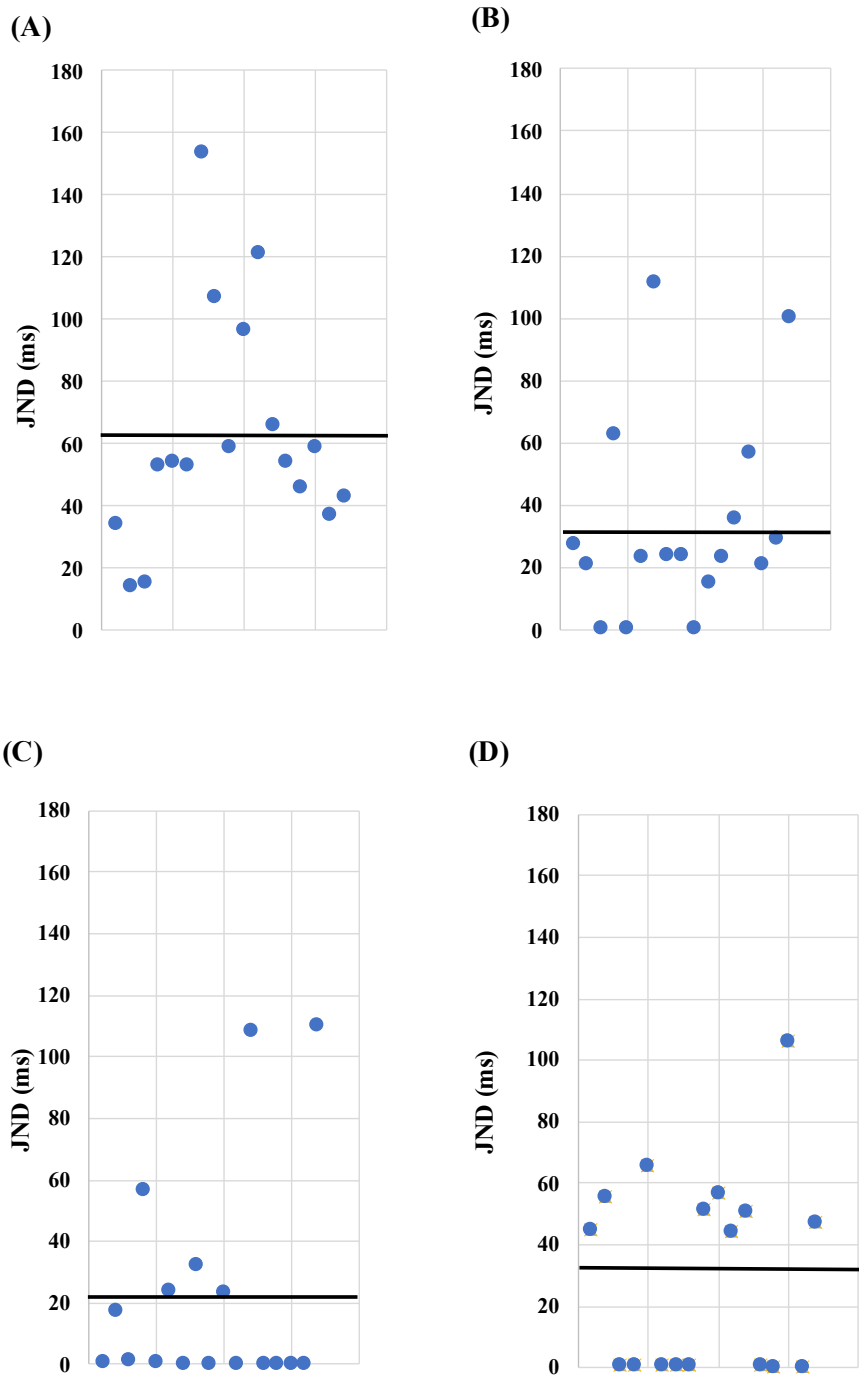


Figure 3.11.　実験参加者の個人データの分布

散布図(A)～(D)は、実施した実験条件（(A)IM-1T 条件、(B)IM-RT 条件、(C)VM-1T 条件、(D)VM-RT 条件）における実験参加者の個人別の JND 値を示している。各散布図内の黒い横線は実験参加者の JND の平均値の位置を示す。

Table 3.3.　Wilcoxon 符号付き順位和検定の実施結果

Pair Condition Name		Sig.	Adj. Sig.	W	Cliff's delta
IM-1T	VM-1T	0.0093	0.0386	130	0.668 (large)
IM-RT	VM-RT	0.8536	0.8536	72	0.093 (negligible)
IM-1T	IM-RT	0.0129	0.0386	25	0.505 (large)
VM-1T	VM-RT	0.4307	0.5168	94	0.273 (small)
IM-1T	VM-RT	0.0202	0.0403	28	0.488 large
VM-1T	IM-RT	0.1454	0.2181	108	0.419 (medium)

ウィルコクソンの符号付き順位和検定（Wilcoxon signed-rank test with BH correction adjustment）を実施し、条件間の組合せに有意な差があるか検定を行った。検定結果からは、IM-1T 条件と VM-1T 条件（p=0.039)、IM-RT 条件と IM-1T 条件（p=0.038)、IM-1T 条件と VM-RT 条件（p=0.040）の組合せで、5%水準で有意差ありと判断した。有意差が認められた組合せは赤字で表示している。なお効果量の推定は、Cliff's delta を用いて行った。

３．５．考察

本実験結果からは、随意運動条件、またリズミカルな刺激提示条件ともに、時間知覚の分解能を向上させることに効果があることを確認することができた。これまでの既存研究では、随意運動条件とリズミカルな刺激提示の組合せが相乗効果となって時間分解能の精度向上に影響を及ぼすのか、という点については不明なままであったが、分析の結果、相乗効果は確認されなかった。

本実験で得られた結果に基づき、聴体性感覚間の TOJ 課題において、随意運動条件、リズミカルな刺激提示、また、随意運動条件とリズミカルな刺激提示の組合せによる時間分解能への影響について考察を行った。

３．５．１．随意運動の影響

実験２の結果では、随意運動条件下で刺激提示を１回行った条件で、JND 値は最も低い値を示した（p =0.04）。先行研究では、西らによる聴体性感覚間で行った TOJ 課題による実験結果で、随意運動条件下では JND 値が低くなり、時間分解能が高まったと報告している（Nishi et al.,2014）。Shi らは、視触覚間で行ったTOJ 課題による実験結果で、同じく随意運動条件下でのJND値が低くなり、時間分解能が高まったと報告している（Shi et al.,2008）。実験２で得られた結果は、随意運動が時間知覚の分解能を向上させるとした先行研究の内容を支持するものである。

随意運動による影響については、運動に伴う予測情報が時間分解能に影響している可能性が数々の先行研究で指摘されてきたが、本実験の結果では、この予測情報によって感覚フィードバックの内容とともに感覚情報の到来タイミングについても情報がもたらされたことにより、時間分解能の精度向上に寄与したことが考えられる。

別の先行研究では、高次運動野の補足運動野（supplementary motor area, SMA)で時間知覚に関連する働きがあることが観察されている(Aso et al.,2010)。Haggard らは、補足運動野が遠心性コピーを生み出す領域であることを示唆する報告を行っている(Haggard & Whitford,2004)。随意運動条件で時間知覚の分解能が向上したのは、この補足運動野における時間知覚の処理が、随意運動によって高速化するためであるとする報告もある（Macar et al.,2006)。

また、随意運動時に関しては、「運動を引き起こそうとする意図」が強い場合に、運動とその結果の間の「時間差」が短く知覚される現象「意図による結びつけ（Intentional binding)」がある。この Intentional binding は感覚フィードバックの予測情報が関与しているとも考えられている。Haggard によって実施された実験によると、自発的なキー押し動作を行ったグループと装置により非自発的なキー押し動作を行ったグループに分けて、キー押し動作を行った時間と動作により起きた事象(音の発生)の発生時間を実験の参加者より報告をさせた結果、自発的なキー押し動作を行ったグループでは、キー押し時点が実際よりも遅く、音の発生時点は実際よりも早く知覚した。一方、非自発的なキー押し動作を行ったグループは、キー押し時点は実際よりも早く、音の発生の時点は実際よりも遅く知覚した（Haggard et al.,2002)。自発的なキー押し動作を行った場合は、その動作と結果の間隔が短くなったことで、運動の意図と知覚との因果関係が示唆されているが、意図による結びつけについては、キー押し運動と音の発生までの時間差は 200 ms から 600 ms のときの内容であることが確認できた。本研究の実験では SOA は 240ms 以下で実施したものであり、随意運動が同時性知覚の時間分解能を向上させたという実験によって得られた結果に対しては、Intentional binding と関連付けて考察するにはあたらないと考える。

３．５．２．リズミカルな刺激提示の影響

リズム刺激の影響については、不随意運動条件下で、体性感覚刺激をリズミカルに提示した条件で、1 回提示条件よりも JND 値は有意に低くなった。本実験では、不随意運動条件下において、体性感覚刺激の提示をリズミカルに繰り返し行ったことが手がかりとなり、TOJ 課題における JND の改善につながったことを確認した。

先行研究には、提示タイミングの手がかりとなる情報により、時間順序判断の閾値が下がる、すなわち時間分解能を示す JND が改善したことを示す報告が見られる。Correa らは TOJ 課題において、刺激提示タイミングが予測できるように視覚刺激の Cue をターゲット刺激として与え、ターゲット刺激が提示されない条件よりも JND の値が小さくなったことから、刺激提示タイミングが予測できるときには、時間知覚の分解能が高まることを報告している（Correa et al.,2006)。この実験では、ターゲット刺激をリズムをもって提示した設定ではないが、手がかりとなる視覚刺激が提示されることで時間分解能に影響を与えたという結果につながった。本実験の結果は、体性感覚刺激を用いた内容で、不随意運動の条件下でリズミカルに複数回の刺激提示を行った条件で、時間分解能の精度向上に寄与したことを示す結果が得られた。

連続して提示される感覚刺激に応じるには、刺激の周期性を認識することによって、次の到来タイミングを予測していることが考えられる。リズムは再現的で周期的な事象として時間の流れを細分化し、順序立てる作用をもつことから、予測の手がかりとすることは有効であると言える（Thaut,2008)。

Shimada らが実施した、運動主体感と視覚運動の認知における知覚遅延の影響に関する研究では、予測された感覚フィードバックと実際のフィードバックが時間的整合性をもって一致したときには、不随意運動条件であっても運動主体性が感じられたことが示された（Shimada et al.,2010)。この内容は、本研究の実験２の結果として、不随意運動条件下でリズミカルな刺激提示を行った場合に時間分解能の精度が高まったこととの共通点があると考えられる。どちらも不随意運動の条件下において、動作と時間的な整合性がある、かつ予測につなが

る手がかりが提示されて、感覚フィードバック情報との比較照合が行われていると推察され、時間分解能の精度が高まり時間的整合性を認識したといえる。

リズム、ハザード関数、合図によって操作された事象の時間的規則性は、知覚感度を向上させ、一次視覚野と聴覚野を変調させていると報告する先行研究もある（Nobre & Rohenkohl,2014)。Nobre らは、時間的規則性と予測の可能性を、リズム、ハザード関数、合図の３つで検証し、リズムは、最も自然で一般的な時間的予測源となるとし、間隔と一致する目標に対する知覚弁別が一貫して示されたという点をリズムの特性として整理している。

リズム知覚の研究成果においては、人間はリズムの知覚によって、身体を動かしていなくても、運動に関わる脳の領域が活動することがわかっている。Bengtsson らは、実験参加者にリズムのある音の系列とランダムな音の系列を聴かせて、そのときの脳活動を調べたところ、リズムのある音の系列を聴いた場合には、運動準備に関連する領域である運動前野、補足運動野、前補足運動野の活動が見られたと報告している（Bengtsson et al.,2009)。また、脳内では補足運動野がリズムを知覚する際に活動しているが、それは感覚刺激の予測とその反応の準備であるとする仮説が提示されている（Ross et al.,2016)。

３．５．３．随意運動とリズム刺激提示の相互作用

随意運動とリズム刺激の組合せが、時間分解能の精度向上となったかどうかについては、結果として相乗効果は観察されず、随意運動とリズム刺激を組合せた VMRT 条件では、随意運動条件と 1 回の刺激提示を組合せた VM1T 条件との比較において有意差は確認できなかった。この結果については、VM-RT 条件は天井効果の影響を受けている可能性が高く、TOJ 課題における JND 値のさらなる精度向上には至らなかったことが考えられる。

また、本実験ではリズム刺激の提示を体性感覚刺激を用いて行った。この体性感覚刺激については次のような先行研究がある。Vitello らは、体性感覚刺激を用いて運動方向弁別能を測定する実験を実施したところ、前腕の状態が静止状態、受動状態、能動状態の順に体性感覚刺激の知覚が鈍くなったことを報告している（Vitello et al.,2006)。また、別の先行研究では、自発的な運動が、動いている手足の触覚刺激に対する感度を低下させることを示唆する報告もある（Frissen et al.,2010)。随意運動と体性感覚刺激の組合せ条件では、これらの先行研究で示された、体性感覚刺激の知覚が鈍くなる感覚減衰が生じた可能性が考えられる。VM−RT 条件と IM-RT 条件との比較では、Figure 3.9. の心理物理曲線の傾きをみると、IM-RT 条件で急な傾きになっており、VM−RT 条件との違いを見ることができる。また Figure 3.10. VM-RT 条件と VM-1T 条件間の比較では、体性感覚刺激が先に提示された側で、わずかに VM−RT 条件と VM-1T 条件の傾きに違いを見ることができる。随意運動とリズム刺激を組合せた VM−RT 条件では、体性感覚刺激を複数回提示した影響から感覚減衰につながり、弁別性の精度が向上しなかったことが考えられる。本実験における VM−RT 条件に関わる結果については、体性感覚刺激ではない別の感覚刺激で実施し、聴覚刺激との TOJ 課題の実施結果を確認する必要があると考える。

３．６．結言

実験２では、能動運動に伴う予測情報の時間知覚への影響について、随意運動と不随意運動という異なる運動条件で時間順序判断課題を実施し、時間分解能の指標である丁度可知差異（Just Noticeable Difference; JND）の値に着目して検討を行った。また、時間知覚に影響を及ぼす要因としてリズムを取り上げ、周期性のあるリズムが予測の手がかりとなることによる時間知覚への影響について検討した。さらに、随意運動とリズム刺激の２条件を組合せ、相乗効果となって時間分解能の精度向上に影響を及ぼすかどうかについても検討した。

実験の結果、随意運動条件、リズム刺激条件は、ともに時間分解能を向上させることに効果があることを確認することができた。随意運動とリズム刺激の組合せでは相乗効果は確認されなかった。

随意運動については、運動に伴う予測情報が重要な役割を果たしていることは先行研究でも指摘されてきたが、本実験の結果においても、この予測情報が時間分解能の精度向上に寄与したものと考える。

随意運動ついては、運動に伴う予測情報が時間分解能に影響している可能性が先行研究で指摘されてきたが、本実験の結果においても、この予測情報によって感覚フィードバックの内容とともに感覚情報の到来タイミングについても情報がもたらされたことにより、時間分解能の精度向上に寄与したことを示す結果を得た。リズム刺激については、不随意運動条件下で体性感覚刺激をリズミカルに提示した条件で、1 回提示した条件よりも JND 値は有意に低くなったことから、不随意運動条件下では、体性感覚刺激をリズミカルに繰り返し提示したことが手がかりとなり、感覚情報の到来タイミングの想定につながったことで TOJ 課題における JND の改善がみられたことが考えられる。

第４章

総合考察

第４章　総合考察

４．１．本研究から得られた結果のまとめ

本研究の目的は、リズム的能動運動に伴う予測が時間知覚に及ぼす影響について検討することである。本章では、実施した２つの実験から得た結果をもとに総合考察を行う。

本研究の課題１に対応する実験１では、リズム的な繰り返し動作をする視覚刺激（アバター）と同調して能動運動を実施するという条件下で、刺激と運動の位相的前後関係を制御してアバターの印象評価を実施した。結果としては、時間変調を加えたアバター映像の印象評価において、遅延動作と先行動作とでは印象が非対称に変化することが示された。

実験は１４名の参加者により行われ、実験課題として、メトロノーム音に合わせて、両手の上げ下げをする繰り返し運動を行った。このとき、運動を行う参加者の前に設置したスクリーンには、参加者の動きと同調して動くアバターを表示した。表示したアバターは３種類あり、同調動作をするアバターのほか、参加者の動きよりも遅延して動作するアバターと、先行して動作するアバターを用意した。参加者は３０秒間の繰り返し運動を行い、終了後に自身の動作に対応してスクリーン上に表示されたアバター映像に対する印象を問うアンケートに回答をした。各アバターに対する印象内容を分析した結果、参加者の動作に対してアバター動作が遅延した遅延動作への印象では、「他人のような」「想定外の」「親しみにくい」という違和感を感じる評価となったが、先行動作したアバターへの印象は、「興味深い」「想定内の」「感じのよい」「楽しい」という評価となり、同調動作をするアバターに対しては、「自然な」「自分らしい」「心地よい」という評価となった。アバター映像に加えた遅延と先行という時間変調による印象内容を比較すると、対称的な結果となったということができる。

本研究の課題２に対応する実験２では、聴体性感覚間での時間順序判断課題を実施し、能動運動とリズム刺激からの時間分解能への影響を調べたところ、両条件はそれぞれ、時間分解能の精度を向上させたことが確認できた。

実験は１７名の参加者により行われ、実験課題としては、わずかな時間差をおいて提示される２種類の刺激（体性感覚刺激と聴覚刺激）に対し、提示された順序について判断を行う TOJ 課題を実施した。体性感覚刺激は、接地型の触覚デバイスを用いて、参加者の右手人差し指に反発からくる振動刺激を提示した。聴覚刺激は、ヘッドフォンを用いて参加者の両耳に提示した。実験は外部からの光を遮断した防音室で行った。聴覚刺激と触覚刺激の提示時間のずれとしては、９種類の時間間隔（SOA：±240，±90，±60，±30，0ms）を設定した。実験条件は、運動条件２種（随意運動条件と不随意運動条件）と刺激提示方法２種（１回提示とリズミカルに５回提示）を組合せた計４条件とした。分析は、既存研究の方法に従い、提示刺激に対して「聴覚刺激が先」という回答データを集計して実施した。分析の結果、１回の体性感覚刺激の提示を行った際、随意運動条件下では不随意運動よりも時間分解能の指標となる丁度可知差異（JND）の値が有意に低くなった。リズミカルな体性感覚刺激提示を行った際は、不随意運動の条件下で有意に JND 値が低くなった。随意運動とリズム刺激を組合せた条件では、随意運動と１回の刺激提示を組合せた条件との比較において JND 値に有意な差が認められないという結果となり、相乗効果は観察されなかった。

４．２．運動制御モデルの観点からの考察

本研究の実験１では、リズム的な繰り返し運動を行い、その運動に同調して動作するアバター映像への印象評価を行った。動作を遅延させて表示するという時間変調を加えたアバターに対する印象は、「他人のような」「想定外の」「親しみにくい」というもので、良い印象とはいい難い結果を得た。一方、動作を先行させて表示した先行動作をするアバターに対する印象は、「興味深い」「想定内の」「感じのよい」「楽しい」という肯定的なものとなった。

運動結果を示すアバターが動作遅延をした映像は、身体運動を行った参加者にとっては、自身の動作が遅延した状態であることを示す視覚情報として感覚フィードバックがもたらされている、と言い換えることができる。また、比較器モデル（Blakemore et al.,1999;Synofzik et al.,2008）における運動で生じる予測情報と感覚フィードバックとの比較照合においては、予測情報との間にギャップが生じているという状態であり、参加者が違和感を感じるという印象をもったのは自然な反応である、ということができる。

一方、アバターが先行動作をした映像への印象評価は「興味深い」「想定内の」「感じのよい」「楽しい」となったが、このとき運動結果を示すアバターは先行動作を行っており、運動に伴う予測情報との比較照合において、内容に相違はない。また時間的に遅れることなく先行している。実験では、アバターに時間変調を加えた先行動作の映像を運動結果として提示したことによって、身体運動を行った参加者にとっては運動に伴う予測情報の内容と符合することとなり、その結果肯定的な印象内容を検出することとなった、と整理ができると考えた。先行動作をするアバターの印象評価は、予測情報からの内容と、視覚情報としてフィードバックされた感覚情報との比較照合において予測誤差（ずれ）が許容できた状態ということもできる。このような脳の働きは予測的符号化といわれている（Friston et al.,2006; Friston,2010）。

予測符号化は、外部の環境から感覚器官を通して入力される情報と、これまでの過去の経験や知識、他の感覚から入力される情報などに基づいて、予測情報との誤差を最小化するように情報処理を実施する仕組みであると考えられている。この仕組みに基づいて推察を行うと、実験１でのリズム運動と運動結果を示す

アバターとの時間的な不一致に関しては、先行動作を行うアバター映像の情報は、自分が行ったリズム運動の結果の予測と異なってはいない、また先行動作をするアバター映像と、事前に届いていたであろう感覚予測の情報との誤差については、自身の運動の修正や調整は必要ないと許容（もしくは修正や調整によって予測情報との誤差を最小化することが可能な範囲と判断）し、肯定的な印象が生じたものと考えられる。

実験２で得られた結果では、随意運動とリズム刺激を組合せた VM−RT 条件の JND 値と、不随意運動とリズム刺激を組合せた IM-RT 条件の JND 値とでは検定の結果では有意差は認められなかった。この結果については、随意運動時にリズム刺激（RT）として提示した体性感覚刺激の知覚に関する感覚減衰の可能性について第３章で考察した。

Blakemore らによる運動制御の内部モデルについて示した先行研究によると、運動によって予測可能な感覚フィードバックによる感覚野の活動は、運動の無い条件での感覚刺激に比べて低下し、知覚される刺激の強さも低下することが報告されている（Blakemore et al.,1998; Blakemore et al.,2002)。報告内容によると、能動運動の際に生じる予測情報により感覚フィードバック内容が予測され、予測情報と実際の感覚フィードバック情報が比較照合されるが、自分の手足をくすぐっても、他人からくすぐられるよりもくすぐったさを感じないという現象で実感できるように、「自分がその現象を引き起こした」とする認識があり予測が可能である場合、また予測情報のとおりであれば、その感覚フィードバックは減衰、またはキャンセルとなることが示されている。第３章の考察で検討した感覚減衰については、この能動運動の際に生じる予測情報と感覚フィードバックの予測との比較照合を行う脳内のしくみから整理をすることができると考えた。すなわち、本研究で行った実験２での随意運動と体性感覚刺激の組合せ条件においては、運動に伴う予測情報と実際のフィードバックの内容が照合されたときに体性感覚刺激は「自分がその現象を引き起こした」とする認識が背景にあり予測可能であることから、知覚される刺激の強さの低下となり、時間分解能のさらなる精度向上に至らなかったと推察した。

本研究で実施した２つの実験からは、運動に伴う予測情報と実際の感覚フィードバック情報との比較照合の過程で、随意運動時の時間知覚に変容がもたら

された可能性が考えられる。本研究の実験１では、時間変調が生じている視覚情報の印象評価への影響が生じたこと、実験２では、聴体性感覚間での TOJ 課題において、能動運動とリズム刺激の組合せ条件では、時間分解能の精度向上につながる相乗効果が観察されなかったこと、これらの結果は、運動に伴う予測情報と運動の結果生じる感覚フィードバック情報との比較照合を行う情報処理の過程で、感覚知覚への影響や時間知覚への影響が生じていることを示唆している。

神経科学の領域では、随意運動時に提示された感覚情報が遅延したときの一次体性感覚野の神経活動に関する動物実験による既存研究によると、右手でサルがレバーを動かしたとき、左の掌に筆で体性感覚刺激を提示するという装置による実験を行い、筆の動きが右手でレバーを動かす動きよりも遅延する場合と遅延しない場合とでサルの神経活動を記録した結果、遅延する場合は、遅延しない場合よりも神経活動が増加した部分と弱くなった部分とが見つかった、という報告がある(Murata et al.,2016)。この神経活動は、増加した方が弱くなった方よりも活動が上回っていたという結果から、遅延が関連する運動によって生じる感覚フィードバック予測と実際の感覚フィードバックとの比較照合が行われていることが示されたものと報告している。実際の神経活動内には感覚抑制が生じている内容が混在していることが考えられるが、この報告は一次体性感覚野における運動に伴う予測情報と感覚フィードバック情報との比較照合の状態を示すものと考えられる。この内容からは、実験１での遅延という時間変調が生じた刺激提示の際には、比較照合に対応する神経活動は時間的整合性を考慮することと関連して活発化するものと解釈できる。実験の報告内容では、一次体性感覚野における神経活動の感覚抑制に関わる神経基盤とのつながりや運動主体感をもたらす神経メカニズムとの関わりも示唆されている。

４．３．運動に伴う予測情報の時間知覚への影響

運動に伴う予測情報が時間知覚に及ぼす影響という点では、本研究で行った実験２で聴体性感覚刺激をそれぞれ１回提示した際に、随意運動条件下で時間分解能の精度が有意に高くなったという結果をあげることができる。この結果は、随意運動に伴って生じる予測情報が、異種感覚の到来順序の判別精度に影響を及ぼし、時間知覚の分解能を向上させたことを示唆するものである。Figure 3.7. IM-1T 条件と VM-1T 条件間の比較を見ると、VM-1T 条件の心理物理曲線の傾きが、IM-1T 条件よりも急な傾斜となっており、特に体性感覚刺激が先行したときの回答に顕著な違いを見ることができる。

Shimada らが行った運動主体感と視覚運動の認知における知覚遅延の影響に関する研究では、随意運動条件で、不随意運動条件よりも遅延に関する検出の感度が高いことを示す結果が報告され、運動に伴って生じる予測情報による視覚フィードバックの到来タイミングの把握への影響が示唆されている(Shimada et al.,2010)。本研究での TOJ 課題における随意運動条件下で見られた時間分解能の精度は、随意運動に伴って生じる予測情報から刺激到来タイミングを予め感知し、時間知覚に影響が生じた結果としてとらえることができる。

４．４．本研究の結果に見る運動知覚連関

本研究の実験結果の検討を進めるにあたり、実験１の結果からは、自身の動きと同調するアバター映像への印象評価についての検討を通して、身体運動時に時間変調が加えられた視覚情報のうち、時間的に先行する内容を示す情報については、運動に伴い生じる予測情報との比較照合において運動の修正や調整の必要なく知覚されたことで肯定的な印象が生じたものと考えた。実験２の結果からは、短い時間差をもって提示される２つの異種感覚刺激の時間順序判断では、随意運動時に高い弁別性を示す結果が得られた。この結果は、随意運動に伴う予測情報がもたらした結果であると考えた。本研究の実験で得た結果からは、変化を続ける周囲の環境に対して適用的な対応を行うため、感覚情報による知覚と身体運動が協調して対応する過程で時間知覚に生じた影響として見ることができる。時間知覚は、感覚知覚と身体運動との情報の循環において、同時性判断や時間順序判断をする役割をもって知覚と運動との連関を支え、運動遂行を円滑に進めるために必要な影響を受けながら、発生情報の時間的な整合性を維持するための基盤として機能していると位置づけることができる。

知覚と運動の協調によって運動を制御する過程に関しては、知覚運動制御や知覚運動協応といわれている（McLeod, P.,1988)。知覚運動協応では、運動学習に関連して、運動を専門に行う選手の知覚に関する研究や運動選手に特有の知覚について、また運動環境に適応した知覚の進化に関する報告などがあるが、知覚と身体運動の連関は、単に身体運動が知覚の成果を高めるという関係にとどまらない。日常の中で得る感覚器官からの知覚や認知の内容は、同時性や時間順序を判断する時間知覚によって、時間的な整合性をもって身体運動からの情報と統合され、身体運動を継続的かつ効率的に遂行する際の身体制御に用いられる。この仕組が日常的に機能することで蓄積された知覚内容は、経験として定着し、身体制御や継続的な身体運動の遂行のために活用され、内部モデルや比較器モデルによる情報の比較照合のプロセスは、より効率的で適応度が高い行動の実現のために機能していることが考えられる。

また本研究の実験２で得た結果で、随意運動とリズム刺激からの時間知覚の影響では、時間分解能の精度向上に相乗効果が観察できなかった内容について、４．２．節で感覚減衰の可能性に触れたが、Vitello は、随意運動を行う際の運動指令による感覚減衰への関与について、次のような記述している。「腕を動かす前には触覚の感度が低下し、筋電図信号が筋収縮の前に検出された。この内容は運動指令が腕を動かす筋肉の活動を優先することを示している。その結果、感覚減衰（ゲーティング効果）につながる。触覚情報が減少し、触覚刺激の表現力が低下し、弁別能力が低下する」(Vitello,2010)。Vitello はこの内容から、触覚の感覚抑制には運動司令が関与することを示唆していることが伺える。さらに Wasaka は、感覚減衰に関連する体内の反応について、体性感覚情報は単に抑制されているのではなく、運動遂行時は運動制御に必要のない体性感覚情報を排除し、必要な情報だけを中枢神経に伝える働きがあることが影響している、という考えを示している (Wasaka et al.,2012)。これら感覚減衰に関する既存研究では、感覚情報による知覚と身体運動が対応していく過程においては、運動遂行が優先され、感覚情報の知覚が制御されることがある、ことが示唆されており、本研究の実験２で確認した、２条件の組合せが時間分解能の精度向上への相乗効果とならなかったという結果に関しては、体性感覚の知覚と随意運動の遂行の調整から体性感覚の知覚の抑制が生じた状況であること、また運動と知覚の連携過程における時間分解能の状態を観察した結果なのではないか、ということが考えられる。

感覚減衰が生じる背景として既存研究によって示唆されている内容から推測されるのは、人間の活動においては身体運動の遂行が優先され、円滑で効率的な身体運動を遂行のために、感覚器官からの情報が減弱されることが生じるということである。継続的で効率的な運動遂行のために、時間知覚は運動に伴う予測情報の影響を受けていると考えられ、適応的に影響を受けることで知覚・認知活動を推進し、運動遂行を支えていることを示唆するものだと考えられる。

４．５．神経科学の観点からの考察

最後に、神経生理学的研究について触れる。

時間知覚については、時間の情報が脳内でどのように処理されているか、また能動運動の影響など、神経基盤において明らかになっていないことも多い。脳科学研究では一次運動野を対象に、運動指令や筋肉の反応から神経細胞がどのような配置となっているかといった各神経細胞の働きを解明する解析研究が国際間で進められている。また神経生理学の分野では、人間同様に高度に発達した脳を持つ霊長類（サル等）での検証から、高次な脳機能を解明しようとする研究発表が行われている。

生物の時間知覚については、視聴覚刺激が出るタイミングを予測するようにサルを訓練して調べたところ小脳核の信号が刺激のタイミング予測に利用されていることが明らかになったという報告（Lu et al.,2012）や、大脳皮質にある一次体性感覚野は、感覚器官からの情報を受けとっているだけであると考えられていたが、身体が能動的に動く前から“これからはじまる動き”に関する事前情報を受けとっていることが明らかになった、という報告(Umeda et al.,2019)がある。Umeda らの研究成果によると、感覚器官から得た外界からの多様な情報は、統合されて知覚が形成されると考えられてきたが、サルによる実験を実施し、一次体性感覚野と運動野の活動や筋活動を同時に計測し分析をした結果から、手から実際の体性感覚情報を受け取る前に、一次体性感覚野はこれからはじまる動きに関する事前情報も受け取っていることが示された、と報告している。この報告では、これまで一次体性感覚野の活動は、主に外界からの刺激に対して応答すると考えられていたが、サルが手を伸ばしてレバーを引く運動時の計測からは、「手の動きによって生じる感覚受容器の活動だけでなく、ほかの入力源」が、運動が始まる前からの一次体性感覚野の活動を活発化させることに関与している結果が示された。また物体を触るなど特定の感覚器官の活動の際には、どのような刺激がこの活動を引き起こしているのかと脳が事前に推測することで知覚は形成される、とする情報処理仮説を提示した。

この研究報告の内容は、本研究で検討している運動に伴う予測情報に関連する。運動に伴う予測情報は、一次体性感覚野への入力情報として存在し、その後

一次体性感覚へ入ってからの働きが脳内の活動を示す数値から示されたものと解釈できる。この内容より、私たちの脳は、どのような運動を行うのかという運動指令の情報に加えて、どのような感覚情報が到来するのかという予測情報をもとに、運動の遂行および運動時の身体制御を行っていることが推察できる。また、どのような感覚情報が到来するのかを知った状態で、運動による多様な体性感覚情報に対する処理や対応を行っているということを裏付ける内容であるとも考えられる。行われた実験では、手を伸ばしてレバーを引くという運動が行われたが、運動時にその他の感覚刺激が提示された場合の脳内の反応や、その存在が示唆された運動に伴う予測情報と、感覚器官から入力される感覚情報や実際の感覚フィードバック情報との比較照合の処理過程、また、感覚器官や身体運動によるフィードバック情報と同時性知覚などの時間知覚との関係についてなどについては今後の報告が待たれる。予測情報に基づく身体制御やその後の継続的な運動遂行には、同時性知覚や時間順序判断が重要になると考えることから、脳内の活動に対する計測方法の適用範囲を拡大しての解明が期待される。このほか、機能的磁気共鳴画像法（fMRI）を活用した研究では、小脳が大脳皮質（補足運動野）との機能的な相互作用を通じて、時間情報の処理に関する課題を遂行していることを検証した報告（Aso et al.,2010）がある。この検証報告は、本研究でも随意運動の時間知覚への影響として考察でとりあげた補足運動野について、小脳との相互作用を明らかにしようとする内容であり、大脳と小脳の連携によって時間情報の処理が行われていることを示唆しているものと考えられる。

これら神経科学の研究は、関連する疾患の病態理解と診断への応用を目的とした取組みではあるが、身体運動と感覚フィードバックを利用するシステムの開発とも関連が深いといえる。また、バーチャル空間におけるインタフェース設計の検討とも無縁ではない。

４．６．今後の研究への展望

４．６．１．視覚情報の評価実施のバリエーション

本研究の実験１では、繰り返しのリズム運動時に提示した視覚刺激であるアバター映像に、時間変調を加えて印象評価を実施したが、実施にあたっては、実験装置で使用したKinectの機能に依拠するところが多かった。実験１については、評価対象となる視覚情報をはじめとし、アバター映像表示の時間ずれ設定や、実験の実施環境の見直し等が考えられる。実施環境としてはヴァーチャル空間も対象となりうる。

また実験１で検証した、自分自身の運動と操作する視覚対象がもたらす運動結果との関係性という点においては、今回の検証対象である時間知覚に触覚の要素を加えて、Pseudo-haptics（疑似触覚）(Lécuyer,2000）を対象に運動に伴う予測の影響を検討することも考えられる。視覚刺激で触知覚に変化をもたらす例としては、CPUのリソース不足などによって、カーソルの動きが急に減速すると重さや抵抗感を感じることがある。また、画面上での実際の手の移動量よりも、見た目の移動量を小さく見せることで、ユーザに移動させた物体を重く感じさせるなど、画面表示の中では、知覚の組合せで触覚の知覚が変わるという経験を作り出すことができる。感覚情報を組み合わせることによる知覚は、物理刺激による触覚の知覚とは質的に異なる。また、人間の主観的同時点は物理的同時点と一致しないことが報告されている（Zampini et al.,2005）点も考慮し、視覚情報と触覚情報を用いて、運動によって生じる予測情報を前提とした知覚展開の検討ができると考える。

４．６．２．評価方法の検討

本研究で行った実験１では、実験参加者からの印象評価をもとに検討を進めたが、より客観的な評価を行うためには、機能的磁気共鳴画像法(fMRI)による脳活動のイメージング手法を用いるなど、評価方法に関する検討も必要と考える。実験１の印象評価に関しては、アバターの遅延動作と先行動作という視覚情報を確認している際に、それぞれ脳内でどのような変化が生じているのか、また脳内の血流量がどのように変化するかを計測することで、客観的なデータに基づく分析につながる。

実験２に関しては、神経科学の研究報告で用いられている評価方法で示されている客観的な状況把握を行うための方法の検討が考えられる。運動時の体性感覚については、脳波や脳磁場を用いることで感覚減衰の状態を観察する方法が知られており、能動運動中の感覚減衰については、体性感覚誘発電位（Somatosensory Evoked Potential:SEP）の振幅を確認した研究がある。研究内容によると、運動をしていないときと比較して、運動時には SEP の振幅が減少すること、また SEP 振幅の減少は運動の速度が速いときに顕著であることが報告されている（Cohen & Starr,1987)。本研究の実験での事象についても、先行研究の知見から収集可能な計測情報を検討し、分析に有用かどうか検討をすることも考えられる。脳磁計（Magnetoencephalography: MEG）による非侵襲脳計測と心理物理計測を組合せて分析を行っている研究では、実験課題の運動が切り替わるときの脳活動を対象に MEG を使った計測を実施し、運動の切り替わりを知覚した時間を記録、ここに同時性判断課題を行った際のデータを組合せてタイミング予測のメカニズム解明を目的とした分析を行っている内容がある（Amano et al.,2016)。また、データの分析方法については、脳、感覚器官、筋肉の活動などからの収集情報に対し、機械学習を用いてその関連性を評価する情報解析技術が用いられている研究（Umeda et al.,2019）等をみると、感覚情報の統合過程や身体運動との関係を検討するための新たなアプローチについて知ることができ、時間知覚のメカニズムを検討する際の検討に有用な情報を導くことになるのではないかと考える。

４．６．３．本研究知見の応用領域

本研究で得た知見は、以下に示す応用領域が考えられる。

本研究で実施した実験結果からは、人間が能動的に身体を動かす際に、運動に伴って生じる予測が時間知覚に影響を及ぼすことが示された。また、身体運動時には、運動に伴う感覚フィードバックの予測と実際の感覚フィードバックとの誤差検知を行い、その後の運動遂行のための準備を行なうと考えられてきたが、本研究では、この考えを裏付ける事象を示すことができた。

序論に述べたように、身体運動と感覚フィードバックの内容を対応付けるには、時間的整合性が条件となる。運動の連鎖には、次に生じる運動のタイミングを予測し、時間の経過を正しく計測して身体の制御などの準備を行うことが必要である。本研究で明らかにした内容のほかにも、運動に伴う予測が時間知覚に及ぼす影響が確認できる可能性があると考えるが、疾患などによって運動機能の回復が必要な状況や、具体的には運動回復支援を目的とした、リハビリテーションにおける人間と機械を結びつける技術検討への適用が、応用展開として考えられる。

また、本研究での運動に伴う予測情報による時間知覚への影響に関する現象をもとに数理モデルを構築し、シミュショーションが可能となれば、人間の運動を支援する機器を対象に、能動運動と同時性知覚や時間順序判断に関する知見に基づく人間の知覚タイミングを考慮した、協調的な運動支援の設計検討が行えるようになる。またヒューマンインタフェースの設計全般にも、役に立つことが大いにあると考えられる。

さらにリハビリテーションに限らず、身体運動を伴う領域であれば、教育の領域において、音楽、美術、体育などの技能を高めるための練習やトレーニングへの展開も考えられる。産業領域では、自動車の自動運転における研究課題として、運転者への情報提示を想定して、視覚を含む多感覚情報を用いた情報提示や提示タイミングの設計などに応用の可能性があるのではないかと考える。

第５章

結論

第５章　結論

本章では、本研究の結果及び成果を以下にまとめる。本研究は、リズム的能動運動に伴う予測情報が時間知覚に及ぼす影響について２つの課題を設定し、それぞれ実験を行った結果をもとに分析し、検討を行った。

課題１は、リズム的な繰り返し動作をする視覚刺激（アバター）と同調して能動運動を行う実験課題を実施し、能動運動時に生じる予測情報が、アバター動作の印象評価に及ぼす影響について検討を行うというものである。アバターの動作映像に対する印象評価の内容を分析した結果、実験参加者の動作よりもアバター動作が遅延した際の印象は、「他人のような」「想定外の」「親しみにくい」という違和感を感じる内容となり、先行動作したアバターへの印象は、「興味深い」「想定内の」「感じのよい」「楽しい」という肯定的な内容となった。同調動作をするアバターに対しては、「自然な」「自分らしい」「心地よい」という印象であった。これらの実験結果より、アバター映像に加えた遅延と先行という時間変調によって、印象評価は対称的な内容となったということができる。視覚刺激と運動の位相的前後関係を制御することにより、アバター動作への印象評価は非対称に変化した。この結果からは、人間は感覚器官から入力される刺激に受動的に反応しているのではなく、運動によって生じる予測情報に基づく感覚情報と、運動後の感覚情報とを比較照合するプロセスを経て、予測情報との誤差を認識した結果、先行動作をするアバター映像は運動に伴って生じる予測情報の内容と符合したことから、肯定的な評価につながったことが考えられる。先行して表示された感覚情報に対して肯定的な印象評価が行われたことにより、能動運動に伴う予測情報によって時間知覚が影響を受けるということが確認できた。

課題２では、２つの異なる感覚刺激を提示して「どちらの刺激が先であったか」を判断させる時間順序判断課題（TOJ 課題）を実施し、時間知覚に対する能動運動とリズム刺激からの影響について検討を行った。実験では、聴体性感覚間で TOJ 課題を実施し、実験条件は、運動条件２種（随意運動条件_VM: Voluntary Movement と不随意運動条件_IM: Involuntary Movement)、刺激提示方法２種（１回提示_1T:1Tactile とリズミカルに５回提示_RT:Rhythmical Tactiles）を組合せた計４条件を設定した。TOJ 課題を実施して収集した回答データをもとに時間

分解能の指標である丁度可知差異（JND）の値を算出して分析を行った結果、聴覚・体性感覚ともに１回の刺激の提示を行った際、随意運動条件下では不随意運動よりも時間分解能の指標となる丁度可知差異（JND）の値が有意に低くなった。また不随意運動条件下で、聴覚・体性感覚ともに１回の刺激の提示を行った条件との比較において、聴覚刺激 1 回に対し体性感覚刺激をリズミカルに提示した条件で JND 値が有意に低くなったという結果を得た。実験結果より、随意運動、またリズム刺激は TOJ 課題における時間分解能の精度を向上させることが確認できた。随意運動時に体性感覚刺激をリズミカルに提示した条件は、同じく随意運動時に聴覚・体性感覚ともに１回の刺激提示をした条件との比較において JND 値に有意な差が認められず、随意運動とリズム刺激の組み合わせによる時間分解能の精度向上への相乗効果は観察されなかった。これらの結果からは、まず能動運動の際に生じる予測情報により、運動の結果生じる感覚フィードバックの内容および感覚到来に関わる内容が時間知覚に影響し、時間分解能の精度が向上したことが示唆される。次に、リズム刺激においても時間分解能の精度向上が見られたが、リズムによってもたらされる手がかり情報が感覚フィードバック到来のタイミング予測に影響し、時間分解能の精度が向上したことが示唆される。

本研究を通して、能動運動に伴う予測情報は、運動時の時間知覚に変容をもたらすこと、また時間知覚の分解能の精度向上にも重要な役割を果たしていることが明らかになった。またこの予測情報は、人間が外界で生じる事象を把握しながら円滑に運動遂行を継続するために、脳内で運動の結果生じる感覚フィードバック内容と比較照合を経て、時間知覚に影響を及ぼしていることを確認することができた。

謝辞

本学位論文は、東京都立産業技術大学院大学の修士課程および、 東京工業大学 大学院情報理工学院 知能システム科学専攻 の博士課程在学中の実験結果と投稿論文の内容をもとにまとめたものです。本論文はたくさんの方々のお力添えを無くしては、書き上げることができませんでした。本論文の執筆、また研究活動に多大なるご支援をいただいた皆様に深く感謝申し上げます。

はじめに、本論文を構成する研究の計画，遂行に常に的確な指導をいただき、研究を進めるために必要な環境も整えていただきました指導教官である三宅美博先生に、心より感謝申し上げます。仕事との両立で研究に充てる時間を思うように確保できず、遅れをとってばかりの日々が続き、たいへんご心配をおかけしました。また、多くの不足があった私に、研究に関する議論だけでなく、研究を進めるということ、また論文の執筆の作法等までご指導いただきました。研究生活が続けられたのは、三宅先生のお導きによるものと深く感謝しております。広い心で優しく、時に厳しく、そしてきめ細やかなご指導を賜りましたことに、御礼申し上げます。

また，本稿の審査員をお引き受け下さいました先生がたに深く感謝いたします。審査におきましては，数多くのご助言・ご指摘をいただき、本研究の内容をまとめるに際して、多くの視点や多大な知見を授けていただきました。

続いて、研究を進めていく中でご指導いただいた緒方大樹特任准教授に深く感謝いたします。折りに触れ、多角的な視点からのご指摘と具体的なフィードバックをいただくとともに、いつも親身に接してくださいました。思い返すと、緒方先生よりいただいたお言葉により、行き詰まりながらも道筋を作ることにつながったと言える場面が、何度となくありました。心より御礼申し上げます。

学会発表や論文等を通じて貴重な助言をくださった皆様にも、感謝しております。

研究生活を送るうえでは、お世話になった三宅研究室の皆様に深く感謝いたします。在学期間の後半は、新型ウィルスによる感染症対策からリモートによるゼミ開催となったことで、それまでは業務都合から思うようにゼミへの出席が叶わなかった私は、研究室の皆様のさまざまな研究内容に、ようやくふれる機会を得ることができました。同時に多くの気づきや刺激をいただきました。あいにくの出来事であった一方で、私自身は実りある時間を過ごすことができました。

実験に協力いただきました三宅研究室、ならびにその他の研究室の学生の方々にも、この場を借りて改めて御礼申し上げます。実験に参加いただいたすべての方々のご協力がなければ、本研究を遂行することはできませんでした。本当にありがとうございました。

続いて、三宅研究室の林千枝氏，冨永弓子氏に感謝いたします。学会発表や TA 報告、学位申請までの各種手続き等において、常に的確なご判断による助言と必要情報の提示など、多大なるご支援を賜りました。心より感謝申し上げます。

また、三宅研究室の OB である野村修氏（現 九州工科大学特任教授）に感謝申し上げます。野村氏は本学修了後も、社会人学生として博士号を取得されたご経験から、数多くの貴重な助言やあたたかい励ましをくださいました。常に背中を押していただき、ありがとうございました。

最後に，仕事に邁進する一方で、手掛けた研究も続けたいと考えた私を応援してくれていた父、母に感謝を述べたいと思います。計画していたよりも長い時間がかかり、修了を待たずしてどちらも鬼籍に入りました。子としての十分な役割が果たせたかどうかはわかりませんが、両親はいまも私を見守っていてくれると信じています。

参考文献

Allman, M. J., & Meck, W. H. (2012). Pathophysiological distortions in time perception and timed performance. Brain : a journal of neurology, 135(Pt 3), 656–677. doi:10.1093/brain/awr210

Armel, K. C., & Ramachandran, V. S. (2003). Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. Proceedings. Biological sciences, 270(1523), 1499–1506. doi:10.1098/rspb.2003.2364

Asai T. (2015). Feedback control of one's own action: Self-other sensory attribution in motor control. Consciousness and cognition, 38, 118–129. doi:10.1016/j.concog.2015.11.002

Aso, K., Hanakawa, T., Aso, T., & Fukuyama, H. (2010). Cerebro-cerebellar interactions underlying temporal information processing. Journal of cognitive neuroscience, 22(12), 2913–2925. doi:10.1162/jocn.2010.21429

Baldeweg T. (2006). Repetition effects to sounds : evidence for predictive coding in the auditory system. Trends in cognitive sciences, 10(3), 93–94. doi:10.1016/j.tics.2006.01.010

Bengtsson, S. L., Ullén, F., Ehrsson, H. H., Hashimoto, T., Kito, T., Naito, E., Forssberg, H., & Sadato, N. (2009). Listening to rhythms activates motor and premotor cortices. Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior, 45(1), 62–71. doi:10.1016/j.cortex.2008.07.002

Blakemore, S. J., Wolpert D. and M., Frith, C. D.(1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation; Nature Neuroscience,1, 635-640 . doi:10.1038/2870

Blakemore, S.-J., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (1999). Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. Journal of Cognitive Neuroscience, 11(5), 551–559. doi: 10.1162/089892999563607

Boff, K. R., Kaufman, L., & Thomas, J. P. (Eds.). (1986). Handbook of perception and human performance, Vol. 2. Cognitive processes and performance. John Wiley & Sons.

Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. Nature, 391(6669), 756. doi:10.1038/35784

Bridgeman B. (1995). A review of the role of efference copy in sensory and oculomotor control systems. Annals of biomedical engineering, 23(4), 409–422. doi:10.1007/BF02584441

Brozzoli, C., Gentile, G., & Ehrsson, H. H. (2012). That's near my hand! Parietal and premotor coding of hand-centered space contributes to localization and self-attribution of the hand. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience, 32(42), 14573–14582. doi:10.1523/JNEUROSCI.2660-12.2012

Case, L. K., Pineda, J., & Ramachandran, V. S. (2015). Common coding and dynamic interactions between observed, imagined, and experienced motor and somatosensory activity. Neuropsychologia, 79(Pt B), 233–245. doi:10.1016/j. neuropsychologia.2015.04.005

Chapman, C. E., Bushnell, M., Miron, D., Duncan, G., & Lund, J. (1987). Sensory perception during movement in man. Experimental Brain Research, 68, 516–524. doi:10.1007/BF00249795

Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. Journal of cognitive neuroscience, 20(2), 226–239. doi:10.1162/jocn.2008.20018

Christensen, M., Lundbye-Jensen, J., Geertsen, S. et al. (2007).Premotor cortex modulates somatosensory cortex during voluntary movements without proprioceptive feedback. Nat Neurosci 10, 417–419. doi.org/10.1038/nn1873

Cohen, L. G., & Starr, A. (1987). Localization, timing and specificity of gating of somatosensory evoked potentials during active movement in man. Brain : a journal of neurology, 110 (Pt 2), 451–467. doi:10.1093/brain/110.2.451

Correa, A., Sanabria, D., Spence, C., Tudela, P., & Lupiáñez, J. (2006). Selective temporal attention enhances the temporal resolution of visual perception: Evidence from a temporal order judgment task. Brain research, 1070(1), 202–205. doi: 10.1016/j.brainres.2005.11.094

Cravo, A. M., Claessens, P. M., & Baldo, M. V. (2011). The relation between action, predictability and temporal contiguity in temporal binding. Acta psychologica, 136(1), 157–166. doi:10.1016/j.actpsy.2010.11.005

David, N., Newen, A., & Vogeley, K. (2008). The "sense of agency" and its underlying cognitive and neural mechanisms. Consciousness and cognition, 17(2), 523–534. doi:10.1016/j.concog.2008.03.004

Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J. C., & Fazio, F. (1994). Mapping motor representations with positron emission tomography. Nature, 371(6498), 600–602. doi:10.1038/371600a0

Desmurget, M., Reilly, K. T., Richard, N., Szathmari, A., Mottolese, C., & Sirigu, A. (2009). Movement intention after parietal cortex stimulation in humans. Science (New York, N.Y.), 324(5928), 811–813. doi:10.1126/science.1169896

Dixon, N. F., & Spitz, L. (1980). The detection of auditory visual desynchrony. Perception, 9(6), 719–721. doi:10.1068/p090719

Dijksterhuis, A., & Smith, P. K. (2002). Affective habituation: Subliminal exposure to extreme stimuli decreases their extremity. Emotion, 2(3), 203–214..doi: 10.1037/1528-3542.2.3.203

Droit-Volet S. (2013). Time perception, emotions and mood disorders. Journal of physiology, Paris, 107(4), 255–264. doi:10.1016/j.jphysparis.2013.03.005

Dunlap, K. (1910). Reaction to rhythmic stimuli with attempt to synchronize. Psychological Review, 17(6), 399–416. https://doi.org/10.1037/h0074736

Ernst, M. O., and Bülthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. Trends in Cognitive Sciences, 8, 162–169. doi:10.1016/j.tics.2004.02.002

Ehrsson, H. H., Naito, E., Geyer, S., Amunts, K., Zilles, K., Forssberg, H., & Roland, P. E. (2000). Simultaneous movements of upper and lower limbs are coordinated by motor representations that are shared by both limbs: a PET study. The European journal of neuroscience, 12(9), 3385–3398. doi:10.1046/j.1460-9568.2000.00209.x

Finney, D. J. (1952). Probit analysis: A statistical treatment of the sigmoid response curve (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Frissen, I., Ziat, M., Campion, G., Hayward, V., and Guastavino, C. (2012). The effects of voluntary movements on auditory–haptic and haptic–haptic temporal order judgments. Acta Psychol. 141, 140-148. doi: 10.1016/j.actpsy.2012.07.010

Friston, K., Kilner, J., & Harrison, L. (2006). A free energy principle for the brain. Journal of physiology, Paris, 100(1-3), 70–87. doi:10.1016/j.jphysparis.2006.10.001

Friston K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory?. Nature reviews. Neuroscience, 11(2), 127–138. doi:10.1038/nrn2787

Frith, C. D., Blakemore, S. J., & Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 355(1404), 1771–1788. doi:10.1098/rstb.2000.0734

Gallagher I., I (2000). Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. Trends in cognitive sciences, 4(1), 14–21. doi:10.1016/s1364-6613(99)01417-5

Gemma A. Calvert, Crossmodal Processing in the Human Brain: Insights from Functional Neuroimaging Studies, Cerebral Cortex, Volume 11, Issue 12, December 2001, Pages 1110–1123, https://doi.org/10.1093/cercor/11.12.1110

Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. Psychological Review, 69(6), 477–491. doi:10.1037/h0046962

Gu, B. M., van Rijn, H., & Meck, W. H. (2015). Oscillatory multiplexing of neural population codes for interval timing and working memory. Neuroscience and biobehavioral reviews, 48, 160–185. doi:10.1016/j.neubiorev.2014.10.008

Gu, X., Hof, P. R., Friston, K. J., & Fan, J. (2013). Anterior insular cortex and emotional awareness. The Journal of comparative neurology, 521(15), 3371–3388. doi:10.1002/cne.23368

Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. Nature neuroscience, 5(4), 382–385. doi:10.1038/nn827

Haggard P. (2005). Conscious intention and motor cognition. Trends in cognitive sciences, 9(6), 290–295. doi:10.1016/j.tics.2005.04.012

Haggard P. (2009). Neuroscience. The sources of human volition. Science (New York, N.Y.), 324(5928), 731–733. doi:10.1126/science.1173827

Haggard P. (2017). Sense of agency in the human brain. Nature reviews. Neuroscience, 18(4), 196–207. doi:10.1038/nrn.2017.14

Haggard, P., & Whitford, B. (2004). Supplementary motor area provides an efferent signal for sensory suppression. Brain research. Cognitive brain research, 19(1), 52–58. doi:10.1016/j.cogbrainres.2003.10.018

Halpern, A. R., and Darwin, C. J. (1982). Duration discrimination in a series of rhythmic events. Percept. Psychophys. 31, 86-89. doi: 10.3758/bf03206204

Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Pütz, B., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2000). Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. Nature, 403(6766), 192–195. doi:10.1038/35003194

Jason D. Moss, Jon Austin, James Salley, Julie Coats, Krysten Williams, Eric R. Muth.(2011).The effects of display delay on simulator sickness. Displays, 32(4),159-168, doi:10.1016/j.displa.2011.05.010.

Kanda, T., Ishiguro, H., Ono, T., Imai, M., & Nakatsu, R. (2002). An evaluation on Interaction between humans and an autonomous robot Robovie. Journal of the Robotics Society of Japan, 20, 315-323.doi:10.7210/JRSJ.20.315

Kappers, A. M. L., & Bergmann Tiest, W. M. (2013). Illusory rotation in the haptic perception of a moving bar. Experimental Brain Research, 231, 325–329. doi:10.1007/s00221-013-3695-x

Kawato M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. Current opinion in neurobiology, 9(6), 718–727. doi:10.1016/s0959-4388(99)00028-8

Kitagawa, N., Kato, M., & Kashino, M. (2016). Auditory-Somatosensory Temporal Sensitivity Improves When the Somatosensory Event Is Caused by Voluntary Body Movement. Frontiers in integrative neuroscience, 10, 42. doi: 10.3389/fnint.2016.00042

Klein, J. & Moon, Y. & Picard, Rosalind. (2001). This computer responds to user frustration: Theory, design, and results. Interacting with Computers. 14. 119-140. doi:10.1016/S0953-5438(01)00053-4

小松知章・三宅美博 (2003). 同期タッピング課題における予測的挙動の時系列データ解析. 計測自動制御学会論文集, 39(10), 952-960

鈴木優太・木村　廉 (2013). Jerk 最小モデルに基づく指差し動作予測の印象評価. 情報処理学会インタラクション 2013, 249-254

Kudo, K., Miyazaki, M., Kimura, T., Yamanaka, K., Kadota, H., Hirashima, M., Nakajima, Y., Nakazawa, K., & Ohtsuki, T. (2004). Selective activation and deactivation of the human brain structures between speeded and precisely timed tapping responses to identical visual stimulus: an fMRI study. NeuroImage, 22(3), 1291–1301. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.03.043

Lécuyer, A., S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. (2000). Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?.Proceedings IEEE Virtual Reality 2000, 83-90, doi: 10.1109/VR.2000.840369.

Lee, D. N., Young, D. S., Reddish, P. E., Lough, S., & Clayton, T. M. H. (1983). Visual timing in hitting an accelerating ball. The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 35A(2), 333-346. doi: 10.1080/14640748308402138

Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., & Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. Brain : a journal of neurology, 106 (Pt 3), 623–642. doi:10.1093/brain/106.3.623

Loomis, J. M., & Lederman, S. J. (1986). Tactual perception. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), Handbook of perception and human performance, Vol. 2. Cognitive processes and performance (pp. 1–41). John Wiley & Sons.

Lu, X., Miyachi, S., & Takada, M. (2012). Anatomical evidence for the involvement of medial cerebellar output from the interpositus nuclei in cognitive functions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(46), 18980–18984.doi:10.1073/pnas.1211168109

Macar, F., Coull, J., & Vidal, F. (2006). The supplementary motor area in motor and perceptual time processing: fMRI studies. Cognitive processing, 7(2), 89–94. doi:10.1007/s10339-005-0025-7

Makin, T. R., Holmes, N. P., & Ehrsson, H. H. (2008). On the other hand: dummy hands and peripersonal space. Behavioural brain research, 191(1), 1–10. doi:10.1016/j.bbr.2008.02.041

Marko, M. K., Haith, A. M., Harran, M. D., & Shadmehr, R. (2012). Sensitivity to prediction error in reach adaptation. Journal of neurophysiology, 108(6), 1752–1763. doi:10.1152/jn.00177.2012

Mauk, M. D., & Buonomano, D. V. (2004). The neural basis of temporal processing. Annual review of neuroscience, 27, 307–340. doi:10.1146/annurev.neuro.27.070203.144247

Merchant, H., Harrington, D. L., & Meck, W. H. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. Annual review of neuroscience, 36, 313–336. doi:10.1146/annurev-neuro-062012-170349

Meredith M. A. (2002). On the neuronal basis for multisensory convergence: a brief overview. Brain research. Cognitive brain research, 14(1), 31–40. doi:10.1016/s0926-6410(02)00059-9

Miall, R. C., Weir, D. J., Wolpert, D. M., & Stein, J. F. (1993). Is the cerebellum a smith predictor?. Journal of motor behavior, 25(3), 203–216. doi:10.1080/00222895.1993.9942050

McLeod, P. (1998). 知覚運動協応, 認知心理学事典, Eysenck,M. W. (Ed), 261-266, 新曜社

Morrone, M. C., Ross, J., & Burr, D. (2005). Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. Nature neuroscience, 8(7), 950–954. doi:10.1038/nn1488

Murata, A., Wen, W., & Asama, H. (2016). The body and objects represented in the ventral stream of the parieto-premotor network. Neuroscience research, 104, 4–15. doi:10.1016/j.neures.2015.10.010

Nishi, A., Yokoyama, M., Ogawa, K., Ogata, T., Nozawa, T., and Miyake, Y. (2014). Effects of voluntary movements on audio-tactile temporal order judgment. IEICE Trans. Inf. Syst. E97–D, 1567-1573. doi: 10.1587/transinf.e97.d.1567

Norman, D.A., & Bobrow, D.G. (1975). On the role of active memory processes in perception and cognition. doi :10.1037/e668262012-006

Osumi, M., Nobusako, S., Zama, T., Yokotani, N., Shimada, S., Maeda, T., & Morioka, S. (2019). The relationship and difference between delay detection ability and judgment of sense of agency. PloS one, 14(7), e0219222. doi:10.1371/journal.pone.0219222

Parker, P., Brown, M. A., Smear, M. C., & Niell, C. M. (2020). Movement-Related Signals in Sensory Areas: Roles in Natural Behavior. Trends in neurosciences, 43(8), 581–595. doi:10.1016/j.tins.2020.05.005

Poghosyan, V., & Ioannides, A. A. (2008). Attention modulates earliest responses in the primary auditory and visual cortices. Neuron, 58(5), 802–813. doi:10.1016/j.neuron.2008.04.013

Poulet, J. F., & Hedwig, B. (2007). New insights into corollary discharges mediated by identified neural pathways. Trends in neurosciences, 30(1), 14–21. doi:10.1016/j.tins.2006.11.005

Porro, C. A., Francescato, M. P., Cettolo, V., Diamond, M. E., Baraldi, P., Zuiani, C., Bazzocchi, M., & di Prampero, P. E. (1996). Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience, 16(23), 7688–7698. doi:10.1523/JNEUROSCI.16-23-07688.1996

Pruszynski, J. A., Kurtzer, I., Nashed, J. Y., Omrani, M., Brouwer, B., & Scott, S. H. (2011). Primary motor cortex underlies multi-joint integration for fast feedback control. Nature, 478(7369), 387–390. doi:10.1038/nature10436

Recanzone, G. H., Merzenich, M. M., Jenkins, W. M., Grajski, K. A., & Dinse, H. R. (1992). Topographic reorganization of the hand representation in cortical area 3b owl monkeys trained in a frequency-discrimination task. Journal of neurophysiology, 67(5), 1031–1056. doi:10.1152/jn.1992.67.5.1031

Recanzone, G. H., Jenkins, W. M., Hradek, G. T., & Merzenich, M. M. (1992). Progressive improvement in discriminative abilities in adult owl monkeys performing a tactile frequency discrimination task. Journal of neurophysiology, 67(5), 1015–1030. doi:10.1152/jn.1992.67.5.1015

Robert S. Allison, Laurence R. Harris, and Michael Jenkin.(2001). Tolerance of temporal delay in virtual environments. In the Virtual Reality 2001 Conference, pp.247254. doi: 10.1109/VR.2001.913793

Ross, J. M., Iversen, J. R., & Balasubramaniam, R. (2016). Motor simulation theories of musical beat perception. Neurocase, 22(6), 558–565. doi:10.1080/13554794.2016.1242756

Sciutti, A., Squeri, V., Gori, M., Masia, L., Sandini, G., & Konczak, J. (2010). Predicted sensory feedback derived from motor commands does not improve haptic sensitivity. Experimental brain research, 200(3-4), 259–267. doi:10.1007/s00221-009-1996-x

Shi, Z., Hirche, S., Schneider, W. X., and Müller, H. (2008). ‘‘Influence of visuomotor action on visual-haptic simultaneous perception: A psychophysical study,’’ 2008 Symposiumon Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Reno, NE, 65-70. doi: 10.1109/haptics.2008.4479915

Shimada, S., Qi, Y., & Hiraki, K. (2010). Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements. Experimental brain research, 201(2), 359–364. doi:10.1007/s00221-009-2028-6

Slutsky, D. A., and Recanzone, G. H. (2001). Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect. Neuroreport. 12, 7-10. doi: 10.1097/00001756-200101220-00009

Spence, C., Shore, D. I., & Klein, R. M. (2001). Multisensory prior entry. Journal of experimental psychology. General, 130(4), 799–832. doi: 10.1037//0096-3445.130.4.799.

Spence, C., & Squire, S. (2003). Multisensory integration: maintaining the perception of synchrony. Current biology : CB, 13(13), R519–R521. doi:10.1016/s0960-9822(03)00445-7

Sperry R.W.(1950). Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion. Journal of comparative and physiological psychology, 43(6), 482–489. doi:10.1037/h0055479

Summerfield, C., Trittschuh, E. H., Monti, J. M., Mesulam, M. M., & Egner, T. (2008). Neural repetition suppression reflects fulfilled perceptual expectations. Nature neuroscience, 11(9), 1004–1006. doi: 10.1038/nn.2163

鈴木優太・木村　廉 (2013). Jerk 最小モデルに基づく指差し動作予測の印象評価. 情報処理学会インタラクション 2013, 249-254

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. Consciousness and cognition, 17(1), 219–239. doi:10.1016/j.concog.2007.03.010

Thaut, M.H., McIntosh, G.C., Prassas, S.G., Rice, R.R.(1993). Effect of rhythmic auditory cuing on temporal stride parameters and EMG patterns in hemiparetic gait of

stroke patients. Journal of Neurologic Rehabilitation 7, 9-16. doi: 10.1177/136140969300700103.

Thaut, M. H., (2008). Rhythm, Music, and the Brain: Scientific Foundations and Clinical Applications. London: Routledge, 4-45.

Thaut, M. H., Tian, B., & Azimi-Sadjadi, M. R. (1998). Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment. Human Movement Science, 17(6), 839–863. doi:10.1016/s0167-9457(98)00031-1

Thaut, M.H., McIntosh, G.C., & Hoemberg, V. (2015). Neurobiological foundations of neurologic music therapy: rhythmic entrainment and the motor system. Frontiers in Psychology, 5.doi:10.3389/fpsyg.2014.01185

Treisman M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval. Implications for a model of the "internal clock". Psychological monographs, 77(13), 1–31. doi:10.1037/h0093864

Tsakiris, M., Haggard, P., Franck, N., Mainy, N., & Sirigu, A. (2005). A specific role for efferent information in self-recognition. Cognition, 96(3), 215–231. doi:10.1016/j.cognition.2004.08.002

Tsakiris, M., Schütz-Bosbach, S., & Gallagher, S. (2007). On agency and body-ownership: phenomenological and neurocognitive reflections. Consciousness and cognition, 16(3), 645–660. doi:10.1016/j.concog.2007.05.012

Tsakiris, M., Hesse, M. D., Boy, C., Haggard, P., & Fink, G. R. (2007). Neural signatures of body ownership: a sensory network for bodily self-consciousness. Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991), 17(10), 2235–2244. doi:10.1093/cercor/bhl131

Umeda, T., Isa, T., & Nishimura, Y. (2019). The somatosensory cortex receives information about motor output. Science advances, 5(7), eaaw5388. doi:10.1126/sciadv.aaw5388

van den Bos, E., & Jeannerod, M. (2002). Sense of body and sense of action both contribute to self-recognition. Cognition, 85(2), 177–187. doi:10.1016/s0010-0277(02)00100-2

van Eijk RL, Kohlrausch A, Juola JF, van de Par S (2008). Audiovisual synchrony and temporal order judgments: Effects of experimental method and stimulus type. Perception and Psychophysics, 70(6), 955–968.doi: 10.3758/pp.70.6.955

Vitello, M. P., Ernst, M. O., and Fritschi, M. (2006). An instance of tactile suppression: Active exploration impairs tactile sensitivity for the direction of lateral movement, in EuroHaptics International Conference (EH 2006), eds. A. Kheddar, & B. Bayart (Paris: Proceeding of Eurohaptics), 351-355.

Vitello, M. P. (2010). Perception of Moving Tactile Stimuli,Mpi Series in Biological Cybernetics No25,Logos Verlag Berlin GmbH ISBN 978-3-8325-2647-4

Von Holst, E. (1954). Relations between the central nervous system and the peripheral organs. British Journal of Animal Behaviour, 2, 89–94. doi:10.1016/S0950-5601(54)80044-X

Wasaka, T., Kida, T., & Kakigi, R. (2012). Modulation of somatosensory evoked potentials during force generation and relaxation. Experimental Brain Research, 219, 227—233. doi:10.1007/s00221-012-3082-z

Weiss, C., Tsakiris, M., Haggard, P., & Schütz-Bosbach, S. (2014). Agency in the sensorimotor system and its relation to explicit action awareness. Neuropsychologia, 52, 82–92. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2013.09.034

Wenke, D. and Haggard, P. (2009). How voluntary actions modulate time perception. Experimental Brain Research, 196,311–318.doi:10.1007/s00221-009-1848-8

Wiener, M., Turkeltaub, P., & Coslett, H. B. (2010). The image of time: a voxel-wise meta-analysis. NeuroImage, 49(2), 1728–1740. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.09.064

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. Science (New York, N.Y.), 269(5232), 1880–1882. doi:10.1126/science.7569931

Wolpert D. M. (1997). Computational approaches to motor control. Trends in cognitive sciences, 1(6), 209–216. doi:10.1016/S1364-6613(97)01070-X

Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. Nature neuroscience, 3 Suppl, 1212–1217. doi:10.1038/81497

Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. Current biology : CB, 11(18), R729–R732. doi:10.1016/s0960-9822(01)00432-8

Wu, T., Kansaku, K., & Hallett, M. (2004). How self-initiated memorized movements become automatic: a functional MRI study. Journal of neurophysiology, 91(4), 1690–1698. doi:10.1152/jn.01052.2003

Zampini M., Shore D.I., Spence, C. (2005). Audiovisual prior entry. Neurosci Lett.Jun 24;381(3):217-22. doi: 10.1016/j.neulet.2005.01.085.

研究業績

原著論文

1. **Taeko Tanaka**, Taiki Ogata, Yoshihiro Miyake, The Effect of Rhythmic Tactile Stimuli Under the Voluntary Movement on Audio-tactile Temporal Order Judgement, Frontiers in Psychology, vol. 11. Article no 600263, pp. 1-8, doi:10.3389/fpsyg.2020.600263 (2021)

2. **Taeko Tanaka**, Hiroshi Hashimoto, Sho Yokota, Analysis of Impression in Exercise while Watching Avatar Movement, International Journal on Advances in Intelligent Systems, vol. 9, no. 1 & 2, pp. 213-222 (2016)

国際会議論文（査読あり）

3. **Taeko Tanaka,** Taiki Ogata, Yoshihiro Miyake, The Effect of Rhythmical Movement in Audio-tactile Temporal Order Judgement, Proceedings of the SICE Annual Conference 2019 (SICE2019), Hiroshima, Japan, September 10-13, pp. 1125-1129 (2019)

4. **Taeko Tanaka**, Hiroshi Hashimoto, Sho Yokota, Evaluation of Visual Impression of Delayed Movement of Avatar while Exercising, Proceedings of the Fourth International Conference on Intelligent Systems and Applications (INTELLI 2015), St. Julians, Italy, October 11-16, pp. 255-260, (2015) ※Best Paper Award

5. **Taeko Tanaka**, Hiroshi Hashimoto, Sho Yokota, Mizuki Nakajima, Psychological Evaluation of Synchronous Motions of Avatar for E-Learning Exercise, Proceedings of the 34th IASTED International Conference on Modeling, Identification and Control, (MIC2015), Innsbruck, Austria, February 16-17, pp. 193-198, doi: 10.2316/P.2015.826-003 (2015)

国内会議論文（査読無し）

6. **田中多恵子**, 緒方大樹, 三宅美博, リズミカルな随意運動が聴体性感覚同時性知覚に与える影響, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2018, 筑波，9 月 5－ 7 日，pp. 101-104（2018）

7. **田中多恵子**，中島 瑞季，橋本 洋志，横田 祥, 運動の e-Learning におけるアバターの同調動作の考察,サービス学会第 3 回国内学会, 金沢, 4 月 8―9 日，pp. 155-159（2015）