



Title	運動主体感の暗示的尺度 (intentional binding) に基づく電気的筋刺激印加手法の提案
Author(s)	永井, 美和
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98679
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

運動主体感の暗示的尺度（intentional binding）に基づく
電気的筋刺激印加手法の提案

令和 6 年 9 月

永井 美和

運動主体感の暗示的尺度（intentional binding）に基づく
電気的筋刺激印加手法の提案

博士（工学）論文提出先

大阪大学大学院基礎工学研究科

令和 6 年 9 月

永井 美和

論文要旨

ヒトとコンピュータの関係性は、相互作用を超えて、共同的に目的を達成するパートナーシップとしてのヒト-コンピュータ統合 (HInt: human-computer integration) へと発展する途上にある。HInt 技術下のユーザは、物理的・技能的な限界が拡張されることで高いパフォーマンスを実現することが可能となる。しかし、コンピュータデバイスは、時にユーザの意思決定を意識的・無意識的に変容するような侵襲的介入を行うため、ユーザ自身が運動や行為の主体であると感じる運動主体感を曖昧化させる恐れがある。

コンピュータデバイスによる支援が増加するにつれて、ユーザが報告する運動主体感は段階的に損失することが報告されている。その一方、運動主体感の暗示的尺度である intentional binding 尺度は、一定の支援レベルを超えると極端に低下することが報告されている。この尺度は、運動の意図性に応じて運動時刻を実際より遅く (action binding)，運動に連続する感覚時刻を実際よりも早く (tone binding) 知覚する時間圧縮効果として知られる、運動主体感形成の要因となる知覚変化である。この暗示的尺度はミリ秒オーダで定量計測可能であり、運動主体感の明示的報告における判断バイアスを回避できる上、適切な支援レベルの特定に有効である可能性がある。

本研究では、運動技能を拡張する代表的な HInt 技術である電気的筋刺激 (EMS: electrical muscle stimulation) を用いて、スイッチ押し運動速度を支援されるユーザの intentional binding 効果を計測することで、運動主体感の維持と高速化支援を両立するような EMS 印加時刻指標を明らかにする。まず、intentional binding 効果を適切に維持すると同時に、ユーザの運動よりも早く EMS を印加するため、EMS の印加トリガとして取得可能な事前動作が常にスイッチ押し運動の直前に発生するようなスイッチ押しタスクを設計した。そして Libet clock 法による intentional binding 尺度の計測を通し、随意的なスイッチ押しと、EMS による非随意的なスイッチ押しの意図性の違いが、action binding 効果に反映されることを確認した（実験 1）。次に、EMS によって段階的に高速化を支援されたユーザの intentional binding 効果を計測した結果、ユーザの事前動作から 20 ms 後に印加された EMS が、唯一、随意運動単体の効果と同様に有意な action binding 効果を維持することを明らかにした（実験 2）。最後に、特定された時刻指標で印加された EMS は、他の印加時刻指標と比較して運動主体感の維持に優れ、かつ運動を有意に短縮可能であることが、反応時間タスクを通して実証された（実験 3）。

本研究は、intentional binding 効果が、段階的な EMS 高速化支援を受けるユーザの運動主体感経験の変化を鋭敏に捉えることを明らかにし、運動主体感の損失を最小限に抑えて支援効果を最大化するような EMS 印加時刻指標の特定に有用であることを示した。

目次

1 序論	1
1.1 導入	1
1.2 運動主体感	2
1.3 運動主体感の計測	5
1.3.1 明示的報告に基づく計測	5
1.3.2 暗示的計測手法: intentional binding 尺度	6
1.3.3 その他の暗示的計測手法	9
1.4 HInt 技術と運動主体感	10
1.4.1 HInt 技術の分類	11
1.4.2 HInt 技術において運動主体感を維持することの困難	15
1.5 本研究の位置づけ	17
2 intentional bindingに基づく随意運動と EMS 誘発運動の区別	20
2.1 はじめに	20
2.2 実験手法	20
2.2.1 研究対象者	20
2.2.2 実験環境	21
2.2.3 タスク	22
2.2.4 実験手順	24
2.2.5 電気刺激パラメータ	24
2.3 結果	26
2.4 考察	28
2.5 まとめ	30
3 intentional bindingに基づく高速化 EMS の支援レベルの特定	31
3.1 はじめに	31
3.2 実験手法	31
3.2.1 研究対象者	31
3.2.2 タスクと実験手順	32

3.3 結果	34
3.4 考察	41
3.5 まとめ	43
4 特定された高速化 EMS 支援レベルの評価	44
4.1 はじめに	44
4.2 実験手法	44
4.2.1 研究対象者	44
4.2.2 実験手順	44
4.3 結果	46
4.4 考察	51
4.5 まとめ	53
5 総合考察	54
5.1 暗示的運動主体感としての知覚シフト	54
5.1.1 action binding	54
5.1.2 tone binding	55
5.1.3 タスク間隔長	56
5.2 明示的運動主体感の判断バイアス	56
5.3 明示的な運動主体感計測が特定した EMS 印加指標との比較	57
5.4 提案 EMS 印加手法の利点	58
6 結論	59
6.1 まとめ	59
6.2 貢献・展望	60
付録 A binding 効果の条件間比較	62
A.1 実験 1 の 3 条件間比較	62
A.1.1 結果	62
A.1.2 考察	64
A.2 実験 2 の 8 条件間比較	65

A.2.1 結果	65
A.2.2 考察	71
付録 B 実験環境の詳細	73
B.1 制御プログラム	73
B.2 電気回路	80
付録 C 知覚シフトの研究対象者毎結果	82
C.1 電気刺激パラメータ	82
C.2 判断誤差と知覚シフト	86
謝辞	89
参考文献	90
発表論文リスト	103

図目次

1.1	Comparator model (based on Synofzik et al. (2008) [1]).	3
1.2	Schematic depiction of intentional binding.	7
1.3	Map of HInt technologies categorized by agents, integrations, and augmenting elements (based on Cornelio et al., (2022) [2]).	12
1.4	Novel switch-pushing method.	18
2.1	Experimental setup.	21
2.2	Tasks of experiment 1.	22
2.3	Electrical stimulus waveforms.	25
2.4	Mean and S.D. of perceptual shift for action and tone judgment. . . .	28
3.1	Tasks of experiment 2.	32
3.2	Results of Experiment 2. Top: Mean and S.D. of the time from switch release or EMS application to switch pushing action (push completion time and EMS actuation time, respectively); middle: Mean and S.D. of perceptual shift for action and tone judgment; bottom: Median of self-reported sense of agency.	35
3.3	Heatmaps showing <i>p</i> -values of multiple comparisons of paired t-tests with Bonferroni correction. Combinations of conditions with significant differences are shaded in black.	36
4.1	Tasks in experiment 3.	45
4.2	Median of the switch-push time and the sense of agency in 0 ms condition of experiment 3.	47
4.3	Median of the switch-push time and the sense of agency in 20 ms condition of experiment 3.	48
A.1	Mean and S.D. of perceptual shift for action and tone judgment. . . .	63
A.2	Heatmap of multiple comparison between conditions for perceptual shift of action judgment.	67
A.3	Heatmap of multiple comparison between conditions for perceptual shift of tone judgment.	69
B.1	Form A-1 that controls the electrical stimulator.	73
B.2	Form A-2 for the participant experiment in Experiment 1.	75
B.3	Form A-2 for the participant experiment in Experiment 2.	76

B.4	Flow chart of the intentional binding experimental program (Experiment 1 and 2).	78
B.5	Flow chart of the evaluate experimental program using reaction time task(Experiment 3).	79
B.6	Mounted substrate.	80
B.7	Electrical circuit of the experimental system.	81

表目次

2.1 Judgment errors, perceptual shifts, and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 1	27
2.2 Perceptual interval lengths and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 1	27
3.1 Judgment errors, perceptual shifts, and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 2	40
3.2 Interval lengths and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 2	41
4.1 Median, lower quartile (Q1), and upper quartile (Q3) of each parameter in 20 ms condition	49
4.2 Median, lower quartile (Q1), and upper quartile (Q3) of each parameter in 0 ms condition	50
A.1 Correlation coefficients of between self-reported sense of agency and each of composite, action, and tone binding	71
C.1 Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in Experiment 1	82
C.2 Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in Experiment 2	84
C.3 Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in 20 ms condition of Experiment 3	85
C.4 Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in 0 ms condition of Experiment 3	85
C.5 Perceptual shifts of individual participants in Experiment 1	86
C.6 Perceptual shifts of individual participants in Experiment 2	88

第 1 章 序論

1.1 導入

計算機技術の発展に伴うコンピュータの小型化と個人化を契機に、コンピュータとユーザとの関係は、ヒト-コンピュータの相互作用（HCI: human-computer interaction）から、ヒト-コンピュータの統合（HInt: human-computer integration）へと発展する途上にある [3-5]. HInt 技術は、ヒトとコンピュータの双方が同じ目標を達成するための主体性を共有し、互いに自律的に活動することで特徴づけられる。HCI が刺激と反応であるとすると、HInt はユーザとコンピュータのパートナーシップと称され [3]、コンピュータと統合されたユーザは、コンピュータと共同的に意思決定を下す。HInt 技術は、ユーザの限界（身体的・技能的・環境的な限界）を拡張することで、高い技能やパフォーマンスを発揮することを可能とする。

しかし、ユーザと統合されたコンピュータデバイスが、ユーザの運動技能を超えて運動を達成した時、その運動の主体は誰に帰属されるのだろうか。統合デバイスによる侵襲的な介入は、ユーザの意図の実現や再現に留まらず、ユーザの意思決定や選択を意識的・無意識的に変容させる可能性がある。コンピュータ介入によって変更された意思決定は、確かにユーザの目的を達成するためのより良い変更だったかもしれないが、その変更は誰の意思によるものだろうか。より現実的な問題としては、そのデバイスの行為や変更が原因で発生した責任は誰に帰属されるのだろうか。HInt 技術の設計には、このユーザの自己認識の感覚を損なわず、すなわちユーザ自身が、自分が運動や選択の行為主体であるという感覚を維持しながら、拡張・支援効果を最大化することが要求される。ここで取り上げる必要があるのが、運動主体感と呼ばれる、自分自身が運動や選択を行っていると感じるよう根源的な自己認識の感覚である。

本章ではまず、運動主体感の定義とメカニズム、そして計測手法について概観する。そして、身体・技能・物理的環境の三つの限界の拡張に着目した HInt 技術の分類を通して、ヒト-コンピュータ間の運動主体感の共有における課題を示し、本研究の位置づけを説明する。

1.2 運動主体感

運動主体感 (sense of agency, 行為主体感とも呼称される) とは, 行動や思考などの行為を引き起こしている, あるいは生み出している主体 (agent) が自分自身であるという感覚を指す. 自己に対する感覚であることや, 運動に限らない (例えば思考) 感覚であることを明示するため, 自己主体感 (sense of self-agency) と区別して呼称する例もあるが [1], 本稿では, より具体的な運動の実行に伴う経験を指す用語として運動主体感を用いる.

この概念は Gallagher によって定義された [6]. 彼の貢献は, 自己感覚の哲学的概念を, 心理学・認知科学・神経科学などの他分野との間で交換可能な概念として, 最小自己 (minimal self) と物語的自己 (narrative self) の 2 つに分類する概念を提案した点にある. 物語的自己は, 時間の経過を超えて個人の同一性と連續性を保つような, 過去の記憶と未来への意図から構成される一貫した自己・自己イメージを意味する. 一方, 最小自己は, 時間的拡張がない即時的・根源的・前反省的な概念として定義される. これはまず, 哲学者によって主張される, 話者が一人称代名詞を用いて自分自身を指すとき, その話者が誰を言及しているかを間違えることはないという, 「(自己の) 誤同定に対する免疫 (immunity to error through misidentification)」の原則を満たす概念として説明される. 「免疫」原則概念の反例として取り上げられたのが, 統合失調症患者の経験する作為体験 (させられ体験) である. 例えば, 思考が外部から自分の心に入り込んでくるように体験される思考吹入では, 実際にその思考を創出しているのは自分であるにもかかわらず, その思考の作者は自分ではないと誤認している. これは, 統合失調症患者の自己モニタリングが障害されたために, 主体性が誤帰属された状態であると考えられた [7, 8]. さらにこの現象は, 自分が行動や思考の発生源・制御主体であるという運動主体感と, 行動や思考を体験しているのが自分自身であるという身体所有感 (sense of ownership, 自己所有感 (sense of self-ownership) とも呼称される) の区別を促す. 思考吹入の症状がある統合失調症患者は, 自らの思考の作者が自分ではないという異常な主体感を経験するが, その思考を経験しているのは自分自身であるという所有感は正常である.

Frith は神経認知モデルを導入することで, 統合失調症患者の経験を, 自己モニタリング機能の障害として説明した [9]. このモデルは, 元は運動制御モデルとして提案されたものであり [10], 脳内に運動コマンドと身体運動とを定量的に結びつけるモデルが内部モデルとして経験的に構築されているとする運動制御仮説である [11]. 運動意図が内部逆モデルに入力されて生成された運動コマンドがフィードフォワード制御に基づく迅速で環境に適した運動制御を可能とする. そして生成された運動コマンドは, 同時に遠心性コピー

として内部順モデルに入力され、運動意図と比較、すなわち自己モニタリングされる。思考吹入の症状がある統合失調症患者の経験は、内部順モデルによる予測機能が障害されたことによって、自らの意図（思考の生成・制御）が実際の（思考の）結果と異なるものとして感じられ、したがって自らの思考に対する主体感を失った状態であると説明できる。このモデルは Blakemore らによってコンパレータモデル（図 1.1）と呼ばれる形式で一般的化された [12]。内部順モデルによる予測結果が、実際の身体運動中の感覚フィードバックと比較され、予測結果と実際の感覚結果とが一致していると見なされる場合に、その運動の行為主体が自分であるという感覚が得られる、つまり運動主体感が生じると考えられる。以上のように、コンパレータモデルは、運動の事前予測から得られる運動感覚手がかりに基づいて運動主体感の成立過程を説明する。

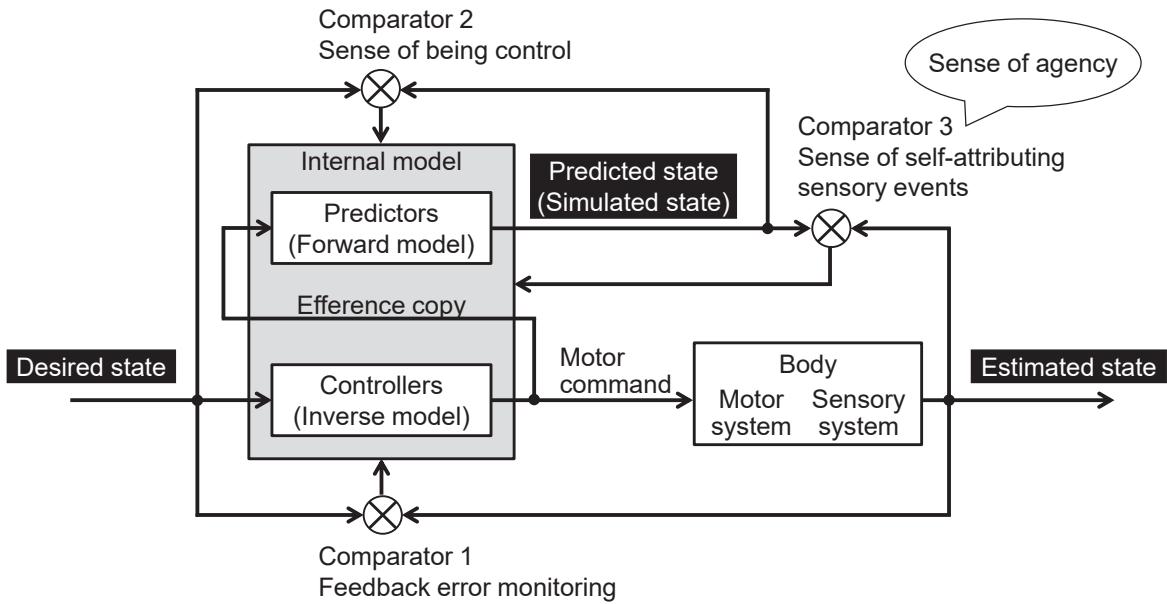


図 1.1: Comparator model (based on Synofzik et al. (2008) [1]).

一方で、運動意図と行動の因果関係がなく、したがってコンパレータモデルによって説明できない条件下でも、運動主体感が生じるケースが報告されている。例えば、Libet ら [13] は、随意的運動において、研究対象者が運動意図が発生したことを認識するよりも約 300–500 ms 前に、脳波の準備電位（事象関連脱同期）が生じることを報告した。また、切断肢に対して視覚的に手足の動きを再現・補完すると、感覚フィードバックがないにもかかわらず運動主体感を感じるケース [14] や、「I」や「me」を運動前に闇下提示すると、発生原因が曖昧なイベントを自分が開始したと報告するようなプライミング効果が報告されている [15]。また自己生成運動の誤帰属は、エイリアンハンド症候群、解離性障

害、統合失調症を呈する患者、そして催眠術やウィジャボード（こっくりさん）などの体験においても観察される。これらの報告は、我々が認識している意識的な運動意図と実際に発生した運動との因果関係は、脳によって編集された意識上の経験にすぎないことを示唆する。Wegner らはこれを、見かけの心的因果（apparent mental causation）理論と呼び [16]、運動主体感の経験が、無意識下で事後的・遡及的に編集されて生じることを指摘した。彼らは、このような事後推論的に運動主体感が生じる条件として、運動意図が行動の直前に意識に現れること（事前性）、運動意図と発生した行動が一致していること（整合性）、そしてその行動の妥当な帰属先が自分以外にないと判断できること（排他性）の三つを提案した [17]。

コンパレータモデルに基づいて事前予測される感覚運動的手がかりと、見かけの心的因果によって事後推論される認知的手がかりは、いずれも運動主体感経験を成立可能な手がかりであり、各々手がかりがどのように統合されて運動主体感の生成に寄与するかがさまざまに提案されている。例えば、コンパレータモデルによって主体性を感じる（feeling of agency）運動感覚レベルと、これが破綻したときに、文脈や信念などの事後推論的な手がかりから運動主体性を判断する（judgment of agency）認知的レベルの 2 段階モデル [1] や、予測手がかりと事後推論手がかりが、最適手がかり統合 [18, 19] プロセスやベイズ手がかり統合 [20, 21] プロセスを通して統合されることが実験的に提案されている。後者の手がかり統合は、各々の運動主体感手がかりが、相対的な信頼性に応じて重みづけが変化した上で統合され、運動主体感の成立に寄与することを提案している。

本節では運動主体感の提案と成立過程について概観した。哲学的概念として定義された運動主体感は、コンパレータモデルの形で理論化されたことで広範な分野で利用可能な概念となった。一方、運動主体感は、自己を形成するための根源的で前反省的な要素であるとともに、見かけ上因果関係が成立していれば容易に生成・変容し得る感覚である。厳密な因果関係に依存せず、運動をある種の寛容さで自己帰属可能な性質が、身体の延長としての巧みな道具操作や他者との共同作業の可能性を拓いたといえる。更に、運動主体感の拡張可能性は、自律的に動作するコンピュータデバイスがユーザの運動主体感を積極的に拡張することや、ユーザの意図をも変容することも許容し得ることを示唆する。

1.3 運動主体感の計測

本節では、運動主体感の計測手法を、古典的で簡便な明示的報告に基づく手法と、運動の意図性に応じて変化する、時刻や力を計測する暗示的な手法に二分して概観する。前者は運動主体感の判断であり、後者は運動感覺手がかりの一つを直接計測しているといえ、いずれも運動主体感の一側面のみを計測する限定的な尺度に留まることには注意が必要である。

1.3.1 明示的報告に基づく計測

運動主体感の古典的な計測手法は、運動に対する主体感や意図性を研究対象者本人に明示的に回答するように要求する質問紙法である。例えば、「ある動作を自分が（どの程度）制御したと感じたかどうか」や、「（視覚、聴覚などの）ある感覺結果を自分が（どの程度）引き起こしたと感じたかどうか」などのアンケートを用い、研究対象者自身に判断するよう要求する。提示される選択肢には、運動を発生したのが自分か否か、あるいは自分が他者かなどの二値の選択肢や、運動主体感を感じた対象を選ぶような限定された選択肢を用いる方法や、感覺の強さをリッカート尺度などの多段階の選択肢から選ぶ評定尺度法が採用されている。質問紙法は簡便な計測手法であることから広く利用されている。

一方で、運動主体感の明示的な報告には判断バイアスが顕著に影響することが指摘されており、身体外部で生成された運動を過剰に自己帰属したり、自身が生成した運動への運動主体感が低下したりすることが報告されている。例えば、運動と結果間の遅延を増大させると、自身の運動に対しても明示的な運動主体感強度が減少することや [22]、事前学習によって予測された感覺結果（音）と偶然に一致する結果が与えられた場合には、運動主体感の明示的評価が増加することが報告されている [23]。また、映像を介したジョイスティックの手首操作を行う健常者が、空間的には最大 15 deg、時間的には最大 150 ms の視覚的フィードバック誤差を許容して自己帰属することや [24, 25]、自己生成された運動と視覚的結果が時間的に一致する場合には、健常参加者の約 30% がその手と運動を自己帰属することが報告されている [26]。更に、実験の目的を推測して回答してしまうような判断バイアスの影響 [27] や、運動主体感を感じること（前反省的な最小自己 [6] としての運動主体感）と運動主体感を判断すること（主体性を解釈的に判断すること）との違い [1] が指摘されている。加えて、統合失調症や心因性運動障害を呈する患者を対象とした計測は困難である [24, 28]。

1.3.2 暗示的計測手法: intentional binding 尺度

本節ではまず、主観的な運動主体感を暗示的かつ定量的に計測する手法への転換点となった、Libet の提案した実験的方法論 [13] を紹介したい。彼らは主観的な感覚は主観的な報告によって計測されるべきとした立場から [29]、随意運動経験の時系列的プロセスに着目した。研究対象者は、任意のタイミングで右手首や指を曲げるよう指示された上で、運動意図が発生した時刻 (W 判断) と運動が発生した時刻 (M 判断) を Libet clock を使って報告するように要求された。この Libet clock は、Wundt の複雑時計とも呼ばれる時計形状の機械的計時装置であり、60 目盛と 5 目盛毎に目盛数値が記載された文字盤と、時計回りに 2560 ms 周期で回転する針、もしくはスポットから構成される。そして、実際の運動意図（事象関連脱同期）や運動（筋電図）の発生時刻と比較することで、研究対象者が運動意図を認識するよりも早く、脳内で運動意図が発生することを明らかにした。この研究結果の意義は自由意志をはじめとした分野で広く議論されているが、本稿において重要なのは、Libet が提案した主観的な感覚を対象とした神経学的な定量的計測の路線を切り開いたことである [30, 31]。

Haggard らは、Libet の主観的時刻計測手法を発展させて、運動主体感の暗示的な計測手法を提案した [32]。彼らは、運動とそれに連続する感覚フィードバックまでの時間間隔が、運動の意図性に応じて短く知覚される現象を報告した（図 1.2）。例えば、スイッチを押すような行動タスクと、行動タスクから一定の遅延後に音を聞くような感覚タスクが与えられたとき、行動タスクが随意的であるほど、行動タスク時刻を実際よりも遅く（感覚タスク時刻に近く）知覚し、感覚タスク時刻を実際よりも早く（行動タスク時刻に近く）知覚する。この時間的圧縮が随意運動にのみ発生し、経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation, TMS) に誘発される非随意運動では発生しなかったことから、Haggard らはこの現象を intentional binding (意図による束ね・意図に関連した結合) と命名した。この intentional binding 効果は、研究対象者の意図性の認識に対する明示的な報告と相関があり [33, 34]、モータ駆動 [35, 36] などの非随意運動では発生しないことが再現された。したがって、研究対象者自身の主観的報告に依存しない、暗示的で定量的な運動主体感の計測指標として期待されている [30, 31]。

intentional binding 効果の計測方法は、Libet や Haggard らが用いたような Libet clock を用いて、行動タスクと感覚タスクのいずれか一つの発生時刻を回答する Libet clock 法がしばしば用いられる。Libet clock 法の場合には、行動タスクと感覚タスクが一定の遅延で連続する場合（オペラント条件）の判断時刻が、各タスクが単体で与えられたとき（ベースライン条件）の判断時刻と比較された、相対的な時間知覚シフトが算出される。ただし、Libet clock の監視に多大な注意が必要である点や、フラッシュラグ効果と

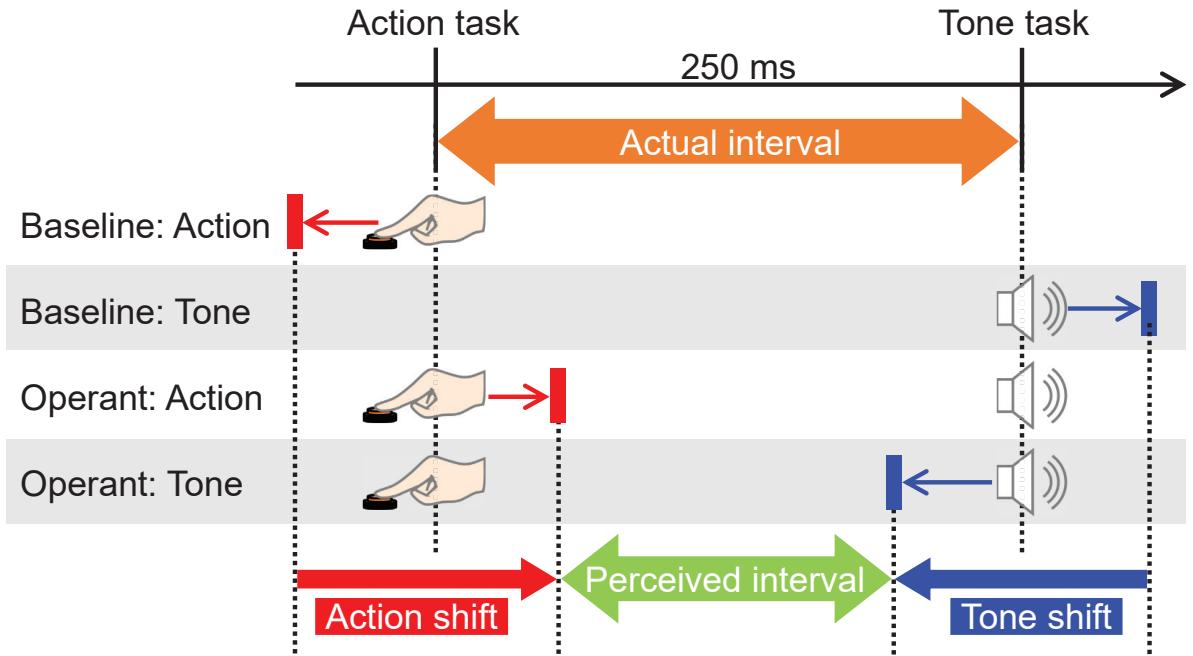


図 1.2: Schematic depiction of intentional binding.

呼ばれる、動いている物体（回転する針）と突発的なイベント（例えば音）を比較する際に針が実際よりも進んだ位置にあるように知覚される錯覚 [37] が生じる点が課題として指摘されている。加えて、Libet clock 法の時間推定値は研究対象者間のばらつきが大きい ([38] など) ことも指摘されている [31, 39].

そこで、Libet clock を用いた時刻報告に依存せず、知覚上の時間圧縮効果を計測する手法が提案されている。この内、最も広く用いられているのが、行動–感覚タスク間隔を推定して報告する直接推定法である [40]. この実験パラダイムは Libet clock の監視が必要ない上、Libet clock 法よりもタスク数が少なく実験設計が容易であることから広く採用されている [36, 41]. ただし、直接推定法の計測では、4 s の長いタスク時間間隔でも intentional binding 効果が生じることが報告されている一方 [42], Libet clock 法では 250, 450, 650 ms と遅延が長くなるにつれて binding 効果が減弱することが報告されており [32], 両計測法が同じ知覚効果を計測していない可能性がある。また、直接推定法において推定した行動–感覚タスク間隔を言語的に回答することの認知バイアス [39] を回避するために、知覚した間隔を研究対象者が再現する手法 [43, 44] や、無作為に提示される様々なタスク間隔と比較して大小関係のみを報告する恒常法 [45] も提案され、随意運動における知覚時間圧縮効果が報告されている。その他、行動に連続する感覚タスク

(例えば音刺激) とその他の感覚タスク (例えば視覚刺激) を比較し、同時か否かを判断する課題を通して主観的同時点を計測する手法 [39] によっても、意図的な運動に対する intentional binding 効果が再現されている。

一方で、intentional binding 効果が、意図的な運動のみの影響を反映した指標ではない可能性も指摘されている。主要な反論は、因果関係の推論が binding 効果の要因であるという主張である [46]。2つの対象間の因果関係の推論は、対象の連續性や随伴性のような原因と結果における特徴的関係に基づくと考えられている。Hume によれば、2つの対象間の因果関係の推論は、原因と結果の時空間的な接近 (contiguity) と、原因の結果に対する先行性 (priority) および結果が原因の後に続く継起 (succession) が、繰り返し経験することによる恒常的連接 (constant conjunction) によって形成される [47]。行動タスクとこれに連続する感覚タスクの随伴性を高めると binding 効果が増大することが報告されており [48]、随伴性の学習によって因果関係の知識が獲得されることがタスク間隔の圧縮に寄与することが報告されている [46]。非随意運動とこれに連続する感覚との間に因果的関係がある場合、意図的な運動と同等もしくはこれよりも弱い intentional binding 効果が生じることが報告されている。例えば、他者の運動 [49] や、共同運動意図を持つ他者の運動 [50, 51] を観察する条件において、自分が運動を達成する場合と同等の binding 効果が報告された (ただし、機械が達成する因果的な行動–感覚タスクの観察では binding 効果は低下する [49])。機械生成運動 [52] や、仮想現実内の身体運動 [53] に対しても、随意運動と同等の binding 効果が生じることが報告されている。更に、実際の行動–感覚タスク間の因果関係に関する脈的な信念が binding 効果に寄与することも報告されている。例えば、実際にスイッチを押して音を発生させたのがもう一人の実験参加者であった場合にも、運動を達成したのが自分であると知らされると binding 効果が増大すること [54] や、モータによる非随意運動によって音が発生することを教示された場合には、教示がない場合と比較して binding 効果が有意に増大することが報告されている [55]。以上のように、intentional binding 効果は、運動主体感のような自己認識とは相関せず [27]、因果関係の知覚 [46, 56] や知覚の一貫性 [33] などの知覚的認識を反映した指標であるとする指摘から、単に temporal binding と呼称される場合もある (例えば [57])。

その一方で、binding 効果の発生には意図性が依然として影響することも主張されている [30]。Cravo らは、意図性と因果性を独立に操作した実験において、直接推定法 [41] と主観的同時点を用いた計測法 [39] を通じて binding 効果を計測した結果、意図性と因果性は、いずれも単体では intentional binding 効果発生の十分条件ではないが、この要素はどちらとも必要条件であることを主張している。intentional binding 効果は、意図的な運動と、運動–感覚間の因果関係の知覚認識を要因として発生する知覚時刻の変化を計測

した指標であると説明できる。したがって、明示的に判断される運動主体感とは異なる側面としての、運動主体感を形成するために部分的に必要な知覚変化の計測を通して、運動の意図性の暗示的尺度として利用可能であると考える。

Libet clock 法を用いて intentional binding 尺度を計測した場合には、直接推定法とは異なり、行動タスクが実際より遅れて知覚される action binding 効果と、感覚タスクが実際より早く知覚される tone binding 効果を分離して計測することができる。この各々の binding 効果は、異なる原因によって生じることが示唆されている。

action binding 効果は、運動主体感の予測的手がかりと事後推論手がかりの組み合わせによって生じることが報告されている [58]。この報告では、行動タスクに続く感覚タスクの発生確率を 50%, 75% と設定した条件を比較した。その結果、発生確率が高く感覚タスクの予測が可能な条件の方が、平均的な action binding 効果を強く生じた。そして同時に、感覚タスクの発生確率が低い条件であっても、感覚タスクが生じた試行において action binding 効果が生じたことを明らかにし、したがって、行動タスクの実行後に感覚タスクが存在したことが、事後推論的に行動タスクの判断時刻を実際よりも遅く知覚したことを示した。各々の手がかりは文脈に依存した重み付けに従って統合され、運動主体感経験に寄与する。

他方、tone binding 効果は、感覚タスクの発生に対する予測的手がかりのみに関係することが示唆されている [38, 59]。感覚タスクの発生の予測に基づいて感覚表現の興奮性が事前に活性化され、したがって知覚閾値に早く到達することで知覚潜時が短縮されるため、感覚タスクの発生時刻を実際よりも早く知覚するという仮説が支持されている。

intentional binding 効果が生じるメカニズムには、主に 2 つの仮説が提案されている。一つ目の仮説は、内的クロック速度が随意運動後に一時的に速度が遅くなることで行動-感覚タスク間隔が短く知覚される仮説である [43, 60]。二つ目の仮説は、感覚イベントの知覚時刻が再較正される仮説である [61, 62]。これは、知覚的恒常性を保つために、感覚結果が早く知覚することで intentional binding 効果が生じているとする説明である。両者を支持する結果がそれぞれ報告されており、両者の矛盾を解消しメカニズムを明らかにするためにはさらなる検証が望まれる。

1.3.3 その他の暗示的計測手法

その他の運動主体感の暗示的計測手法としては、運動感覚減衰を利用したものが知られる。これは、随意的な運動によって生じた感覚フィードバックが、それ以外の外部的感覚よりも一時的に弱く知覚される現象である [63]。感覚減衰の発生メカニズムにはコンパレータモデルに基づく感覚予測が関連しており、予測された感覚強度が、実際の感覚

フィードバックから除かれるという説明 [64] と、予測された感覚表現が事前活性化されることで、感覚刺激に対する感度が低下するという説明 [65] の 2 通りが提案されている。例えば、自分が鳴らした音が実際よりも小さく聞こえることや [66]、自分をくすぐった場合にはくすぐったさが抑制されて感じられることが報告されている [67]。感覚減衰を利用した運動主体感の計測手法にフォースマッチングタスクがある。研究対象者がモータによって片手に加えられた力をもう一方の手で再現するように求められると、一般的には過剰に力が再現される傾向にある [63]。ただし、感覚減衰は予測的メカニズムのみによって説明されることから、事後推論的メカニズム要素が関与する運動主体感の明示的な報告とは乖離することが報告されており [68, 69]、運動主体感の暗示的尺度としての利用には更なる調査を要する。

1.4 HInt 技術と運動主体感

HCI 分野では、ユーザ体験の改善を主眼とするコンピュータ技術開発が進められてきたことを背景に、デバイスの操作性や相互作用の質を評価することを目的に運動主体感計測が導入されてきた [70, 71]。一方、ヒトとコンピュータが同じ目標を達成する共同的な行為主体として統合される HInt 技術 [3–5] においては、運動主体感の計測はより高い緊急性によって要求される。HInt 技術における自律性の高いコンピュータデバイスは、ユーザの目標を代替的に達成するためにユーザの技能を超えた運動を与えること、ユーザの運動や意思決定に変容を促すような侵襲的な介入を行ったりすることで、ユーザの運動主体感を侵害し、技術への受容性を阻害する要因となる可能性がある。したがって、コンピュータと統合されたユーザが、身体外部のコンピュータが自律的に実行した運動や認知的タスク、そしてその感覚結果を自己帰属し得るかを検討することは、HInt 技術の開発における優先的な課題である。

HInt 技術はユーザの運動主体感プロセスに組み込まれることで、ヒトや環境の抱えるさまざまな限界を拡張するように統合される。例えば、6 本目の手指デバイス [72] は身体の物理的限界を拡張するデバイスであり、視覚的錯覚を利用して仮想空間内の無限歩行を実現する例 [73] は、実環境の物理的限界を拡張する。更に、ヒト-コンピュータ間の行為主体の共有度、すなわちコンピュータ支援度にも様々なレベルが存在する。例えば、皮膚状入力デバイス [74] は、ユーザの運動意図に応じて作動するためユーザが完全な行為主体であるが、意思決定を代行する AI レコメンド [75] や翻訳の自動補完支援 [76] は、行為主体であるコンピュータの決定をユーザが追認するシステムである。

本節では、HInt 技術を分類して概観することで、ヒト-コンピュータ統合における運動

主体感の維持と拡張における課題解決を示す。

1.4.1 HInt 技術の分類

HInt 技術におけるヒト-コンピュータ間の行為主体の共有レベルに着目した Cornelio ら [2] の分類に基づいて、多様な HInt 技術を概観する。彼らの分類は、(1) 運動主体がユーザ、コンピュータ、これらの混合のいずれか、(2) ユーザとコンピュータの統合方法、そして、(3) コンピュータデバイスによって拡張されるユーザの限界の三軸による分類を提案する。図 1.3 に分類をマッピングする。横軸は、(1) 運動主体の分類として、ヒト主体、ヒト-コンピュータ混合主体、コンピュータ主体を示す。縦軸は、(2) ユーザとコンピュータの統合方法を、コンピュータがヒト身体の延長として物理的に組み合わされる融合 (fusion) と、ヒトとコンピュータが物理的には独立しているが、目的を達成する主体性を共有している共生 (symbiosis) [77] を対立した軸の分類として示す。図中に描画された領域の描画パターンは、HInt が拡張するユーザの限界要素である、身体拡張 (ドット)、技能拡張 (チェック)、そして環境拡張 (斜線) を示す。

身体拡張 身体拡張には、身体形状や身体運動を模倣・再現して作動するデバイスが分類される。デバイスによって運動の予測に即した身体運動・感覚結果が与えられ、これが一致する場合に運動主体感が成立する。更に自分の身体の一部として認識されることで身体所有感が生じるケースも多い。ここに分類されるデバイスは、基本的にユーザの運動意図に即した支援を行うため、行為主体の共有レベルは低い（図 1.3）。また、身体拡張デバイスは身体の延長として設置されるケースが多く、したがってユーザとの統合方法は個人レベルの融合に分類される。

義肢

神経・筋電計測に基づいて制御される義肢（筋電義手 [78]・義足 [79]、神経刺激によって触覚などの感覚フィードバックを備えた義肢 [80, 81]）など、失われた身体を補完するような身体拡張デバイスが提案されている。

過剰肢 (extra limbs)

追加された 2 本の腕 [82, 83]、6 本目の手指 [72, 84, 85]、尻尾 [86, 87] など、身体に存在しない身体部位を増設するような身体拡張デバイスが提案されている。更に身体の延長として設置されるだけではなく、身体外部に設置された身体部位デバイスも含まれる。例えば、椅子に設置された腕を、BMI を用いて操作したり [88]、携帯電話に設置された指が、把持の補助を行ったり [89] することが、遠隔的な身体拡張デバイスとして提案されている。離れたロボットアームのような身体の外部に設置

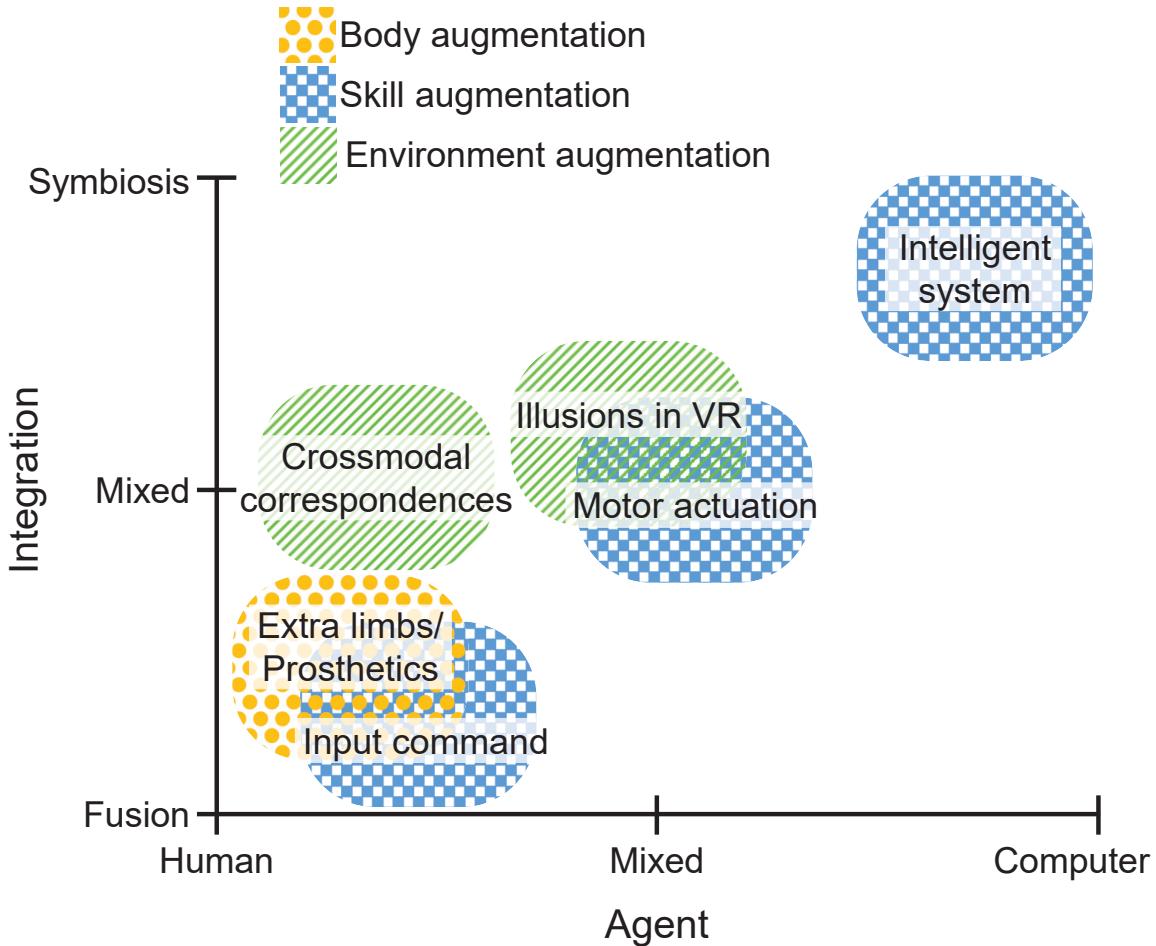


図 1.3: Map of HInt technologies categorized by agents, integrations, and augmenting elements (based on Cornelio et al., (2022) [2]).

されたデバイスに対しても身体図式を拡張することで、運動主体感を（更に身体所有感も）伴う身体拡張が実現可能であることが報告されている [90]. 仮想現実内で 3 本目の腕の操作（追加の腕は足で操作）に熟練すると、難易度の高いタスクでは従来の 2 本腕よりも 3 本腕の方が好まれることや [91]、5 日間実験室内外で 2 本目の親指デバイスの習熟訓練を行うと、運動主体感や身体所有感だけでなく感覚運動皮質における指の運動表現をも変容させることも報告されており [85]、身体認識とその操作における高い可塑性が示唆される。

技能拡張 技能拡張は、ユーザの技能を支援することでユーザの知覚パフォーマンスを向上させるデバイスが分類される。ここでユーザが支援されるのは運動技能だけではなく、

判断や決定、コミュニケーションなどの広範な技能が含まれる。したがって、行為主体の共有レベルやユーザとの統合方法も、多様な範囲に及ぶ（図 1.3）。ここに分類されるデバイスは、ユーザが本来持つ技能を超えた支援を提供し、これがユーザの意図と比較され、一致した場合に運動主体感が発生する [9, 12]。したがって、技能拡張デバイスには、ユーザの意図を認識・予測することで、運動主体感経験を損なわない範囲でユーザの行動を支援することが要求される。良好なパフォーマンスや達成感が与えられることで運動主体感経験が向上するが [92, 93]、その一方、過剰な支援はユーザの運動主体感を損なう恐れがある [94–96]（詳細は 1.4.2 節）。

入力操作

入力操作デバイスは、ユーザとコンピュータが物理的に融合されることで、操作技能を補助し、増強するような操作や入手法に関する技術が分類されるため、ユーザが完全な運動主体である。皮膚を介した入力は、一般的なスイッチ入力 [97] やタッチパッド入力 [98] よりも運動主体感（intentional binding 効果）を高めることから、皮膚 [99] や身体特徴部位 [100] 自体を入力デバイスとする提案や、皮膚状のセンサデバイス [74, 101, 102] が提案されている。ジェスチャ入力（ドローン制御 [103]、TV ゲーム [104]、自動車運転 [105]）は物理的な入力操作と同程度の運動主体感（intentional binding 効果）を生じ [106]、身体障害者の残存機能を用いたインターフェース（ヘッド・ジェスチャ [107]、舌 [108]）にも応用されている。

運動作動

運動作動デバイスの運動主体はヒト-コンピュータ間で共有され、統合の方法は身体的に設置された融合と主体性の共有の共生の混合であると考えられる。例えば電気的筋刺激（EMS: electrical muscle stimulation）を用いる、ユーザ自身の身体をアクチュエータとするような運動技能拡張が提案されている。これは、どの筋を [109] どの程度活性化するか [110] を身体的に直接教示・支援可能な技術である。例えば反応速度 [111] などの身体技能や、正確な点線グラフの描画 [112]、ペーカッションのリズムの正確さ [113] などの器用さを拡張するような支援が提案されている。また、物体検出と EMS を組み合わせ、その物体が要求する動作（例えばスプレー缶は握った後に振ることを、ドアノブはつかんだ後にひねることを要求する物体である）を EMS によって達成するような、より自律的な支援手法も提案されている [114]。その他に、バイクに乗ったユーザの前傾姿勢を速度制御を関連付け、半自動的な支援を実現する手法が提案されている [115]。また航空機の自動操縦技術 [96] や自動車の自動運転技術 [116] は、ユーザの監視と組み合わされるさまざま

な支援レベルでユーザの運転技能を拡張する。

知的（エージェント）システム

知的システムは、認知レベルでユーザに介入・支援するシステムであり、ユーザの最終的な目標や意図を達成するために、コンピュータがユーザの行動や意思決定に影響を与えた代替して動作したりするようなコンピュータ主導システムである。例えば、ユーザが入力したスケジュールから逆算して準備を促すスマートアラーム [3] や、データのビジュアライズや機械翻訳における自動補完 [76]、アルゴリズムに基づくおすすめ動画の自動再生 [75] などが提案されている。このシステムはユーザの行動や決定を変容するような介入を行う可能性があるが、ユーザの最終的な目的や意図は変化しないことで、ユーザがコンピュータの決定を追認して自己帰属することで運動主体感経験を維持することが肝要である。これらは、ヒトとコンピュータとの相互的な協力関係によって統合される代表的な共生システム [77] であり、ユーザとコンピュータが互いに介入し適応が促されることで、複合的な問題の効率的な解決とパフォーマンス向上が期待されている。

環境拡張 環境拡張に分類されるデバイスは、物理的な環境そのものではなく、環境に対するユーザ信念の変容を促すような介入を行う。環境拡張デバイスは、目的に一致するようにユーザの経験する環境知覚を錯覚的に変化させ、ユーザはそれに対して見かけ上の因果関係 [17] を見出し、事後推論的に運動主体感を得ることが可能である。ここに分類されるシステムは、身体にセンサを設置する融合的な統合方法と、コンピュータが身体や環境への認識を変化させることで、ユーザの行動を変化させる共生的な統合方法の両方の特徴を持つ（図 1.3）。

仮想現実（virtual reality: VR）内の錯覚

環境拡張デバイスに分類される主要な介入手法は、VR 空間における視覚的な錯覚を利用した介入である。例えば、実物体を利用して仮想物体の触覚を提示する passive haptic と、ユーザが気が付かない範囲で視覚情報を付与する haptic retargeting を組み合わせて、物体の位置や個数 [117]、重さ [118, 119] を現実とは異なる形で知覚させるような介入が提案されている。また、歩行速度 [120] や移動距離 [73] を視覚的な介入によって誤認させ、VR 空間を実際よりも広く認識させる redirected walking や、平面歩行を階段昇降に錯覚させる手法 [121] などが提案されている。ユーザはコンピュータの視覚的な介入によって行動や認識の変容を支援されるが、錯覚を利用した無意識下での介入であり、運動生成はユーザ自身によって行われるため、したがって行為主体はヒト-コンピュータ間で共有される。

クロスモーダル協応

視覚的な介入に留まらず、実空間における多感覚間錯覚（クロスモーダル錯覚）を利用した環境拡張デバイスがここに分類される。歩行パターンを検出して足音のフィードバックに介入することで身体認識を変化させるデバイスや [122]、布状デバイスの振動パターンを変化させ、物質的知覚（岩、水）の連想を介して身体知覚（重い、リラックス）へ介入する手法 [123] が提案されている。本システムの場合は行為主体が完全にユーザであり、デバイスはユーザの認識を錯覚的に変容する。

1.4.2 HInt 技術において運動主体感を維持することの困難

HInt 技術は、ユーザの物理的身体の限界や環境の限界、そして運動や認知的な技能の限界を拡張するような積極的な介入によって、ユーザの目標達成を意識的・無意識的に支援する。上記分類の内、身体拡張分類ではユーザ自身が行為主体であり、環境拡張分類では、行為主体が共同的な場合もあるが、一般的にユーザの無意識下で錯覚的拡張が行われる。したがってこれらの分類では、基本的にはユーザの運動主体感が完全に保ち得る範囲でコンピュータは拡張的介入を行うため、ユーザの運動主体感への干渉は発生しない。一方で、行動拡張分類の、特に運動動作動デバイスと知的システムは、ユーザの運動意図や運動技能に基づく予測と異なるよう、コンピュータによる拡張的介入を自己帰属することが求められる。したがって、このような自律的デバイスとの共同作業は、ユーザの運動主体感を大きく損なう可能性がある。

自動化デバイスによってユーザの制御感や運動主体感が低下することは、システムや技術が受容されるための大きな課題である。Shneiderman が指摘するように、ユーザは、自分がシステムを制御しており、システムが自分の行動に応答するという感覚を強く望んでおり [124]、したがって運動主体感が失われることは、ユーザの技術受容を容易に阻害する。また、一般的にはコンピュータデバイスによる支援はユーザのパフォーマンスの向上を目的とし、この支援が事後推論的に運動主体感を上昇させる可能性もある [92, 93] が、その一方で、過剰な支援によって運動主体感が損なわれると、却ってパフォーマンスに悪影響を与えることが指摘されている [94–96]。Berberian らは、飛行機操縦シミュレータ上における、衝突回避の進路選択と実装、実行という複合的なタスクを対象として、自動制御の観察から完全手動制御までの 4 段階の支援を受けるユーザの運動主体感を調査した [96]。彼らの報告は、支援レベルが上がるにつれて、4 段階の明示的な運動主体感と、直接推定法による binding 効果の両方が段階的に低下しただけでなく、支援が却ってユーザの注意を逸らし、タスクパフォーマンスの低下につながったことを示した。

また、運動主体感は行動の責任に対する感覚と密接な関係があり [125]、例えば法的責

任を問う際には、行為者がその行為の性質を知っている必要があり（マクノートン・ルール），すなわちその行為が行為者によって意図的に実行され，行為に運動主体感を経験していることが求められる [126]. したがって，運動主体感を損なうような高い支援レベルの介入は，ユーザの責任の帰属に悪影響を及ぼす可能性がある。

共同システムの不良の原因是，かつてはヒューマンエラーに帰属されて改善策が提案されてきたが，Norman はこれを批判し，自律的デバイスの抱える課題はユーザと機械的行為主体との相互作用の設計手法にあることを指摘した [127]. つまり，共同問題を解決するためのヒトが互いに問題解決策を話し合うのと同様に，自律的なコンピュータデバイスは，ユーザと共同して課題を解決するために，システムの状態をユーザにとって自然で認識が容易な手法で提供する必要があることを指摘する。具体的な解決策としては，ユーザにシステムの意図を事前に提供したり [128]，コンピュータ支援の存在を知らせたり [92, 93] といったシステムの透明化や，最終決定をユーザに委譲すること [76] や，ユーザの制御に関する情報をフィードバックすること [94] が提案されている。

もう一つの解決策は，コンピュータデバイスの支援レベルを適切なレベルに調整する方法である。身体運動操作のような具体的な随意的な動作を，コンピュータデバイスによって支援するような技能拡張支援手法においてはこのアプローチが有効である。例えば Kasahara らは，EMS を用いたユーザのスイッチ押し運動を対象として，高速化支援レベルが増加する，すなわち EMS の印加時刻が早まる毎に，明示的に報告される運動主体感が段階的に減弱すること報告している [109, 111, 129]. 彼らはこの明示的指標に基づいてユーザの運動速度の拡張と運動主体感の維持を両立するような EMS 印加時刻指標を提案しており，支援を受けたユーザは，EMS に気が付かない場合や EMS 支援の存在に気が付く場合のいずれの場合でも，運動を自己帰属することが報告されている。一方，Coyle らのカーソル操作を対象としたポインティング・クリックタスク支援では，ある一定の支援レベルを超えると binding 効果が急激に減弱することが報告されている [97]. 彼らは，ユーザがコンピュータから一定の支援を受けていることを認識している場合でも，binding 効果を無支援レベルと同等に保つような支援レベルが存在することを報告している。したがって，intentional binding 効果は，ユーザの経験・知覚する運動主体感をより鋭敏に計測し，段階的な支援を受けるユーザの運動主体感を維持するための適切な支援レベルの特定に有効である可能性がある。

1.5 本研究の位置づけ

本研究では、ユーザのスキルを拡張する代表的な HIInt 技術であり、筋に対して直接運動を提示することが可能な EMS を用いる。支援対象はユーザのスイッチ押し運動の運動速度とする。そして、スイッチ押し運動の高速化支援と、運動主体感の維持を両立するような適切な EMS 印加時刻指標を、intentional binding 尺度の計測を通して特定することを目的とする。

本研究では、運動の高速化支援による運動技能拡張の実現と、運動主体感の損失の低減とを両立する EMS 印加時刻指標を特定するために、以下の 2 つの新しい点を備えた手法を提案する。

intentional binding 尺度を用いて EMS 支援下のユーザの運動主体感を計測 運動主体感の損失を最小限に抑え、支援効果を最大化するために最適な EMS 印加時刻指標を、これまで EMS では計測されたことのない intentional binding 尺度に基づいて決定する。計測は、行動タスクと感覚タスクの両方の binding 効果が計測可能であるため、ユーザの運動主体感経験をより詳細に分析することができる Libet clock 法を用いた計測を採用した。intentional binding 効果を計測することの利点は三つある。一つ目は、運動主体感を明示的に報告する場合の判断バイアス [23, 27, 35] を回避できる点である。研究対象者は、タスクの発生時刻、もしくはタスク間の時間間隔を報告するように求められるが、自身の主観的な経験について、自ら判断して報告する必要はない。二つ目は、運動に対する意図性に応じた知覚変化量を、ミリ秒オーダで定量的に計測可能である点である [70]。三つ目は、ユーザの運動主体感を損なわないような、適切な支援レベルを特定するために有用な可能性がある点である。マウスカーソルを初期位置から目的領域へ移動するような、単純で比較的短時間の行動タスクを対象とした報告では、ある一定の支援レベルを超えると急激に binding 効果が低減することが報告されており [97]、ユーザの運動主体感経験の変化を鋭敏に捉えて計測できることが示唆されている。明示的な～ただし、複雑で比較的長時間のタスクの場合にはこの鋭敏な変化は報告されず、明示的な運動主体感と同様に、支援レベルの増加に応じて連続的に binding 効果が損失されるが [96]、これはおそらく intentional binding 尺度の限界である [70]。本研究における EMS のスイッチ押し運動支援は、短時間の運動を対象とするため intentional binding 効果の計測に適したタスクであり、したがって、適切な支援レベルの特定に有用であると考える。

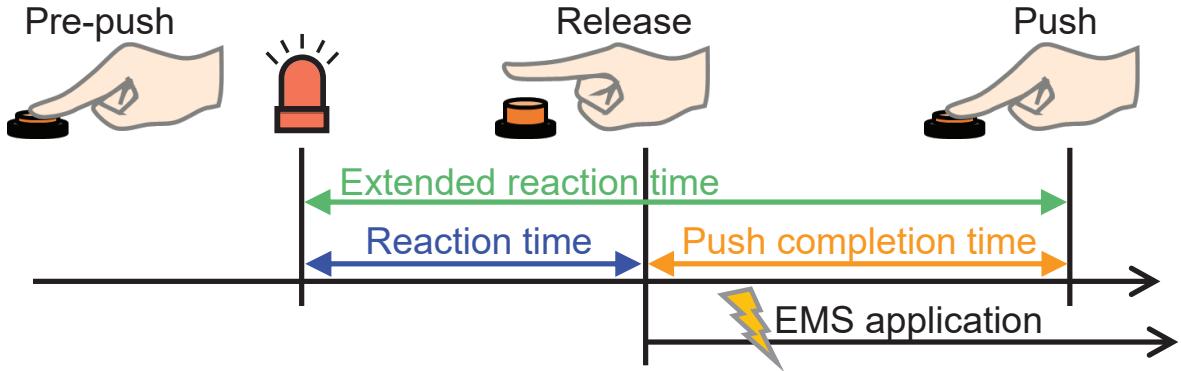


図 1.4: Novel switch-pushing method.

新しいスイッチ押し運動に基づく EMS 印加手法の提案 intentional binding 計測では研究対象者自身が運動開始時刻を決める必要がある一方、EMS による高速化支援のためにはユーザの運動達成以前に EMS を開始する必要がある。これらの矛盾を解決するために、スイッチ押し運動の前に、EMS のトリガとして取得可能な運動が必ず生じるように設計された新しいスイッチ押し運動を提案する（図 1.4）。ユーザは始めにスイッチを押し続けて待機し（スイッチ ON），スイッチを押したいときには、スイッチから指を離して（スイッチ OFF）再び押す（スイッチ ON）ように求められる。これらの動作はできるだけ早く、一連の動作として実行されるように指示した。スイッチ押下動作から少なくとも数十 ms 前に必ずスイッチ開放動作が発生するため、これを EMS 印加のトリガに用いることで、ユーザ自身が運動開始時刻を決めると同時に、随意的なスイッチ押し運動に先行した EMS 支援を可能とする。ユーザにとっては、指を上げて下してスイッチを押すという直感に即した動作であると言える。

先行研究では、一定間隔で発生する音を参考に運動開始時刻を事前に学習させる方法 [46] や、研究対象者に運動を実施してもよい数 s 程度の時間領域を提示し、先に運動を達成したのが研究対象者か、それとも非随意運動（ここでは TMS 誘発運動）かによって事後的に条件分けする方法 [130] が採用されて、intentional binding 効果が計測されている。しかし、Libet clock 法で計測される intentional binding 効果はばらつきが大きく [38, 39]、同じ EMS 支援レベル条件を安定して繰り返す必要があるため、再現性の高い EMS 支援を可能とする随意運動をトリガとする EMS 印加手法を採用した。

EMS 印加手法の提案とその有用性を明らかにするため、下記の 3 つの実験を通して段階的な検証を実施した。

実験 1: intentional binding 尺度に基づく随意運動と EMS 誘発運動の区別

暗示的に計測された intentional binding 尺度を通して、EMS によって誘発される非随意的なスイッチ押し運動と、提案手法による随意的なスイッチ押し運動を区別可能であることを明らかにする。

実験 2: intentional binding 尺度に基づく EMS 高速化支援レベルの特定

異なる EMS 高速化支援レベルに応じて、支援を受けるユーザの運動主体感を intentional binding 尺度の計測から明らかにし、この暗示的かつ定量的な尺度が EMS の適切な支援レベルの特定に有用であることを示す。随意運動に対し、EMS の提案印加手法を用いて段階的な印加オフセットの後に EMS を印加し、ユーザの運動速度技能の支援を行う。

実験 3: 特定された EMS 高速化支援レベルの評価

実験 2 で特定された EMS 高速化支援レベルを用いた支援が、ユーザの運動主体感を維持とスイッチ押し運動の高速化を両立可能かどうかを、反応時間タスクを通して評価する。

第 2 章 intentional binding に基づく 随意運動と EMS 誘発運動の区別

2.1 はじめに

本実験では、高速化支援 EMS を設計するための初期的検討として、EMS に誘発された非随意なスイッチ押し運動中の intentional binding 効果を計測し、随意的なスイッチ押し運動や運動の生じない電気的触覚における intentional binding 効果と比較した。比較の目的は、非随意的な EMS 運動と、随意運動との意図性の違いを、暗示的尺度である intentional binding 効果を用いて区別することである。また、非随意的な EMS 運動を経験するユーザの intentional binding 効果を初めて報告することで、EMS に対する intentional binding 計測の導入可能性を示すことを目指した。

2.2 実験手法

2.2.1 研究対象者

48 名の右利き健常者がこの実験に参加した（平均 21.9 (S.D.= 2.7) 歳、女性 13 名、男性 35 名）。サンプルサイズは、のべ 8 名が参加した予備実験に基づいて事前に決定された。この予備実験において、随意的な提案スイッチ押し運動と EMS による非随意的なスイッチ押し運動の intentional binding 効果の差の検出力が 0.8 以上であるサンプルサイズが 43 名以上であったため、これを最小のサンプルサイズとして決定した。全ての研究対象者から、大阪大学基礎工学研究科における「人を対象とした研究に関する倫理委員会」で承認を受けた手順に則り書面でインフォームドコンセントを取得した（承認番号：R4-12）。

本実験は、研究対象者に実験の目的や計測対象を明かさない、ディセプション形式を採用した。これは、実験の目的や計測対象を説明することが、研究対象者の意識的・無意識的な意図やバイアスを引き起こし、実験結果を歪ませる可能性を懸念したためである。実験終了後にデブリーフィングを行った上で、改めて口頭でデータ提供への同意を得た。また、いずれの研究対象者も EMS を経験したことがなかった。

2.2.2 実験環境

ステッピングモータ（1回転あたり 120 ステップ）で動作する Libet clock を製作した。時計回りに 2560 ms の周期で回転する針と、60 個の目盛と 5 目盛毎に目盛数値が記載された文字盤を備えている（参考 [32]）。針が 12 時方向を指す位置を基準点として、フォトリフレクタを用いて基準点を検出することで、針の位置情報を記録している。

全体のシステム構成図を図 2.1 に、実験風景を図示する。研究対象者の手元には、2 つのスイッチがある。右側のスイッチで右手環指による随意的なスイッチ押し運動や EMS に誘発されるスイッチ押し運動を行い、左側のスイッチで Libet clock の開始動作を行う。採用したスイッチは、定格値が 0.5–2.0 N, 0.5–1.0 mm で出力を反転するスイッチであり、独立した運動が難しい環指でも簡単に押すことができる。また、スイッチ押し運動に強い力を必要としないため、運動主体感の明示的報告 [131] や intentional binding 効果 [132] を増大する可能性がない。マイコン（PIC16F1827）によって、電気刺激装置へのトリガや音（2.2.3 節で後述）の生成、Libet clock の制御を行った。データ取得は AD コンバータ（AI-1608AY-USB, CONTEC）を用いて、Libet clock の基準点情報、2 つのスイッチの状態変化、そして電気刺激と音の同期信号をサンプリング周波数 1 kHz で取得した。

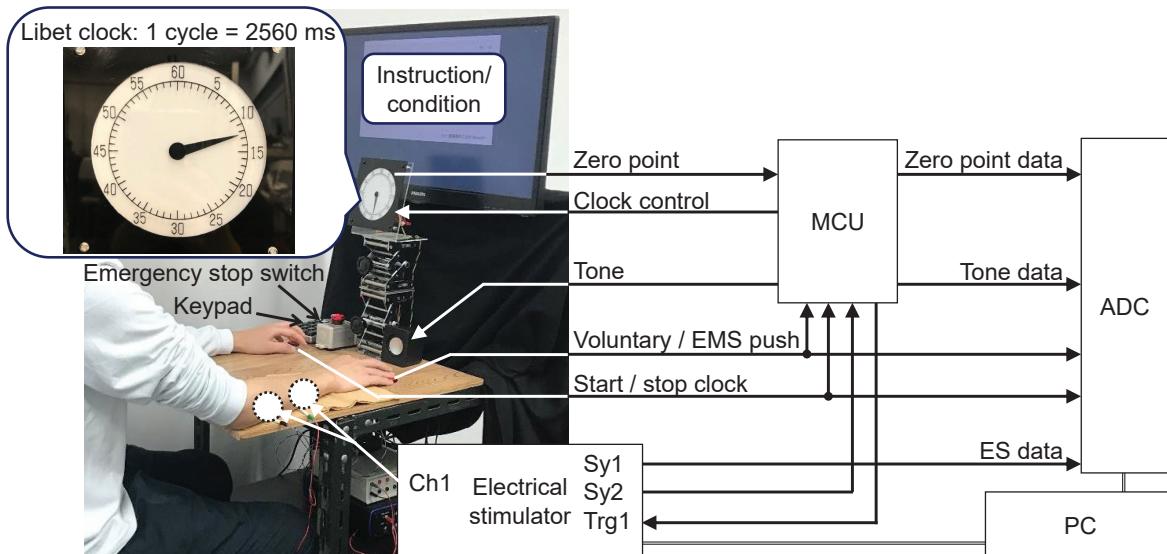


図 2.1: Experimental setup.

2.2.3 タスク

この実験では、先行研究 [32] を参考に 3 つの行動タスクと 1 つの音タスクを設定した(図 2.2). この内、行動タスクには、行動タスク単体の開始時刻を回答するベースライン条件と、行動タスクと音タスクが連続して与えられて、行動タスクと音タスクのいずれかの開始時刻を回答するオペラント条件がそれぞれ設定された。

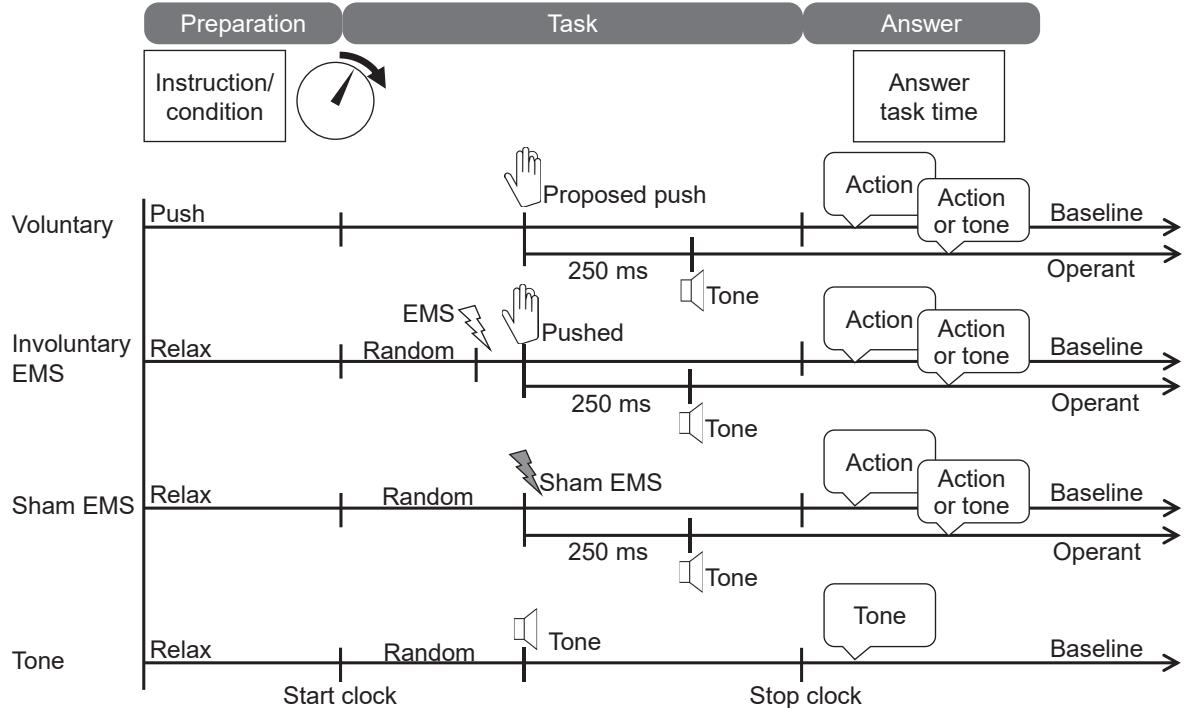


図 2.2: Tasks of experiment 1.

ベースライン条件には、以下の 4 種類の単一タスクが設定され、研究対象者は各タスクの開始時刻を Libet clock を使って判断するように求められた。

随意条件

任意のタイミングで右手環指による提案スイッチ押し運動を行い、自分がスイッチを押した時刻を回答するように指示された。すなわち、研究対象者は、まず右手環指でスイッチを押し続けた後、任意の意図したタイミングでスイッチを解放して再度スイッチを押下する、一連の運動を実施した。ただし、Libet clock の目盛や針の位置を目標としてスイッチを押すことや、Libet clock の針の回転が開始してから最初の一一周の間にスイッチを押すことは避けるように指示された。本条件は、次の実験（3 章）で EMS 運動と組み合わせることを前提としていたため、提案ス

イッヂ押し運動を採用している。なお、刺激電極は貼り付けたまま随意運動を行うよう指示しているが、この条件では電気刺激が印加されないことを実験者が説明しており、加えて電気刺激感覚がないことから、研究対象者は非随意的な運動介入がないことが明確な条件であった。

非随意 EMS 条件

無作為化された遅延後に EMS が与えられ、EMS によって誘発された右手環指の非随意的な屈曲によってスイッチが押された。研究対象者は、EMS によってスイッチが押下された時刻を回答するように指示された。

偽 EMS 条件

偽 EMS、すなわち、刺激感覚を感じるが、運動が生じないような電気刺激が無作為化された遅延後に与えられた。研究対象者は、電気刺激感覚を感じた時刻を回答するように指示された。

音条件

研究対象者は、無作為化された遅延後にアンプ付きスピーカから流される、周波数 1 kHz で 100 ms 間の音声を聞き、音が聞こえた時刻を回答するように求められた。

各条件の電気刺激や音は、研究対象者が左手でスイッチを押して Libet clock を開始してから、無作為な時間経過 (2.5–7.6 s) の後に与えられた。

オペラント条件では、音条件を除く 3 つの行動タスク（自身がスイッチを押下する、EMS によってスイッチを押下される、偽 EMS の刺激感覚）の 250 ms 後に、音タスク (1 kHz, 100 ms) が与えられた。研究対象者は、行動タスクと音タスクのいずれの開始時刻を回答するかを予め指定された上でタスクを実施し、指定されたタスクの開始時刻を回答した。音タスクを開始するオフセットの基準時刻は、随意条件と非随意 EMS 条件ではスイッチ押下時刻を基準とし、偽 EMS 条件ではスイッチ操作がないため、電気刺激印加開始時刻を基準とした。すなわち、随意条件と非随意 EMS 条件では、スイッチの押下が音の発生を引き起こしたという、容易に推論可能な因果関係が構築されている。一方、偽 EMS 条件では、偽 EMS と音が単に連続して提示される条件であり、偽 EMS が印加されたことが音の発生の原因となったという因果関係はおそらく考えにくい。ただし、偽 EMS と音が同じ順序（原因が結果に対して先行する）、同じ時間間隔（時間的接近）で繰り返し提示される（恒常的連接）ことは、因果関係が推論される要因を満たすため [47]、行動–音タスク間の因果性が誤認される可能性がある。

この実験では、4 つのベースラインタスクと、2 種類の回答（行動または音のタスク時刻的回答）を行う 3 つのオペラントタスクの、全部で 10 タスクが設定された。研究対象

者は、10 タスクブロックを異なる無作為な順で提示された。各タスクブロックは 20 試行のタスクで構成されており、全部で 200 試行が実施された。

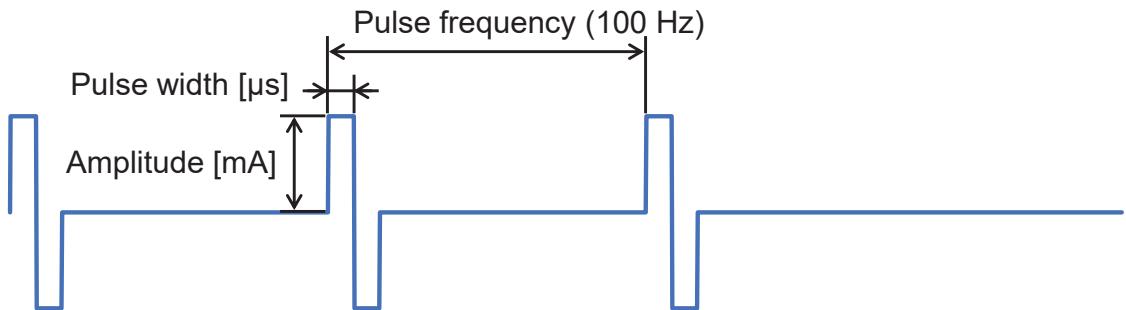
2.2.4 実験手順

まず研究対象者は、ディスプレイ上に示された条件（電気刺激や音の有無）と指示（判断すべき時刻と、スイッチを押す手指の待機条件）を読む。手指の待機条件は典型的な intentional binding 実験に追加された指示である。研究対象者は、随意条件では右手環指でスイッチを押し続けて待機するように指示された。随意条件以外の条件ではスイッチを押さず、EMS で誘発された環指の非随意的な屈曲がスイッチを押すことができるよう、スイッチの上に指を置いて待機するように指示された。研究対象者は 2 つの指示内容を把握したら、左手でスイッチを押して Libet clock を開始する。ただし、手指の待機条件についての指示を誤った場合には、Libet clock が開始しないように設計されている。研究対象者は、タスクを能動的（随意条件）または受動的（それ以外の条件）に行い、同時に指定されたタスクの発生時刻を Libet clock から読み取るように指示される。ただし、タスクが失敗した場合、例えば随意条件において、スイッチを解放する動作が不十分だったり、非随意 EMS 条件において、EMS による屈曲動作が不十分であったりして、スイッチを押すことに失敗した場合には、一旦 Libet clock を停止してもらい、試行をやり直すように指示した。読み取った時刻は左手側にあるテンキーを用いて回答した。回答はできるだけ高精度に回答するように指示した。Libet clock は、タスク終了から無作為な時間経過（1.5–2.52 s）の後に停止した。

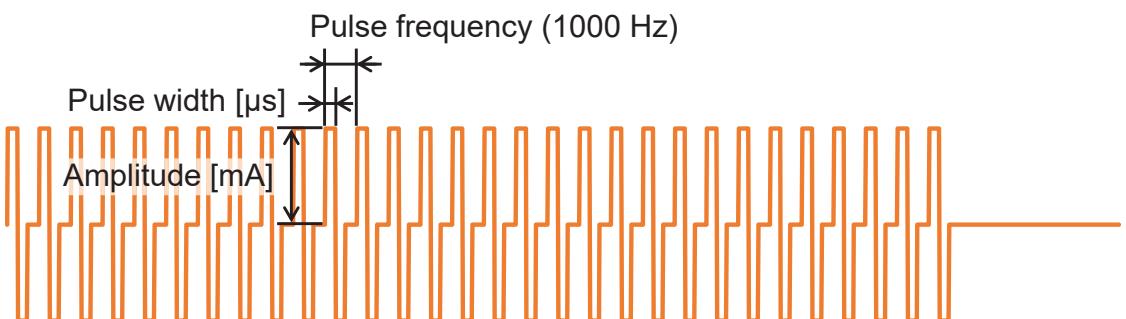
2.2.5 電気刺激パラメータ

EMS 波形は 100 Hz のバイポーラパルス波を用い、パルス幅は 800 μ s、パルス数は 3 個、パルス振幅は 2.5–16.0 mA を用いた（図 2.3a）。刺激対象筋は浅指屈筋であり、2 つの電極がモータポイントを挟み込むように配置された。遠位指節間関節を除く環指の全ての指関節の屈曲を誘発することを確認することで、刺激筋の妥当性を確認した。各刺激パラメータは、環指のみを屈曲し、他の指の運動は最小限もしくは全く動かないように、研究対象者毎に調整した。ただし、7 名の研究対象者は環指の屈曲を誘発することができなかったため、5 名は中指、2 名は小指の屈曲によって代替した。

偽 EMS には 1000 Hz のパルス波を用い、パルス幅は 50–500 μ s、パルス数は 30–120 個、パルス振幅は 3.5–16.5 mA を用いた（図 2.3b）。これらのパラメータ値は、刺激を明確に感じ、かつ手指などの運動が生じないように刺激パラメータを調整した。なお、EMS と偽 EMS は同一の電極配置によって提示された。



(a) EMS.



(b) Sham EMS.

図 2.3: Electrical stimulus waveforms.

これらの電気刺激は電気刺激装置 (STG4002, Multichannel systems) を用いて生成され、マイコンからのトリガを受けてから $20 \mu\text{s}$ 以内に開始された。直径が 32 mm の丸形ディスポ式電極 (Setsu Planning) を使用した。研究対象者が、例えば電極の粘着力の減少や皮膚上の乾燥によって痛みを訴えた場合には、皮膚の導電性を改善するための電気刺激用ジェル (Compex) を塗布して対応した。安全のため、研究対象者自身で電気刺激装置の停止操作を行うことのできる緊急停止スイッチを研究対象者の手元に設置している。

2.3 結果

研究対象者の判断時刻とタスクの実際の発生時刻との差である判断誤差を、試行毎に計算した。判断誤差が負の場合はタスクの発生を予測的に知覚したことを意味し、正の場合はタスクを遅れて知覚したことを意味する。研究対象者毎に判断誤差が平均から 3 標準偏差以上または以下の試行は、分析から除外された [50, 51]。また、非随意 EMS 条件において、EMS 印加からスイッチ押下までの時間が 200 ms より長い試行は、EMS がスイッチ押し運動に貢献しなかったと見做して分析から除外した。システム不良や研究対象者の操作ミスによって実験が正常に記録されなかったデータも除去した。合計の除去データは、データ全体の 1.13% に相当する。

オペラント条件において音タスクが追加されたことによる知覚時刻の変化は、条件毎に知覚シフトとして算出された。すなわち、オペラント条件の判断誤差からベースライン条件の判断誤差を引くことで知覚シフトが算出される。この相対的なシフト値を用いることによって、タスク毎の行動戦略の違いや時刻判断のバイアスを排除することができる。アクションタスクの正（負）の知覚シフトは、アクションが binding (unbinding) 状態にあることを示し、トーンタスクの正（負）の知覚シフトは、トーンが unbinding (binding) 状態であることを示す。知覚シフトの絶対値は、binding/unbinding の強さを示す。以下、アクションタスクにおける知覚シフトを “action binding”，トーンタスクにおける知覚の変化を “tone binding” と呼ぶ。全研究対象者の判断誤差の平均と標準偏差を表 2.1 に、知覚シフトの平均と標準偏差を図 2.4 に示す。

随意運動と EMS による非随意運動を区別するため、各々の条件内において知覚シフトが有意かどうかを単純に調査した。つまり、ベースライン条件とオペラント条件の間で判断誤差が同程度であるという仮説を棄却できるかどうかを、対応あり t 検定を用いて調査した。随意条件における提案スイッチ押し運動は、行動の判断が有意に遅く ($p = 0.0289$)、音の判断が有意に早かった ($p < 0.0001$)。一方、随意運動のない非随意 EMS 条件と偽条件では、音の判断が有意に早かった ($p < 0.0001$) が、行動の判断における知覚シフトは有意ではなかった（非随意 EMS 条件では $p = 0.0503$ 、偽条件では $p = 0.1195$ ）。

もう一つのアプローチとして、研究対象者が経験した主観的な間隔長の変化を、判断誤差から再構築して検討する [50, 51, 56]。条件毎に、実際の行動–音タスク間隔である 250 ms に、音タスクの判断誤差を加算し、行動タスク判断誤差を減算することで知覚タスク間隔が算出された。行動タスクの負の判断誤差と音タスクの正の判断誤差は、知覚タスク間隔を短縮し、一方で、行動タスクの正の判断誤差と音タスクの負の判断誤差は、知覚タ

表 2.1: Judgment errors, perceptual shifts, and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 1.

Condition	Judgment event	Mean judgment error (S.D.) [ms]		Mean perceptual shift (S.D.) [ms]
		Baseline	Operant	
Voluntary	Action	-21 (135)	15 (100)	36 (110), $t(47) = 2.254; p = 0.0289$
	Tone		-102 (144)	-86 (85), $t(47) = 6.958; p < 0.0001$
Involuntary EMS	Action	5 (94)	20 (81)	13 (55), $t(47) = 2.009; p = 0.0503$
	Tone		-89 (108)	-57 (68), $t(47) = 6.432; p < 0.0001$
Sham EMS	Action	23 (107)	36 (98)	15 (50), $t(47) = 1.586; p = 0.1195$
	Tone		-74 (94)	-72 (78), $t(47) = 5.775; p < 0.0001$
Tone	Tone	-17 (68)		

表 2.2: Perceptual interval lengths and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 1.

Condition	Mean interval (S.D.) [ms]		paired t-test
	Baseline	Operant	
Voluntary	254 (94)	133 (110)	$t(47) = 6.229; p < 0.0001$
Involuntary EMS	228 (62)	142 (89)	$t(47) = 7.194; p < 0.0001$
Sham EMS	210 (74)	140 (84)	$t(47) = 5.240; p < 0.0001$

スク間隔を延長すること意味する。ベースライン条件とオペラント条件の知覚タスク間隔の平均と標準偏差を表 2.2 に示す。平均的に 250 ms 間隔よりも増大しているのは随意運動のベースライン条件のみであり、それ以外の条件ではいずれも短縮されている。オペラント条件のタスク間隔が、ベースライン条件と比較して短縮したかどうかを条件毎に対応あり t 検定を用いて調査した結果、全ての条件でタスク間隔が有意に短縮された ($p < 0.0001$)。

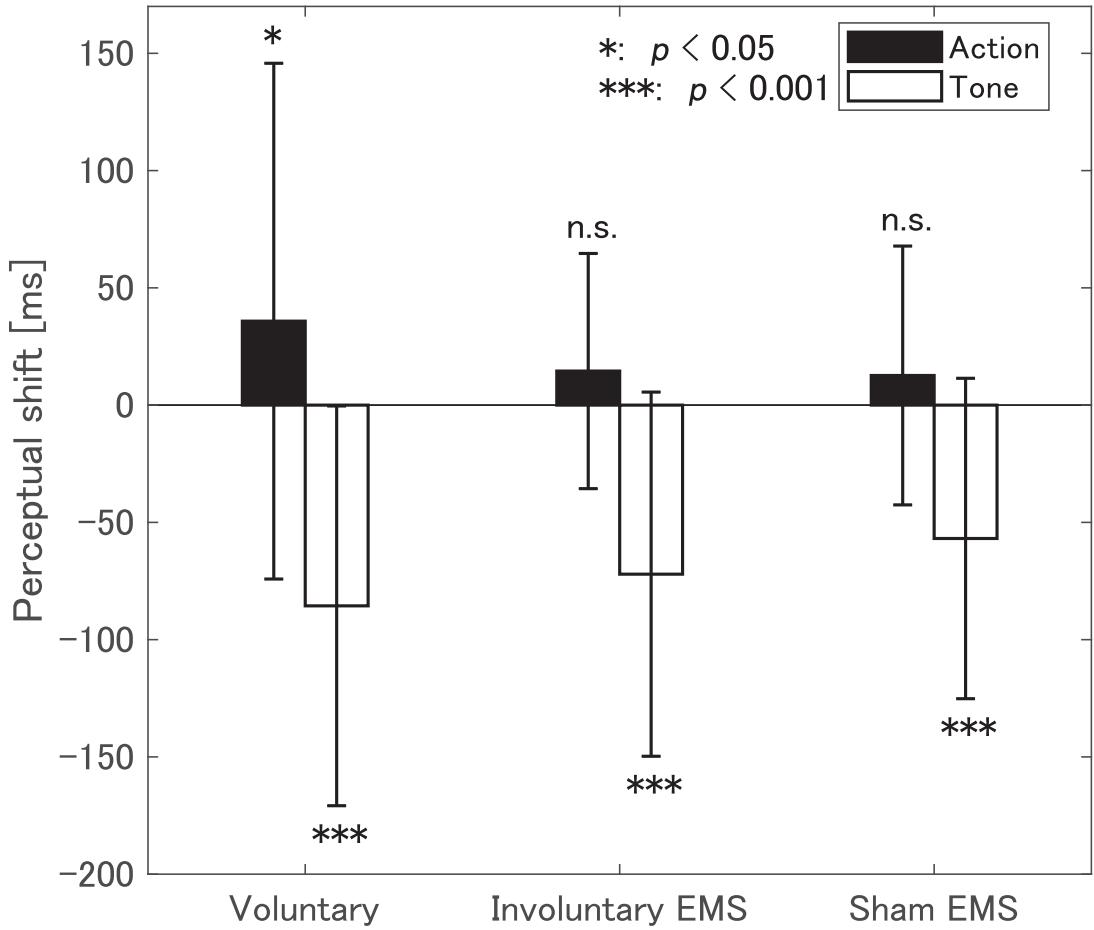


図 2.4: Mean and S.D. of perceptual shift for action and tone judgment.

2.4 考察

随意運動で得られた有意な action binding・tone binding 効果は、典型的な intentional binding 効果 [32] を再現した。随意条件は、行動タスクとして意図的な提案スイッチ押し運動を行うように指示した条件であり、またスイッチを押すことと音が鳴ることとの因果関係が研究対象者にとって明白な条件である。

一方、EMS に誘発された非随意的な運動において観察された、tone binding 効果は、行動と音のタスク間に因果関係がある条件下の非随意運動の観察における結果と一致した。例えば、共同的な運動意図を持つ他者の運動の観察が、自分が運動を達成した場合と

同じように、有意な tone binding が生じた報告 [50, 51] や、機械的に開始されるスイッチ押し運動とこれに連続する音との間の因果関係を認識するように指示された条件において、有意な tone binding が生じた報告 [55] が該当する。また、TMS に誘発されて示指が屈曲されたり [130]、機械によって指を押し下げられたり [56] することでスイッチを非随意的に押す運動にも、随意的に同じスイッチを押す運動よりも弱く tone binding が生じていることが報告されている。本実験の研究対象者にはタスク間の因果関係を直接的には説明していないが、非随意 EMS 条件において非随意的にスイッチを押す運動と音が発生することの間の因果関係の存在を認識していた可能性が高い。なぜなら、今回の非随意 EMS 条件は、随意条件の場合と同じように、スイッチの押下と音の発生との間に因果性があるシステム構成であるためである。つまり、EMS に誘発された屈曲がスイッチ押し運動に失敗した場合には音が鳴らないため、実験者は研究対象者に試行を再度実施するように指示している。この因果関係は、次の実験において随意的なスイッチ押し運動と EMS による非随意的なスイッチ押し運動を組み合わせるために設計されたものである。したがって、非随意 EMS 条件は、意図的な行動タスクではないが因果性のあるタスクが提示されたことによって、有意な tone binding 効果が得られたと考えられる。

結果の有意性の比較から、随意運動と EMS による非随意運動の間の意図性の違いは、行動タスクの知覚シフトが有意か否かによって区別可能であることが示唆された。したがって、行動タスクとそれに付随する音タスクとの間の因果関係だけでは、有意な action binding 効果の発生には不十分であり、因果性と意図性の両方が必要であることが示された。これは Cravo らの先行研究の報告に寄与する結果である [39, 41]。

偽条件では、行動タスクは偽 EMS の触覚刺激が与えられたため意図的なタスクではなく、また、行動と音のタスクはいずれもマイコンによって単に連続的に与えられるため因果関係のないタスクが提示された。しかし、音タスクの判断時刻は有意に早く、これは、時間的に連続した 2 つの感覚タスク（音や運動のない偽 TMS）で報告された最小限の知覚シフト [32] や、反発的な判断時刻の遅れ [56] とは対照的な結果である。これは、行動タスクと音タスクの間が時間的に離れておらず、行動タスクは音タスクに常に先行して音タスクは常に行動タスクの後に続き、そして、これらの接続が常に成り立つことによって（Hume の因果論 [47]），因果関係を誤学習した可能性がある [46, 54]。ただし、この説明だけでは先行研究との矛盾を説明するには不十分であり、おそらく実験設計そのものの影響を考慮する必要があると考える（詳細な議論は 5.1.2 節を参照）。

一方、行動-感覚タスク間隔は、全ての条件において有意に短縮された ($p < 0.0001$)。非随意 EMS 運動と偽 EMS 感覚のような意図的な動作のない条件においても有意にタスク間隔が短縮され、随意運動と同等の binding 効果が生じた。この結果は、運動主体感の

明示的計測と intentional binding 効果が相関しない結果を示唆する。特に、音タスクにおける有意かつ強固な行動タスク方向への知覚シフトが、間隔全体の有意な短縮に寄与したと考えられる。ただし、知覚タスク間隔の有意な短縮は、全く運動のない偽 EMS 条件を含むすべての条件で観察されたため、実験条件設定自体が binding に関係した可能性もあり、これらを本実験内で切り分けることはできない。

最後に行動時刻判断タスクのベースライン条件における定性的な判断誤差に触れる。随意運動が唯一、行動タスク判断が予測的な判断誤差を示しており、これは自己生成運動であることに伴い運動時刻が予測可能であったことを再現している [50, 56]。これに伴い、行動タスクの発生時刻の予測が困難である非随意 EMS 運動や偽 EMS 刺激の単体時刻判断は、遅延した判断を示している。

2.5 まとめ

本実験の目的は、随意的な提案スイッチ押し運動と、EMS に誘発されたスイッチ押し運動を、暗示的な運動主体感尺度を用いて区別することであった。intentional binding 尺度の計測から、意図的な運動がある随意条件のみが、行動タスク時刻を実際よりも有意に遅く判断する action binding 効果を有意に生じることが明らかにされた。本実験で計測された action binding 効果は、実験条件から考えると、行動と音タスク間の因果性の影響よりも、行動タスクの意図性の影響を反映したことが示唆される。

次の実験では、随意運動と非随意 EMS 運動を組み合わせ、EMS の段階的な高速化支援効果が intentional binding 効果、特に action binding 効果にどのような影響を与えるかを明らかにする。

第 3 章 intentional binding に基づく 高速化 EMS の支援レベルの特定

3.1 はじめに

本実験では、随意的なスイッチ押し運動と、段階的なオフセット後に印加される EMS に誘発された非随意的なスイッチ押し運動を組み合わせた運動を対象に、EMS の高速化支援レベルが intentional binding 効果、特に action binding 効果をどのように変容させるかを計測した。そして、intentional binding 尺度の計測結果から、運動高速化支援と運動主体感維持の両立を実現するために最適な EMS 印加時刻指標を特定することを目指した。本実験の実験条件は、実験 1（2 章）の随意条件、非随意 EMS 条件、偽 EMS 条件の 3 つを組み合わせて、EMS または偽 EMS を伴う随意運動として設定することから、intentional binding 効果が増強、あるいは抑制されることが予想される。また、各 EMS 支援レベル下のユーザの明示的な運動主体感を計測することで、暗示的な運動主体感尺度と比較した。

3.2 実験手法

3.2.1 研究対象者

右利き健常者 17 名（平均 23.1（S.D. = 9.3）歳、女性 8 名、男性 9 名）が実験に参加した。サンプルサイズは文献 [32] の研究に基づいて事前に決定された。いずれの研究対象者も、実験 1 に参加していない。全ての研究対象者から、大阪大学基礎工学研究科における「人を対象とした研究に関する倫理委員会」で承認を受けた手順に則り書面でインフォームドコンセントを取得した（承認番号：R4-12）。

本実験は、実験 1 と同様に、研究対象者に実験の目的や計測対象を明かさない、ディセプション形式を採用し、実験終了後にデブリーフィングを行った上で、改めて口頭でデータ提供への同意を得た。また、いずれの研究対象者も EMS を経験したことがなかった。

3.2.2 タスクと実験手順

この実験は、実験 1 から拡張した実験タスクを対象に、intentional binding 効果と、アンケートを用いて明示的に報告された運動主体感の 2 通りの手法で運動主体感を計測した(図 3.1).

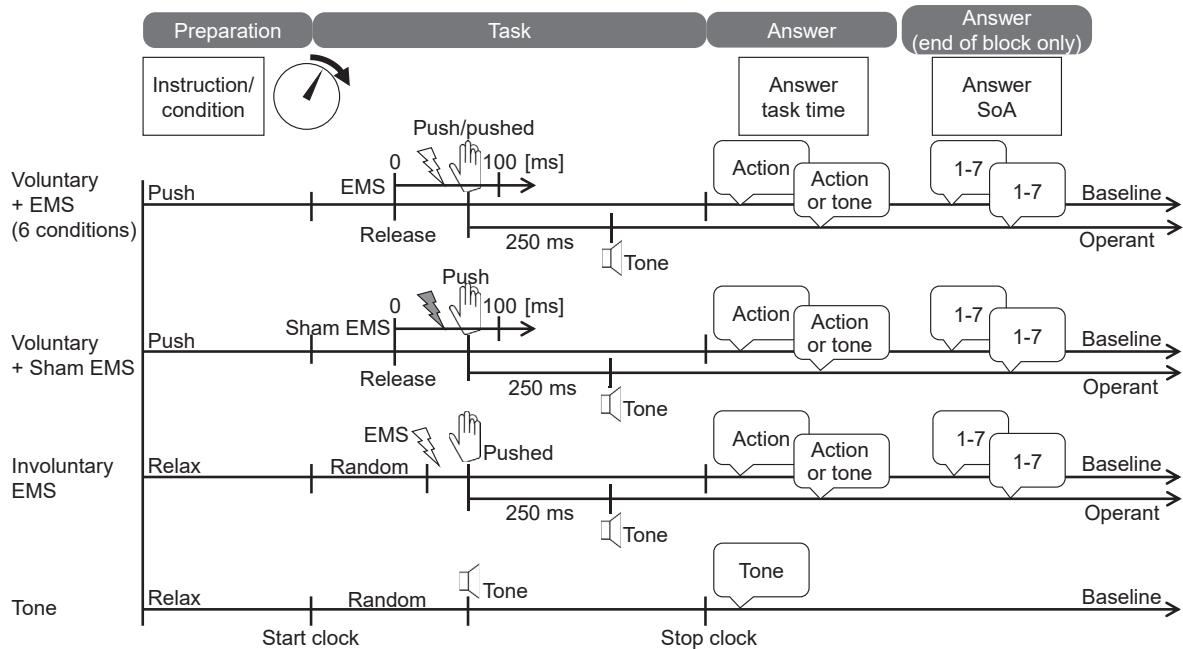


図 3.1: Tasks of experiment 2.

ベースライン条件では 8 つの行動タスクと 1 つの音タスクを設定した.

随意 + EMS 条件 (6 条件)

研究対象者は、任意のタイミングで右手環指による提案スイッチ押し運動を行うように指示された。スイッチが解放された時刻から、0, 20, …, 100 ms (6 条件) の経過後に EMS が印加される。実験 1 の随意条件における提案スイッチ押し運動では、スイッチが解放されてから再度 ON されるまでの時間が平均 97.88 (S.D. = 35.02) ms であった。したがって、本実験の EMS 印加条件は、ほとんどの研究対象者の随意的なスイッチ押し運動よりも早く印加された条件であった。研究対象者は、最初のスイッチ押下時刻を回答するように指示された。つまり、随意運動の方が早いと感じた場合には自分がスイッチを押した時刻を、EMS 誘発運動の方が早いと感じた場合にはスイッチを押された時刻を回答するように指示された。

随意 + 偽 EMS 条件

研究対象者は任意のタイミングで提案スイッチ押し運動を行い、最初のスイッチ押下時刻を回答するように指示された。スイッチが解放された時刻から無作為な遅延(0–100 ms 間)後に、運動を誘発しない偽 EMS が印加された。この条件は運動が完全に随意的に達成されるため、随意コントロール条件として設定された。

非随意 EMS 条件

実験 1 と同様に無作為な時間経過後に EMS が与えられ、右手環指の非随意的な屈曲によってスイッチ押し運動が達成された時刻を回答するように求められた。

音条件

実験 1 と同様に、無作為な時間経過後に与えられる音の発生時刻を回答するように求められた。

オペラント条件では、音タスクを除いた 8 つの行動タスクに対して設定され、最初にスイッチが押されてから 250 ms 後に、実験 1 と同じ音タスクが与えられた。

この実験では、9 つのベースラインタスクと、2 種類の回答（行動または音のタスク時刻の回答）を行う 8 つのオペラントタスクの、全部で 25 タスクが設定された。研究対象者は、25 種類のタスクブロックをそれぞれ異なる無作為な順で提示された。各タスクブロックは 15 試行のタスクで構成されており、全部で 375 試行が実施された。タスクブロックの終了時に、研究対象者は、最初にスイッチを押した運動に対する運動主体感を 7 段階のリッカート尺度で評価した。提示された選択肢は次の通りである。

- 7 自分がスイッチを押したと強く思う
- 6 自分がスイッチを押したと思う
- 5 どちらかというと自分がスイッチを押したと思う
- 4 どちらともいえない
- 3 どちらかというと自分がスイッチを押していないと思う
- 2 自分がスイッチを押していないと思う
- 1 全く自分がスイッチを押していないと思う

実験システムは実験 1 と同様である。また、それぞれの EMS、偽 EMS の刺激パラメータは実験 1 と同様に研究対象者毎に設定した。ただし 4 名の研究対象者は環指の屈曲を誘発できなかったため、中指で代替して実験を行った。

3.3 結果

外れ値基準は実験 1 と同様に、EMS 印加からスイッチ押下までの時間が 200 ms より長い試行を除去した上で、判断誤差が、研究対象者毎に平均から 3 標準偏差以上または以下の試行を除去した。除去されたデータはデータ全体の 2.23% に相当する。

実験結果を図 3.2 にまとめて示す。横軸は 8 条件を指し、左端の網掛け領域が随意 + 偽 EMS 条件、右端の網掛け領域が非随意 EMS 条件、中央の白抜き領域が随意 + EMS 条件を示した。随意 + EMS 条件は、左から EMS 印加時刻が遅い順に図示したため、グラフの右側の条件ほど、高速化支援レベルが高い EMS 印加条件であることを意味する。図 3.2 の上図には、右手側スイッチの状態遷移の計測から算出した、スイッチ押し時間を示す。研究対象者がスイッチを解放した時刻を基準として、この基準時刻からスイッチ押下までの時間をスイッチ押し完了時間と定義して、平均値と標準偏差を実線の折れ線グラフで描画した。また、基準時刻から EMS が印加されるまでの時間、すなわち各 EMS 印加条件 (0, 20, ..., 100 ms) を、EMS 印加時間として破線で描画した。両者の時間間隔、すなわち、EMS 印加時刻からスイッチ押下時刻までの時間を EMS 作動時間と定義して、棒グラフで描画した。図 3.2 の中央図には、知覚シフトの研究対象者間の平均と標準偏差を棒グラフで描画した。図 3.2 の下図には、各研究対象者が明示的に報告した運動主体感の中央値を箱ひげ図で描画した。また、条件間比較として、Bonferroni 補正後の対応あり t 検定の p 値を、ヒートマップとして図 3.3 に図示し、有意差のある条件の組み合わせのセルを黒色で示した。スイッチ押し完了時間の条件間比較は図 3.3a, EMS 作動時間の条件間比較は図 3.3b, 明示的に報告された運動主体感の条件間比較は図 3.3c に示した。

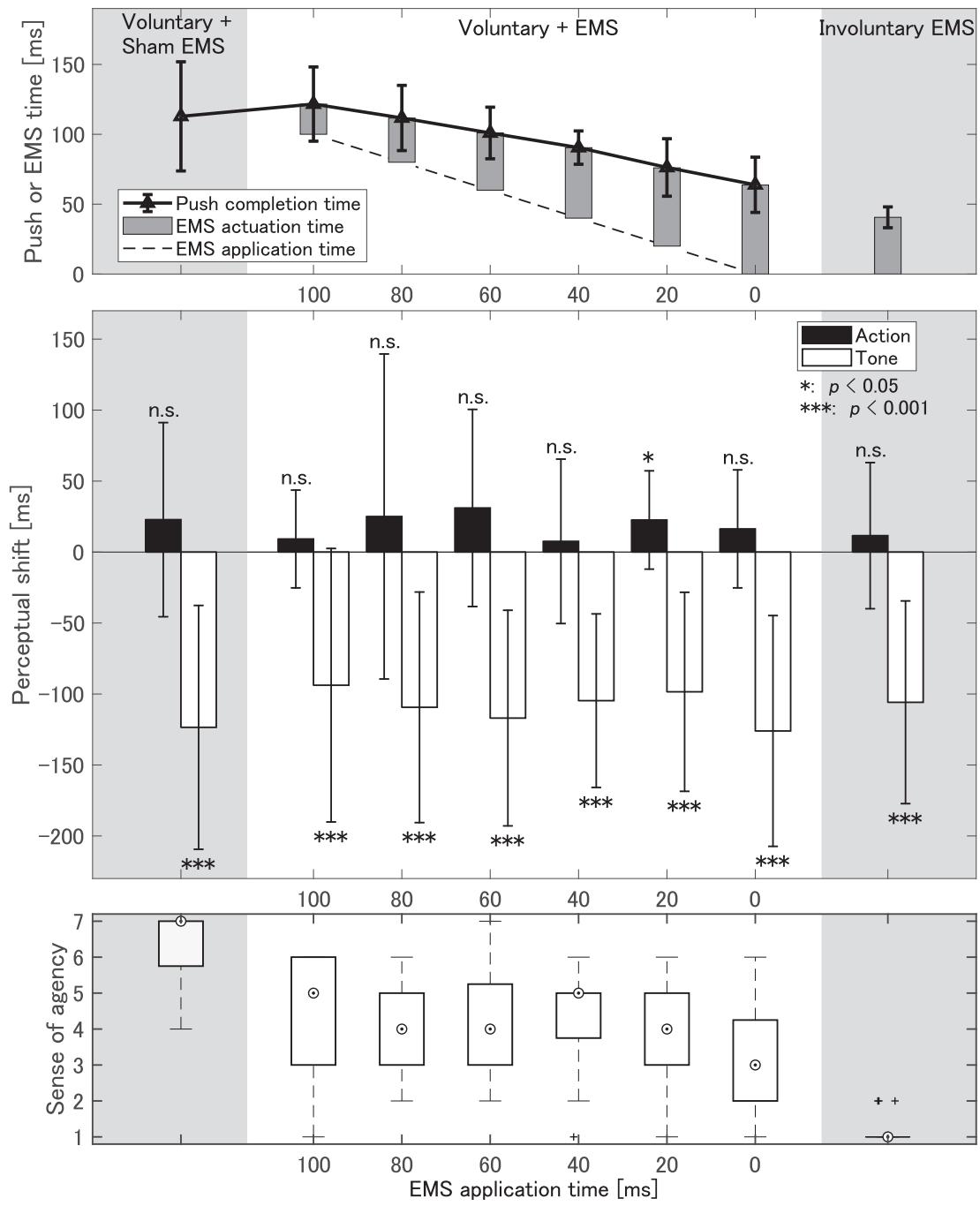
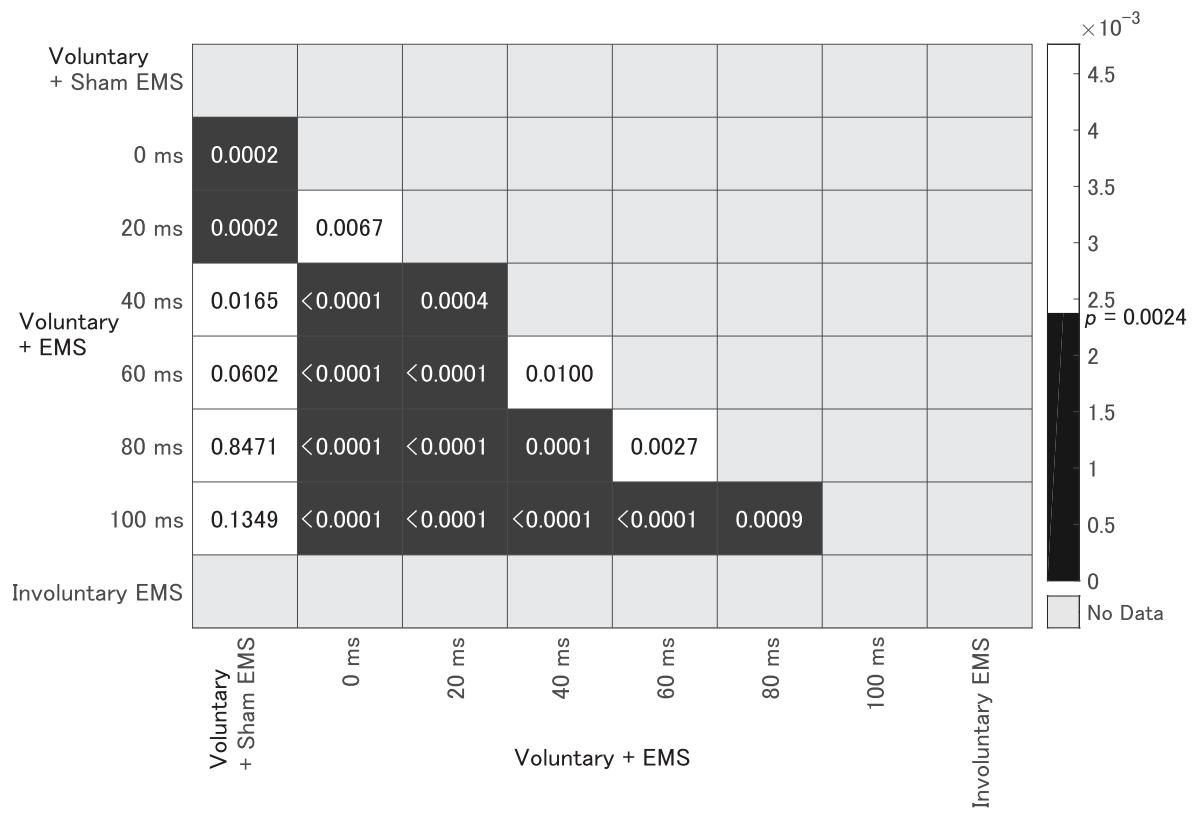


図 3.2: Results of Experiment 2. Top: Mean and S.D. of the time from switch release or EMS application to switch pushing action (push completion time and EMS actuation time, respectively); middle: Mean and S.D. of perceptual shift for action and tone judgment; bottom: Median of self-reported sense of agency.



(a) Push completion time.

図 3.3: Heatmaps showing p -values of multiple comparisons of paired t-tests with Bonferroni correction. Combinations of conditions with significant differences are shaded in black.

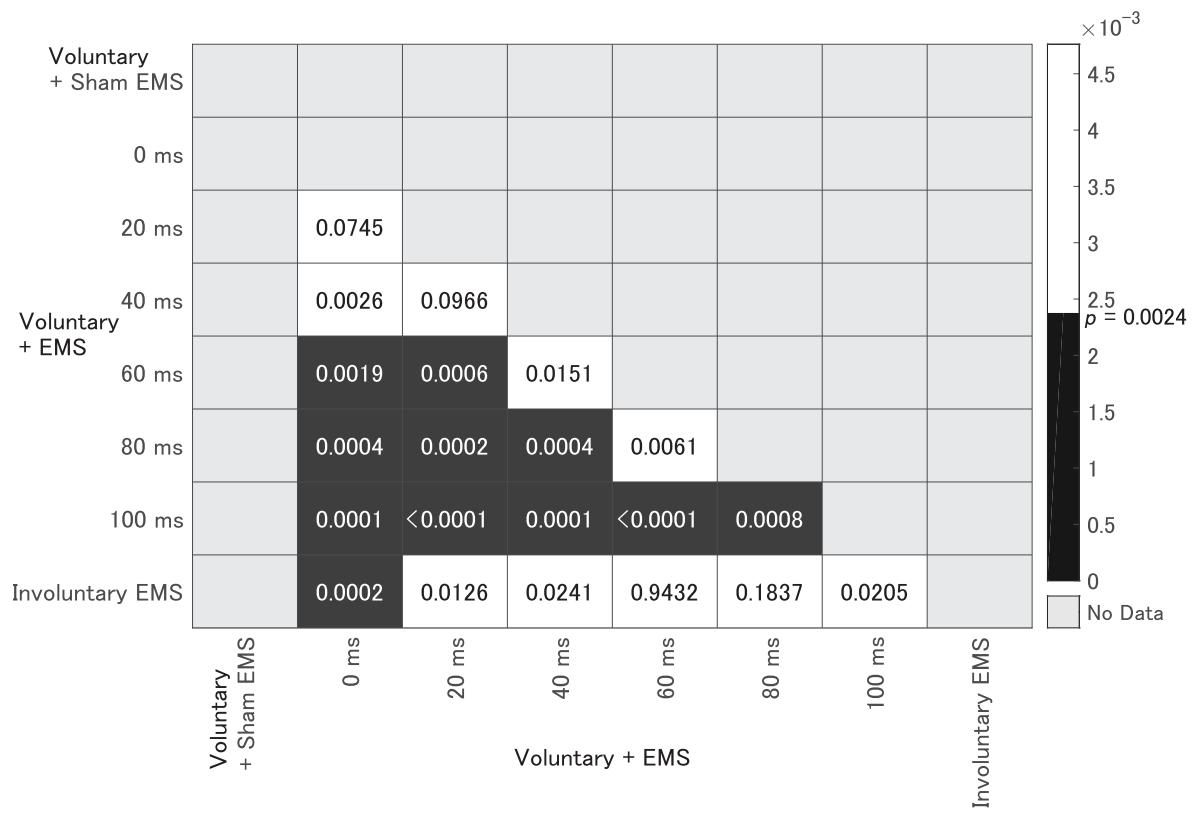
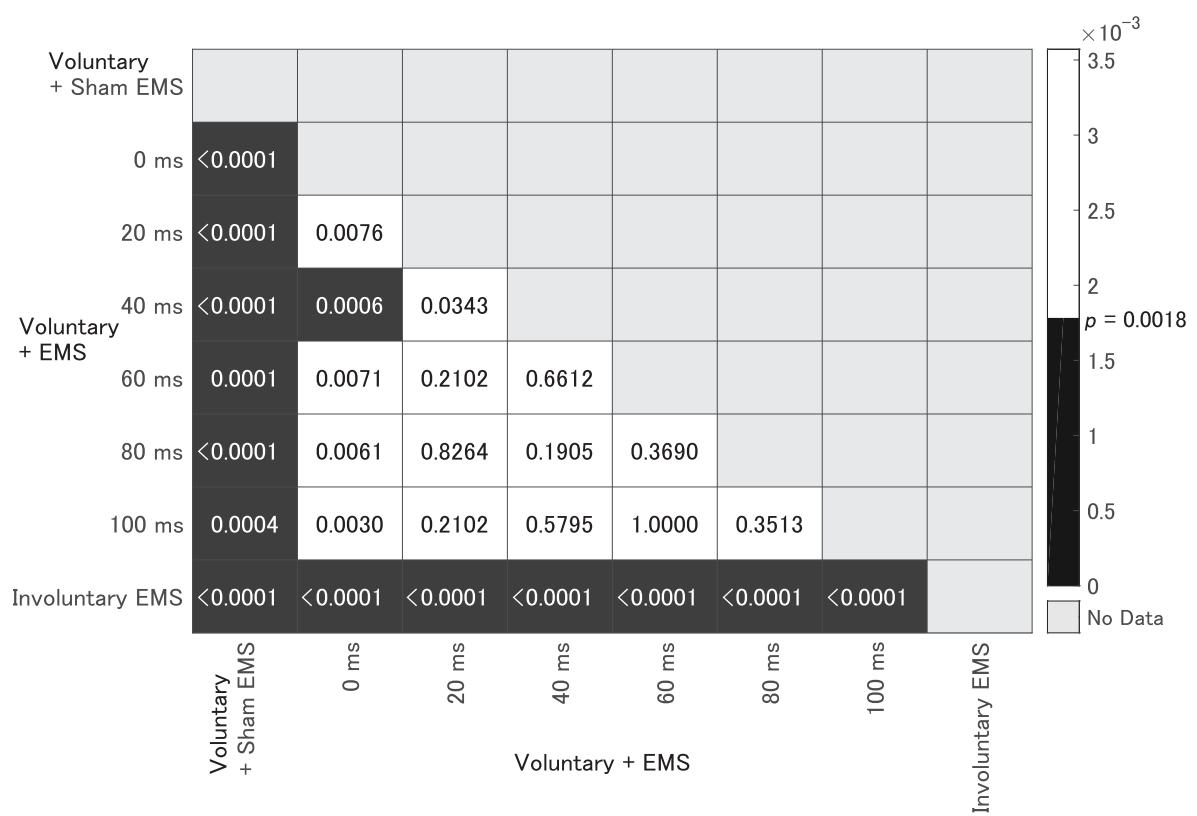


図 3.3: Heatmaps showing p -values of multiple comparisons of paired t-tests with Bonferroni correction. Combinations of conditions with significant differences are shaded in black.



(c) Self-reported sense of agency.

図 3.3: Heatmaps showing p -values of multiple comparisons of paired t-tests with Bonferroni correction. Combinations of conditions with significant differences are shaded in black.

まず最初に、6つのEMS印加条件の中で、スイッチ押し運動の高速化に寄与した条件を明らかにする。提案印加手法において、EMSは研究対象者が随意的にスイッチを解放した後に印加されるため、EMSの高速化効果はスイッチ解放からスイッチ押下までの時間、すなわちスイッチ押し完了時間の短縮として現れる（図3.2上図の実線）。EMSの印加時刻（図3.2上図の破線）が早くなるに従い、スイッチ押し完了時間が短縮された。そこで、Bonferroni補正後の対応ありt検定を用いてスイッチ押し完了時間の条件間比較を行い、随意+偽EMS条件と、0ms, 20ms条件間に有意な差があることを明らかにした（ $p = 0.0002$ 、図3.3a）。EMS印加時刻からスイッチ押し完了時間までの間隔、すなわちEMS作動時間（図3.2上図の棒グラフ）に対して、Bonferroni補正後の対応ありt検定を行った結果、0ms条件が、非随意条件よりも有意に長いことを明らかにした（ $p = 0.0002$ 、図3.3b）。これは、研究対象者がスイッチから指を離す際の伸展運動が、スイッチ解放と同時に印加されたEMSが誘発する屈曲運動によって、相殺された可能性がある。以上の結果は、20ms条件のEMSが、随意運動を妨げることなくスイッチ押し運動の高速化を実現したことを見唆す。

判断誤差および知覚シフトの平均と標準偏差を表3.1に、知覚シフトの平均と標準偏差を図3.2の中央図に示す。8つの条件毎に、実験1と同様に、知覚シフトの有意性を対応ありt検定を用いて調査した。行動タスクの判断は、随意+EMS条件の20ms条件のみにおいて、有意に遅く（ $p = 0.0160$ ）、これ以外の条件で有意な知覚シフトは観察されなかった（表3.1）。音タスクの判断は、すべての条件で有意に早かった（ $p < 0.0001$ ）。したがって、随意+EMSの20ms条件のみが、単体の随意運動と同じように有意なintentional binding効果を示した。更に、20ms条件における知覚シフトの有意性は、平均の差を標準化した効果量が小さくない（行動タスクではCohen's $d = 0.2834$ 、音タスクでは $d = 1.230$ ）ことによって裏付けられる。

明示的に報告された運動主体感の四分位数を、図3.2の下図の箱ひげ図で示す。随意+偽EMS条件における運動主体感は、6つのEMS印加条件で得られた運動主体感よりも有意に低く（ $p < 0.0018$ 、図3.3c）、非随意EMS条件よりも有意に高い（ $p < 0.0001$ 、図3.3c）。随意+EMS条件内では、0ms条件と40ms条件間（ $p = 0.0006$ ）を除いて、運動主体感に有意差はない。明示的に報告された運動主体感の中央値は、0ms条件（中央値3）を除いて4-5の範囲で推移しており、特定の傾向は見られなかった。0ms条件において明示的な運動主体感が低下したことは、EMS作動時間が有意に短縮したことと関連して、EMS誘発運動と随意運動が干渉したことを示唆する。有意なintentional binding効果があった20ms条件の明示的な運動主体感は、随意+偽EMS条件よりも有意に低かった一方で、過半数の試行で4以上、最大で6の運動主体感が回答された。

表 3.1: Judgment errors, perceptual shifts, and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 2.

Condition	Judgment event	Mean judgment error (S.D.) [ms]		Mean perceptual shift (S.D.) [ms]
		Baseline	Operant	
Voluntary + Sham EMS	Action	12 (88)	35 (68)	23 (68), $t(16) = 1.377; p = 0.1876$
	Tone		-103 (87)	-123 (86), $t(16) = 5.928; p < 0.0001$
0 ms	Action	8 (82)	25 (74)	16 (42), $t(16) = 1.620; p = 0.1247$
	Tone		-106 (108)	-126 (81), $t(16) = 6.394; p < 0.0001$
20 ms	Action	16 (72)	39 (87)	23 (35), $t(16) = 2.692; p = 0.0160$
	Tone		-79 (84)	-98 (70), $t(16) = 5.669; p < 0.0001$
Voluntary + EMS	Action	19 (83)	27 (74)	8 (58), $t(16) = 0.538; p = 0.5982$
	Tone		-85 (96)	-105 (61), $t(16) = 7.063; p < 0.0001$
60 ms	Action	9 (67)	40 (93)	31 (69), $t(16) = 1.842; p = 0.0841$
	Tone		-97 (82)	-117 (76), $t(16) = 6.350; p < 0.0001$
80 ms	Action	4 (127)	29 (80)	25 (115), $t(16) = 0.905; p = 0.3789$
	Tone		-89 (101)	-109 (81), $t(16) = 5.552; p < 0.0001$
100 ms	Action	33 (54)	42 (56)	9 (34), $t(16) = 1.109; p = 0.2838$
	Tone		-74 (92)	-94 (96), $t(16) = 4.015; p < 0.0001$
Involuntary EMS	Action	44 (76)	56 (100)	12 (51), $t(16) = 0.947; p = 0.3575$
	Tone		-86 (95)	-106 (71), $t(16) = 6.110; p < 0.0001$
Tone	Tone	20 (77)		

最後に、もう一つのアプローチとして、研究対象者が経験した主観的な間隔長の変化を、判断誤差から再構築して検討する [50, 51, 56]. 実験 1 と同様に知覚タスク間隔を算出し、ベースライン条件とオペラント条件の知覚タスク間隔の平均と標準偏差を表 3.2 に示す。オペラント条件とベースライン条件の知覚タスク間隔を対応あり t 検定で比較した結果、全ての条件で、オペラント条件の知覚タスク間隔はベースライン条件よりも有意に短縮された ($p < 0.0001$).

表 3.2: Interval lengths and paired t-test results between baseline and operant conditions in Experiment 2.

Condition	Mean interval (S.D.) [ms]		paired t-test	
	Baseline	Operant		
Voluntary + Sham EMS	258 (86)	111 (90)	$t(16) = 5.633; p < 0.0001$	
0 ms	262 (77)	119 (74)	$t(16) = 7.535; p < 0.0001$	
20 ms	254 (75)	133 (95)	$t(16) = 6.303; p < 0.0001$	
Voluntary + EMS	40 ms 60 ms 80 ms 100 ms	251 (85) 261 (66) 266 (84) 237 (56)	251 (73) 139 (96) 132 (93) 134 (94)	$t(16) = 5.086; p < 0.0001$ $t(16) = 5.225; p < 0.0001$ $t(16) = 3.738; p < 0.0001$ $t(16) = 4.522; p < 0.0001$
Involuntary EMS	226 (55)	109 (97)	$t(16) = 4.564; p < 0.0001$	

3.4 考察

本実験の条件における行動タスクは、いずれも研究対象者がスイッチを押す、もしくは EMS がスイッチを押すタスクであり、行動タスクと音タスクの間にシステム上の因果関係がある。随意的な提案スイッチ押し運動と、EMS に誘発されるスイッチ押し運動を組み合わせた随意 + EMS 条件では、スイッチ押下時刻が、自身の意図した時刻よりも先行した場合に運動の随意性が失われると考えられる。加えて研究対象者は、EMS によって妨害された場合であっても、運動を取り止めることなくスイッチ押し運動を遂行しており、EMS が自分の意図よりも早くスイッチを押した場合に、運動を取りやめるようには指示しなかった。つまりこの条件は、TMS 非随意運動が先行して運動したときに運動を停止するように指示された場合 [130] や、研究対象者自身が運動を抑制した場合 [133] とは異なる。したがって本実験の随意 + EMS 条件は、実行中の運動意図と整合する EMS 非随意運動が、20 ms 毎の異なる時刻指標によって与えられた際に、運動の意図性がどの程度失われたかを明らかにする条件であるといえる。

運動主体感の 2 つの尺度を用いた計測からは、EMS 印加条件のほぼ全ての条件で意図性が抑制されたことが示唆された。更に、行動タスクのベースライン条件における判断誤差が、随意運動を含む条件であっても全て平均的に判断が遅れる傾向であることからも、運動が自らの意図した時刻と異なって早く生じ、したがって意図性が失われていることが

示唆される。行動タスク判断は、ほとんどの条件で有意な知覚シフトがなく、明示的な運動主体感も随意 + 偽 EMS 条件よりも有意に低かった。また、両タスクにおける知覚シフトは、運動を抑制した条件における行動タスク [130] や音タスク [133] の unbinding 方向のシフトとは異なり、定性的な変化はいずれも binding 方向に変化した。この結果は、印加された EMS が随意運動を妨害したり高速化したりした場合に、随意性は失われた一方で、運動の抑制は行われなかったことを示唆する。ただし、全ての条件で音タスク判断が有意かつ強固に bind したことについては、実験 1 の結果も踏まえて、実験デザイン自体の影響を考慮すべきである（詳細な考察は 5.1.2 節を参照）。

随意運動と EMS 運動を組み合わせた条件の中で、唯一 20 ms 条件において、有意な action binding と tone binding が観察された。この有意な知覚シフトは、実験 1 の単体の随意運動条件で観察されたような、典型的な intentional binding 傾向と整合した。一方で、20 ms 条件の効果は、本実験の非随意 EMS 条件が再現した実験 1 の結果、すなわち有意な tone binding と有意ではない action binding の結果とは異なる傾向を示した。意図的な運動のみが有意な action binding 効果をもたらしたという実験 1 の結果をそのまま適用すると、この結果は、20 ms 条件のみで運動の意図性が維持されたことを意味する。

ここで、20 ms 条件において明示的に報告された運動主体感は中央値 4 であり、intentional binding 効果のように突出して高く維持されているわけではない。この支援レベルに応じた連続的な運動主体感変化は、EMS 高速化支援における明示的な運動主体感報告 [111, 129] と一致した。ただし、本実験で明示的に報告された運動主体感は 3–5 の範囲で減少と増加を繰り返しながら連続的に推移している。40 ms から 0 ms にかけて単調減少の傾向があった一方で、それ以外には特定の傾向は観察されず、したがって本実験で明示的に報告された運動主体感のみから最適な印加指標を特定することは難しい。一方で、20 ms 条件のみで action binding 効果の増強が観察されたことは、カーソル操作支援を対象とした報告において、一定の支援レベルを超えると intentional binding 効果が急激に減弱する報告 [97] を踏まえると、ユーザの運動主体感経験を構成する知覚変化をより鋭敏に反映した可能性がある。

ただし、随意 + 偽 EMS 条件では、与えられた電気刺激が運動に寄与しておらず運動が完全に随意的に達成されたにもかかわらず、行動タスク判断に有意な変化がない。これは、実験 1 の随意条件と偽 EMS 条件が組み合わされたことによって、偽 EMS の刺激感が時刻判断の知覚シフトに負の影響を与えて intentional binding 効果を減弱した可能性がある一方で、意図性とは矛盾した結果である。したがって、20 ms 条件において観察された有意な intentional binding 効果は、運動主体感が維持されたこととの関連性が示唆

された一方で、その他の条件における知覚シフトは運動の意図性と矛盾する結果も得られたことから、この実験のみで結論を出すことは難しい。

一方、行動–感覚タスク間隔は、実験 1 と同様に全ての条件において有意に短縮された ($p < 0.0001$)。実験 1 と同様に、全く運動のない非随意 EMS 運動であっても、随意運動と同等の binding 効果が生じることが再度報告された。このタスク間隔の短縮は、有意で強固な tone binding 効果による寄与が大きい。

3.5 まとめ

この実験では、提案する随意的なスイッチ押し運動と、0–100 ms 間の 20 ms 刻みのオフセット後に印加された EMS による非随意的なスイッチ押し運動を組み合わせた運動を対象として、intentional binding 効果を計測した。スイッチから指を離してから 20 ms 後に EMS を印加した条件のみが、有意な action binding 効果を生じた。この結果は、実験 1 における随意的なスイッチ押し運動の intentional binding 効果と一致し、EMS による非随意的なスイッチ押し運動の効果とは矛盾する結果である。また、スイッチ押し時刻の分析からは、この特定された条件下の EMS が随意運動を妨げることなくスイッチ押し運動を有意に高速化したことが示された。したがって、特定された EMS 支援レベル条件では、実際の運動は EMS によって達成されたが、支援を受けたユーザは随意運動と近しい知覚時刻変化を経験した。これらの結果は、20 ms のオフセットで印加された EMS が、スイッチ押し運動の高速化と運動主体感の維持を両立する可能性を示唆する。更に、この特定された EMS 印加時刻指標は、支援レベルに応じて連続的に変化する明示的な運動主体感計測からは特定が難しい。したがってこの結果は、適切な EMS 高速化支援レベルの決定のために、支援レベルに応じたユーザの知覚変化を鋭敏に計測可能な intentionnal binding 尺度が有用であることを示すものである。ただし、一部条件の知覚シフトは行動タスクの意図性と矛盾した結果を示し、解釈を複雑にする。

そこで次の評価実験（4 章）では、本実験の intentional binding 計測から特定された 20 ms 条件と、スイッチ押し運動の有意な高速化に成功したが action binding 効果が有意ではなかった 0 ms 条件の比較を試みる。より一般的なタスクである反応時間タスクにおいて、2 種類の EMS 印加時刻指標が、スイッチ押し運動の高速化と運動主体感の維持を両立可能かどうかを評価する。

第 4 章 特定された高速化 EMS 支援レベルの評価

4.1 はじめに

本実験の目的は、反応時間タスク実験を通して、3 章の実験 2 の intentional binding 計測によって特定された EMS 印加時刻指標の支援効果を、高速化支援と運動主体感の維持の両面から比較検証することである。実験 2において、運動の高速化支援と binding 効果の維持を両立した 20 ms 条件と、高速化支援には成功したが binding 効果が減弱した 0 ms 条件の 2 つを比較する。先行研究 [111] と同様に、研究対象者が視覚刺激に応じて運動を開始する典型的な反応時間タスクを対象としていることで、暗示的な運動主体感計測によって特定した EMS 印加時刻指標が、明示的な運動主体感計測に基づいて特定された指標と矛盾のない効果をもたらすことを示す。

4.2 実験手法

4.2.1 研究対象者

0 ms 条件には右利き健常者 8 名（平均 22.1 (S.D. = 0.93) 歳、全て男性）が、20 ms 条件には右利き健常者 10 名（平均 22.6 (S.D. = 1.4) 歳、全て男性）が参加した。サンプルサイズは文献 [111] の研究に基づいて事前に決定された。いずれの研究対象者も実験 1 および 2 に参加していない。また、両条件で重複した研究対象者は 5 名である。全ての研究対象者から、大阪大学基礎工学研究科における「人を対象とした研究に関する倫理委員会」で承認を受けた手順に則り書面でインフォームドコンセントを取得した（承認番号：R4-12）。なお、いずれの研究対象者も過去に EMS の経験がある。

4.2.2 実験手順

図 4.1 に実験タスクを示す。研究対象者はディスプレイ上に提示された条件（スイッチを押す手指の二つの待機条件: LED の点灯後にスイッチを押す、もしくは LED が点灯しても運動せず弛緩したまま待機する）を読んだ上で、実験開始の合図として左手でスイッチを押すように指示された。研究対象者は以下の 4 種類のスイッチ押下タスクを行った後、運動主体感を 7 段階リッカートで回答するように要求された。

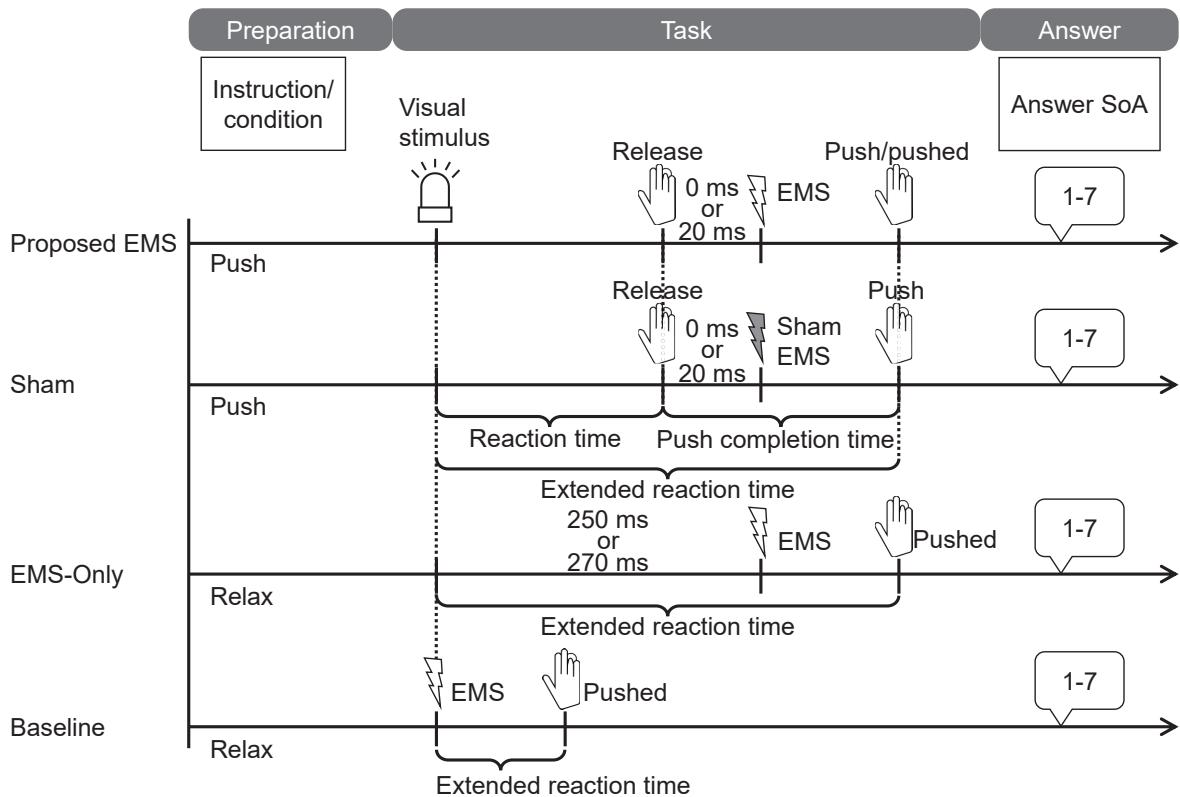


図 4.1: Tasks in experiment 3.

提案 EMS 条件

研究対象者は、LED の点灯後、できるだけ早く提案スイッチ押し運動を行うよう指示された。研究対象者によるスイッチ解放から 0 ms または 20 ms 後に EMS が与えられた。

偽 EMS 条件

研究対象者には提案 EMS 条件と同じ指示が与えられ、同じ時間遅れ後に、運動が生じない偽 EMS が印加された。

EMS-Only 条件

研究対象者は、LED が点灯しても運動を行わず、スイッチの上に指を置いた状態で弛緩したまま電気刺激を受けるように指示された。視覚刺激から指がスイッチを離すまでの反応時間を 250 ms と仮定して [134]、スイッチを押す EMS は、0 ms 条件では視覚刺激から 250 ms 後に、20 ms 条件では視覚刺激に対する反応時刻の 20 ms 後、すなわち視覚刺激から 270 ms 後に印加された。

Baseline 条件

研究対象者は、EMS-Only 条件と同様の指示を受け、EMS は視覚刺激と同時に与えられてスイッチ押し運動を達成した。この条件は、運動開始の指示と EMS の開始が同時に提供されるような、典型的な EMS システムを想定している。

全ての条件で電気刺激が印加されることをあらかじめ研究対象者に伝えた。4 種類のタスクはそれぞれ 20 試行が設定され、全部で 80 試行が無作為順に提示された。

システム構成は実験 1, 2 のシステムから Libet clock とスピーカを取り外して使用した。各々の EMS, 偽 EMS の刺激パラメータは、実験 1, 2 と同様に研究対象者毎に調整された。ただし 1 名の研究対象者は環指の屈曲を誘発できなかったため、中指で代替して実験を行った。

4.3 結果

全ての条件で、視覚刺激からスイッチ押下までの時間を拡張反応時間と定義して計測した。提案 EMS 条件と偽 EMS 条件では、反応時間タスクとして視覚刺激に応じてできるだけ早くスイッチを解放するタスクと、スイッチを押下するタスクの 2 つが結合されているため、拡張反応時間は一般的な反応時間よりも長い。本実験における反応時間である、視覚刺激からスイッチ解放までの時間は、0 ms 条件で平均 240.5 ms, 20 ms 条件で平均 238.5 ms であり、反応時間が約 250 ms の先行研究 [134] と比較して妥当であるといえる。拡張反応時間が 400 ms 以上の試行は、研究対象者の注意が散漫であったと見做して除去した。随意運動を伴う 2 条件（提案 EMS, 偽 EMS 条件）は、追加で、スイッチ解放からスイッチ押下までの時間をスイッチ押し完了時間として計測した。注意点として、提案する EMS 印加手法は、研究対象者が随意的にスイッチを解放してから初めて EMS が印加されるため、EMS の高速化効果はこのスイッチ押し完了時間の短縮に現れる。

拡張反応時間、スイッチ押し完了時間、反応時間、そして運動主体感の四分位数を図 4.2, 4.3 に箱ひげ図で示す。Jarque-Bera 検定から正規性が確認されなかったため、Bonferroni 補正後の Wilcoxon 符号順位検定を行った

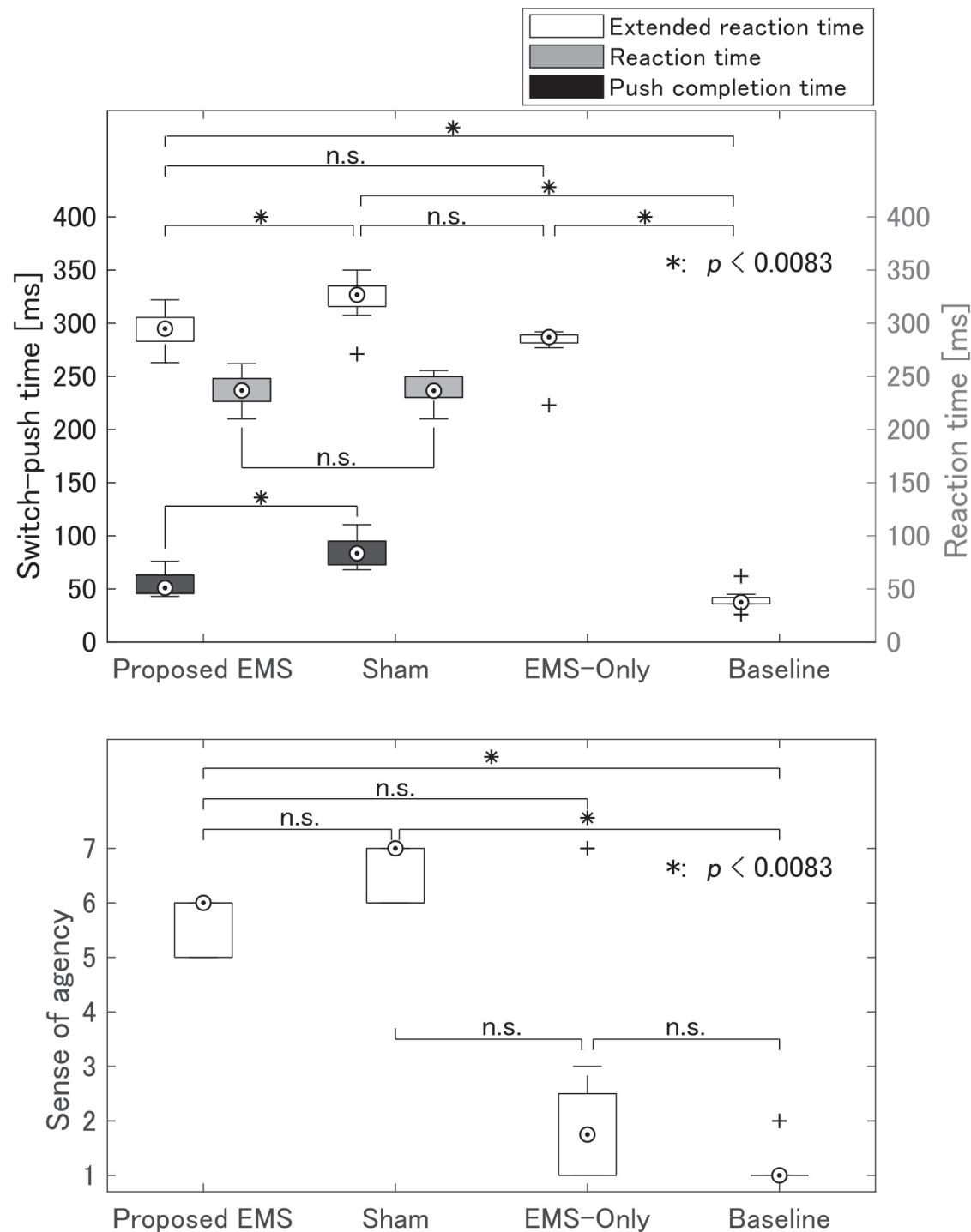


図 4.2: Median of the switch-push time and the sense of agency in 0 ms condition of experiment 3.

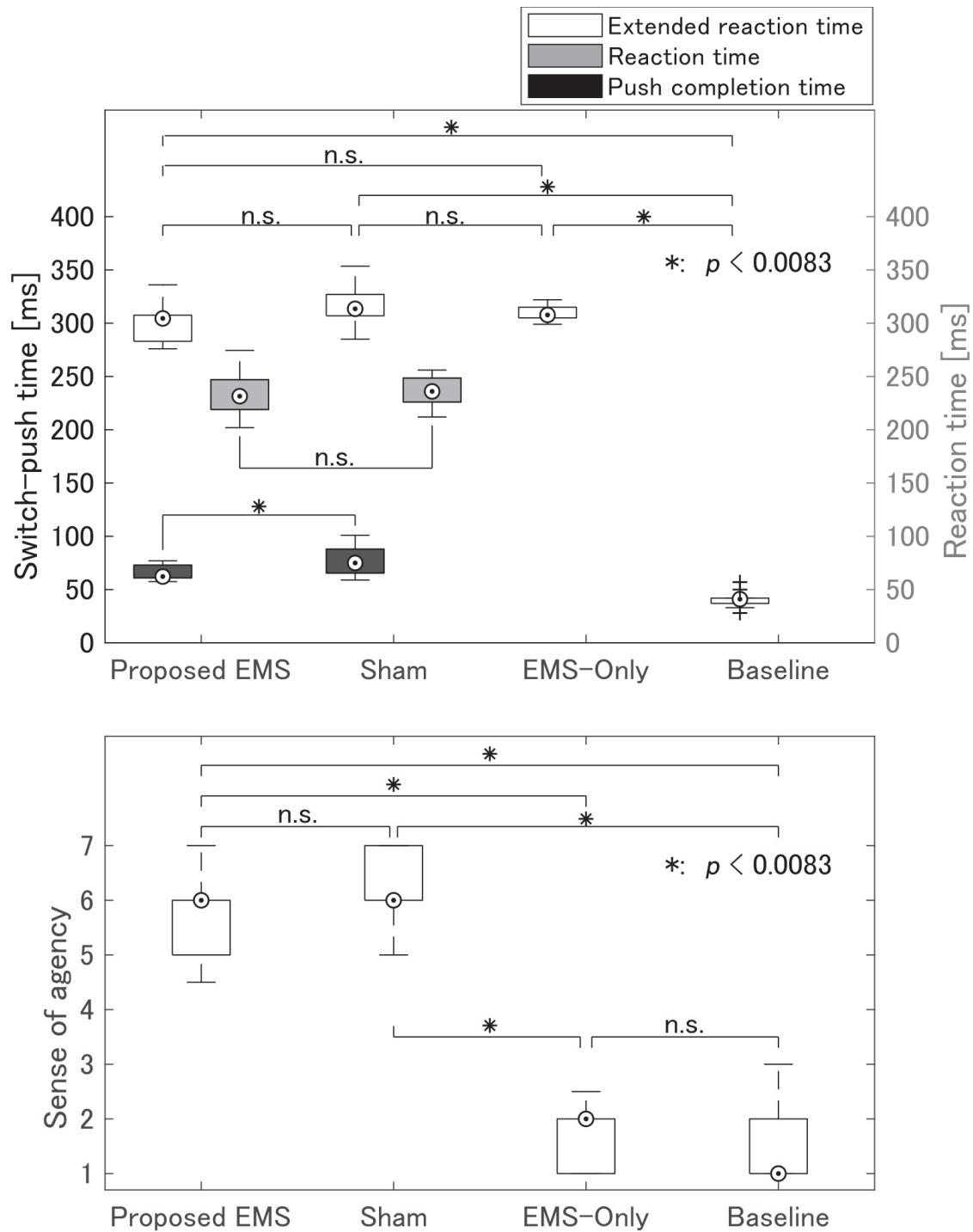


図 4.3: Median of the switch-push time and the sense of agency in 20 ms condition of experiment 3.

表 4.1: Median, lower quartile (Q1), and upper quartile (Q3) of each parameter in 20 ms condition.

(a) Extended reaction time.

	Median [ms]	(Q1–Q3)					
Proposed EMS	305	(283–307.5)	□	n.s.	□		
Sham	314	(307–327)	□	n.s.	□	n.s.	
EMS-Only	308	(305–315)	□	*	□	*	
Baseline	41	(37–42)	□	*	□	*	

*: $p < 0.0083$

(b) Push completion time.

	Median [ms]	(Q1–Q3)		
Proposed EMS	62	(61–73)	□	*
Sham	75	(65.5–88)	□	*

*: $p < 0.0083$

(c) Reaction time.

	Median [ms]	(Q1–Q3)		
Proposed EMS	232	(219–247)	□	n.s.
Sham	236	(226–248.5)	□	n.s.

*: $p < 0.0083$

(d) Self-reported sense of agency.

	Median [-]	(Q1–Q3)					
Proposed EMS	6	(5–6)	□	n.s.	□		
Sham	6	(6–7)	□	*	□	*	
EMS-Only	2	(1–2)	□	n.s.	□	*	
Baseline	1	(1–2)	□	n.s.	□	*	

*: $p < 0.0083$

表 4.2: Median, lower quartile (Q1), and upper quartile (Q3) of each parameter in 0 ms condition.

(a) Extended reaction time.

	Median [ms]	(Q1–Q3)			
Proposed EMS	295	(283–305.5)	[*]
Sham	327	(315.75–335)	[n.s.]
EMS-Only	287	(281.5–289)	[*]
Baseline	38	(36–42)	[*]

*: $p < 0.0083$

(b) Push completion time.

	Median [ms]	(Q1–Q3)			
Proposed EMS	51	(45.75–63)	[*]
Sham	84	(72.75–95)	[*]

*: $p < 0.0083$

(c) Reaction time.

	Median [ms]	(Q1–Q3)			
Proposed EMS	237	(226.5–248)	[n.s.]
Sham	237	(230.25–249.75)	[n.s.]

*: $p < 0.0083$

(d) Self-reported sense of agency.

	Median [-]	(Q1–Q3)			
Proposed EMS	6	(5–6)	[n.s.]
Sham	7	(6–7)	[n.s.]
EMS-Only	2	(1–2.5)	[n.s.]
Baseline	1	(1–1)	[*]

*: $p < 0.0083$

まず、両印加時刻条件におけるスイッチ押し運動の短縮効果を、提案 EMS 条件と偽 EMS 条件を比較から示す。スイッチ押し完了時間について着目すると、いずれの印加時刻条件でも提案 EMS 条件は偽 EMS 条件よりも有意にスイッチ押し完了時間が短い（0 ms 条件では $p = 0.0078$, 20 ms 条件では $p = 0.0039$ ）。一方、拡張反応時間については、0 ms 条件では有意に短縮された ($p = 0.0078$) が、20 ms 条件における短縮は有意ではなかった ($p = 0.0840$)。提案 EMS と偽 EMS 条件の間の一般的な反応時間を比較すると、いずれの印加時刻条件も有意差はない（0 ms 条件は $p = 0.8438$, 20 ms 条件は $p = 0.6250$ ）。以上から、0 ms と 20 ms の両方の印加時刻条件において、提案 EMS が随意運動を有意に高速化可能であることが示された。両者を比較すると、拡張反応時間（反応時間 + スイッチ押し完了時間）にも影響を及ぼすほど安定した高速化を実現した 0 ms 条件の方が、高速化効果が高いことが示めされた。

次に、運動の高速化を達成した提案 EMS 条件の運動主体感について着目する。まず、提案 EMS 条件を、随意運動のない条件（EMS-Only・Baseline 条件）と比較すると、0 ms 条件における EMS-Only 条件と提案 EMS 条件の間 ($p = 0.0156$) を除いて、有意に高く運動主体感が維持された（0 ms 条件の Baseline 条件は $p = 0.0078$, 20 ms 条件はいずれも $p = 0.0020$ 、ただしいずれも中央値 6）。続いて、提案 EMS 条件における運動主体感の損失を、運動支援のない偽 EMS 条件と比較すると、運動主体感の損失はいずれの印加時刻条件も有意に発生しなかった（0 ms 条件は $p = 0.0156$, 20 ms 条件は $p = 0.1875$ ）。更に、提案 EMS 条件における運動主体感の損失の程度を、標準偏差を基準に標準化した平均の差を示す効果量として Cohen's d を用いて比較すると、0 ms 条件 ($d = 1.932$) よりも 20 ms 条件 ($d = 0.5460$) の方が損失量が少ないことが明らかとなった。また、偽 EMS 条件の運動主体感が完全でない（0 ms 条件は mean = 6.41, S.D. = 0.753, 20 ms 条件は mean = 6.15, S.D. = 1.07）ことから、一部の研究対象者が、電気刺激特有の刺激感を感じた影響で運動主体感を失ったことが示唆される。以上から、0 ms と 20 ms の両方の印加時刻条件が、運動主体感を偽 EMS 条件と同程度に維持可能であることが示された。両者の比較からは、20 ms 条件の方が運動主体感の損失を軽減する効果が高いことが示めされた。

4.4 考察

本実験で比較した 2 つの EMS 印加時刻条件、0 ms 条件と 20 ms 条件は、いずれもスイッチ押し完了時間を短縮すると同時に、運動主体感の損失を軽減可能であることを示した。中でも、20 ms 条件は運動主体感を維持する効果が高く、0 ms 条件は運動を高速化

する効果が高い。したがって、運動の高速化と運動主体感の維持にはトレードオフの関係があることが指摘でき、高速化支援レベルが高まると、明示的に報告された運動主体感が低下する効果が観察された [96, 111, 129]。0 ms 条件では最大 44.5 ms（平均 30.3 ms）の高速化効果を発揮しており、20 ms 条件の最大 28.0 ms（平均 11.6 ms）よりも高速化効果が高い。一方、20 ms 条件における運動主体感は、2 名の研究対象者の回答の中央値が 7 であったが、0 ms 条件の提案 EMS 条件では回答の中央値が 7 である研究対象者はいなかった。

20 ms 条件の Proposed EMS 条件が、0 ms 条件よりも運動主体感が高いと報告されたことは、実験 2 の intentional binding 計測実験の結果から妥当性が裏付けられる可能性がある。実験 2 における action binding 効果は、20 ms 条件のみで有意に維持され、更に 0 ms 条件よりも高く、かつ随意コントロール条件と同レベルに維持されていた。また tone binding 効果は、20 ms 条件と 0 ms 条件の両方で有意に高く維持されていた。一方、本実験で研究対象者によって明示的に報告された運動主体感は、20 ms 条件の方がわずかに運動主体感の維持に効果的な結果を示した。したがって、本研究条件で明示的に報告された運動主体感は、action binding 効果と特に関連付けられたことが示唆され、すなわち運動の予測要素と事後推論要素の組み合わせによって形成された可能性が示唆される [58]。ここで予測要素については、実際に達成された運動は、高速化支援 EMS によって研究対象者の随意運動よりも有意に早く、したがって予測とは時間的に異なるフィードバックが得られた可能性が高い。事後推論要素については、本印加手法の特徴を踏まえると、研究対象者の運動意図と EMS が達成した運動との間に見かけの心的因果が成り立つ可能性がある [16]。提案の EMS 印加手法は、トリガとなる運動がユーザによって開始されていることから、研究対象者の運動意図が実際の運動の前に存在するという事前性、そして運動意図と一致した運動結果が得られるという一貫性を満たし、そして EMS によってユーザ自身の身体が作動されることで、運動を達成したのは他ならぬ自分自身の身体である（ただし EMS による運動介入を受ける）という部分的な排他性を満たす支援であるといえる [17]。更に、タスクの結果が望ましく、目的に即した高いパフォーマンスが得られるほど、運動主体感が高まることが知られている [17, 23, 135]。本実験における反応時間タスクは、視覚刺激後に高速な運動を促すタスク設定であるため、高速な運動を実現する EMS 誘発運動を事後推論的に自己帰属した可能性がある。したがって、本実験の提案 EMS 条件において研究対象者が報告した運動主体感は、実験 2 で計測された binding 効果と関連付けた考察から、事後推論的要素の寄与によって形成されたことが示唆される。

最後に、本実験の EMS 印加条件は、実験 2 の随意 + EMS 条件の 20 ms 条件・0 ms 条件と同じであったにもかかわらず、明示的に報告された運動主体感は本実験条件の方が

いずれの条件も増加傾向を示した。この理由は、主に2つの実験環境の差異が要因となって、本実験におけるEMS誘発運動を過剰に自己帰属するような判断バイアスが生じたためであると考えられる（詳細な考察は5.2節を参照）。

4.5 まとめ

本実験では、印加指標決定実験（実験2）で運動を有意に高速化した2つの条件、すなわち、action binding効果を維持した20 ms条件と、action binding効果を損失した0 ms条件を比較した。反応時間タスクを用いた検証の結果、両条件が運動時間の有意な短縮と、明示的な運動主体感の維持の両立に成功した。中でも、20 ms条件のEMS支援は、明示的に報告された運動主体感の損失が少なく、運動主体感の維持に優れていることが示された。この結果は、20 ms条件において典型的なintentional binding効果が得られたという実験2の結果と整合する。したがって、本実験では、随意運動とEMSによる非随意運動を組み合わせた運動に対するintentional binding効果が、運動中の明示的な運動主体感の維持と関連することを実験的に示した。

第 5 章 総合考察

ユーザとコンピュータデバイスが共同的に活動することで密接に統合される HInt 技術には、デバイスがユーザの運動技能を拡張して支援する際に、ユーザにとって継続的かつ潜在的な運動主体感を提供することが要求される。本研究では、EMS を用いたスイッチ押し運動の高速化支援を対象として、支援効果の最大化とユーザの運動主体感の損失の軽減を両立するための最適な EMS 印加時刻指標を、暗示的な運動主体感尺度である intentional binding 効果の計測に基づいて特定することを目的とした。明示的な運動主体感の報告の判断バイアスを回避し、運動主体感の定量的計測として期待される intentional binding 効果の計測は、支援レベルに応じたユーザの鋭敏な時間知覚変化を捉えることが可能であり、したがって最適な EMS 印加時刻指標の特定に有用である可能性がある。まず、行動タスク判断の有意な知覚シフト (action binding) が存在することによって、随意的なスイッチ押し運動を、EMS による非随意的なスイッチ押し運動と区別可能であることを明らかにした（実験 1）。次に、EMS 印加オフセットを段階的に変化させたときの intentional binding 効果を計測し、特定の EMS 印加時刻指標が、単体の随意運動と同様に有意な action binding 効果が生じることを発見した（実験 2）。この特定された EMS 印加時刻指標（20 ms 条件）で印加された EMS は、他の高速化支援可能な EMS 印加時刻指標（0 ms 条件）と比較して、運動主体感の維持に効果的であり、同時に運動を有意に短縮可能であることが、反応時間タスクを通して実証された（実験 3）。

5.1 暗示的運動主体感としての知覚シフト

本研究が目的とした、提案する随意的なスイッチ押し運動と、EMS が誘発するスイッチ押し運動などのその他の非随意的な運動との区別は、action binding 効果の計測によって達成されることが明らかにされた。本節では、2 つの実験を通じた知覚シフトやタスク間隔の検討を行う。

5.1.1 action binding

単体の非随意 EMS 運動条件（実験 1, 2 で共通）は、非随意的にスイッチを押す行動タスクと、音タスクの発生との間に因果関係がある条件であった。したがって、非随意 EMS 条件における行動時刻が、実際より遅かったと判断されるような binding 傾向の知

覚シフトを、有意ではないが定性的に示したことは、過去の因果的な非随意運動の観察における報告と一致する [50, 51, 55]. EMS・偽 EMS と随意運動を組み合わせた条件（実験 2）では、研究対象者の継続的な運動に起因して、行動タスク判断は（20 ms 条件を除いて）有意ではないが定性的に binding 方向の知覚シフトを示した。これは、TMS 誘発運動の方が自分よりも早く運動を達成した場合に、随意運動を取りやめるよう指示された報告において、行動タスク判断が unbinding 方向の知覚シフトを示した結果 [130] とは異なる傾向であり、研究対象者が、EMS によって不随意的に運動しながらも運動を抑制しなかったことが示唆される。

5.1.2 tone binding

実験 1, 2 を通した全ての条件において、有意かつ強固な tone binding 効果が発生した。特に、実験 1 の偽 EMS 条件は、意図的な運動も因果関係もない単純な感覚イベントが行動タスクとして提示されたにもかかわらず、音タスク判断は有意な binding 効果を示した。これは、時間的に連続した 2 つの感覚タスク（2 つの連続する音や、偽 TMS 刺激に連続する音）で観察されたような、音タスク判断の最小限のシフト [32] または unbinding 効果 [56] とは対照的な結果である。tone binding 効果は、音タスクの発生の予測に直接関係する [59] ことから、本実験で初めて報告された EMS および偽 EMS による電気刺激感覚が、研究対象者に音の開始を予測させるきっかけとなった可能性がある。ただし、この説明だけでは先行研究との矛盾を説明するにはおそらく不十分である。

この原因の一つは、実験環境は防音環境ではなかった影響によって説明できる可能性がある。tone の信頼性が低下するような白色雑音が追加された環境では tone binding 効果が増加する [38] ため、実験条件全体に共通して tone binding 効果が増強された可能性が考えられる。

もう一つの原因是、運動の自己帰属や、タスク間の因果関係に関する高次レベルの信念が形成されたことであると考える。この信念は、実験全体に共通する指示や、実験環境からの推論によって構築された可能性がある。本実験において実験者は、各タスクブロックの開始前に、どのタスク時刻を判断するかに依らず、すべてのタスクの存在について言及した。例えば、偽 EMS 条件のオペラント条件において音時刻を判断するタスクブロックの場合、実験者は研究対象者に、このブロックでは、運動を誘発しない電気刺激と、音が連続的に提示されることを説明した。この説明が判断タスク以外のタスクへの注意や期待を促し、音タスク判断の知覚シフトを強化するような自己帰属や因果性の誤った信念を形成した可能性がある [54, 55]。更に、偽 EMS 刺激タスクと音タスクの感覚タスクが常に近しい間隔（時間的接近）と同じ順序（一貫性）で繰り返し提示される（恒常的接続）こ

とで、本来は存在しない因果関係が誤って推論され [47]、したがって tone binding 効果が増強された可能性がある [46, 56].

5.1.3 タスク間隔長

行動–感覚タスク間隔は、実験 1 と 2 の全ての条件で有意に短縮された。この結果は一見すると、intentional binding 効果が運動主体感の暗示的尺度であるという主張と矛盾する。しかし、運動の意図性以外の要因が intentional binding 効果に寄与する可能性が指摘されている。主要なものは、推論された因果関係が binding 効果の要因であるという主張であり [46, 56]、2 つの対象間の因果関係の推論の手がかりとなる行動タスクとその結果の感覚タスクの随伴性を高めると binding 効果が増大することが報告されている [48]。その他、非随意的に実施される因果的な運動の観察において、意図的な運動と同等もしくはこれよりも弱い intentional binding 効果が生じることが報告されている。他者と行動意図を共有した場合、観察者と行為者で同等の binding 効果が発生する [50, 51] ことや、機械を介した運動 [52] や VR 空間における仮想の手 [53] の観察においても随意運動と同等の binding 効果が報告されている。その他に、知覚の一貫性が binding 効果に影響を及ぼす可能性 [33] や、高次の文脈情報 [54, 55] が binding 効果を増強することも示唆されている。本研究結果はこれらの報告に、EMS によって誘発された非随意運動において有意に intentional binding 効果が生じたことを付け加えるものである。

EMS による非随意運動や偽 EMS 刺激判断においても有意に発生した binding 効果は、有意かつ強固に生じた tone binding 効果の影響を強く反映している。したがって、tone binding 効果の考察と同様に、本実験で初めて報告された EMS・偽 EMS の電気刺激感覚が音発生時刻の予測性を高めた可能性が指摘できる一方、実験条件（実験者の予告的な指示がタスク発生への期待や因果関係の推論を促した）や実験環境（騒音による音タスクの信頼性の低下）が binding 効果を増加させた可能性もあり、本実験内ではこれらの要因を切り分けた解釈はできない。

5.2 明示的運動主体感の判断バイアス

実験 3 では、実験 2 の 20 ms 条件と 0 ms 条件で印加された EMS が、反応時間課題において運動主体感を維持しながら随意運動の高速化が可能かどうかを比較評価した。したがって、実験 3 の提案 EMS 条件は、実験 2 の随意 + EMS 条件の 0 ms 条件・20 ms 条件と同じ EMS 印加時刻指標を用いた条件であった。それにもかかわらず、実験 2 における随意 + EMS 条件の明示的な運動主体感は、いずれも随意 + 偽 EMS 条件よりも有

意に損失した一方、実験 3 における提案 EMS 条件の明示的な運動主体感は、いずれも偽 EMS 条件（随意運動と偽 EMS を組み合わせた条件）と有意差なく維持された。

主に 2 つの観点で、実験 2 と実験 3 の実験環境が異なることが、実験 3 において EMS による高速化支援中の運動主体感を増加させた要因であると考えられる。まず、実験 2 では複数の EMS 印加時刻指標が用いられたことに対し、実験 3 では実験毎に 1 種類の印加時刻指標のみが用いられたため、実験 3 の方が EMS に誘発される非随意運動の予測が容易であったことが挙げられる。コンパレータモデルによると、運動主体感は、予測信号と実際の運動の感覚効果とが一致するときに生じ [9, 12]、したがって、外部から加えられた運動のタイミングが予測可能であれば、その運動主体を自己帰属する可能性がある。次に、タスクに成功することが、運動の自己帰属に対して正のフィードバック効果を与えることが挙げられる。運動主体感を成立する認知的的手がかりとして、タスクの結果が望ましいほどタスクの実行者が自己に帰属され、事後推論的に運動主体感が高まることが報告されている [17, 23, 135]。したがって、スイッチができるだけ早く押すことを要求される反応時間タスクにおいて、随意運動に先制して印加されることで高速な運動を達成する EMS 介入運動を、積極的に自己帰属したことが予想される。一方で、実験 2 における intentional binding 実験のように、タスクの明確な目標がなく、タスクの成功や失敗のフィードバックが得られない環境でスイッチを押すタスクは、意図した運動タイミングと異なる EMS 誘発運動がより明瞭に感じられ、明示的な運動主体感が損なわれた可能性がある。実際に、実験 3 における随意的なスイッチ押し完了時間（0 ms 条件の参加者は、85.13 ms, 20 ms 条件の参加者は 77.55 ms）の方が、実験 2 における随意的なスイッチ押し完了時間（118.1 ms）よりも短縮されており、実験タスクの違いが研究対象者の運動に影響を与えていることが示唆される。この 2 つの要素、すなわち予測的手段がかりと事後推論的手段がかりが統合されて影響したことで、実験 3 において、運動主体感を強く感じるような判断バイアスが形成されたと考えられる [20]。

5.3 明示的な運動主体感計測が特定した EMS 印加指標との比較

提案された EMS 印加時刻指標の有効性を、運動主体感の明示的報告に基づいて EMS 印加時刻指標を特定した先行研究 [111, 129] との比較を通じて明らかにする。両者の EMS 印加手法が異なるため、明示的に報告された運動主体感に着目する。実験 2 の運動主体感の中央値は、EMS 印加時刻指標の遅延に応じて、3 から 5 まで緩やかな増加傾向で推移した（3.3 節の図 3.2）。先行研究では、EMS 印加時刻に応じた段階的な運動主体感の変化をシグモイド関数で近似し、その勾配が最も高い中間点を適切な印加時刻指標と

している。一方、本研究の EMS 印加手法の場合には、研究対象者自身の随意運動をトリガとして EMS を印加するため、随意運動よりも極端に早い支援を行うことができず、また運動主体感は全体的に勾配が緩やかである。したがって、本研究の EMS 印加時刻指標はシグモイド関数の中間点前後に該当すると考えられる。intentional binding 尺度の計測によって特定された 20 ms 条件は、明示的な運動主体感の中央値が 4 であり、また 20 ms から 0 ms へ減少を開始する直前であることから、シグモイド関数のおよそ中間点に相当するといえる。実際に、本研究の EMS 印加時刻指標決定実験（実験 2）において短縮されたスイッチ押し完了時間は平均 37.98 ms であり、先行研究 [129] の反応時間を短縮する先行ゲイン 40 ms と近しい値である。したがって、本研究結果が、運動主体感の明示的計測に基づく先行研究とほぼ同等の印加時刻指標を、運動主体感の明示的報告に依存せず特定できたことが示唆された。

5.4 提案 EMS 印加手法の利点

提案する EMS 印加手法は、明示的運動主体感計測から EMS 高速化支援タイミングを特定した先行研究 [111] とは対照的に、パーソナライズが不要で、環境やタスクの変化に対してロバストに支援が可能な利点がある。ユーザの挙動は、タスクの難しさや個人の運動戦略や運動技能の違い、試行毎の注意などの要因によって変化するため、先行研究のように、ユーザ毎の反応時間をあらかじめ計測する手法の場合は適用可能な環境が限定される。今回提案した印加手法は、EMS のトリガとなる運動が随意運動の必ず直前に生じるような印加手法を採用することで、異なる実験環境やタスク、ユーザに対しても高速化効果を発揮した。実際に、評価実験（実験 3）の参加者の随意的なスイッチ押し完了時間は、指標を決定した実験（実験 2）の参加者よりも 33.00–40.57 ms 程度短かったにもかかわらず、実験 3 における EMS は随意運動を有意に短縮することができた（0 ms 条件では $p = 0.0078$ 、20 ms 条件では $p = 0.0039$ ）。

第 6 章 結論

6.1 まとめ

ヒト-コンピュータ間のパートナーシップと称される HInt 技術は、ユーザとコンピュータの双方が共同的に目的を達成することで特徴づけられる。コンピュータは、ユーザの物理的・技能的な限界を拡張可能な一方、その拡張的支援は、ユーザの目標を達成するため運動意図を超えた支援を与えることにより、運動意図そのものを変容させるような介入・支援を行ったりすることで、ユーザの運動主体感を侵害する恐れがある。ユーザの運動主体感を損なわず、適切に維持すると同時に、最大限の支援効果を発揮することが、HInt 技術が受容されるために達成すべき必須課題である。

本研究は、ユーザの運動技能を拡張する代表的な HInt 技術である EMS を用いて、ユーザのスイッチ押し運動速度を拡張する支援を対象とした。そして、EMS によって段階的なレベルで高速化支援を受けるユーザの運動主体感を、運動の意図性に応じた時間知覚変化尺度である intentional binding 尺度の計測を通して、対象運動の高速化支援と運動主体感の維持を両立するために適切な支援レベルを特定することを提案した。

初期的検討としての実験 1 では、随意的なスイッチ押し運動と、EMS による非随意的なスイッチ押し運動を対象に、intentional binding 尺度を計測した。その結果、行動タスク時刻を実際よりも遅く知覚するという action binding 効果が、随意的なスイッチ押し運動のみで有意に生じるという結果を得た。したがって、EMS による非随意運動と随意運動を、暗示的尺度、中でも action binding 尺度によって区別可能であることを示した。これは、EMS に誘発された非随意運動を対象として intentional binding 尺度を導入した最初の報告である。更に、本研究で新たに設計した、スイッチを解放する事前動作が常にスイッチ押し運動の直前に発生するような一連のスイッチ押し運動タスクが、intentional binding 効果を妨げないことも明らかにした。

続けて、実験 2 では、EMS 印加オフセットを 0, 20, ..., 100 ms と変化させて段階的に高速化支援レベルを変化させた際の、ユーザの運動主体感経験の変化を、intentional binding 尺度を通して計測した。その結果、スイッチを解放する事前動作から 20 ms 後に EMS を印加する条件が、運動を有意に高速化すると同時に、唯一、随意運動と同様に action binding 効果を維持可能であることを明らかにした。

最後に, 反応時間タスクを通して比較検証を行った実験 3 では, 実験 2 の action binding 尺度の計測から特定された 20 ms の EMS 印加オフセットが, スイッチ押し運動を有意に高速化し, 同時に, 明示的に報告された運動主体感を有意な損失なく維持することを明らかにした.

以上より本研究は, intentional binding 尺度が EMS 高速化支援レベル下のユーザの運動主体感変化を鋭敏かつ暗示的に計測可能であることを明らかにし, EMS による運動技能支援とユーザの運動主体感維持を両立する, 最適な支援レベルを特定するために有用であることを示した.

6.2 貢献・展望

本研究では, HInt 技術としての EMS の支援効果を評価指標として, intentional binding 尺度の導入を提案した. 本研究の貢献と今後の展望を示す.

intentional binding 尺度への貢献

多数の段階的な支援レベルを経験するユーザの intentional binding 尺度は, 文献 [96,97] の他にほとんど報告がない. その理由は, おそらく支援レベルを再現性高く繰り返すことが困難であるためと考えられる. 本研究は, EMS の印加トリガとして取得可能な事前動作が常にスイッチ押し運動の直前に発生するようなスイッチ押しタスクを用いることによって, ユーザ自身の運動を基準として EMS を印加することで, 運動高速化支援レベルを繰り返し再現可能であることを示した.

本研究の結果は, ユーザの随意運動中に印加される EMS 誘発運動の印加時刻を 20 ms 毎に変化させることが, intentional binding 効果を大きく変化させることを示した. EMS 印加時刻に応じて binding 効果が極端な変化を示したことは, intentional binding 効果が明示的な運動主体感とは完全に一致しないことを示唆する.

HInt 技術としての EMS 印加手法への貢献

提案 EMS 印加手法は, Wegner らの提案する見かけの心的因果理論が成立するための三要素 [17] を部分的に満たす印加手法であると考えられる. 本研究の EMS 印加手法はユーザ自身の動作をトリガに EMS を印加するため, EMS 運動の直前に運動意図が存在するという「事前性」を満たし, 運動意図とその行動が一致するという「整合性」を満たす支援である. また, ユーザ自身の筋を直接作動することで運動介入が可能な EMS は, 運動が自分の身体によって達成されたという「排他性」を部分的に満たす. したがって,

意図した運動と実際に達成された運動が時間的に一致しない EMS 高速化支援下でも、これらの三要素が満たされることで形成された見かけ上の心的因果関係が、事後推論的に運動や感覚結果を自己帰属した可能性が示唆される。このことは、実験 2 の 20 ms 条件において有意な action binding 効果が生じたことによっても、事後推論的な運動主体感手がかりによる影響が示唆される [58].

実験 1 における個別の知覚シフトの検定は、随意運動と EMS 非随意運動の差異を示したが、一方で、行動–感覚タスク間隔の有意差検定は、EMS による非随意運動において随意運動と同様に intentional binding 効果が発生することを示した。この結果は、行動–感覚タスク間の因果関係が intentional binding 効果に強固に影響することを示唆する。したがって、提案する EMS 印加手法による非随意的な運動介入が、時刻認識の観点からは、随意運動と同等に自己帰属可能であることを示唆する結果であるといえる。実際に、20 ms 条件の EMS は実験 2, 3 を通して運動を有意に高速化しながらも、ユーザが明示的に報告した運動主体感は、実験 2 では中央値 4 (最大値 6), 実験 3 では中央値 6 (最大値 7) の高い値を維持している。これは、EMS を用いた運動支援が、運動主体感を維持する観点からは有力な支援手法であることを示唆する結果である。今後は、EMS 以外の運動支援・介入手法、例えば外骨格型デバイスなどを対象に intentional binding 尺度を計測することによって、更なる比較検証が望まれる。

提案手法の展望

本研究で提案した EMS 印加手法は、intentional binding 尺度を用いることで、運動主体感の維持と運動の高速化を両立可能な支援レベルを特定した。本研究の提案手法は、高速な反応速度が要求される環境下の運動支援に効果を発揮するだろう。例えば、高速で移動する物体をカメラの画角に捉えた瞬間にシャッタを押すことの支援などが想定可能である。更に、EMS の高速化支援効果が運動主体感を伴う場合には、EMS を取り外した後も持続することが報告されている [129]。この報告を踏まえると、提案手法の高速化支援も同様に運動学習に寄与する可能性が示唆される。例えば、短距離走者の反応時間トレーニングとして、スタートを合図する音に応じて EMS で身体を作動することを通した運動学習などが想定可能である。

EMS デバイスは、ユーザの間違いや躊躇いを補ってユーザの身体そのものを正確なタイミングで支援することが可能である。更に、ユーザが EMS による運動支援を拒否することも可能な、柔軟な運動支援デバイスとして機能することが期待できる。

付録 A binding 効果の条件間比較

本付録では、意図性の異なる行動タスク間で、intentional binding 効果を比較する。TMS やモータ生成運動、他者や VR 空間内の運動観察等、非随意運動を対象とした intentional binding 計測は様々な計測手法によって報告されているが、随意運動と有意に異なる binidng 効果の報告 [32–36, 39, 40, 44, 45, 130] と、随意運動と有意な差のない binding 効果の報告 [46, 49–53] が混在している。本付録の結果は、EMS による非随意運動と随意運動、そして両者を段階的な時間オフセットを設けて組み合わせた運動を対象として、intentional binding 効果の条件間比較を初めて報告した。

A.1 実験 1 の 3 条件間比較

A.1.1 結果

外れ値処理は 2.3 節と同様に実施した。知覚シフトの平均と標準偏差を図 A.1 に示す。

まず、action binding から tone binding を除した値である composite binding [136] について反復測定分散分析と事後比較を行う。これは、Libet clock 法によって計測される action binding 効果と tone binding 効果の合計値として用いられる。composite binding の反復測定分散分析からは、条件間の有意な主効果が示された ($F(2, 94) = 4.632; p = 0.0121$)。Bonferroni 補正後の対応あり t 検定を用いた事後比較からは、随意条件と偽 EMS 条件間のみが有意な差を示した ($p = 0.0104$)。この結果は、提案スイッチ押し運動が、intentional binding 効果を妨げないことを示している。しかし、EMS に誘発された非随意運動においてもある程度の intentional binding 効果が観察され、また随意運動とも有意差がなかった ($p = 0.0795$ 、検出力: $\beta = 0.6580$)。

非随意 EMS 運動において、随意運動と差が検出されないような intentional binding 効果が得られた原因を明らかにするために、action binding と tone binding の個別の binding 効果を分析する。「条件」（随意条件、非随意 EMS 条件、偽 EMS 条件）と「判断タスク」（行動、音）を要因とする、 3×2 反復測定分散分析を実施した。「判断タスク」の主効果は有意であったが ($F(1, 47) = 64.356; p < 0.0001$)、「条件」の主効果は有意ではなかった ($F(2, 94) = 0.378; p = 0.6863$)。しかしこの主効果は、2 つの要因間の有意な相互作用 ($F(2, 94) = 4.632; p = 0.0121$) により限定される。Bonferroni 補正後の対

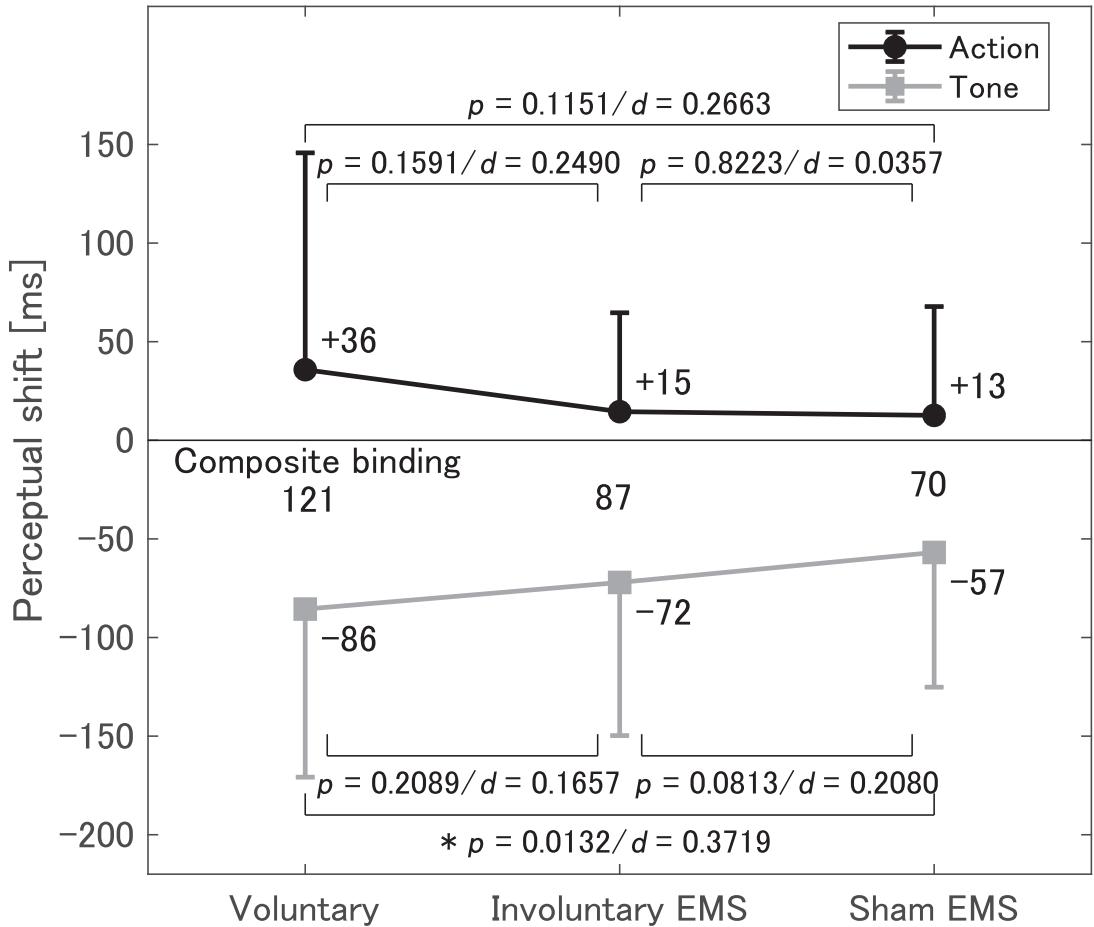


図 A.1: Mean and S.D. of perceptual shift for action and tone judgment.

応あり t 検定を用いた事後比較からは、音タスク判断における随意条件と偽 EMS 条件間 ($p = 0.0132$) を除いて、有意差は検出されなかった。

EMS による非随意運動の傾向をさらに分析するために、平均の差を標準化した効果量を表す Cohen's d に焦点を当てる。随意的なスイッチ押し運動と偽 EMS の感覚との間の差の効果量は、action binding ($d = 0.2663$) と tone binding ($d = 0.3719$) の両方で中程度である。一方で、EMS による非随意的なスイッチ押し運動と偽 EMS の感覚との間の効果量は、tone binding では中程度に異なる ($d = 0.2080$) が、action binding では実質的な差がない ($d = 0.0357$)。その結果、随意運動と非随意 EMS 運動の間には、

action binding に中程度の差がある ($d = 0.2490$) が, tone binding には実質的な差がない ($d = 0.1657$).

A.1.2 考察

action binding 効果は, 運動主体感を構成していると考えられる, 事後推論的要素と事前予測的要素の両方の手がかりが統合されて関連することを示唆する報告がある [58]. 一方で tone binding 効果は予測された感覚効果に関連する事前活性により知覚潜時が短縮するために発生することが示唆されている [59]. これらの報告に基づいて結果を解釈すると, EMS による非随意的な運動が, 行動とその結果についての部分的な予測手がかりを提供したが, 自己帰属を事後的に推論する手がかりを提供しなかったという解釈が最も妥当であると考えられる.

まず予測手がかりについて着目すべきは, 非随意 EMS 条件の tone binding 効果が, 偽 EMS 条件よりも小さくない効果量 ($d = 0.2080$) によって観察された点である. EMS と偽 EMS の刺激感覚の違い (刺激を与える電極配置は同一) が, 生成される運動や刺激, そしてこれに付随して発生する音に対する, 予測的な手がかりを提供した可能性がある. 例えば本実験環境は, スイッチを押すことと音が発生することとの間に明確な因果関係がある. 本実験の研究対象者には直接的に因果関係を説明していないが, 非随意 EMS 条件において非随意的にスイッチを押下することと音が発生することの間の因果関係の存在を認識していた可能性が高い. なぜなら, 今回の非随意 EMS 条件は, 随意条件の場合と同じように, スイッチを押されたことと音が発生することの間に因果性があるシステム構成であるためである. つまり, EMS に誘発された屈曲がスイッチ押しに失敗した場合には音が鳴らないため, 実験者は研究対象者に再度試行を開始するように指示している. したがって機械的に達成された非随意的な因果運動において, 随意運動よりも弱いが一定の tone binding 効果を發揮した Buehner の報告 [56] と同様に, tone binding は因果関係に起因して発生した可能性がある.

もう一つの要因としては潜時の違いの影響が挙げられる. 偽 EMS 刺激の場合には, 非随意 EMS のようにスイッチを押す必要がなく, したがって刺激開始から音発生までの時間潜時は一定である. 非随意 EMS 条件の場合には, 非随意的にスイッチが押されてから 250 ms 後に音が発生するため, 平均 46.70 (s.d. = 16.81) ms 程度長い遅延である. 一般的に行動–感覚タスク間隔が増大すると binding 効果は低減するが [32], 200, 250, 300 ms の短い間隔を比較する場合には, composite binding 効果, 特に tone binding 効果が増大することが報告されており [137], 本研究の非随意 EMS 条件と偽 EMS 条件の差異はこれに該当する可能性がある. 更に, 本実験のような EMS 誘発運動から運動発生まで

の約 40 ms の潜時 [111, 129] と比較して, TMS 誘発運動において報告される潜時は約 20 ms [32, 130] と短い. したがって, 皮膚上に刺激感を感じてから実際に運動が発生するまで, そして音が発生するまでの潜時は EMS 誘発運動の方が長く, この刺激感は音の発生を知らせる外在的な手がかりとして機能した可能性がある.

一方, 隨意運動のない条件においては事前の運動計画がないため, Wegner の示す三原則の, 運動意図が行動の直前に意識に現れるという事前性を満たさないため [17], 事後推論的手がかりは提供されなかったと考えられる. したがって action binding 効果は, 隨意運動と比べて同程度の効果量で減弱された（非随意 EMS 条件では $d = 0.2490$, 偽 EMS 条件では $d = 0.2663$ ）と考えられる.

随意運動は, 非随意運動, たとえば自分の身体を TMS [32, 130] や, 機械 [35, 36], あるいは他人によって [20, 40] 作動される運動, に比べて binding 効果を強化することが報告されている. 一方で, 運動がなくても binding 効果が生じる結果も報告されている. 他者と共有された運動に対し, 運動の実施者と観察者の間に同等の binding 効果が発生することが報告されている [50, 51]. また, 機械を介した運動 [52] や VR 空間における仮想ハンド [53] の観察においても, 隨意運動と同等の binding 効果が生じることも報告されている. 加えて, 高次レベルの文脈情報, 例えば他者運動 [54] や, モータによる受動的なキー押し [55] を自己帰属するような信念の増加が binding 効果を増加することも報告されている. 研究対象者自身の身体を作動する非随意 EMS 運動において tone binding 効果が生じたという今回の新たな発見は, intentional binding 効果が明示的な運動主体感の評価と相関しない可能性に寄与する結果である.

EMS による非随意運動が, action binding 効果は生じないが, tone binding 効果を部分的に生じることを明らかにした. このことは, 運動とその結果の予測に基づく自己帰属 [59] や, 非随意運動と結果との間の因果関係 [56] によって生じたことが示唆される.

A.2 実験 2 の 8 条件間比較

A.2.1 結果

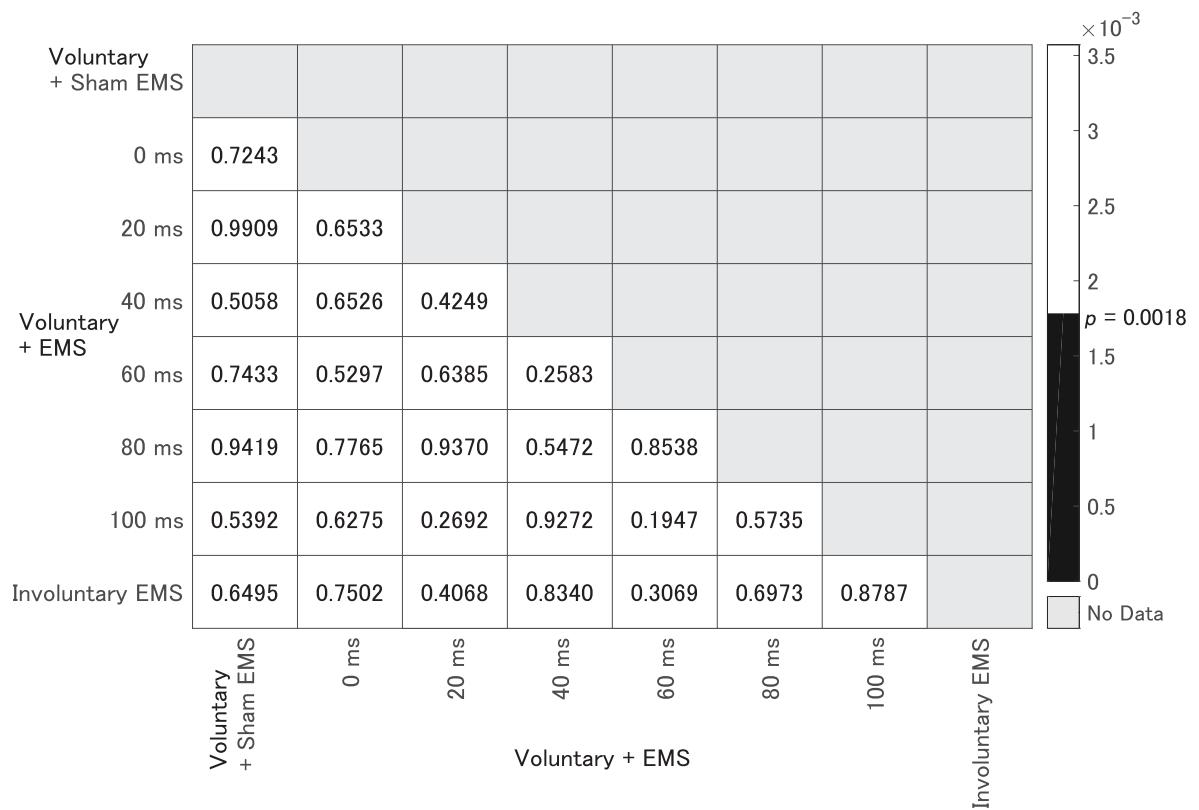
外れ値処理は 3.3 節と同様に実施した. また, スイッチ押し完了時間と EMS 作動時間, そして明示的な運動主体感の条件間の検定も 3.3 節と同様に実施し, 本節内で適宜引用する.

各々のタスクの知覚シフトについて, 「条件」(随意 + 偽 EMS 条件, 隨意 + EMS 条件の 0, 20, 40, 60, 100 ms 条件, 非随意 EMS 条件), 「判断タスク」(行動, 音)を要因とする 8×2 反復測定分散分析を実施した. その結果, 「条件」には主効果は示

されず ($F(7, 112) = 0.306; p = 0.9497$), 2つの要因間の相互効果は示されなかった ($F(7, 112) = 0.643; p = 0.7199$). Bonferroni 補正後の対応あり t 検定による事後比較からは, composite binding と, 各々のタスクの知覚シフトの両方で, いずれの条件間に有意差が示されなかった (図 A.2a, A.3a). 実験 1 における, 隨意運動と EMS による非随意運動の比較からは, 効果的な差 (ただし有意ではない) が action binding 効果に検出され, また音タスク判断にも部分的な binding 効果が検出されることを示した. そこで, 個別の binding 効果, 特に action binding 効果について, Cohen's d を用いて効果量比較を行う (図 A.2b, A.2b).

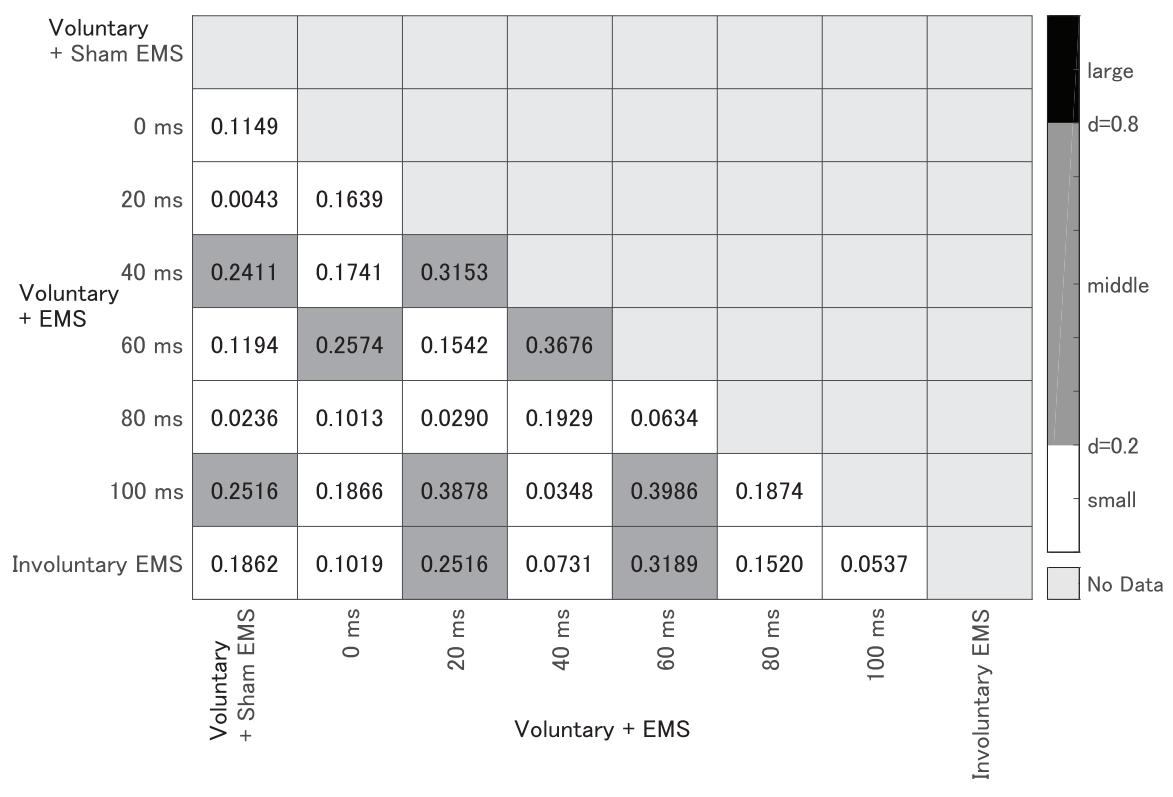
まず, 比較の基準となる随意コントロール条件, すなわち随意 + 偽 EMS 条件と, 非随意 EMS 条件を, 実験 1 の随意条件および非随意 EMS 条件の結果と比較する. 実験 1 と 2 の非随意 EMS 条件は同じタスクであり, 実験 1 の随意条件と偽 EMS 条件を組み合わせたのが本実験の随意 + 偽 EMS 条件である. action binding は, 隨意 + 偽 EMS 条件 (Cohen's $d = 0.0306$), 非随意 EMS 条件 ($d = 0.0153$) 共に実験 1 と比べて効果的な差がなく, したがって同等レベルである. 対照的に, tone binding は, 本実験の方が実験 1 よりも比較的強い効果を示した (随意 + 偽 EMS 条件では $d = 0.4296$, 非随意 EMS 条件では $d = 0.4329$). 非随意 EMS 条件は実験 1 と同じタスクであったにもかかわらず, 実験 2 の tone binding 効果は実験 1 より 2 倍以上高い. この結果は, 実験 2 環境の方が, 実験 1 よりも強力な予測の手がかりを提供していることを示唆する. これは, 実験 2 の方が, 88% のタスクブロックで随意運動を指示しており, EMS の予測が容易であったことが影響した可能性がある.

続けて, 6つの印加条件の知覚シフトを, Cohen's d を用いて非随意 EMS 条件および随意 + 偽 EMS 条件と比較する. 非随意 EMS 条件との間隔の中で Cohen's d が中程度以上の条件は, action binding は 20 ms, 60 ms 条件, tone binding は 0 ms 条件である. 20 ms と 0 ms で印加された EMS は, スイッチ押し完了時間を有意に高速化した ($p = 0.0002$, 3.3 節の図 3.3a) にもかかわらず, 各々の binding 効果を妨げなかった. 20 ms 条件では, tone binding 効果は損なわれている (随意コントロールとの差が $d = 0.3192$) が, action binding 効果は強化された (非随意 EMS 条件との差が $d = 0.2516$). 一方で, 0 ms 条件ではスイッチ押し運動が有意に高速化されたが, 各々の binding 効果は 20 ms 条件とは逆の効果を示した. tone binding 効果は高いレベルに維持された (非随意 EMS 条件との差が $d = 0.2641$) が, action binding 効果には効果的な差がなかった (非随意 EMS 条件との差が $d = 0.1019$).



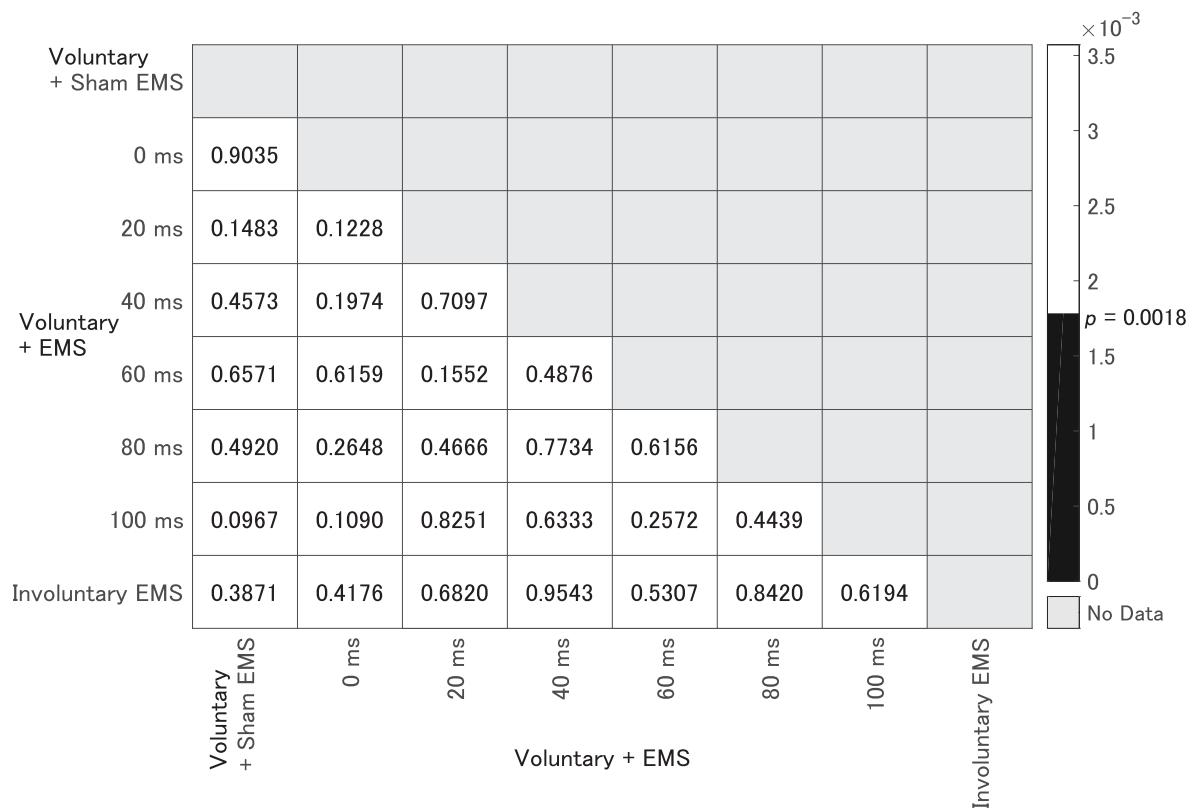
(a) p -values from Bonferroni-adjusted paired t-tests.

団 A.2: Heatmap of multiple comparison between conditions for perceptual shift of action judgment.



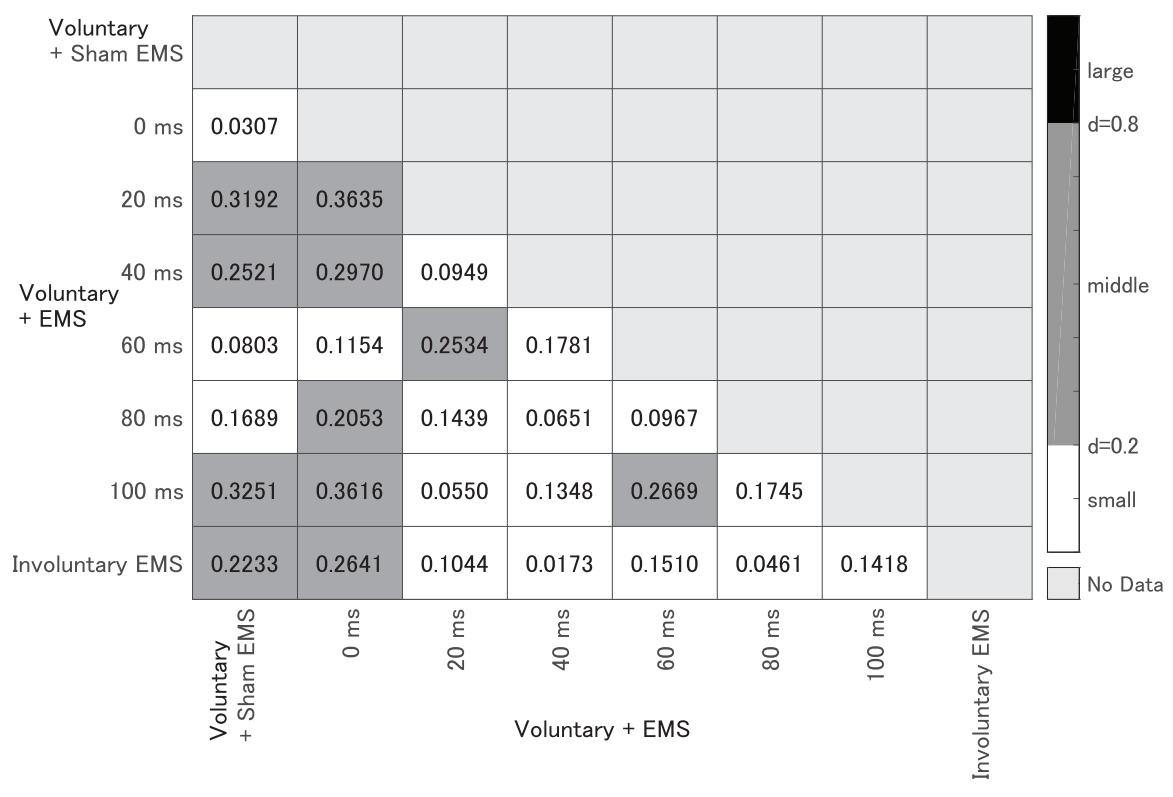
(b) Cohen's d values.

団 A.2: Heatmap of multiple comparison between conditions for perceptual shift of action judgment.



(a) p -values from Bonferroni-adjusted paired t-tests.

囗 A.3: Heatmap of multiple comparison between conditions for perceptual shift of tone judgment.



(b) Cohen's d values.

囗 A.3: Heatmap of multiple comparison between conditions for perceptual shift of tone judgment.

最後に、運動主体感の明示的指標と暗示的指標（composite binding, action binding, tone binding）の相関を算出した。8つの条件のいずれにおいても、研究対象者間の間に相関関係はなかった（表 A.1）。binding 効果と明示的に報告された運動主体感との間に相関関係がないことは、以前に報告されたように [27]、暗示的に計測される運動主体感は、明示的に計測される運動主体感と異なるプロセスによって生成される可能性を示している。提案 EMS 印加手法に特有の理由として、EMS は常に随意的にスイッチから指を離した後に与えられるため、研究対象者は偏った EMS 印加範囲に適応して明示的な運動主体感を報告した可能性がある。

表 A.1: Correlation coefficients of between self-reported sense of agency and each of composite, action, and tone binding.

Binding	Voluntary + Sham EMS	Voluntary + EMS						Involuntary EMS
		0 ms	20 ms	40 ms	60 ms	80 ms	100 ms	
Composite	-0.090	0.100	-0.002	-0.060	-0.011	-0.161	-0.038	0.405
Action	-0.266	0.015	0.035	0.293	0.025	-0.196	-0.457	0.368
Tone	-0.099	-0.089	0.019	0.367	0.040	0.018	-0.127	-0.336

A.2.2 考察

スイッチ押し運動を有意に高速化したにもかかわらず、各々小さくはない効果量で、20 ms 条件の EMS は action binding 効果を、0 ms 条件の EMS は tone binding 効果を維持することが明らかになった。

まず 20 ms 条件で維持された action binding 効果は、事後推論手がかりの強化によって説明可能かもしれない。提案手法において、EMS は必ず随意的にスイッチを離す動作の後に印加される。したがって、運動意図の後に意図に一致した運動結果が得られるという、Wegner の三原則の事前性、整合性が満たされ、更に運動自体は自分の指によって達成されたという視覚的・触覚的なフィードバックにより部分的な排他性をクリアしている。したがって、見かけ上の因果関係が構成され、事後推論的に運動が自己帰属された可能性がある。

一方で 0 ms 条件では、スイッチから環指を離すための随意的な伸展運動の開始と、環指の屈曲を促す EMS の印加が同時であったため、見かけの因果関係がおそらく構築されなかつたと考えられる。実際に 0 ms 条件の EMS 作動時間は、非随意 EMS 条件より

も有意に長く ($p = 0.0002$, 3.3 節の図 3.3(b)), EMS 運動が随意運動によって相殺されていることが示唆される。非随意 EMS 条件よりも高く維持された tone binding 効果 ($d = 0.2641$) は、予測手がかりによる強化を示唆する。0 ms 条件の EMS 作動時間は、単体の非随意 EMS 運動と比較して有意に長く、したがって行動–効果タスク間隔が約 30 ms 延長された条件であることから、tone binding 効果が増強された [137] 可能性がある。実験 1 の結果からは、非随意運動は部分的な tone binding を生じることが示されたため、0 ms 条件において維持された tone binding は、その達成された運動が非随意 EMS 運動によるものであることを示唆する可能性がある。

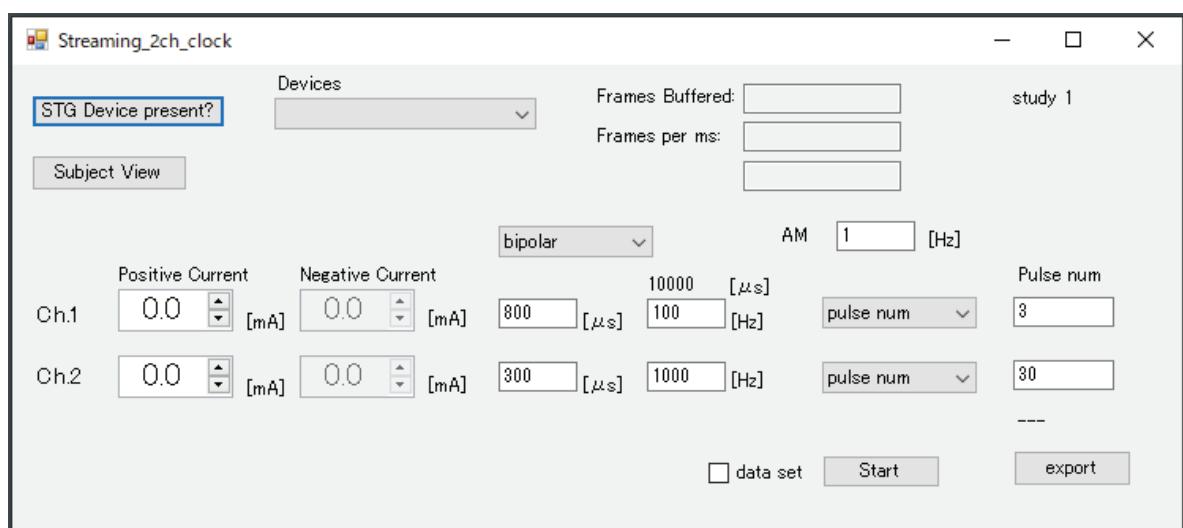
付録 B 実験環境の詳細

本付録では、2-4章で用いた実験システムの詳細として、2つの実験制御プログラムを、フローチャートと電気回路図を用いて説明する。

B.1 制御プログラム

実験制御プログラムは、ディスプレイ上の入出力フォームおよび電気刺激装置制御を行うPC上のプログラムA(C#)と、Libet clockやスイッチの状態に応じたタスク開始等の制御を行うマイコン上のプログラムBの2つで構成されている。

プログラムAは、電気刺激装置制御のためのフォームA-1と研究対象者実験の入出力制御のためのフォームA-2の2つから構成されている。図B.1に示す電気刺激装置制御フォームA-1は、刺激出力中もパラメータ変更が可能なStreamingモードに対応している。本プログラムではバイポーラパルス刺激を基本としており、事前にパルス幅、パルス周波数、パルス数を入力した後、パルス振幅(電流値制御)を探索する手順をとっている。研究対象者毎に電極貼付位置と各パラメータが決定した後、Ch.1がEMS、Ch.2が偽EMSに相当するようにパラメータをセットした上でフォームA-1上のexportボタンを押すと、研究対象者実験フォームA-2でダウンロード可能な形式で配列に格納する。



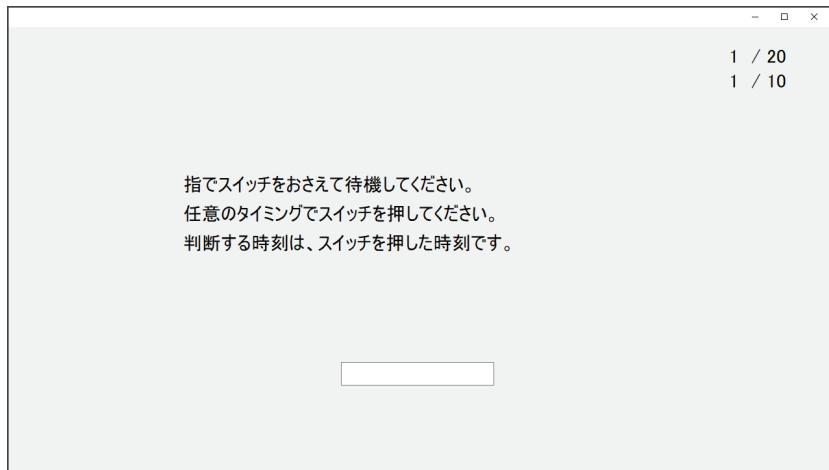
図B.1: Form A-1 that controls the electrical stimulator.

図 B.2, B.3 に示す研究対象者実験フォーム A-2 は、研究対象者への指示するタスクを表示し、フォーム上のテキストボックスから研究対象者の回答（時刻や運動主体感）を受け取るフォームである。まずフォーム A-2 は、タスクブロック条件を無作為に選択する（タスクブロック条件配列を無作為化した上でタスクブロック数に応じて選択）。そして、タスク条件に応じた刺激波形を、フォーム A-1 から受け取った電気刺激波形の中から選択して電気刺激装置へ送信する（Ch. 1 に刺激波形、Sync 1 に刺激同期デジタル信号）。刺激装置へ送信された電気刺激波形は、マイコンからのトリガパルス（Trg. 1）を受け取って 20 μ s 以内に刺激を出力することが可能である。条件提示画面は、発生する電気刺激（EMS と偽 EMS の別は指示しない）や音の条件の列記と、環指の待機条件（スイッチをおさえて待機するのか、それとも指をスイッチの上にのせて待機するのか）、判断する時刻（スイッチ押下時刻、電気刺激を感じた時刻、音が聞こえた時刻）の 3 種類の条件・指示を表示している。代表的な条件提示画面として、図 B.2a に実験 1 の随意条件のベースライン条件、図 B.2b に実験 1 の偽 EMS 条件のオペラント条件、図 B.3a に実験 2 の随意 + EMS 条件のベースライン条件、図 B.3b に実験 2 の非随意 EMS 条件のオペラント条件を示す。

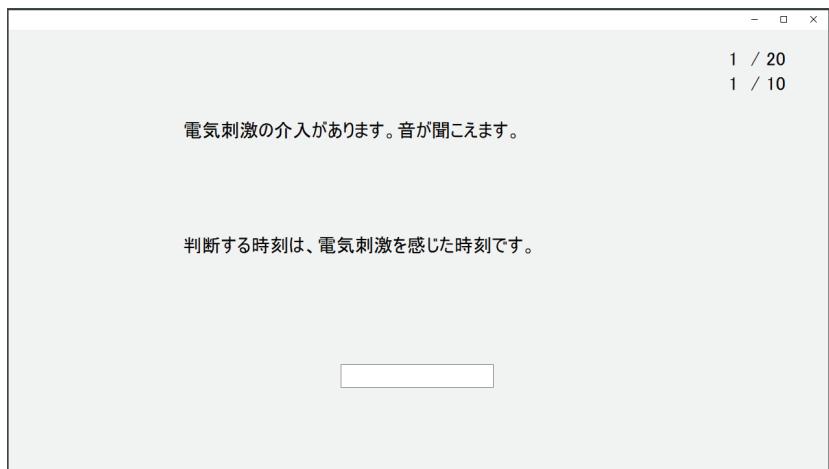
試行が失敗した場合には、キーボード操作によってタスク指示画面に戻ることが可能である。研究対象者がテンキーからフォーム内のテキストボックスに入力した回答は、タスク条件と共に csv ファイルへ書込される。ブロック内で設定された試行数を超えない場合は、テキストボックスがクリアされ、フォーム A-2 右上に表示された試行数がカウントアップされた上で、条件表示画面へ戻る。設定試行数を超えると、実験 1 の場合にはタスクブロック終了画面（図 B.2c）へ遷移して、研究対象者に休憩を促す。一方、実験 2 の場合には、図 B.3c の運動主体感回答画面へ遷移して、入力された回答をタスク条件と共に csv ファイル（時刻回答ファイルとは異なるファイル）へ書込した後、タスクブロック終了画面に遷移する。

プログラム B は、Libet clock の制御や、電気刺激や音の開始・停止制御など、試行毎のタスク時間を管理するマイコンのプログラムである。マイコン時刻は 12 MHz のクリスタルオシレータを外部クロック源として管理されている。プログラム B は、プログラム A が選択したタスク条件を、電気刺激装置の Sync 2 を介して受取る。このタスク条件に応じてスイッチ遷移を取得し、Libet clock の開始や停止動作、電気刺激装置へのトリガ、そしてスピーカへの音出力などの場合分けされた処理を実行する。

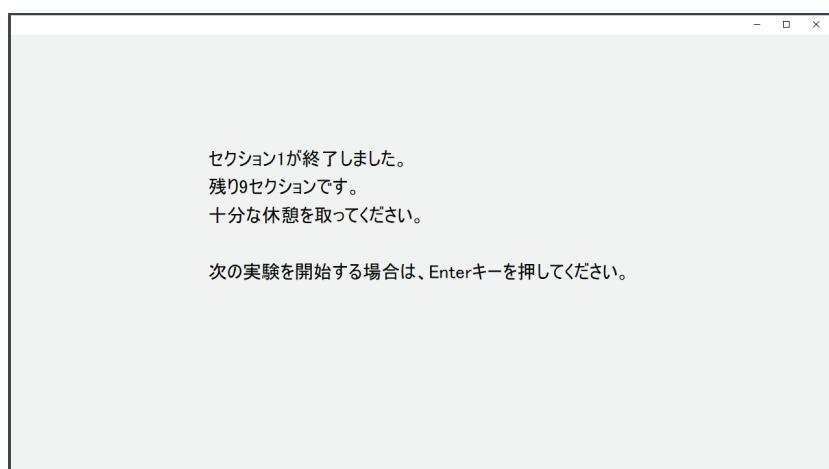
- 場合分けに応じて管理しているため、条件に適合しないスイッチ遷移は意図的に無視される。例えば、随意的な運動を要求する条件では、提案スイッチ押し運動のた



(a) Screen displayed in baseline condition of Voluntary.

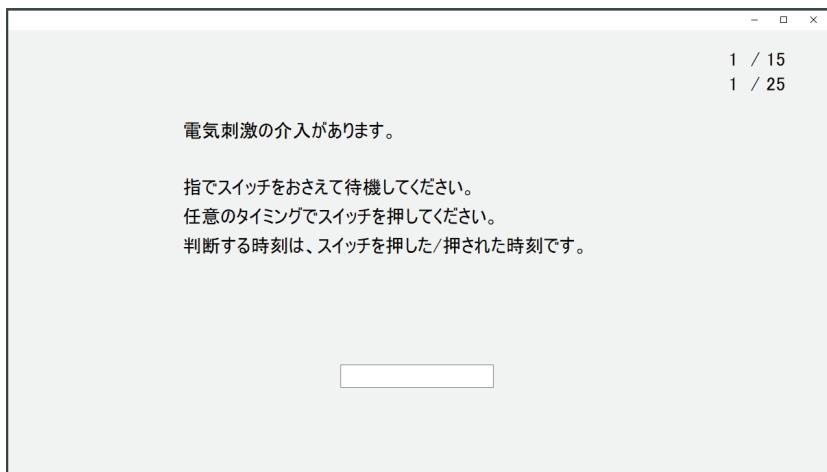


(b) Screen displayed in operant condition of Sham EMS.

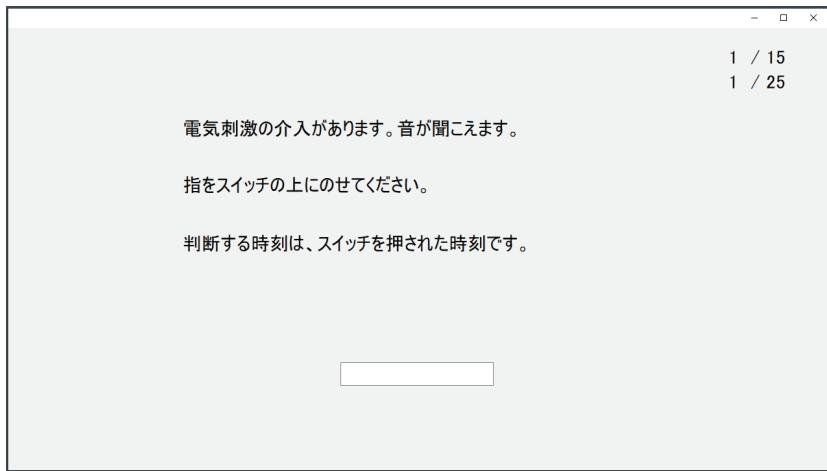


(c) Screen displayed at the end of the task block.

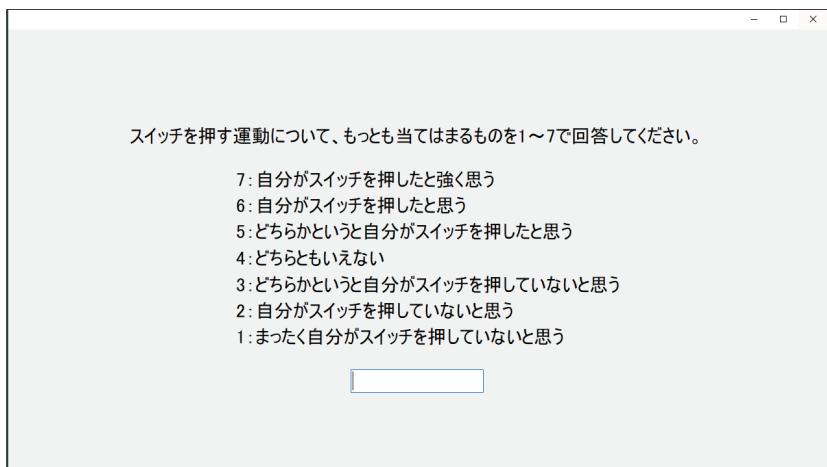
図 B.2: Form A-2 for the participant experiment in Experiment 1.



(a) Screen displayed in baseline condition of Voluntary + EMS.



(b) Screen displayed in operant condition of Involuntary EMS.



(c) Screen displayed to answer the sense of agency.

図 B.3: Form A-2 for the participant experiment in Experiment 2.

めに Libet clock 開始 (SW 2 押下) 以前からスイッチ (SW 1) を押し続けることが必要であるため, SW 2 が押下された時に SW 1 が ON 状態でない場合には SW 2 の遷移が無視されて Libet clock が開始しない. 反対に随意運動を含まない条件において, SW 1 が OFF 状態でない場合には SW 2 が押されても Libet clock が開始しない. このスイッチは 0.5–2.0 N, 0.5–1.0 mm で出力反転するため, 研究対象者が意図しなくてもスイッチを押した状態になる場合もあり, スイッチの状態が指示と異なる場合に研究対象者にミスを知らせるために有効であった.

- 実験 2 の随意 + EMS 条件における 0, 20, ..., 100 ms の 6 種類条件は, スイッチから指を離した後, 電気刺激が印加されるまでの異なるオフセットをあらかじめ含む刺激波形を電気刺激装置に送信することで実現した. このため, 随意条件を含む条件における電気刺激装置へのトリガは, 常にスイッチが離上したタイミングで与えることで実現できる.
- スピーカは, イヤホンジャックによって接続されている. 実験 3 ではスピーカを取り外し, 代わりに LED を接続して用いる.

プログラム A および B の制御フローチャートを図示する (図 B.4 は実験 1 および 2, 図 B.5 は実験 3).

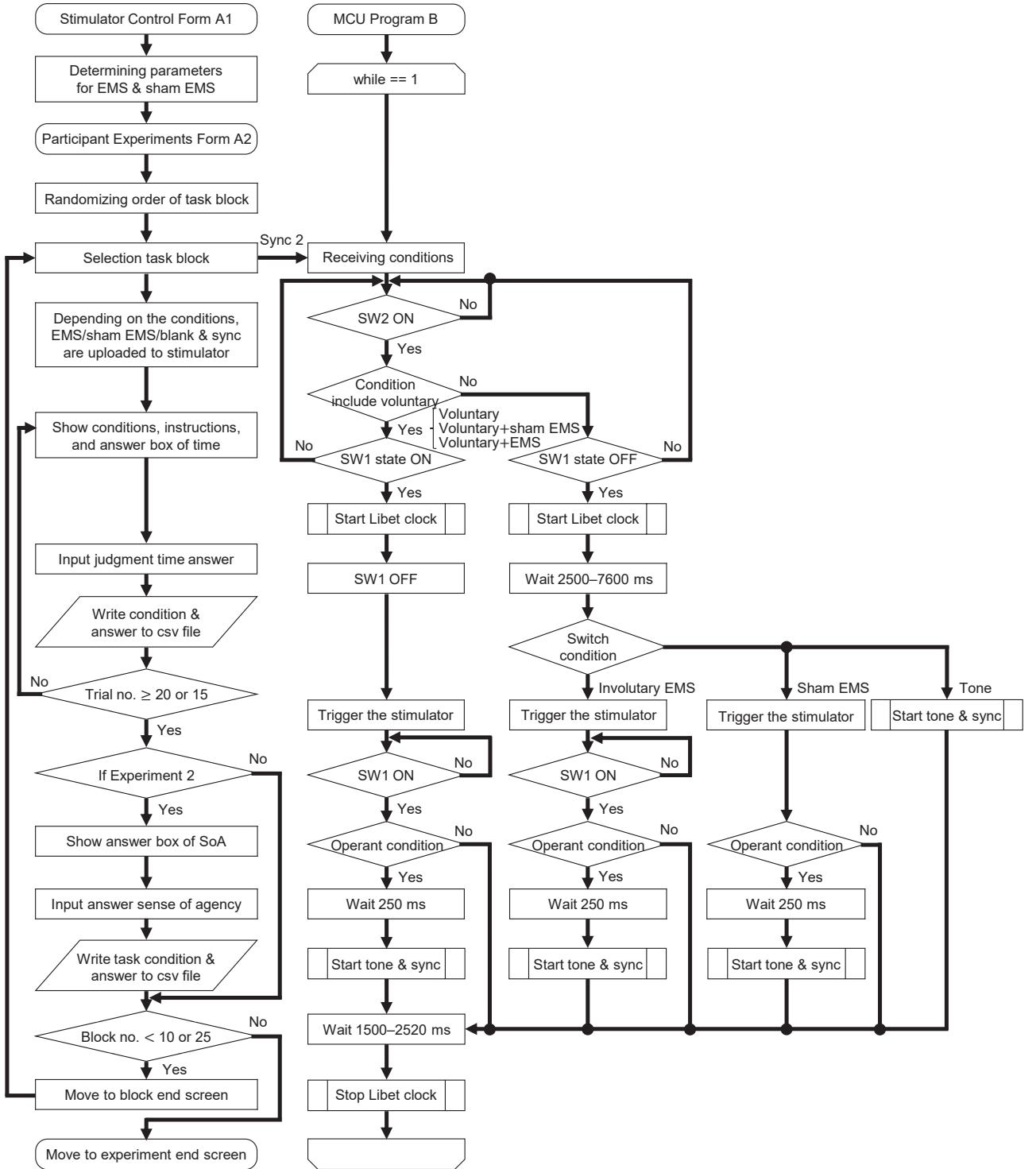


図 B.4: Flow chart of the intentional binding experimental program (Experiment 1 and 2).

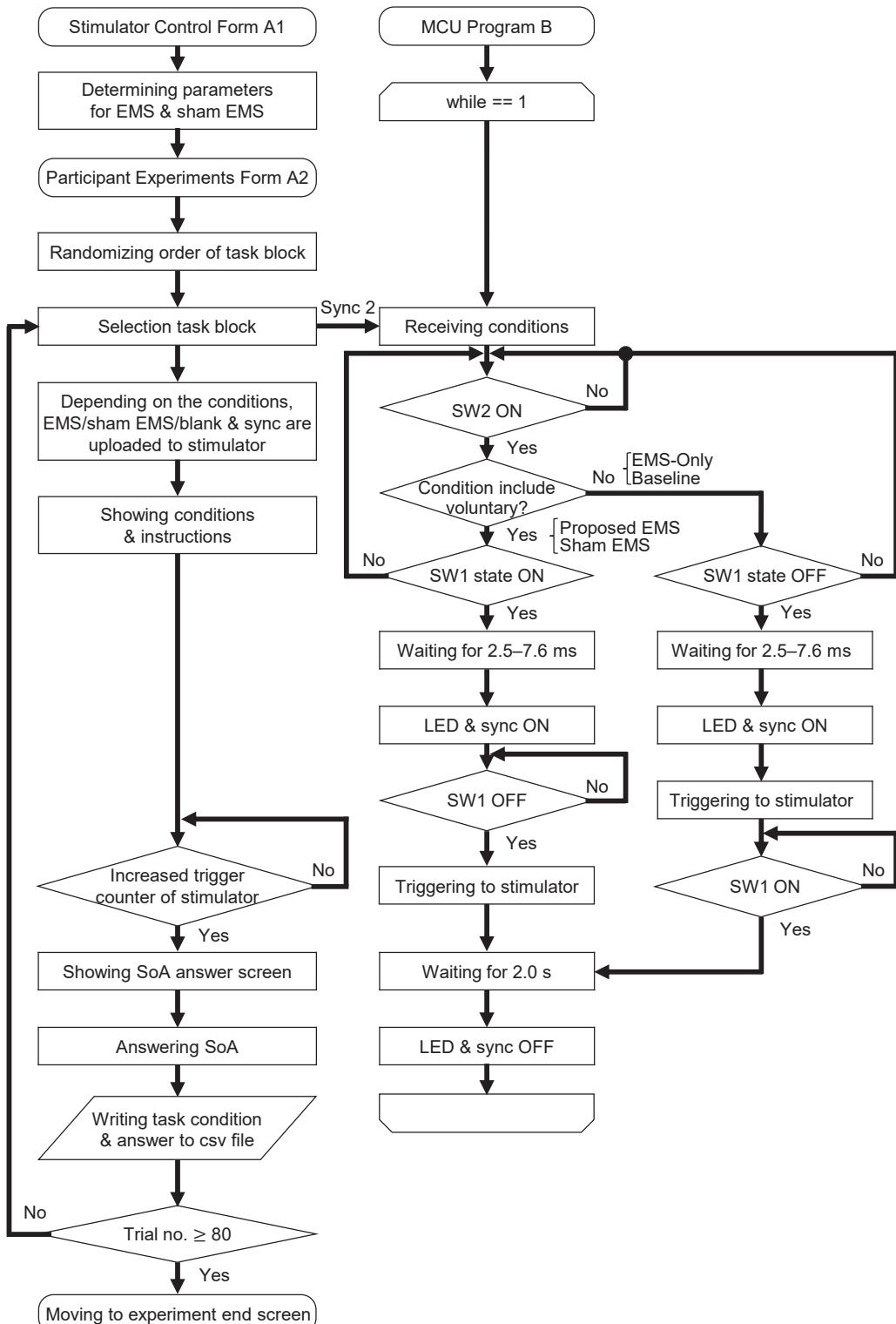


図 B.5: Flow chart of the evaluate experimental program using reaction time task(Experiment 3).

B.2 電気回路

プログラム B 周辺の実装写真を図 B.6 に、電気回路図を図 B.7 に示す。

回路は Libet clock 制御・計測部と、タスク生成部に分かれる。Libet clock の針を描画した円盤を取り付けた、1周 120 ステップのステッピングモータ（SPG27-1601）を駆動する。マイコンから 1-2 相励磁方式を用いて一周 2560 ms の回転を制御した。SW 2 押下によって Libet clock の停止、開始操作を実行可能である。また、Libet clock の基準点（針が 12 時を指す方向）を検出するために、フォトリフレクタ（LBR-123F）を用いて、針円盤の裏面に描画した基準点の印を検出してオペアンプ・コンパレータで二値化し、マイコンを経由して AD コンバータで記録する (Ch. 1)。

タスク生成部の入力要素は、スイッチ (SW 1, SW 2) の遷移がマイコンに取得されると同時に AD コンバータで記録される (Ch. 4, Ch. 5)。出力要素は、電気刺激装置へのトリガ (Trg. 1)，音を生成してアンプ内蔵スピーカへの送信と、同時に同期信号を AD コンパレータへ送信 (Ch. 3)，同時に、電気刺激装置からの EMS や偽 EMS (Ch. 1) との同期信号 (Sync 1) も AD コンバータで取得される (Ch. 2)。電源は micro USB Type-B を介して 5 V が供給された。マイコンへの書き込みは PICkitTM3 を用いた。

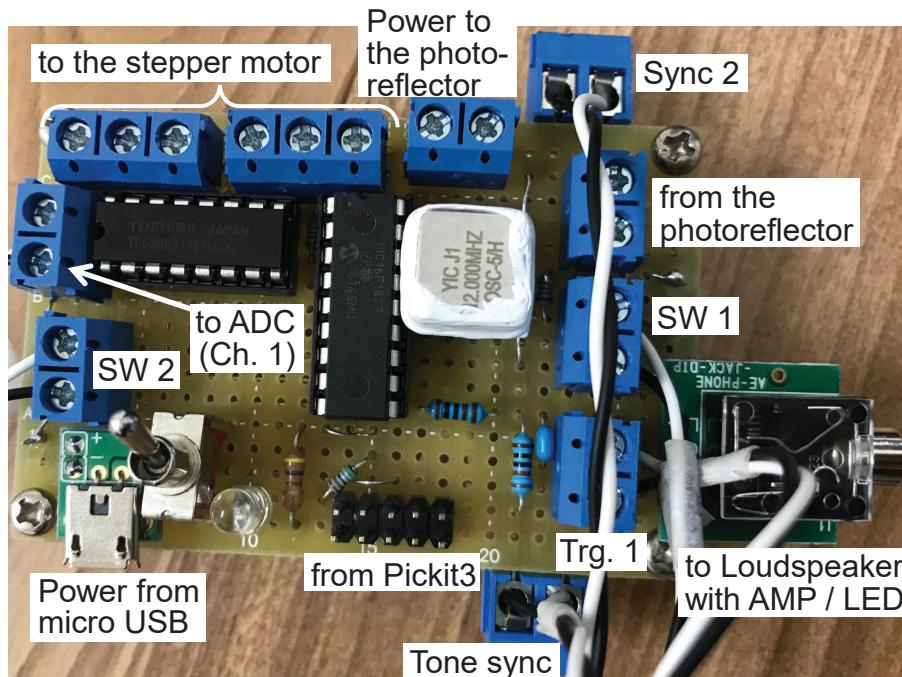


図 B.6: Mounted substrate.

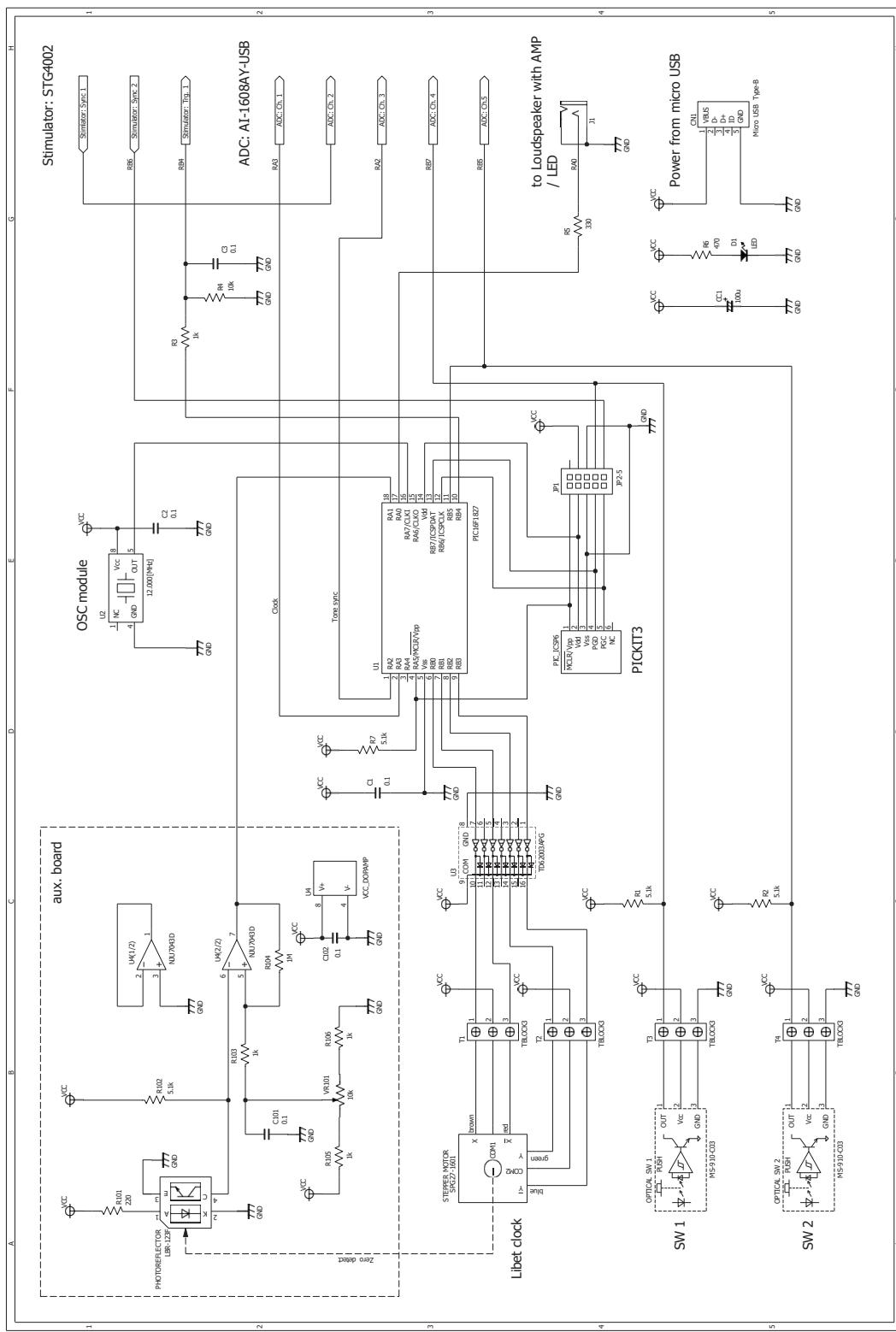


図 B.7: Electrical circuit of the experimental system.

付録 C 知覚シフトの研究対象者毎結果

C.1 電気刺激パラメータ

表 C.1: Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in Experiment 1 (the former half).

Participant number	EMS: pulse frequency=100 Hz			Sham EMS: pulse frequency=1000 Hz		
	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses
1	9.5	800	3	7.0	300	30
2	11.5	800	3	9.5	300	30
3	9.0	800	3	5.5	300	30
4	9.5	800	3	7.5	300	30
5	8.0	800	3	5.5	300	30
6	9.0	800	3	7.0	300	30
7	7.0	800	3	5.5	300	60
8	13.5	800	3	10.0	300	30
9	10.0	800	3	12.5	100	120
10	6.5	800	3	4.5	300	30
11	4.5	800	3	8.0	100	120
12	8.5	800	3	7.5	300	30
13	9.0	800	3	6.5	300	30
14	8.5	800	3	7.5	300	30
15	8.0	800	3	7.0	300	30
17	7.5	800	3	5.5	300	30
18	7.0	800	3	5.5	300	30
19	7.0	800	3	5.0	300	30
20	6.0	800	3	4.5	300	30
21	8.0	800	3	7.0	300	30

表 C.1: Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in Experiment 1 (the latter half).

Participant number	EMS: pulse frequency=100 Hz			Sham EMS: pulse frequency=1000 Hz		
	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses
22	11.0	800	3	9.0	300	30
23	8.0	800	3	7.5	500	120
24	5.5	800	3	3.5	500	90
25	8.0	800	3	7.0	300	30
26	12.0	800	3	8.5	300	30
27	8.5	800	3	7.0	300	30
28	7.0	800	3	16.5	50	120
29	7.0	800	3	6.5	300	30
30	5.0	800	3	8.5	100	120
31	9.0	800	3	7.5	300	30
32	10.0	800	3	8.0	300	30
33	12.5	800	3	9.0	300	30
34	6.0	800	3	5.0	500	6
35	9.0	800	3	7.5	300	30
36	9.0	800	3	6.5	300	30
37	10.5	800	3	7.5	300	30
38	10.5	800	3	7.5	300	30
39	9.5	800	3	7.0	300	30
40	7.5	800	3	6.5	300	30
41	7.0	800	3	6.0	300	30
42	11.5	800	3	8.5	300	30
43	7.5	800	3	6.5	300	30
44	6.0	800	3	5.0	300	30
45	9.5	800	3	8.0	300	30
46	8.0	800	3	6.0	300	30
47	10.0	800	3	7.5	300	30
48	11.5	800	3	9.5	300	30

表 C.2: Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in Experiment 2.

Participant number	EMS: pulse frequency=100 Hz			Sham EMS: pulse frequency=1000 Hz		
	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses
49	16.0	800	3	11.5	300	30
50	15.0	800	3	9.5	300	30
51	10.5	800	3	9.0	300	30
52	10.5	800	3	9.0	300	30
53	11.0	800	3	7.0	300	30
54	8.5	800	3	6.5	300	30
55	10.0	800	3	6.5	300	30
56	14.0	800	3	10.5	300	30
57	2.5	800	3	7.5	50	90
58	10.0	800	3	9.5	300	30
59	5.0	800	3	4.5	300	30
60	9.5	800	3	6.5	300	30
61	9.0	800	3	6.5	300	30
62	6.0	800	3	10.0	50	120
63	9.0	800	3	14.0	100	60
64	10.5	800	3	8.0	300	30
65	12.5	800	3	7.0	300	30

表 C.3: Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in 20 ms condition of Experiment 3.

Participant number	EMS: pulse frequency=100 Hz			Sham EMS: pulse frequency=1000 Hz		
	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses
66	8.0	800	3	6.0	300	60
67	10.0	800	3	8.0	300	30
68	13.5	800	3	10.0	30	30
69	9.0	800	3	7.0	300	30
70	12.5	800	6	10.0	300	60
71	9.5	800	3	7.5	300	30
72	12.5	800	3	8.5	300	60
73	12.5	800	3	9.5	300	60
74	8.5	800	3	6.0	300	30
75	11.5	800	3	9.0	300	30

表 C.4: Parameters of the EMS and sham EMS for all participants in 0 ms condition of Experiment 3.

Participant number	EMS: pulse frequency=100 Hz			Sham EMS: pulse frequency=1000 Hz		
	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses	Current [mA]	Pulse width [μs]	Number of pulses
68	11.0	800	3	8.0	300	30
69	8.0	800	3	7.0	300	30
70	12.0	800	3	9.5	300	30
71	8.5	800	3	6.0	300	30
72	10.5	800	3	7.0	300	30
76	8.0	800	3	9.0	200	30
77	8.5	800	3	5.5	300	30
78	8.0	800	3	5.0	300	30

C.2 判断誤差と知覚シフト

表 C.5: Perceptual shifts of individual participants in Experiment 1 (the former half).

Participant number	Voluntary		Involuntary EMS		Sham EMS	
	Action [ms]	Tone [ms]	Action [ms]	Tone [ms]	Action [ms]	Tone [ms]
1	9	85	117	61	-17	57
2	-57	-162	-4	-118	54	-70
3	68	-29	-6	-95	35	-132
4	-4	23	12	29	-43	54
5	52	-160	-9	-173	0	-63
6	79	-206	-39	-196	-16	-143
7	-35	-166	-1	-69	2	-84
8	-4	-140	-11	-24	-19	-140
9	33	12	25	-24	98	21
10	-22	-64	-16	-10	-10	5
11	-53	-19	29	-108	-40	-31
12	0	10	-33	-40	8	57
13	-3	-134	32	-139	48	-46
14	720	-39	187	-44	187	-36
15	13	-294	-9	-111	-16	-59
16	56	-135	8	-188	24	-137
17	18	-89	89	-69	-79	-46
18	25	-17	-26	-71	70	13
19	51	-216	-45	-99	-123	-97
20	49	-141	-26	-149	60	-143
21	61	-75	-6	-6	32	-32
22	8	-104	-11	-160	22	-167
23	56	-21	-49	-48	57	-21
24	0	9	32	-20	3	-5
25	63	-154	46	-74	39	-75

表 C.5: Perceptual shifts of individual participants in Experiment 1 (the latter half).

Participant number	Voluntary		Involuntary EMS		Sham EMS	
	Action [ms]	Tone [ms]	Action [ms]	Tone [ms]	Action [ms]	Tone [ms]
26	58	-45	52	-33	10	-30
27	206	23	-11	71	19	67
28	36	-127	-12	-159	11	-77
29	13	8	-20	18	-35	1
30	-8	-74	4	-66	-26	-117
31	-20	-204	-9	-225	1	-78
32	19	-123	16	-69	24	-124
33	0	-107	-9	-30	1	-67
34	13	49	-24	29	-51	68
35	-23	-1	94	20	-12	24
36	49	-111	19	-83	17	-92
37	11	-103	12	-154	-14	-117
38	-52	-45	55	-119	34	-126
39	34	-113	-14	-205	-3	-219
40	32	-215	-31	-161	36	-126
41	45	-102	32	-23	50	-127
42	11	-135	67	-179	43	-72
43	60	-54	40	-153	-95	-22
44	49	-54	-9	67	64	-12
45	-42	-31	72	-64	15	-76
46	28	-265	-42	8	0	39
47	41	-105	-26	-34	-35	-35
48	-25	55	155	29	175	-92

表 C.6: Perceptual shifts of individual participants in Experiment 2.

Participant number	Voluntary + Sham EMS				Voluntary + EMS				100 ms				Involuntary EMS			
	Action Tone		0 ms		20 ms		40 ms		60 ms		80 ms		Action Tone		Action Tone	
	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
49	-198	-127	-7	-49	78	-170	43	-92	146	-145	23	-133	61	-101	113	-134
50	72	-145	24	-111	-8	-98	34	-8	38	-56	424	-105	51	-86	-30	-104
51	70	-234	27	-199	32	-125	24	-171	-15	-195	-12	-207	-26	-232	53	-204
52	46	-157	108	-82	3	-106	-17	-99	19	-190	-62	-157	-24	-63	119	-176
53	18	-199	4	-252	-20	-256	9	-222	-54	-169	68	-213	-3	-291	6	-179
54	-4	-144	8	-117	18	-100	-6	-55	3	-80	-69	-106	16	-3	12	-67
55	100	-3	8	-36	6	17	37	-122	67	-23	8	19	12	16	-18	-88
56	13	-139	1	-90	50	-47	-4	-66	-6	-56	32	-70	-37	-100	42	-112
57	-12	-248	-22	-231	-36	-93	104	-65	23	-173	-54	-116	2	-236	15	-107
58	100	-25	47	-13	59	19	-77	-9	63	-4	-43	37	-22	-62	-7	-48
59	15	-220	-9	-54	71	-140	-109	-55	-3	-151	35	-83	29	-40	-8	-193
60	4	-14	40	-33	-16	-34	26	-57	4	-38	76	-33	1	-34	-101	-22
61	45	-73	14	-221	8	-65	21	-176	7	-112	71	-266	-25	-149	-17	-113
62	89	-233	-28	-202	19	-187	62	-150	221	-302	37	-172	13	-192	24	-116
63	29	-98	-66	-213	57	-109	31	-128	58	-89	-17	-62	21	-44	-19	78
64	-19	-41	41	-61	3	-48	-107	-157	31	-80	-84	-44	92	-37	15	-49
65	19	-1	87	-180	61	-131	59	-149	-72	-123	-9	-146	-4	58	-3	-166

謝辞

研究活動全般にわたって、終始、懇切丁寧にご指導いただきました主査の西川 敦 教授に深く感謝申し上げます。新規に立ち上げた本研究を博士論文としてまとめることができたのは、西川 教授の示唆に富んだ的確なご指導によるものです。また博士論文の執筆に際し、大城 理 教授、和田 成生 教授、ならびに京都大学大学院情報学研究科の野村 泰伸 教授には、快く副査をお引き受けいただき、有益なご指摘、ご指導をいただきましたことを深く感謝申し上げます。

データ解析や論文執筆について広くご指導いただきました松居 和寛 助教、実験機器作製を中心にご指導いただきました広島市立大学大学院情報科学研究科の厚海 慶太 助教、研究活動全般を通してご指導いただきました安田女子大学家政学部の谷口 和弘 教授に、深く感謝いたします。また、平井 宏明 准教授には、研究の方向性について、度々洞察的なご指摘をいただいたことを感謝申し上げます。

直接的・間接的に研究生活を支えていただきました、西川研究室（身体運動制御学グループ）の皆様に御礼申し上げます。そして事あるごとに気にかけていただきました友人と、信州大学 旧西川・岩本研究室の先輩と同期の皆様に感謝申し上げます。

また、研究対象者として時間を割き、場合によっては度々実験に参加協力いただいた多くの皆様に御礼申し上げます。

最後に、研究活動に理解を示し、どんな時も支えてくれた両親に感謝します。

参考文献

- [1] Matthis Synofzik, Gottfried Vosgerau, and Albert Newen. Beyond the comparator model: A multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and Cognition*, Vol. 17, No. 1, pp. 219–239, 2008.
- [2] Patricia Cornelio, Patrick Haggard, Kasper Hornbaek, Orestis Georgiou, Joanna Bergström, Sriram Subramanian, and Marianna Obrist. The sense of agency in emerging technologies for human–computer integration: A review. *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 16, p. 949138, 2022.
- [3] Umer Farooq and Jonathan Grudin. Human-computer integration. *interactions*, Vol. 23, No. 6, pp. 26–32, 2016.
- [4] Florian Floyd Mueller, Pedro Lopes, Paul Strohmeier, Wendy Ju, Caitlyn Seim, Martin Weigel, Suranga Nanayakkara, Marianna Obrist, Zhuying Li, Joseph Delfa, Jun Nishida, Elizabeth M. Gerber, Dag Svanaes, Jonathan Grudin, Stefan Greuter, Kai Kunze, Thomas Erickson, Steven Greenspan, Masahiko Inami, Joe Marshall, Harald Reiterer, Katrin Wolf, Jochen Meyer, Thecla Schiphorst, Dakuo Wang, and Pattie Maes. Next steps for human-computer integration. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–15, 2020.
- [5] 稲見昌彦, 北崎充晃, 宮脇陽一, Gowrishankar Ganesh, 岩田浩康, 杉本麻樹, 笠原俊一, 瓜生大輔. 自在化身体論：超感覺・超身体・変身・分身・合体が織りなす人類の未来. エヌ・ティー・エス, 東京, 2021.
- [6] Shaun Gallagher. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 14–21, 2000.
- [7] Christopher D Frith. The positive and negative symptoms of schizophrenia reflect impairments in the perception and initiation of action. *Psychological medicine*, Vol. 17, No. 3, pp. 631–648, 1987.
- [8] Christopher Donald Frith. 分裂病の認知神経心理学. 医学書院, 東京, 1995. (丹羽真一, 菅野正浩監訳, 原書: The cognitive neuropsychology of schizophrenia, Lawrence Erlbaum Associates, 1992).
- [9] Chris D Frith, Sarah-Jayne Blakemore, and Daniel M Wolpert. Explaining the symptoms of schizophrenia: abnormalities in the awareness of action. *Brain research reviews*, Vol. 31, No. 2-3, pp. 357–363, 2000.

- [10] Daniel M Wolpert, Zoubin Ghahramani, and Michael I Jordan. An internal model for sensorimotor integration. *Science*, Vol. 269, No. 5232, pp. 1880–1882, 1995.
- [11] Mitsuo Kawato. Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 9, No. 6, pp. 718–727, 1999.
- [12] Sarah-Jayne Blakemore, Daniel M Wolpert, and Christopher D Frith. Abnormalities in the awareness of action. *Trends in cognitive sciences*, Vol. 6, No. 6, pp. 237–242, 2002.
- [13] Benjamin Libet. Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *Behavioral and brain sciences*, Vol. 8, No. 4, pp. 529–539, 1985.
- [14] Vilayanur S Ramachandran and Diane Rogers-Ramachandran. Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, Vol. 263, No. 1369, pp. 377–386, 1996.
- [15] Daniel M Wegner. Précis of the illusion of conscious will. *Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 27, No. 5, pp. 649–659, 2004.
- [16] Daniel M Wegner and Thalia Wheatley. Apparent mental causation: Sources of the experience of will. *American psychologist*, Vol. 54, No. 7, p. 480, 1999.
- [17] Daniel M Wegner. The mind’s best trick: how we experience conscious will. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 7, No. 2, pp. 65–69, 2003.
- [18] Matthias Synofzik, Gottfried Vosgerau, and Axel Lindner. Me or not me—an optimal integration of agency cues? *Consciousness and cognition*, Vol. 18, No. 4, pp. 1065–1068, 2009.
- [19] Gottfried Vosgerau and Matthias Synofzik. Weighting models and weighting factors. *Consciousness and cognition*, Vol. 21, No. 1, pp. 55–58, 2012.
- [20] James W Moore, Daniel M Wegner, and Patrick Haggard. Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and cognition*, Vol. 18, No. 4, pp. 1056–1064, 2009.
- [21] J.W. Moore and P.C. Fletcher. Sense of agency in health and disease: A review of cue integration approaches. *Consciousness and Cognition*, Vol. 21, No. 1, pp. 59–68, 2012.
- [22] Wen Wen. Does delay in feedback diminish sense of agency? a review. *Consciousness and cognition*, Vol. 73, p. 102759, 2019.

- [23] Atsushi Sato and Asako Yasuda. Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, Vol. 94, No. 3, pp. 241–255, 2005.
- [24] Nicolas Franck, Chloé Farrer, Nicolas Georgieff, Michel Marie-Cardine, Jean Daléry, Thierryd' Amato, Marc Jeannerod. Defective recognition of one's own actions in patients with schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, Vol. 158, No. 3, pp. 454–459, 2001.
- [25] Chloé Farrer, Nicolas Franck, J Paillard, and Marc Jeannerod. The role of proprioception in action recognition. *Consciousness and cognition*, Vol. 12, No. 4, pp. 609–619, 2003.
- [26] Elena Daprati, Nicolas Franck, Nicolas Georgieff, Joëlle Proust, Elisabeth Pacherie, Jean Dalery, and Marc Jeannerod. Looking for the agent: an investigation into consciousness of action and self-consciousness in schizophrenic patients. *Cognition*, Vol. 65, No. 1, pp. 71–86, 1997.
- [27] John A Dewey and Günther Knoblich. Do implicit and explicit measures of the sense of agency measure the same thing? *PloS one*, Vol. 9, No. 10, p. e110118, 2014.
- [28] Christopher D Frith and D John Done. Experiences of alien control in schizophrenia reflect a disorder in the central monitoring of action. *Psychological medicine*, Vol. 19, No. 2, pp. 359–363, 1989.
- [29] Benjamin Libet. マインド・タイム：脳と意識の時間. 岩波書店, 東京, 2021. (下条信輔, 安納令奈訳, 原書: Mind time: The temporal factor in consciousness, Harvard University Press, 2009).
- [30] James W Moore and Sukhvinder S Obhi. Intentional binding and the sense of agency: a review. *Consciousness and cognition*, Vol. 21, No. 1, pp. 546–561, 2012.
- [31] Noham Wolpe and James B Rowe. Beyond the “urge to move”: objective measures for the study of agency in the post-libet era. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 8, p. 450, 2014.
- [32] Patrick Haggard, Sam Clark, and Jeri Kalogeras. Voluntary action and conscious awareness. *Nature neuroscience*, Vol. 5, No. 4, pp. 382–385, 2002.
- [33] Jeffrey P Ebert and Daniel M Wegner. Time warp: Authorship shapes the

perceived timing of actions and events. *Consciousness and cognition*, Vol. 19, No. 1, pp. 481–489, 2010.

- [34] Shu Imaizumi and Yoshihiko Tanno. Intentional binding coincides with explicit sense of agency. *Consciousness and cognition*, Vol. 67, pp. 1–15, 2019.
- [35] Manos Tsakiris and Patrick Haggard. Awareness of somatic events associated with a voluntary action. *Experimental brain research*, Vol. 149, pp. 439–446, 2003.
- [36] Kai Engbert, Andreas Wohlschläger, and Patrick Haggard. Who is causing what? the sense of agency is relational and efferent-triggered. *Cognition*, Vol. 107, No. 2, pp. 693–704, 2008.
- [37] Marcus Vinicius C Baldo and Stanley A Klein. Extrapolation or attention shift? *Nature*, Vol. 378, No. 6557, pp. 565–566, 1995.
- [38] Noham Wolpe, Patrick Haggard, Hartwig R Siebner, and James B Rowe. Cue integration and the perception of action in intentional binding. *Experimental brain research*, Vol. 229, pp. 467–474, 2013.
- [39] Andre M Cravo, Peter ME Claessens, and Marcus VC Baldo. The relation between action, predictability and temporal contiguity in temporal binding. *Acta Psychologica*, Vol. 136, No. 1, pp. 157–166, 2011.
- [40] Kai Engbert, Andreas Wohlschläger, Richard Thomas, and Patrick Haggard. Agency, subjective time, and other minds. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 33, No. 6, p. 1261, 2007.
- [41] Andre M Cravo, Peter ME Claessens, and Marcus VC Baldo. Voluntary action and causality in temporal binding. *Experimental brain research*, Vol. 199, pp. 95–99, 2009.
- [42] Gruffydd R Humphreys and Marc J Buehner. Magnitude estimation reveals temporal binding at super-second intervals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 35, No. 5, p. 1542, 2009.
- [43] Gruffydd R Humphreys and Marc J Buehner. Temporal binding of action and effect in interval reproduction. *Experimental brain research*, Vol. 203, pp. 465–470, 2010.
- [44] SK Poonian and Ross Cunnington. Intentional binding in self-made and observed actions. *Experimental brain research*, Vol. 229, pp. 419–427, 2013.
- [45] Carola Haering and Andrea Kiesel. Intentional binding is independent of the

validity of the action effect's identity. *Acta Psychologica*, Vol. 152, pp. 109–119, 2014.

- [46] Marc J Buehner and Gruffydd R Humphreys. Causal binding of actions to their effects. *Psychological science*, Vol. 20, No. 10, pp. 1221–1228, 2009.
- [47] 隆英杖下. ヒューム. 思想学説全書. 効草書房, 東京, 1982.
- [48] James W Moore, David Lagnado, Darvany C Deal, and Patrick Haggard. Feelings of control: contingency determines experience of action. *Cognition*, Vol. 110, No. 2, pp. 279–283, 2009.
- [49] Andreas Wohlschläger, Kai Engbert, and Patrick Haggard. Intentionality as a constituting condition for the own self—and other selves. *Consciousness and cognition*, Vol. 12, No. 4, pp. 708–716, 2003.
- [50] Lars Strother, Kristin A House, and Sukhvinder S Obhi. Subjective agency and awareness of shared actions. *Consciousness and cognition*, Vol. 19, No. 1, pp. 12–20, 2010.
- [51] Sukhvinder S Obhi and Preston Hall. Sense of agency and intentional binding in joint action. *Experimental brain research*, Vol. 211, pp. 655–662, 2011.
- [52] Marc J Buehner. Understanding the past, predicting the future: Causation, not intentional action, is the root of temporal binding. *Psychological science*, Vol. 23, No. 12, pp. 1490–1497, 2012.
- [53] Keisuke Suzuki, Peter Lush, Anil K Seth, and Warrick Roseboom. Intentional binding without intentional action. *Psychological Science*, Vol. 30, No. 6, pp. 842–853, 2019.
- [54] Andrea Desantis, Cédric Roussel, and Florian Waszak. On the influence of causal beliefs on the feeling of agency. *Consciousness and cognition*, Vol. 20, No. 4, pp. 1211–1220, 2011.
- [55] Myrthel Dogge, Marloes Schaap, Ruud Custers, Daniel M Wegner, and Henk Aarts. When moving without volition: implied self-causation enhances binding strength between involuntary actions and effects. *Consciousness and Cognition*, Vol. 21, No. 1, pp. 501–506, 2012.
- [56] Marc J Buehner. Awareness of voluntary and involuntary causal actions and their outcomes. *Psychology of Consciousness: Theory, Research, and Practice*, Vol. 2, No. 3, p. 237, 2015.
- [57] Kai Engbert and Andreas Wohlschläger. Intentions and expectations in tempo-

- ral binding. *Consciousness and cognition*, Vol. 16, No. 2, pp. 255–264, 2007.
- [58] James Moore and Patrick Haggard. Awareness of action: Inference and prediction. *Consciousness and cognition*, Vol. 17, No. 1, pp. 136–144, 2008.
- [59] Florian Waszak, Pedro Cardoso-Leite, and Gethin Hughes. Action effect anticipation: neurophysiological basis and functional consequences. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Vol. 36, No. 2, pp. 943–959, 2012.
- [60] Dorit Wenke and Patrick Haggard. How voluntary actions modulate time perception. *Experimental brain research*, Vol. 196, pp. 311–318, 2009.
- [61] Chess Stetson, Xu Cui, P Read Montague, and David M Eagleman. Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation. *Neuron*, Vol. 51, No. 5, pp. 651–659, 2006.
- [62] Brent D Parsons, Scott D Novich, and David M Eagleman. Motor-sensory recalibration modulates perceived simultaneity of cross-modal events at different distances. *Frontiers in psychology*, Vol. 4, p. 34056, 2013.
- [63] Sukhwinder S Shergill, Paul M Bays, Chris D Frith, and Daniel M Wolpert. Two eyes for an eye: the neuroscience of force escalation. *Science*, Vol. 301, No. 5630, pp. 187–187, 2003.
- [64] Paul M Bays, J Randall Flanagan, and Daniel M Wolpert. Attenuation of self-generated tactile sensations is predictive, not postdictive. *PLoS biology*, Vol. 4, No. 2, p. e28, 2006.
- [65] Cedric Roussel, Gethin Hughes, and Florian Waszak. A preactivation account of sensory attenuation. *Neuropsychologia*, Vol. 51, No. 5, pp. 922–929, 2013.
- [66] Carmen Weiss, Arvid Herwig, and Simone Schütz-Bosbach. The self in action effects: selective attenuation of self-generated sounds. *Cognition*, Vol. 121, No. 2, pp. 207–218, 2011.
- [67] Sarah-J Blakemore, Chris D Frith, and Daniel M Wolpert. Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. *Journal of cognitive neuroscience*, Vol. 11, No. 5, pp. 551–559, 1999.
- [68] Lisa Weller, Katharina A Schwarz, Wilfried Kunde, and Roland Pfister. Was it me?—filling the interval between action and effects increases agency but not sensory attenuation. *Biological psychology*, Vol. 123, pp. 241–249, 2017.
- [69] Brianna Beck, Steven Di Costa, and Patrick Haggard. Having control over the external world increases the implicit sense of agency. *Cognition*, Vol. 162, pp.

54–60, 2017.

- [70] Hannah Limerick, David Coyle, and James W Moore. The experience of agency in human-computer interactions: a review. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 8, p. 643, 2014.
- [71] James W Moore. What is the sense of agency and why does it matter? *Frontiers in psychology*, Vol. 7, p. 209433, 2016.
- [72] Ludovic Hoyet, Ferran Argelaguet, Corentin Nicole, and Anatole Lécuyer. “wow! i have six fingers!” : Would you accept structural changes of your hand in vr? *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 3, p. 27, 2016.
- [73] Qi Sun, Anjul Patney, Li-Yi Wei, Omer Shapira, Jingwan Lu, Paul Asente, Suwen Zhu, Morgan McGuire, David Luebke, and Arie Kaufman. Towards virtual reality infinite walking: dynamic saccadic redirection. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 37, No. 4, pp. 1–13, 2018.
- [74] Zhenqiang Ma. An electronic second skin. *Science*, Vol. 333, No. 6044, pp. 830–831, 2011.
- [75] Kai Lukoff, Ulrik Lyngs, Himanshu Zade, J Vera Liao, James Choi, Kaiyue Fan, Sean A Munson, and Alexis Hiniker. How the design of youtube influences user sense of agency. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–17, 2021.
- [76] Jeffrey Heer. Agency plus automation: Designing artificial intelligence into interactive systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 116, No. 6, pp. 1844–1850, 2019.
- [77] Joseph CR Licklider. Man-computer symbiosis. *IRE transactions on human factors in electronics*, No. 1, pp. 4–11, 1960.
- [78] Akira Furui, Shintaro Eto, Kosuke Nakagaki, Kyohei Shimada, Go Nakamura, Akito Masuda, Takaaki Chin, and Toshio Tsuji. A myoelectric prosthetic hand with muscle synergy–based motion determination and impedance model–based biomimetic control. *Science Robotics*, Vol. 4, No. 31, p. eaaw6339, 2019.
- [79] Levi J Hargrove, Ann M Simon, Aaron J Young, Robert D Lipschutz, Suzanne B Finucane, Douglas G Smith, and Todd A Kuiken. Robotic leg control with emg decoding in an amputee with nerve transfers. *New England Journal of Medicine*, Vol. 369, No. 13, pp. 1237–1242, 2013.
- [80] Luke E Osborn, Andrei Dragomir, Joseph L Betthauser, Christopher L Hunt,

Harrison H Nguyen, Rahul R Kaliki, and Nitish V Thakor. Prosthesis with neuromorphic multilayered e-dermis perceives touch and pain. *Science robotics*, Vol. 3, No. 19, p. eaat3818, 2018.

- [81] Loredana Zollo, Giovanni Di Pino, Anna L Ciancio, Federico Ranieri, Francesca Cordella, Cosimo Gentile, Emiliano Noce, Rocco A Romeo, Alberto Della-casa Bellingegni, Gianluca Vadalà, et al. Restoring tactile sensations via neural interfaces for real-time force-and-slippage closed-loop control of bionic hands. *Science robotics*, Vol. 4, No. 27, p. eaau9924, 2019.
- [82] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metalimbs: multiple arms interaction metamorphism. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2017.
- [83] Wen-Yeo Chen, Hsu-Chia Huang, Yen-Tung Lee, and Caleb Liang. Body ownership and the four-hand illusion. *Scientific reports*, Vol. 8, No. 1, p. 2153, 2018.
- [84] Irfan Hussain, Gionata Salvietti, Giovanni Spagnoletti, and Domenico Prattichizzo. The soft-sixthfinger: a wearable emg controlled robotic extra-finger for grasp compensation in chronic stroke patients. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 1, No. 2, pp. 1000–1006, 2016.
- [85] Paulina Kieliba, Danielle Clode, Roni O Maimon-Mor, and Tamar R Makin. Robotic hand augmentation drives changes in neural body representation. *Science robotics*, Vol. 6, No. 54, p. eabd7935, 2021.
- [86] Dag Svanaes and Martin Solheim. Wag your tail and flap your ears: The kinesthetic user experience of extending your body. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3778–3779, 2016.
- [87] Junichi Nabeshima, MHD Yamen Saraiji, and Kouta Minamizawa. Prosthetic tail: Artificial anthropomorphic tail for extending innate body functions. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, pp. 1–4, 2019.
- [88] Christian I Penalosa and Shuichi Nishio. Bmi control of a third arm for multi-tasking. *Science Robotics*, Vol. 3, No. 20, p. eaat1228, 2018.
- [89] Marc Teyssier, Gilles Bailly, Catherine Pelachaud, and Eric Lecolinet. Mobilimb: Augmenting mobile devices with a robotic limb. In *Proceedings of the 31st*

annual ACM symposium on user interface software and technology, pp. 53–63, 2018.

- [90] Matej Hoffmann, Hugo Marques, Alejandro Arieta, Hidenobu Sumioka, Max Lungarella, and Rolf Pfeifer. Body schema in robotics: a review. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 2, No. 4, pp. 304–324, 2010.
- [91] Elahe Abdi, Etienne Burdet, Mohamed Bouri, Sharifa Himidan, and Hannes Bleuler. In a demanding task, three-handed manipulation is preferred to two-handed manipulation. *Scientific reports*, Vol. 6, No. 1, p. 21758, 2016.
- [92] Wen Wen, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama. The sense of agency during continuous action: performance is more important than action-feedback association. *PloS one*, Vol. 10, No. 4, p. e0125226, 2015.
- [93] Kazuya Inoue, Yuji Takeda, and Motohiro Kimura. Sense of agency in continuous action: Assistance-induced performance improvement is self-attributed even with knowledge of assistance. *Consciousness and cognition*, Vol. 48, pp. 246–252, 2017.
- [94] Baruch Eitam, Patrick M Kennedy, and E Tory Higgins. Motivation from control. *Experimental brain research*, Vol. 229, pp. 475–484, 2013.
- [95] Bruno Berberian. Man-machine teaming: a problem of agency. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 34, pp. 118–123, 2019.
- [96] Bruno Berberian, Jean-Christophe Sarrazin, Patrick Le Blaye, and Patrick Haggard. Automation technology and sense of control: a window on human agency. *PloS one*, Vol. 7, No. 3, p. e34075, 2012.
- [97] David Coyle, James Moore, Per Ola Kristensson, Paul Fletcher, and Alan Blackwell. I did that! measuring users’ experience of agency in their own actions. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 2025–2034, 2012.
- [98] Joanna Bergstrom-Lehtovirta, David Coyle, Jarrod Knibbe, and Kasper Hornbæk. I really did that: Sense of agency with touchpad, keyboard, and on-skin interaction. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–8, 2018.
- [99] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput: appropriating the body as an input surface. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 453–462, 2010.

- [100] Jürgen Steimle, Joanna Bergstrom-Lehtovirta, Martin Weigel, Aditya Shekhar Nittala, Sebastian Boring, Alex Olwal, and Kasper Hornbæk. On-skin interaction using body landmarks. *Computer*, Vol. 50, No. 10, pp. 19–27, 2017.
- [101] Sihong Wang, Jie Xu, Weichen Wang, Ging-Ji Nathan Wang, Reza Rastak, Francisco Molina-Lopez, Jong Won Chung, Simiao Niu, Vivian R Feig, Jeffrey Lopez, et al. Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array. *Nature*, Vol. 555, No. 7694, pp. 83–88, 2018.
- [102] Aditya Shekhar Nittala, Klaus Kruttwig, Jaeyeon Lee, Roland Bennewitz, Eduard Arzt, and Jürgen Steimle. Like a second skin: understanding how epidermal devices affect human tactile perception. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–16, 2019.
- [103] Joseph La Delfa, Mehmet Aydin Baytas, Rakesh Patibanda, Hazel Ngari, Rohit Ashok Khot, and Florian’Floyd’ Mueller. Drone chi: Somaesthetic human-drone interaction. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2020.
- [104] Jeff KT Tang, Jacky CP Chan, and Howard Leung. Interactive dancing game with real-time recognition of continuous dance moves from 3d human motion capture. In *Proceedings of the 5th international conference on ubiquitous information management and communication*, pp. 1–9, 2011.
- [105] Gareth Young, Hamish Milne, Daniel Griffiths, Elliot Padfield, Robert Blenkinsopp, and Orestis Georgiou. Designing mid-air haptic gesture controlled user interfaces for cars. *Proceedings of the ACM on human-computer interaction*, Vol. 4, No. EICS, pp. 1–23, 2020.
- [106] Patricia Ivette Cornelio Martinez, Silvana De Pirro, Chi Thanh Vi, and Sriram Subramanian. Agency in mid-air interfaces. In *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 2426–2439, 2017.
- [107] Pei Jia, Huosheng H Hu, Tao Lu, and Kui Yuan. Head gesture recognition for hands-free control of an intelligent wheelchair. *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 60–68, 2007.
- [108] Jeonghee Kim, Hangue Park, Joy Bruce, Erica Sutton, Diane Rowles, Deborah Pucci, Jaimee Holbrook, Julia Minocha, Beatrice Nardone, Dennis West, et al. The tongue enables computer and wheelchair control for people with spinal cord injury. *Science translational medicine*, Vol. 5, No. 213, p. 213ra166, 2013.

- [109] Daisuke Tajima, Jun Nishida, Pedro Lopes, and Shunichi Kasahara. Whose touch is this?: Understanding the agency trade-off between user-driven touch vs. computer-driven touch. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 29, No. 3, pp. 1–27, 2022.
- [110] Pedro Lopes, Alexandra Ion, Willi Mueller, Daniel Hoffmann, Patrik Jonell, and Patrick Baudisch. Proprioceptive interaction. In *Proceedings of the 33rd annual acm conference on human factors in computing systems*, pp. 939–948, 2015.
- [111] Shunichi Kasahara, Jun Nishida, and Pedro Lopes. Preemptive action: Accelerating human reaction using electrical muscle stimulation without compromising agency. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–15, 2019.
- [112] Pedro Lopes, Doaa Yüksel, François Guimbretière, and Patrick Baudisch. Muscle-plotter: An interactive system based on electrical muscle stimulation that produces spatial output. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 207–217, 2016.
- [113] Ayaka Ebisu, Satoshi Hashizume, Kenta Suzuki, Akira Ishii, Mose Sakashita, and Yoichi Ochiai. Stimulated percussions: method to control human for learning music by using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, pp. 1–5, 2017.
- [114] Pedro Lopes, Patrik Jonell, and Patrick Baudisch. Affordance++ allowing objects to communicate dynamic use. In *Proceedings of the 33rd annual acm conference on human factors in computing systems*, pp. 2515–2524, 2015.
- [115] Josh Andres, Julian de Hoog, and Florian ‘Floyd’ Mueller. ” i had super-powers when ebike riding” towards understanding the design of integrated exertion. In *Proceedings of the 2018 annual symposium on computer-human interaction in play*, pp. 19–31, 2018.
- [116] Wen Wen, Yoshihiro Kuroki, and Hajime Asama. The sense of agency in driving automation. *Frontiers in Psychology*, Vol. 10, p. 2691, 2019.
- [117] Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D Wilson. Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences. In *Proceedings of the 2016 chi conference on human factors in computing systems*, pp. 1968–1979, 2016.
- [118] Michael Rietzler, Florian Geiselhart, Jan Gugenheimer, and Enrico Rukzio.

- Breaking the tracking: Enabling weight perception using perceivable tracking offsets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, 2018.
- [119] Majed Samad, Elia Gatti, Anne Hermes, Hrvoje Benko, and Cesare Parise. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2019.
 - [120] Roberto A Montano Murillo, Elia Gatti, Miguel Oliver Segovia, Marianna Obrist, Jose P Molina Masso, and Diego Martinez Plasencia. Navifields: Relevance fields for adaptive vr navigation. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 747–758, 2017.
 - [121] Ryohei Nagao, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Ascending and descending in virtual reality: Simple and safe system using passive haptics. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1584–1593, 2018.
 - [122] Ana Tajadura-Jiménez, Joseph Newbold, Linge Zhang, Patricia Rick, and Nadia Bianchi-Berthouze. As light as you aspire to be: Changing body perception with sound to support physical activity. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14, 2019.
 - [123] Ana Tajadura-Jiménez, Aleksander Väljamäe, and Kristi Kuusk. Altering one’s body-perception through e-textiles and haptic metaphors. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 7, p. 7, 2020.
 - [124] Ben Shneiderman. ユーザーインターフェースの設計：やさしい対話型システムへの指針. 日経 BP 社, 東京, 第 2 版, 1995. (東 基衛, 井関 治 監訳, 原書: Designing the user interface).
 - [125] Chris D Frith. Action, agency and responsibility. *Neuropsychologia*, Vol. 55, pp. 137–142, 2014.
 - [126] Patrick Haggard. Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 18, No. 4, pp. 196–207, 2017.
 - [127] Donald A Norman. The ‘problem’ with automation: inappropriate feedback and interaction, not ‘over-automation’. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, Vol. 327, No. 1241, pp. 585–593, 1990.
 - [128] Kevin Le Goff, Arnaud Rey, Patrick Haggard, Olivier Oullier, and Bruno Berbe-

rian. Agency modulates interactions with automation technologies. *Ergonomics*, Vol. 61, No. 9, pp. 1282–1297, 2018.

- [129] Shunichi Kasahara, Kazuma Takada, Jun Nishida, Kazuhisa Shibata, Shinsuke Shimojo, and Pedro Lopes. Preserving agency during electrical muscle stimulation training speeds up reaction time directly after removing ems. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–9, 2021.
- [130] Patrick Haggard and Sam Clark. Intentional action: Conscious experience and neural prediction. *Consciousness and cognition*, Vol. 12, No. 4, pp. 695–707, 2003.
- [131] Rin Minohara, Wen Wen, Shunsuke Hamasaki, Takaki Maeda, Motoichiro Kato, Hiroshi Yamakawa, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama. Strength of intentional effort enhances the sense of agency. *Frontiers in psychology*, Vol. 7, p. 1165, 2016.
- [132] Jelle Demanet, Paul S Muhle-Karbe, Margaret T Lynn, Iris Blotenberg, and Marcel Brass. Power to the will: How exerting physical effort boosts the sense of agency. *Cognition*, Vol. 129, No. 3, pp. 574–578, 2013.
- [133] Patrick Haggard, Simmy Poonian, and Eamonn Walsh. Representing the consequences of intentionally inhibited actions. *Brain research*, Vol. 1286, pp. 106–113, 2009.
- [134] Ray Hyman. Stimulus information as a determinant of reaction time. *Journal of experimental psychology*, Vol. 45, No. 3, p. 188, 1953.
- [135] Michiko Yoshie and Patrick Haggard. Negative emotional outcomes attenuate sense of agency over voluntary actions. *Current Biology*, Vol. 23, No. 20, pp. 2028–2032, 2013.
- [136] James W Moore, Susanne A Schneider, Petra Schwingenschuh, Giovanna Moretto, Kailash P Bhatia, and Patrick Haggard. Dopaminergic medication boosts action–effect binding in parkinson’s disease. *Neuropsychologia*, Vol. 48, No. 4, pp. 1125–1132, 2010.
- [137] Miriam Ruess, Roland Thomaschke, and Andrea Kiesel. The time course of intentional binding. *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 79, pp. 1123–1131, 2017.

発表論文リスト

学術論文

- Miwa Nagai, Kazuhiro Matsui, Keita Atsuumi, Kazuhiro Taniguchi, Hiroaki Hirai, Atsushi Nishikawa. “The effect of electrical muscle stimulation on intentional binding and explicit sense of agency.” PeerJ (掲載決定). 【主論文】
- 厚海慶太, 永井美和, 谷口和弘, 松居和寛, 西川敦, 「平衡点仮説に基づく機能的電気刺激を用いた等尺性条件下におけるヒト手指関節運動モデルの検討」, 生体医工学, 日本生体医工学会, 56(5), pp. 198–208, 2018.
- Kazuhiro Matsui, Yuya Suzuki, Keita Atsuumi, Miwa Nagai, Shotaro Ohno, Hiroaki Hirai, Atsushi Nishikawa, Kazuhiro Taniguchi. “Earable Ω (OMEGA): A Novel Clenching Interface Using Ear Canal Sensing for Human Metacarpophalangeal Joint Control by Functional Electrical Stimulation.” Sensors, 2022 Sep; 22(19): 7412.

国際会議（査読あり）

- Miwa Nagai, Keita Atsuumi, Kazuhiro Taniguchi, Kazuhiro Matsui, Hiroaki Hirai, Atsushi Nishikawa. “Modeling of Metacarpophalangeal Joint Movement using Functional Electrical Stimulation by Controlling the Equilibrium-Point.” EMBC2019, 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2019 July 23–27; Berlin, Germany: ThPOS-34.21.
- Miwa Nagai, Kazuhiro Matsui, Keita Atsuumi, Kazuhiro Taniguchi, Hiroaki Hirai, Atsushi Nishikawa. “Identification of Metacarpophalangeal Joint Movement Model Using Functional Electrical Stimulation Based on Muscle Synergy Hypothesis—Confirmation of the Three Models of Finger Movement.” EMBC2020, 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2020 July 20–24; Montreal, Canada (EMBS Virtual Academy): No. 2365.

国内学会

- 永井美和, 厚海慶太, 谷口和弘, 松居和寛, 宮崎文夫, 李仕剛, 西川敦. “表面電極を用いた前腕への機能的電気刺激と等尺性条件下における指先力計測に基づく手指のモデル化.” 第 37 回日本生体医工学会甲信越支部大会, 2017 年 11 月 25 日; 山梨大学甲府キャンパス: 24. [優秀賞]
- 永井美和, 厚海慶太, 谷口和弘, 松居和寛, 宮崎文夫, 李仕剛, 西川敦. “表面電極を用いた機能的電気刺激と中手指節関節角度計測に基づく手指のモデル化.” 第 57 回日本生体医工学会大会, 2018 年 6 月 19–21 日; 札幌コンベンションセンター: O3-7-3-3.
- 永井美和, 厚海慶太, 谷口和弘, 松居和寛, 西川敦. “平衡点仮説に基づく機能的電気刺激によるヒト手指の神経筋系のモデリングと力制御実験.” 生体医工学シンポジウム 2018, 2018 年 9 月 14–15 日; 名古屋工業大学 NITech Hall: 2A-22.
- 永井美和, 厚海慶太, 谷口和弘, 松居和寛, 西川敦. “平衡点仮説に基づく機能的電気刺激を用いた等尺性条件下におけるヒト手指関節運動のモデリングおよび評価実験.” 第 38 回日本生体医工学会甲信越支部大会, 2018 年 10 月 13 日; 新潟大学五十嵐キャンパス: 16. [優秀賞]
- 永井美和, 厚海慶太, 谷口和弘, 松居和寛, 西川敦. “機能的電気刺激を用いた中手指節関節角度計測に基づく手指関節の平衡点制御モデルの検討.” 第 58 回日本生体医工学会大会, 2019 年 6 月 6–8 日; 沖縄コンベンションセンター: PO-B-024.
- 永井美和, 松居和寛, 厚海慶太, 谷口和弘, 平井宏明, 西川敦. “ヒト運動制御戦略に基づく機能的電気刺激を用いた中手指節関節運動制御モデルの同定と評価.” 生体医工学シンポジウム 2019, 2019 年 9 月 6–7 日; 徳島大学 常三島キャンパス: 2P-22.
- 永井美和, 松居和寛, 厚海慶太, 谷口和弘, 平井宏明, 西川敦. “筋シナジーに基づく機能的電気刺激を用いた中手指節関節運動のモデル化.” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2020 年 5 月 27–30 日; 石川県産業展示館 3 号館 (オンライン開催) : 1P2-M05.
- 永井美和, 松居和寛, 厚海慶太, 谷口和弘, 平井宏明, 西川敦. “協調的な機能的電気刺激を用いた中手指節関節運動のモデル化.” 第 26 回ロボティクスシンポジア, 2021 年 3 月 16–17 日; オンライン開催: 5C3.

- 永井美和, 松居和寛, 厚海慶太, 谷口和弘, 平井宏明, 西川敦. “運動主体感の暗示的尺度 (intentional binding) に基づく電気的筋刺激印加手法の提案と評価.” 生体医工学シンポジウム 2024, 2024 年 9 月 12–14 日; 東京大学 (本郷キャンパス) :F-9 (発表予定).
- 厚海慶太, 永井美和, 谷口和弘, 松居和寛, 宮崎文夫, 李仕剛, 西川敦. “表面電極を用いた機能的電気刺激 (FES) によるヒト手指制御のためのシステム同定.” 生体医工学シンポジウム 2017, 2017 年 9 月 15–16 日; 信州大学纖維学部 (上田キャンパス) : 2P-19.
- 大野正太朗, 松居和寛, 谷口和弘, 厚海慶太, 永井美和, 平井宏明, 西川敦. “噛みしめ動作をインタフェースに用いた機能的電気刺激によるヒト手指関節制御の検討.” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2020 年 5 月 27–30 日; 石川県産業展示館 3 号館 (オンライン開催) : 2P1-E10.
- 松居和寛, 安藤哲也, Gong Shuogang, 永井美和, 平井宏明, 西川敦. “筋協調を考慮した筋電図バイオフィードバックシステムの連続的な入力における角度計算精度検証.” 第 10 回日本支援工学理学療法学会学術大会, 2021 年 12 月 4–5 日; オンライン開催: a132-1.
- 松居和寛, 安藤哲也, Gong Shuogang, 永井美和, 平井宏明, 西川敦. “内部モデルの再学習を目的としたモデルベースの筋電図バイオフィードバックシステムに関する提案.” 第 19 回日本神経理学療法学会学術大会, 2021 年 12 月 18–19 日; オンライン開催: O8-1.

受賞

- 第 37 回日本生体医工学会甲信越支部大会, 優秀賞 (2017 年 11 月).
- 第 38 回日本生体医工学会甲信越支部大会, 優秀賞 (2018 年 10 月).
- 自動車技術会大学院研究奨励賞, 優秀賞 (2020 年 2 月).

知的財産権

- 名称: 運動支援装置

発明者: 永井美和, 西川敦

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 特願 2023-39685

出願年月日: 2023 年 3 月 14 日

国内外の別: 国内