

身体運動制御における注意の働きとシナジーに関する一考察

Relationship between attention and motor synergy in body motion control

阪口 豊[†]

Yutaka Sakaguchi

[†]電気通信大学

University of Electro-Communications

yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

概要

本発表では、ヒトの運動制御における注意の働きについて議論する。特に、外的焦点に比して内的焦点において運動課題の成績が低下する原因について運動計画の局所最適性の観点から考察し、大域的最適性を実現する注意の在り方として包括的注意の意味を議論する。また、全身運動の協応構造であるシナジーが注意の在り方と密接な関係にある可能性を指摘するほか、運動計画の評価関数の荷重係数を選択的注意によって修飾することで注意による運動への影響を説明するモデルについて述べる。

キーワード：身体技能，運動制御，身体感覚，注意，シナジー，評価関数

1. はじめに

注意の向け方がヒトの知覚や運動に影響を及ぼすことは日常的経験からも科学的知見からも明らかである。特定の対象に対して選択的注意を向けることによってその対象に関する情報処理が促進されることはさまざまな研究で明らかにされている[1]。また、身体運動制御に関しては、注意を外部の対象に向ける（外的焦点）のに比べ、自分の身体内に向ける（内的焦点）方が課題成績や学習効率が低下することが指摘されている[2,3]。

本発表では、注意が身体知覚や運動制御に与える影響やそのメカニズムについて視知覚における注意の働きと対比しながら議論する。なお、本稿の内容は、行動実験やシミュレーション実験に基づく具体的・定量的な議論ではなく、以上の問題に関する種々の知見に基づく考察である。

2. 選択的注意と包括的注意

視知覚における注意の研究では「選択的注意が特定の対象の情報処理を促進する」ことが広く受け入れられている[1]。このことは、注意を向けた対象を詳細に分析するには都合がよいが、その裏返しとして、注意を向けていない対象や領域の処理が疎かになるという負の側面がある。実際、先入観をもった状況での見落とし

など、特定の対象に注意を集中させたことに伴う失敗は日常的に経験することが多い。したがって、視野全体にわたって一様な処理特性を維持するには、特定の対象に選択的注意を向けないことが望ましいといえる。剣道における「遠山の目付」（目の前の相手を見ようとせずにあたかも遠くの山を見るようにする）という言葉は視野全体を広くとらえることの重要性を指摘する例である。このような視野全体に広がる注意の向け方を本稿では「包括的注意」と呼ぶ。選択的注意が情報源の所在が明らかなきに有効に機能するのに対し、包括的注意は情報がどこに出現するかを予測できない不確実性が高い場面で有効に機能するといえる。

このように、包括的注意は特定の対象に焦点を絞らず視野全体に様に気を配る状況であるが、その状態を明確に定義することは難しい。これは、視野のどこかに何か出現するのを能動的に待ち受けるという状態ではなく、刺激をそのまま受動的に受け入れる状態である。一方で、思考に集中するなどして感覚情報に注意を向けていない状態（無注意状態）とも異なる。あえていえば、意識下で作動する自動化された処理が自然に機能するようにした状態とよいかもしい。例えば、視野のどこかに変化が生じたときにそれを検出して視線を向けるのは無意識の処理系の働きであるが、このような処理が有効に機能するような状態を保っているということである。選択的注意が働いていた無注意状態であったりすると、このような無意識の処理が妨げられて、本来知覚に上るはずのものが知覚されないことが起こりうる。そのような状態を避けるのが包括的注意であるといつてよい。

ここまで視知覚を例にとって注意の働きについて述べてきたが、本論の主題は身体知覚における注意の働きである。ここで話を身体知覚の移すと、これまで述べてきた選択的注意と包括的注意の違いは、視覚的注意だけでなく身体的注意においても同様に成り立つと考えられる。つまり、特定の身体部位に注意を向けるのが

選択的注意であるのに対し、身体全体の状態を一様に受け取るのが包括的注意である。これは、アレクサンダー・テクニクにおける包括的認識力 (comprehensive awareness) [4] に近いものと推測される。このように考えたとき、冒頭で述べた内的焦点における運動パフォーマンスの低下は内的「焦点」すなわち選択的注意の負の側面として捉えることができる。つまり、外的焦点と対比したときの内的焦点の問題点は、内的焦点が選択的注意であるための問題であると考えられる。したがって、同じ内的注意であっても包括的注意においてパフォーマンス低下が生じるかどうかは疑問である。特に、アレクサンダー・テクニクにおいて包括的注意の重要性が指摘されていることを考えれば、包括的注意にポジティブな効果があることは十分に考えられる。外的焦点と包括的注意の関係については後述するが、少なくとも「身体への注意がもたらす負の効果」については検討の余地があることは間違いない。

ここで、運動課題遂行中に内的焦点を向けるのはいかなる場面であるかを具体的に考えてみる。運動者が身体に注意を向けるのはその身体部位の状態を知覚したいからであるが、その典型的な例は、新しい動きを習得するために試行錯誤しているときである。一般に、慣れた動作は無意識に遂行していることが多く、身体が存在を忘れていないといってもよいような状況である（この場合の注意の働きについては後述する）。これに対し、慣れない動作を習得しようとする際は、いかなる身体感覚が目的の動作を実行する際の手がかりとして有用かを探索すべく、さまざまな部位に選択的注意を向けていると考えられる。

ここで注意すべきことは、そのような場面では、その身体部位の状態を知覚しようするだけでなく制御しようとしていることが多いことである。例えば、手や腕の動きに注意を向けるときは、手や腕の感じ方（知覚）が自分の望ましいと思う感じ方と等しくなるように身体を動かそうとしていないだろうか。つまり、その部位に選択注意を向ける動機は、「その部位がどのような状態にあるかを知りたい」だけでなく「その部位が望ましい状態であるかどうかを判断し、さらには、望ましい状態に近づきたい」こともあると考えられる。

このような動機付けは、目的の運動課題のパフォーマンスを向上させるうえで、運動者自身が（あるいは指導者の教示にしたがって）自身の身体感覚に基づくサブゴールを設定していると解釈できる。例えば、「肘が〇〇であるような感じで腕を動かそう」と考えたとき

には、肘に向けられた注意は肘がそのような感覚になっているかを判断し、そうでなければそうなるように動きを修正させる働きを担っている。このような注意の向け方は、設定したサブゴールを実現すべく運動計画・制御に影響を及ぼしているはずである。

いずれにせよ、運動習得過程における内的焦点は、課題成績を向上させるための手がかりとして特定の身体部位の感覚を利用する場合に働いていると考えられる。このような身体感覚を土台とする運動規範が強く働くと、本来の運動課題を実行することよりも、自分が定めた望ましい身体感覚を得ることが重要視され（つまり、局所最適化が起こり）、結果として、本来の運動課題の成績向上のおろそかになる（大域的最適化が妨げられる）ことが起こりうる。特に、力感などの知覚しやすい感覚は手がかりとなりやすいが、力感を感じるということは筋張力が余計に働いている可能性が高いことから、本来の運動にとってネガティブな作用をしていることは十分に考えられる。

このようなことが生じないようにするには、「注意を向けた先の身体部位を望ましい状態に近づけよう」という動機付けをもたずに、単に「その身体部位がどのような状態にあるか」をそのまま受け入れるといった意識の持ち方が必要になる。誤解を恐れずにいえば、エージェンシー（身体の自己支配感）を脇において第三者的に身体を眺める感覚である。したがって、同じ内的焦点であっても、身体を積極的に感じようとしたり身体を思い通りの状態にしようとしたりするかどうかで運動遂行の様態は変化すると考えられる。そして、先に述べた包括的注意とは、このような身体の状態を受動的に観察するという意識の持ち方を特定の身体部分だけでなく全身に対して向けた状態であるといえる。

ここで、慣れた動作をする際の注意の働きについて述べておく。上述したように、慣れた動作をする際に身体の状態が知覚に上ることはまれで、動作はほぼ無意識にうちに実行されているといつてよい。これは、いわば「無注意状態」であるといえるが、この場合には、内的焦点と異なり、脳は特定の身体部位の評価にとらわれないため、身体運動の大域的最適化が実現できるように考えられる。外的焦点において運動パフォーマンスが相対的に高い理由は、身体内部に注意が向けられない（つまり無注意状態である）ため、同様に身体運動の大域的最適化がなされるためと考えることができる。それでは、この無注意状態と包括的注意の状態はどのように違うのであろうか。

これはあくまで推測の域をでない考察であるが、両者の違いは、身体の「違和感」をはじめとした「気づき」を得ることができるかどうかにあると考えられる。無注意状態では身体の知覚は生じないため、運動遂行中は無意識の運動計画・生成系が生み出した運動がそのまま実行され、その修正を促す手がかりは何も得られない。つまり、無注意状態では動作を現状以上に改善させるきっかけが生じないのである。これに対して、包括的注意の状態では、運動遂行中に生じる緊張感や力感などに気づくことができ、それにより、意識的にあるいは無意識的に運動を修正する機会が得られる。このような予期しない「気づき」を得るには、身体全体に対してまんべんなく注意を向けておく包括的注意が有効であると考えられる。

つまり、慣れた運動は身体感覚に注意を向けなくても実行できるが、それは必ずしも最適な形で遂行されているとは限らず（極小解に陥っている可能性がある）、また、注意を向けない限りその問題点に気づくことができない。これに対して、包括的注意の状態をとることにより、慣れた運動の実行中に問題点を検出・解消して運動の最適解へ近づく可能性が生まれる。特に、ヒトの身体特性が時々刻々と変化していることを考えると、そのときそのときで身体を最適な形で使うためには包括的注意を働かせることが有効であると考えられる。

包括的注意の特性や機能はまだよくわかっていないだけに、包括的注意が運動パフォーマンスに与える影響を実験的に検証することが求められる。

3. 注意、知覚体制化と運動シナジー

前節では、包括的注意が運動計画・制御の大域的な最適化を促し運動パフォーマンスを向上させる可能性を指摘した。ここで着目した「運動の大域的な最適性」という概念の背景には、ヒトの身体運動は全身の筋骨格系の協調的な働きによって実現されているという前提がある。

例えば、腕を動かす際は、腕の動きによって生じる反力を肩（つまり体幹）で支える必要があることから、制御が必要な部位は、腕の動きに直接関係する筋だけでなく、その土台となる体幹を支えるのに必要な筋に及ぶ。このとき、体幹を固めて腕だけを動かす方略もあれば、体幹も動きに参加して全身運動として腕を動かす方略もある。どちらの方略が望ましいかは運動課題の内容次第であるが、いずれにしても腕の運動であって

も運動制御が全身に及ぶことに違いはない。本節では、このような前提の下で、包括的注意はどのようにして運動パフォーマンスを向上させうるのかを考察する。

この問いに答えるための一つの手がかりとして、ここでは注意と知覚体制化の関係に着目する。知覚体制化はパターン情報である感覚情報を一定の構造をもった表象にまとめあげる作用であり、視知覚においては画像処理における図地分離やセグメンテーションに相当する情報処理である[5]。選択的注意は、知覚体制化において背景から図を切り出す作用を有している。実際、「ルビンの盃」のような図地反転図形においては、注意を向けた領域が図として知覚されやすく、図として知覚された領域や対象に関する情報処理が促進される。つまり、選択的注意は、視野全体から図を抽出するとともに、地の部分を目的とする情報処理から切り離す働きを有するといえる。このことを身体知覚に当てはめれば、内的焦点には、注意を向けた身体部分を抽出して他の部分を切り離す作用を有すると推察できる。

ここでさらに視点を身体知覚から運動制御に広げれば、身体の知覚体制化と関係があると考えられるのが運動シナジー（運動協応）である[6]。一般に、シナジーは運動中に複数の身体部分が協調的に機能することを指すが、その実態については議論が分かれている。一部の研究者は、シナジーを多自由度の筋指令空間における次元圧縮（冗長性削減）メカニズムと捉える一方で（筋シナジー：muscle synergy[7]）、他の研究者は複数の身体部位が相補的に働く（ある部位の動きの変化を他の部位の動きで補う）ことをシナジーと考えている[6]。少なくとも、優れた身体技能が高い身体自由度を活かして実現されることを考えると、本論の観点からは、シナジーの本質は次元圧縮よりもむしろ高い身体自由度の活用にあると考えるのが自然であろう。このように考えると、シナジーとは、前節までで論じてきた「身体運動の大域的最適化」と何らかの意味で同義であるといえる。そして、包括的注意の効用はシナジーを有効に機能させることとみなすこともできる。

一方で、多次元空間の最適化問題において大域的最適解を探索することは難しく、そこに身体技能習得の難しさの本質的理由がある。Latashらは、このことに関連して「自由度の凍結と解放」という議論を行っている[8]。すなわち、新しい運動を習得する際は身体の自由度を制約し問題を単純化して解の探索を容易にする一方で、学習が進めば自由度を解放してより大きな空間での望ましい解を獲得するという議論である。この議

論に従えば、運動習得の過程では、全身にわたるシナジーを一時的に断念して自由度を下げ、局所的な最適解を獲得したのち、ふたたび自由度を上げて全身のシナジーをとりもどすのが、運動習得に向けた一つの方策ということになる。

このように考えたとき、そのような身体自由度の調整に関わっているのが内的注意の機能的役割であるという仮説が得られる。実際、内的焦点を向ける局面は、与えられた運動課題がうまく実行できず、どのような手がかりに基づいて身体を操作すればよいかと試行錯誤を重ねている過程である。内的焦点により運動の評価軸を定めれば、その評価軸の下で望ましい運動の解を探索することができる。逆に、特定の焦点を設けない包括的注意の状態ではこのような探索はやりにくい。したがって、運動習得の過程で全身にわたるシナジーが一時的に機能しづらくなるのは内的焦点の副作用として仕方のないことかもしれない。

このように考えると、運動技能習得における内的焦点の問題は、内的焦点それ自体にあるのではなく、内的焦点の下で準最適な運動を獲得したあとも内的焦点の状態を維持し続けてしまうことにあるのかもしれない。内的焦点の下では、焦点の対象でない部分が望ましくない状態にあったとしてもそれに気づきにくくなる。例えば、手に内的焦点を向けていると、肘や肩に無駄な力が入っていてもそれを違和感として感じ取ることができないということである。逆に、内的焦点の下で一定の成績が獲得できれば、いったん内的焦点を解除して包括的注意に移行することにより、分断されたシナジーから全身のシナジーへ移行するきっかけが得られるほか、内的焦点の下で気づくことができなかつた他の身体部分の問題点にも気づくことができる。

以上まとめると、内的焦点の下での局所的な問題解決と包括的注意の下での大域的な問題検出の往復によって漸次的に運動機能を獲得する運動学習のモデルを構築することができる。筋指令の決定過程が意識に上らない意味で、運動制御・学習の過程は認知システムから見ればブラックボックスである。認知システムはあくまで運動の意図を定めその結果を知覚することしかできない。しかし、認知システムは何を運動の目標（規範）とするかを選択できる。その意味で、認知システムは無意識の運動制御・学習系のサンプリングを調整する機能を担っているといえる。学習システムにおいて学習データのサンプリングが学習性能を左右することを考えれば、認知システムの働き、すなわち、注意の遣

い方が運動学習に大きな影響を与えるのはこのためであるといえる。

4. 注意とシナジーの計算論

これまで、注意やシナジーの働きについて言葉を使って議論を進めてきたが、議論をさらに具体的に進めるには、これまでの議論の内容を物理的、数理的な表現を用いて記述する必要がある。例えば、シナジーを「身体の運動を大域的に最適化すること」を定めたが、その中身を検討するには評価関数を明示的に表さなければならぬ。以下では、運動計画の最適化理論を手がかりにしてこの問題について検討する。

生態学的な要請を考えると、生体は物理的、生理的あるいは情報論的に負荷がなるべく小さな方法で所望の動作を実現することが望まれる。このようなことから、運動計画・運動生成の計算理論における評価関数は、課題の実行成績を表す評価項と生態学的要請を反映した評価項から構成される。

$$(\text{評価関数}) = (\text{課題成績}) + (\text{生態学的要請})$$

生態学的要請としては、消費エネルギー、動きの滑らかさ、トルク変化量、筋張力変化量、筋指令変化量などが提案されている[9]。また、生態学的要請を明示的に与えずに信号依存性イブ（signal dependent noise）という筋指令に内在する特性の下で課題成績（終点分散）を評価量とする理論も提案されている[10]。このように、多様な評価量が提案されているものの、その評価関数の下で生成される運動機能の特性は、ほとんどの場合、平面内2リンク機構に代表される低自由度の身体モデルを用いた例題でしか検討されていない。つまり、多数の筋が関与する現実の身体運動においてこれらの評価量が有効であるかどうかは不明である。数少ない研究例として、5リンク身体モデルによる全身到達運動課題を対象とした検討[11]があるが、それによると、トルク変化量を評価に用いると手先軌道をうまく再現できないが、筋張力変化量を評価に用いるとよく再現できることが明らかにされている。このことは、筋骨格構造の特性を反映した評価関数を用いることで、多自由度の状況でも従来の運動計画理論がヒトの運動を説明できることを示唆している。

ここで、本稿の主題である注意が運動に与える影響に話題をもどすと、従来の運動計画理論には注意という要素が考慮されていないことに気づく。これはおそらく、従来の運動計画理論が認知過程とは無関係な計

算機構を対象としているためであるが、これに加えて、低自由度の身体モデルのみを例題としていたため注意という問題意識が生じなかったためとも考えられる。このことを逆説的に考えれば、従来の運動計画理論は、(低次元ながらも)全身にわたって運動を最適化している点で、全身の協調動作、すなわち、シナジーを実現していると捉えることができる。したがって、全身動作に関わる評価関数を選択的注意の機能によって部分的に修飾すれば、全身に亘る評価の一様性が崩れ、シナジーの特性が変化することが予想できる。

選択的注意によって評価関数を修飾する具体的な方法として、評価関数を複数の評価項の荷重和として記述し、その荷重を注意の向きに応じて調整する方法が考えられる。従来理論の評価関数においても、

$$(\text{評価関数}) = (\text{課題成績}) + \lambda (\text{生態学的要請})$$

といった形で荷重係数 λ を導入し、荷重係数を調整することで課題成績と生態学的要請のバランスを図ることは一般的に行われてきた。注意の機能を実現するには、評価関数を多数の項に分解してそれぞれに荷重係数をかけることによって実現できる。

このように、運動計画の評価関数に注意が作用するメカニズムを想定することによって、運動制御における選択的注意の働きが、知覚のための情報源選択としてだけでなく、課題成績評価の重みづけとしての機能する仕組みを説明できる。

なお、到達運動のような弾道の運動(事前の運動計画により前向き制御だけで遂行できる運動)ではなく、歩行運動や目標追跡運動のように運動を適応的に変化させる必要がある運動制御においては、モデル予測制御のような間欠的な制御方式[12]を用いて動的に運動計画を更新することで、ここでの議論を適用することができる。

また、注意による評価関数修飾の考え方は、特定の身体部位に注意を向けるという「空間的注意」だけでなく、課題実行中の特定の局面でのみ注意を向けるという「時間的注意」についても同様に議論できる。すなわち、課題成績に関わる評価関数を課題の局面ごとに分解し、局面ごとに荷重係数を設定することにより、時間方向についても成績評価のめりはりをつけることができる。このような時間方向の注意の在り方は、間欠的制御における運動計画区間(=モデル予測制御におけるホライズン)の適応的な決定と関係づけることができる点で重要な課題である。

5. 注意と課題成績の知覚的評価

前節では、運動計画・制御における評価関数を注意の向きに応じて修飾することにより、選択的注意が身体運動に与える影響を制御モデル上で検討できることを述べた。最後に、ヒトの運動制御における課題成績の評価法について議論する。

従来の運動計画の理論において、課題成績は誤差(例えば、到達運動では終点誤差)によって評価されるのが通常である。具体的には、作業空間における目標位置と手先位置のユークリッド距離という客観的指標が評価に用いられることが多い。一方で、我々の認知過程(あるいは脳)が課題成績の評価に目標位置と手先位置のユークリッド距離を評価指標としているとは考えにくい。むしろ、目標と手先の空間的關係性に関わる視知覚、あるいは、手先が目標に達したときの触知覚などの手がかりに基づいて課題の成否を判断していると考えられる。課題成否の評価が意識に上る認知過程でのみ行われているとは限らないが、少なくとも、脳は、自身の感覚受容器で観測できる情報に基づいてしか環境の状態を判断できないことは明らかである。したがって、随意的に運動決定過程を説明するためには、前節で示した評価関数の評価項には、物理量ではなく知覚量(無意識的な評価であれば感覚量)に基づく量、いいかえれば、脳の中で計算できる量を用いるのが適切であると考えられる。

このような知覚量に基づく課題評価と前節で述べた注意の働きに基づく評価の修飾を組み合わせることで、ヒトの認知過程を反映した運動計画のモデルを構築することができる。

近年、筆者らは、仮想的身体知覚に基づく技能獲得支援についての研究を行っている[13,14]。スポーツ、楽器演奏といった身体技能の指導では、指導者が学習者に対して「あたかも〇〇のように感じながら△△しなさい」といった教示を与える場面がしばしばある。例えば、クラシックバレエでは「ローブで胸を天井から吊り下げられたような感じで立つ」といった教示が行われる。ここで重要なことは、あるべき姿勢などを直接的に指示せず、現実とは異なる感覚を間接的に指示している点である。このような仮想的な身体知覚に基づく教示が運動に与える影響は、以上で述べてきた運動計画モデルの下でどのように説明できるだろうか。

あくまで推測であるが、このような仮想的身体知覚の場面では、過去の経験したことのある「身体が引き伸

ばされた感じ」を想起して、想起した知覚と現実を感じる知覚が近くなることを運動の規範として採用していると考えられる。その意味で、仮想的身体知覚に基づく教示の下での運動計画・制御もまた、知覚を土台とした課題成績の評価であるという点で、上述した知覚量に基づく運動計画のモデルの枠組みの中で説明できると考えている。

6. むすび

本論では、運動制御における注意の働きについていくつかの観点から論じてきた。まず、従来の選択的注意の概念に対比する形で、空間全体に広く注意を向ける包括的注意の働きを指摘した。続いて、外的焦点に比して内的焦点において運動課題の成績が低下する原因が、選択的注意がもたらす運動計画の局所最適性にある可能性を指摘し、それとは逆に、包括的注意の下で運動計画の大域的最適性を実現されることを論じた。さらに、全身運動の協応構造であるシナジーが運動計画・制御の大域的最適性と対応づけられることを指摘し、全身の協調がうまく働かない状況（シナジーが変質した状況）は、注意による修飾によって運動計画の大域性が失われるためであることを指摘した。最後に、注意が運動に与える影響を説明する数理モデルとして、運動計画のための評価関数を多数の評価項の荷重和として記述し、その荷重係数を注意によって調整するモデルを提案した。

筆者らは数年前より注意をはじめとする運動者の主観的・認知的な作用が運動制御に与えるメカニズムについて、計測制御システムの観点から数理モデル化する取り組みを継続してきた。その歩みは遅いながらも、関連する種々の事項や問題の関係性が少しずつ整理が進んできたところである。文献[13]でも指摘したように、このような研究の有効性を示すためには、具体的な例題を設定して、ヒトの行動と数理モデルの振舞いに原理的な一致が見られることを示す必要がある。仮想的身体知覚に基づく教示が教示部位に限局されない身体運動の変化をもたらすことは行動実験において確かめているが[14]、残念ながら、多自由度身体モデルに基づきこの実験結果を再現するモデルの構築には至っていない。本稿で提案した注意による運動計画修飾のモデルも、その問題設定から必然的に多自由度の身体モデルを用いた検討が必要であることから、到達運動理論における水平面内 2 リンクモデルのように、この種の

問題を議論するためのスタンダードな問題設定を構築することが必要なのかもしれない。

本研究は、科学研究費補助金挑戦的研究（萌芽）19K22866 の補助により行われた。この場を借りて謝意を表する

文献

- [1] 河原, 横澤 (2015) 注意：選択と統合, 勁草書房.
- [2] Wulf, G., (2013) Attentional focus and motor learning: a review of 15 years. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 6(1), 77–104.
- [3] Wulf, G., (2007) *Attention and Motor Skill Learning*, Human Kinetics.
- [4] 小野, (2007) アレクサンダー・テクニーク やりたいことを実現できる〈自分〉になる 10 のレッスン, 春秋社.
- [5] カニツア, G., (1985) 視覚の文法—ゲシュタルト知覚論, サイエンス社.
- [6] Latash, M.L., (2008), *Synergy*, Oxford University Press.
- [7] d’Avella, A., Saltiel, P. & Bizzi, E. (2003). Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior. *Nature Neuroscience*, 6(3), 300–308.
- [8] Yang, J.-F., Scholz, J. P. & Latash, M. L. (2006). The role of kinematic redundancy in adaptation of reaching. *Experimental Brain Research*, 176(1), 54–69.
- [9] 川人, (1996) 脳の計算理論, 産業図書.
- [10] Harris, C. M. & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695), 780–784.
- [11] Kudo, N., Choi, K., Kagawa, T. & Uno, Y. (2016). Whole-Body Reaching Movements Formulated by Minimum Muscle-Tension Change Criterion. *Neural Computation*, 28(5), 1–20.
- [12] Sakaguchi, Y., Tanaka, M. & Inoue, Y. (2015). Adaptive intermittent control: A computational model explaining motor intermittency observed in human behavior. *Neural Networks*, 67, 92–109.
- [13] 阪口, (2018) 「意識の働き」を組み込んだ感覚運動制御の計算モデル, 日本認知科学会第 35 回大会論文集, OS03-4.
- [14] 畑野, 阪口, (2020) 課題に対する捉え方の違いが身体運動に与える影響, 日本認知科学会第 37 回大会論文集, P-126.