

課題の主観的捉え方の違いが身体運動に与える影響

Effects of subjective task criteria on objective task performance

畑野 圭佑[†], 阪口 豊[‡]
Keisuke Hatano, Yutaka Sakaguchi

[†]電気通信大学
University of Electro-Communications
k.hatano@uec.ac.jp

概要

動作者の主観的な感覚が身体運動に与える影響を明らかにするため、「まるで〇〇であるかのように感じながら身体を動かす」という教示を加えた際の身体運動をモーションキャプチャ及び表面筋電図により計測した。具体的には、右上肢を用いた鉛直方向の到達課題において、「手の動きが直線的になるように上に動かす」という指示と「上から糸で吊り上げられているように感じながら動かす」という指示における運動を計測したところ、いずれの条件でも直線的な手先軌道が実現された一方で、二つの条件のあいだでは関節や筋の使い方に違いが現れることが明らかになった。本論では、以上の結果が得られた原因について考察を加えた。

キーワード: 主観的運動規範 (subjective task criterion), 仮想的身体知覚 (virtual body perception), 焦点的注意 (attentional focus)

1. はじめに

1.1. 運動者の意識と運動の関係

運動技能獲得の現場において、運動者の課題に対する捉え方の違いが運動パフォーマンスに与える影響は大きい。優れたパフォーマンスの実現には、自身の身体の状態や周囲の状況を知覚し適切な身体の使い方を判断する意識の働きが果たすが重要である。

運動課題遂行中の注意の向け方が運動パフォーマンスに影響を与えるという報告はWulfらによる研究がよく知られている[1]。彼女らは、随意運動において内的焦点 (internal focus: 動作を行う身体そのものへの注意) に対する外的焦点 (external focus: 動作が及ぼす身体外部の環境への注意) の優位性を示唆した。

また、リハビリテーションやスポーツにおいて運動イメージ (motor imagery) を想起することが効果的であるという研究報告も多く存在する[2,3]。このように、自身の身体の使い方を内的に観察し判断する「意識の働き」が身体運動に与える影響は大きい。本研究では、筆者らが「仮想的身体知覚」と名付けた感覚に着目し、この身体感覚に基づく教示が運動パフォーマンスに与える影響を行動実験により明らかにする。

1.2. 仮想的身体知覚

スポーツや楽器演奏などの指導の現場では「まるで〇〇であるかのように感じながら身体を動かさない」という指導が行われることがある。例えば、クラシックバレエにおいて基本的な立ち方を指導する際「まるで自分の胸が天井から吊り下げられているように感じながら立ちなさい」という指導が行われるのがその一例である。本研究では、このような指示を「仮想的身体知覚に基づく教示」と呼び、このような指示が身体運動に与える影響を行動実験により明らかにする。

このような教示方法は、身体の望ましい姿勢や動きを直接誘導しない点に特徴がある。このような教示方法が用いられる理由として、望ましい身体の動きを実現しようとする際に働く意識的な認知プロセスが、無意識下で行われる運動制御を阻害してしまっている可能性が考えられる。これは、Wulfらが提唱する運動制御仮説 (注意を身体内部から外すことで行われていた自動的な身体制御を、注意を身体内部に向けることで阻害してしまう仮説) に通じる考え方といえる[4]。すなわち、あえて仮想的な状況に対して意識を向けさせることで、身体への直接的な注意を避け、無意識的なプロセスを働かせることにより結果的に望ましい身体の使い方を実現させている可能性が考えられる。加えて、仮想的知覚による教示では、教示の内容が実現したい目標状態と直接的に関係していないことも特徴である。上述したバレエの例では、何らかの姿勢・身体状態を実現することが目的であるにもかかわらずそれを明示せず、天井から吊り下げられている際に感じるであろう知覚を仮想的に再現しようとした結果として望ましい状態を実現することをめざしている。このように、望ましい身体状態を直接の目標とするのではなく結果として実現することがこの教示法の特徴である。

本研究では、仮想的身体知覚に基づく教示が運動遂行過程に与える影響を与えるため、運動課題の目標を直接的に指示する条件と、仮想的身体知覚に基づく教

示を与える条件において、それぞれの条件における運動をモーションキャプチャおよび筋活動計測により測定し、それらの違いを分析した。

2. 実験方法

2.1. 被験者

実験には、電気通信大学所属の20代の健常な右利きの成人男性6名が参加した。本実験は、電気通信大学の「ヒトを対象とする実験に関する倫理委員会」の承認を受けている。

2.2. 実験動作と計測装置

実験では、右上肢を用いた鉛直方向の到達運動課題を行い、右上肢の各部の身体軌道及び各筋の筋活動を計測した。

被験者の頸椎(C7)から手先(右手示指のPIP関節)にかけて右上肢計12箇所(反射マーカ)を取り付け、動作をモーションキャプチャ装置(OptiTrack, Prime13,6台)によって計測した(サンプリング周波数120Hz)。また手関節、肘関節、肩関節の動きに用いられる代表的な筋の活動量を計測した。具体的には、撓側手根伸筋(flexor carpi ulnaris muscle: FCR)、撓側手根屈筋(extensor carpi radialis muscle: FCR)、上腕二頭筋(biceps brachii muscle: Biceps)、上腕三頭筋(triceps brachii muscle: Triceps)、三角筋前部(anterior deltoid muscle: Delt-A)、三角筋中部(medial deltoid muscle: Delt-M)の計6筋を測定した。電極にはAg/AgClディスプレイ電極(日本電光ディスプレイ電極FピトロードF1-150S)を使用した。生体アンプにはTEAC社のpolymate AP-1000を使用した(サンプリング周波数2000Hz)。計測された筋活動電位に対してカットオフ周波数50Hzの2次バターワースハイパスフィルタをかけたのち整流を行い、さらにカットオフ周波数10Hzの2次バターワースローパスフィルタをかけて平滑化を行った。さらにその出力を二乗し、時間幅50msで振幅平均を取ったものの平方根をとる二乗平均平方(RMS)処理を用いて筋活動量を算出した。得られた信号について、1試行の運動時間を100点に正規化した時間に渡ってその振幅の平均を求めることで、異なる試行間のデータを整合させた。

2.3. 実験課題と条件

実験の内容を図1に示す。被験者の課題は、椅子に座り水平に張られたひも上に印された始点(下側)から終点(上側)に到達することである。運動始点は、被験者が椅子に座りひざの上に軽く手を載せたときの示指のPIP関節の位置に設定した。また、上側の紐は被験者の眼球と同じ高さに配置した。

実験条件として以下の4条件を設定し、それぞれ15試行ずつの測定を行った。なお、直前の条件での試行が履歴として次の試行に作用する可能性を考慮して、異なる指示条件の間に15試行の統制条件を挟んで行った。

また、課題の遂行時間の違いが結果に影響することを防ぐため、40bpmのテンポで鳴らしたメトロノーム4拍分を1試行の遂行時間の目安として設定した。具体的には、メトロノームを鳴らしてそのテンポを覚えてもらい、メトロノームを鳴らさない状態でおおよそ同じ時間で課題を実行できるように練習を行った後に計測を行った。

[統制条件]：特定の指示を与えない。

[直接的指示条件]：「手の動きがまっすぐで前後左右にぶれないようにしてください」という指示。

[仮想的指示条件 A]：「まるで手先を糸で吊られているように感じながら手を動かしてください」という指示。

[仮想的指示条件 B]：「まるで手首を糸で吊られているように感じながら手を動かしてください」という指示。

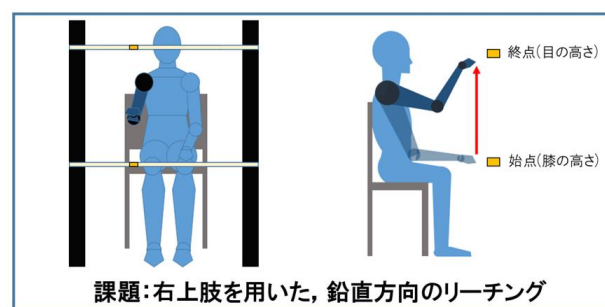


図 1. 実験の様子

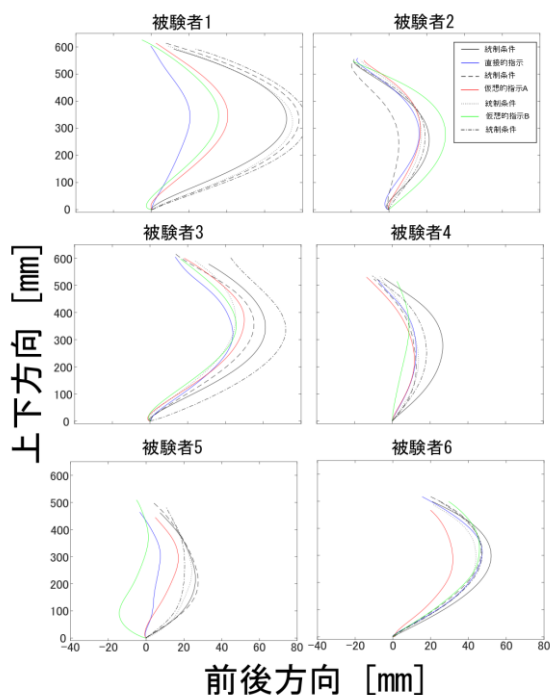


図 2. 矢状面上の手先軌道 (試行間平均)

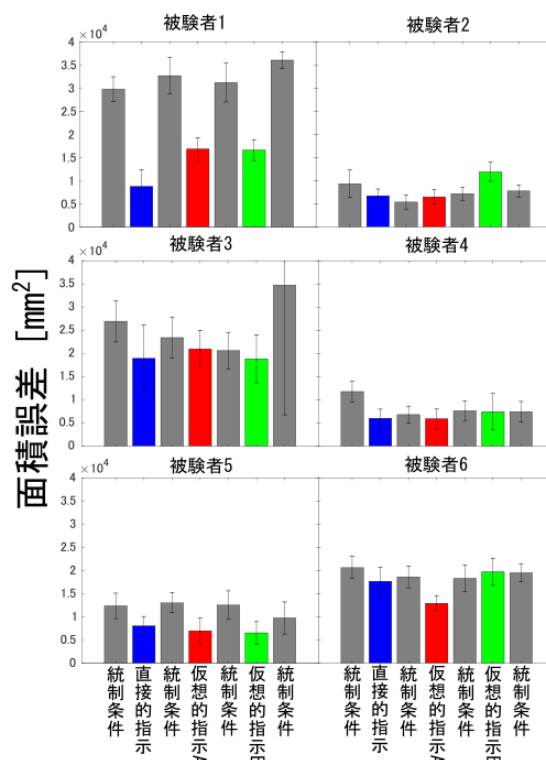


図 3. 手先直線性の評価値 L

3. 実験結果

3.1. 手先軌道の直線性

モーションキャプチャでの計測により得られた各条件における手先軌道の特性について分析した。

図2は4条件での平均手先軌道（15試行のうち6試行目から15試行目までの10試行の試行間平均）を被験者ごとに表したものである。なお、この図では前後方向の変化をわかりやすく示すために、横軸を拡大して表示している。

手先軌道の直線性を定量的に比較するために、(1)式によって提示される評価関数を設定した。

$$L = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \{r(n+1) + r(n)\} \{y(n+1) - y(n)\} \quad (1)$$

ここで、 $r(n)$ は時刻 n における水平方向誤差、 $y(n)$ は時刻 n における手先の高さ、 N は計測時刻数である。

この関数は、手先軌道と始点・終点間の直線軌道との水平誤差を高き方向に積分することで得られる面積誤差で、値が小さいほど手先軌道の直線性が高いことを表す。図3は、各条件10試行分の評価値 L の試行間平均を被験者ごとに示したものである。図の棒グラフは実験手続きの順序にあわせて左から並べてある。

この図より、被験者1, 3, 5について、直接的指示・仮想的指示条件において統制条件に比べて手先軌道がより直線的であることがわかる。また、被験者4, 6では、仮想的指示条件Bにおいて手先軌道の直線性が低くなったが、仮想的指示条件Aにおいては逆に直線性が高くなるという結果が得られた。これらの結果は、半数以上の被験者について、仮想的身体知覚に基づく指示により、統制条件に比べて直線的な手先軌道がもたらされることを示している。すなわち、仮想的指示条件では、手先を直線的に動かすことを明示的に指示していないにもかかわらず、直接的指示条件と同等の手先の直線性がもたらされることが確かめられた。

3.2. 関節角度

モーションキャプチャで計測されたマーカ位置から関節角度の推定を行った。以下に示すデータは、手先が始点から終点に到達するまでの関節角度の時間変化の各条件10試行における平均値を被験者ごとに条件間で比較したものである。

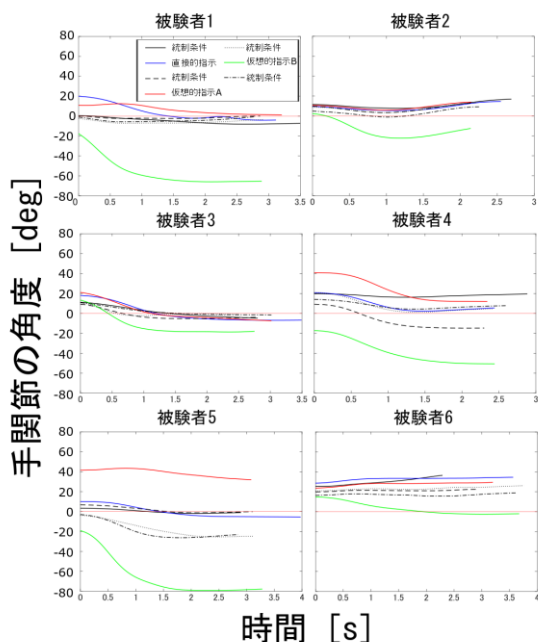


図 4. 手関節の時間変化 (試行間平均)

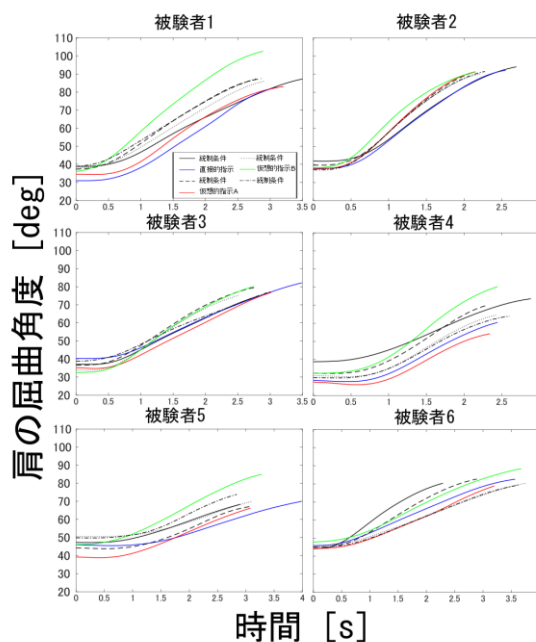


図 5. 肩屈曲角度の時間変化 (試行間平均)

3.2.1. 手関節

図4は、手先（指示のPIP関節）、手首（尺骨茎状突起）、肘（外側上顆）のマーカの前後および上下方向の座標から推定した手首の伸展角度である。前腕と手が直線的である状態を0度とし、手関節が背屈したときに正、掌屈（屈曲）したときに負の値をとるようにしている。

図4より、仮想的指示条件Bでは、動き出しの段階から手首が掌屈している様子がすべての被験者に渡って見られる。これは「手首を上から吊られるように」という指示の結果、手首の力を抜いて手を下に垂らした状態を作っていることを意味している。一方で、仮想的指示条件Aでは、被験者2、3、6のように直接的指示条件と同様の手首の状態のまま課題を行う例や、被験者4、5のように動き出しの段階から手首を背屈させたまま課題を行う例が観察された。後者は「手先を吊られたように」という指示のため、指先が持ち上がった状態を作った可能性を示しているといえる。

3.2.2. 肩関節

図5は、肘、肩峰のマーカの前後、上下方向の座標から推定した肩関節の屈曲角度である。解剖学的正位における屈曲角度を0度とし、肩関節が屈曲したときに正の値をとるように定めた。

図5より、被験者2を除くすべての被験者について、仮想的指示条件Bにおいて手先が終点に到達したときの最終姿勢における屈曲角度が大きく、肘が高い位置にある様子が見られた。また、課題遂行中は常に、仮想的指示条件Bにおいて、直接的指示および仮想的指示条件Aに比べて屈曲角度が大きいため、より肘が上方にある姿勢で上に動いていることがわかった。

3.3. 筋活動量

以下の各図は、各条件15試行のうち6試行目から15試行目までの10試行について平均筋活動量を求め、それらの試行間平均と標準偏差を被験者ごとに条件間比較したものである。なお、本実験ではMVCに基づく筋活動量の正規化処理は行っていない。

3.3.1. 撓側手根伸筋

図6は、手関節の背屈に用いられる撓側手根伸筋の筋活動量を示したものである。この図からわかるように、被験者2を除くすべての被験者について仮想的指示条件Bにおいて撓側手根伸筋の筋活動量が小さくなった。

被験者1について、仮想的指示条件Bにおいて撓側手根伸筋の筋活動量が抑えられたという結果は、図4において手首が大きく掌屈したまま課題を行っていたという結果が、手首の脱力によってもたらされている

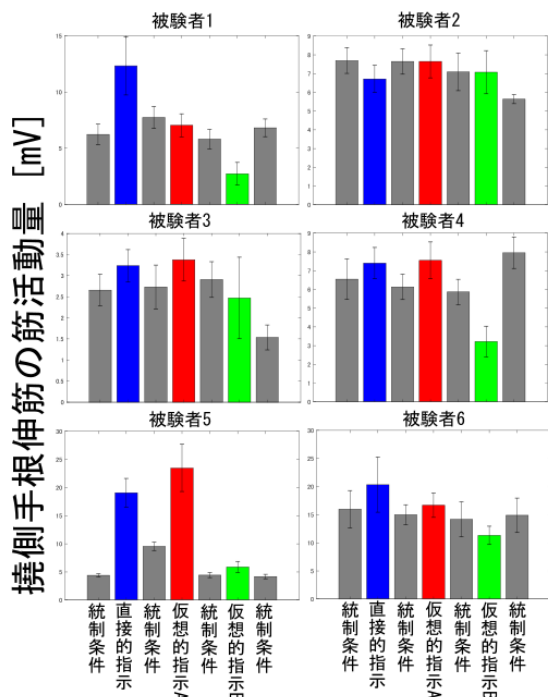


図 6. 撓側手根伸筋の筋活動量

ことを示している。また、仮想的指示条件 A では直接的指示条件とほぼ同様の手関節角度を保っていたが、直接的指示条件に比べて撓側手根伸筋の筋活動量が抑えられていることがわかる。

被験者 3, 4, 5, 6 について、仮想的指示条件 A における筋活動量は直接的指示条件とほぼ同様であるか、直接的指示条件よりも大きかった。また、これら 2 つの指示条件は統制条件よりも筋活動量が大きくなっていることが見られた。仮想的指示条件 A においてこのような結果が得られた原因としては、被験者が「手先を吊られたように感じる」という指示を「身体感覚として感じる」のではなく「(視覚的イメージとしての) 手先を吊り上げられたときの姿勢を保つ」という意味で解釈し、手先の姿勢を保つことに注意を向けたことが考えられる。

3.3.2. 三角筋

図 7 および図 8 は、肩関節の屈曲に用いられる三角筋前部と、外転に用いられる三角筋中部の筋活動量を示したものである。

まず、図 7 において、被験者のあいだで一貫した傾向はみられず、仮想的指示条件 B において高い筋活動がみられたのは被験者 3 のみであった。一方、図 8 においては、被験者 1, 5, 6 が仮想的指示条件 B において

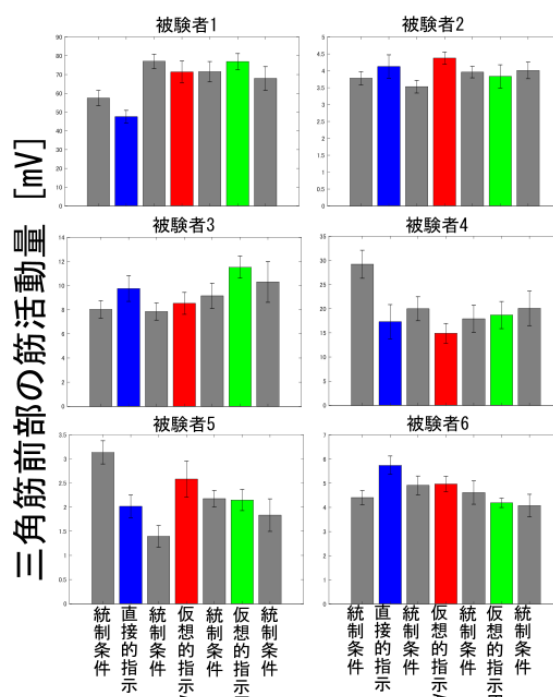


図 7. 三角筋前部の筋活動量

最も高い筋活動を示した。以上の結果は、手首を糸で吊りあげられた状態を仮想的に実現するのに二つの方法があることを示している。

一つは、掌を上側もしくは内側に向け、肘を下に落とした状態で手首が吊り上げられる感覚で腕を上げる方法である。この場合は、肘が下に落ちた姿勢で手首を上げていくので、肩関節の動きとしては外転運動が伴わずに屈曲運動のみとなる。被験者 3 はこのような身体の使い方によりこの課題を実行したと考えられる。

もう一つは、肘を外側に向け、掌を下側に向けた状態で手首が吊り上げられていく感覚で腕を上げる方法である。この場合は、前節で指摘したように、肘を外側に広げて高く保ちながら腕を上げるので、肩関節は外転した状態で、屈曲運動により腕を持ち上げることになる。

同じ仮想的指示を与えたにも関わらずこのような動作の違いが生じた原因は次のように考えられる。

今回の課題では、運動の方向が鉛直方向に限られていたため、これら二つの身体の使い方を用いても、手首を受動的に吊り上げられた感覚で課題を実行することができる。しかし、手をつかんだ他者の誘導に任せてさまざまな方向に自分の手を動かす課題においては、肘を下に向けた姿勢のまま相手の誘導についていくことは難しい。一方、肘を高く保った姿勢をとった場合は、肩関節の自由度が制約なく使えるため、相手の誘導に

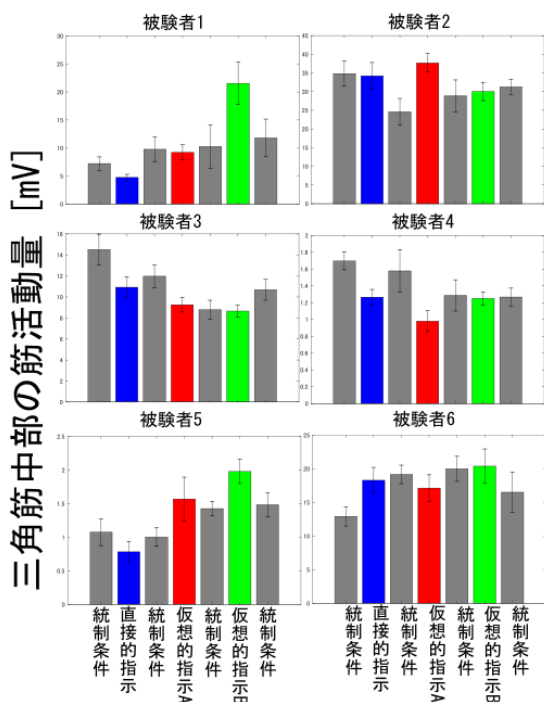


図 8. 三角筋中部の筋活動量

ついていくことが可能である。したがって、後者の方法は前者に比べてより汎用性の高い身体の使い方であると考えられる。その一方で、単なる上下運動に限定するのであれば、肘の位置を高く保つ必要がない前者の方が「楽な」動きとなる。したがって、「上下運動のみ行う」ことを前提に、その中でもっとも楽な動きを選択した被験者は後者の戦略を採用し、「相手の誘導についていく」という点を重視した被験者は前者の戦略を採用したものと推測できる。

4. まとめと全体的考察

本実験の結果、上下方向の上肢到達運動において、多くの被験者にわたって「手首を上から吊り上げられているように感じながら動かす」条件（仮想的指示条件 B）において「手の動きがまっすぐで前後左右にぶれないように注意して動かす」条件（直接的指示条件）や「手先を上から吊り上げられているように感じながら動かす」条件（仮想的指示条件 A）と同等の直線的な手先軌道が実現される一方で、手関節が掌屈することや肩の外転が働いて肘の位置が高くなるなどのキネマティクスやダイナミクスに違いが生じることが明らかになった。このことから、同一の課題において仮想的身体知覚に基づく指示の違いによって異なる運動を誘導できることを示した。

また、仮想的指示条件 B において被験者間にある程度共通した運動特徴が見られたことは、「手首を上から吊られているように感じながら」という指示によってもたらされる身体感覚に被験者間で共通する規範があることを示唆している。このことから、この運動を行うための運動計画問題はそのような運動規範に基づく制約付き最適化問題として定式化できるのではないかと考える。今回の実験結果をこのような数理モデルに基づいて理解しようとするときに、仮想的身体知覚に基づく指示がどのような運動規範となり、また、どのようにして運動制御方式として実現されるのかを具体的に構成する必要がある。特に、本実験でとりあげた課題では「手を糸で吊られて」という指示から想像されるように、重力に抗して身体を支える運動制御の仕組みと深い関係があると推測され、抗重力の仕組みが関係している可能性が考える。また、この課題だけでなく、仮想的身体知覚に基づく指示は力の感じ方に関するものが多いことから、重力覚や力覚をどのようにして制御モデルに組み込むかが重要な課題である。

また、本実験では得られた結果に大きな個人差が観察された。特に、仮想的指示条件 A において、撓側手根伸筋を脱力させて課題を行う被験者と、手首を背屈させた状態で課題を行う被験者がみられた。これは、仮想的指示条件 A を「外部（他者）からの誘導に委ねる身体感覚で課題を行う」ものと解釈した被験者と、「糸で吊り上げられたときの姿勢（視覚的イメージ）を模倣しながら課題を行う」ものと解釈した被験者がいたことを示している。前者では手先軌道が統制条件よりも直線的である、直接的指示条件に比べて撓側手根伸筋の活動が小さいなど、仮想的指示条件 B に共通してみられるような特徴が現れている。このような「他者に身体を預ける」という解釈は「力の感じ方」に基づく解釈であり、上述したような、仮想的身体知覚に基づく指示の特徴に沿ったものであると考えられる。一方、後者では、手先軌道の直線性が高く、手首が背屈し撓側手根伸筋の活動量が大きくなるなど、直接的指示条件と共通した特徴が現れている。このことから、後者の被験者は、仮想的身体知覚に基づく指示の本来の狙いと異なり、「特定の姿勢を実現する」ものとして解釈したと推測できる。したがって、仮想的身体知覚に基づく指示においては、指示を受けた学習者にその意図が正しく伝わっているかどうかを確認することがきわめて重要であるといえる。本来の仮想的身体感覚に基づく指示の効果を明らかにするためには、実験中の指示において

その意図が誤解されないようにいっそうの配慮をする必要がある。

本研究の一部は、JSPS 科研費挑戦的研究（萌芽）18K19823 および 19K22866 の支援を受けて行われた。この場を借りて謝意を表す。

文献

- [1] Gabriele Wulf, (2013) "Attentional focus and motor learning: A review of 15 years", *International Review of Sport and Exercise Psychology*, Vol.6, No.1, pp.77-104.
- [2] Philip L. Jackson, Martin F. Lafleur, Francine Malouin, Carol Richards, Julien Doyon, (2001) "Potential Role of Mental Practice Using Motor Imagery in Neurologic Rehabilitation", *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Vol.82, No.8, pp.1133-1141.
- [3] Nobuaki Mizuguchi, Hiroki Nakata, Yusuke Uchida, Kazuyuki Kanosue, (2012) "Motor imagery and sport performance", *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, Vol .1, No. 1, pp.103-11.
- [4] Gabriele Wulf, Nancy H Mcnevin, Charles H Shea, (2001) "The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus", *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol.54, No.4, pp.1143-1154.