

上肢への触覚刺激による Pseudo-haptics の強度の制御 Modulating Pseudo-Haptics by Applying Tactile Stimuli to the Upper Limb

小松 拓豊[†], 福森 聡[†]
Takuto Komatsu, Satoshi Fukumori

[†] 香川大学

Kagawa University

s25g405@kagawa-u.ac.jp

概要

物体の重さを感じる時、身体の位置に関する感覚、特に固有受容感覚がどのように影響するかは十分に明らかにされていない。本研究では、触覚刺激によって上肢の固有受容感覚に錯誤を生じさせ、その影響が重量感覚および Pseudo-haptics（視覚が重量感覚に作用する現象）の強度に及ぼす効果を検証した。実験の結果、固有受容感覚によって重量感覚が変化することが示唆され、さらに Pseudo-haptics の強度にも影響を与えることが明らかとなった。これにより、従来は視覚中心に行われてきた Pseudo-haptics の制御に対し、身体側からの感覚操作によってもその強度を制御できる可能性が示された。

キーワード：Pseudo-haptics, 固有受容感覚, Virtual Reality, 感覚漏斗現象

1. はじめに

視覚情報の操作によって重量感覚を生起させる現象は、Pseudo-haptics（以下、Ph）と呼ばれ、力覚デバイスを用いずに感覚提示を行うインタフェース技術として注目されている。たとえば、ユーザがディスプレイ上のオブジェクト（仮想物体）の移動量を意図的に小さく見せることで、ユーザに物体が重く感じられるような錯覚を生じさせることが可能である。こうした技術は軽量・低コストな触覚インタフェースの実現に有用だが、その効果の強さ（Phの強度）には個人差が大きく、同一の視覚刺激を提示しても知覚される重さにばらつきが生じる。この個人差は、Phの利用における一貫性や再現性を損なうため、実用化に向けた課題となっている。本研究は、Phの強度に関与する固有受容感覚に着目し、触覚刺激によってその感覚に錯誤を誘導することでPhを制御可能かどうかを検証することを目的とする。

本研究は、Phに影響を与える要因として固有受容感覚に着目する。固有受容感覚は、筋や腱、関節、皮膚などから得られる感覚情報に基づいて、身体の位置や

動き、力の加減を感じさせる感覚である。伴ら（2021）は、視覚情報と一致しない腕の運動を経験させた上で重量判断を求める実験を通じて、関節位置覚の錯誤がPhの強度に影響する可能性を示唆した。また、小松ら（2024）は、伴らの手法を拡張し、錯誤の大きさとPhの強度との相関関係に注目したが、その効果は条件によって一貫せず、結果の再現性にも課題が残った。これらの研究は、固有受容感覚がPhに関与する可能性を示す一方で、指や腕を動かすという主体的な運動が含まれることで、位置の知覚と運動とを分離できていない。

固有受容感覚（proprioception）は、身体の位置や動きに関わる単一の感覚として捉えられてきたが、固有受容感覚をいくつかの要素に分けることが提案されている。Horváthら（2023）は、固有受容感覚は、関節位置覚（joint position sense）、運動覚（kinesthesia）、力覚（force sense）といった複数の要素から成る感覚の集合であるとしている。関節位置覚は、筋・腱・皮膚・関節包などからの情報を統合して構成され、実際の身体部位の位置と運動に対する予測とのズレを感知する上で重要な役割を担っている。そこで、本研究ではPhの成立や強度に影響を与える固有受容感覚の核となる要素は、身体の空間的位置の知覚精度であると捉え、固有受容感覚における関節位置覚に着目する。改めて、伴ら（2021）の実施した指指実験を検討すると、この実験方法には、関節位置覚と運動覚の両方が含まれているだろう。前述の観点で、改めて伴ら（2021）の研究方法を見ると、指指試験で評価されているのは、関節位置覚と運動覚の2つの要素が信号が統合された感覚である。したがって、運動を伴わない方法で関節位置覚を計測する方法を検討し、実験を行う。

本研究では、皮膚感覚に刺激を加えることで固有受容感覚を操作できる可能性に着目した。皮膚感覚は、身体上のどの部位が刺激されているかという情報を提供することで、関節の位置推定にも関与しているとされる。この関係性に基づき、皮膚への触覚刺激によっ

て固有受容感覚、特に関節位置覚に影響を与えることが可能であると考えられる。実際、Vargas ら (2021) は、皮膚への機械的刺激によって関節位置の知覚にズレが生じることを報告しており、皮膚感覚が固有受容感覚を変調することを示唆している。本研究では皮膚感覚を介して関節位置覚に錯誤を生じさせ、その影響が Ph にどのように波及するかを3段階で検証した。まず、触覚刺激により固有受容感覚に錯誤が生じるかを検証する(実験1)。次に、その錯誤が重量感覚に影響を与えるかを調べた(実験2)。最後に、錯誤が Ph の強度に与える影響を検証する(実験3)。これらの検証を通じて、固有受容感覚の操作が Ph 制御の手法として有効かどうかを明らかにする。

2. 実験1: 固有受容感覚の錯誤

2.1 実験参加者

参加者は、右利きの20~24歳の健常な男女40名(男性27名、女性13名)である。参加者には、文章を提示しながら研究内容を説明し、全ての参加者から研究協力の同意を得た。実験のすべての手続きは、香川大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を得て実施された。

2.2 実験方法

実験1では、皮膚への触覚刺激を用いて関節位置覚に錯誤が生じるかどうかを検証した。仮説として、誤った刺激の位置を知らせることで、参加者の関節位置感覚に系統的な誤認が生じると予測した。この仮説を検証するため、振動の提示方法(1点振動/2点振動)と、振動位置の教示(正しく知らせる/誤った位置を伝える)の2要因(各2水準)からなる計4条件を設定した。錯誤の誘導は、実際に振動している位置とは異なる部位が刺激されていると伝えることで行われた。

関節位置覚の測定には、視覚情報を遮断した状態で、右手の人差し指を用いて左手首の位置を指し示すタスクを用いた(図1)。この方法は、視覚の影響を排除しながら固有受容感覚に基づく関節位置の知覚を評価できる利点がある。また、指差しという単純な動作



図1 固有受容感覚のタスク 図2 重さ感覚のタスク

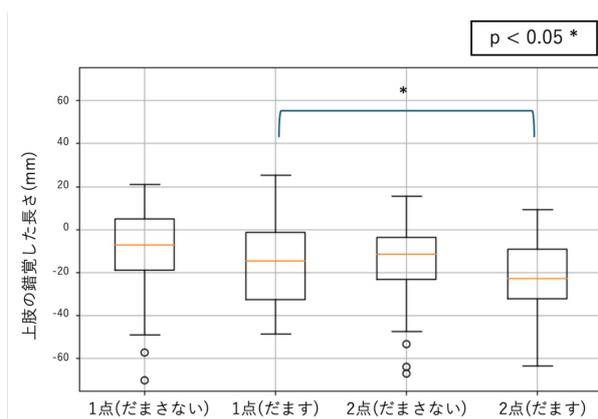


図3 上肢の位置感覚の錯誤した長さ

によって運動覚との混在を避けることができる点でも有効である(Capaday, 2013)。Horváth ら (2023) は、こうした視覚遮断下での身体部位への指差しは、関節位置覚を評価する手法の中でも適切な手法の一つと指摘している。

第1段階では、手の位置感覚の誤認を誘導するために感覚漏斗現象(Gardner, 1972)を利用した。感覚漏斗現象とは、2点間に同時に与えられた振動刺激がその中間にあるかのように知覚される現象であり、物理的には存在しない位置をあたかも刺激されたように感じさせることができる。皮膚刺激は、Seed Studio社製の小型振動モータ(316040001)を使用し、参加者の左前腕の外側に等間隔で3つ取り付けられた。小型振動モータの制御パラメータは、これまでの研究で安定した触覚提示が得られた設定を踏襲し(石井, 2011)、振動周波数が250 Hz、振動の1サイクルは1000 ms(振動100 ms、休止900 ms)とした。

分析には、振動の提示方法(1点/2点)および振動位置の教示(だます/だまさない)を独立変数、指し示した位置の誤差量(mm)を従属変数とした2要因分散分析(2×2 ANOVA)を実施した。

2.3 結果

振動位置の教示に主効果が認められ($p < .05$)、だます条件では、だまさない条件に比べて有意に上肢が短く錯誤される傾向が確認された。さらに、提示方法と教示の間に交互作用が認められ、だます条件において1点振動よりも2点振動の方が有意に大きな錯誤を引き起こすことが明らかとなった($p < .05$)。図3に示すように、2点振動・だます条件では、誤知覚された上肢の長さが他条件と比べて顕著に短く、感覚漏斗現象によって中間部への誤帰属が誘導された可能性が示唆される。

3. 実験 2: 固有受容感覚の重量感覚への影響

3.1 実験方法

実験 2 では、実験 1 で誘導された関節位置覚の錯誤が主観的な重量感覚に影響を及ぼすかを検証した。仮説として、上肢の位置感覚が実際よりも短く錯誤されると、主観的な重さが軽くなると予測した。この仮説を検証するため、本実験では振動位置の教示条件（正しい位置を伝える／誤った位置を伝える）を操作し、両条件間で主観的な重量感覚を比較した。

この仮説を検証するため、本実験では仮想キューブを用いた持ち上げタスクを実施し、その前後に触覚刺激によって関節位置覚の錯誤を導入したうえで、重量感覚の変化を測定した。まず、参加者は仮想空間に提示されたキューブを持ち上げる動作に慣れるタスクを行った。次に、実験 1 と同様に左前腕に 3 点の振動子を装着し、感覚漏斗現象を用いて振動の知覚位置を肘寄りに錯誤させ、上肢が通常よりも短く感じられる状態を作り出した。持ち上げ動作には、220 g で一辺 80 mm の実物のキューブを使用した。ただし参加者はこれを直接見るのではなく、同じ大きさ・動きの仮想キューブを VR 空間内で観察した。仮想映像は Unity (ver.2022.3.13f1) で作成され、映像提示には HTC VIVE Cosmos と VIVE Tracker 3.0 が用られた。キューブの動きは垂直方向に実物と同期させ、参加者は図 2 に示すように肘を直角に曲げて持ち上げるという動作を行った。なお、振動子の装着や刺激条件は実験 1 と同様である。

重量感覚の評価には、錯誤の誘導前後において同一のキューブを持ち上げ、両者の相対的な重さの印象を比較した。参加者は、錯誤前と比べて錯誤後に感じた重さの印象を VAS で評価した。

分析の前に、VAS のスコアは、非常に軽いを -50、非常に重いを 50 の数値に変換された。分析には、錯誤量（錯誤誘導後における関節位置覚の変化量）と重量感覚の変化量（VAS スコア）との相関関係を評価するため、各条件ごとにピアソンの相関係数を算出した。

3.2 結果

図 4 に示すように、「だまさない条件」では、上肢の位置感覚に錯誤が生じた長さ（mm）と重量感覚の変化量との間に相関は認められず（ $r = .02, p = .91$ ）、錯誤が重量感覚に影響を与えないことが示唆された。一方、「だます条件」では、上肢の位置覚が実際よりも短く錯誤されるほど、キューブをより軽く感じる傾向が確認され、両者の間には有意な正の相関が認められた（ $r = .32, p < .05$ ）。この結果は、関節位置覚の錯誤が主観的な重量感覚に影響を及ぼす可能性を示唆して

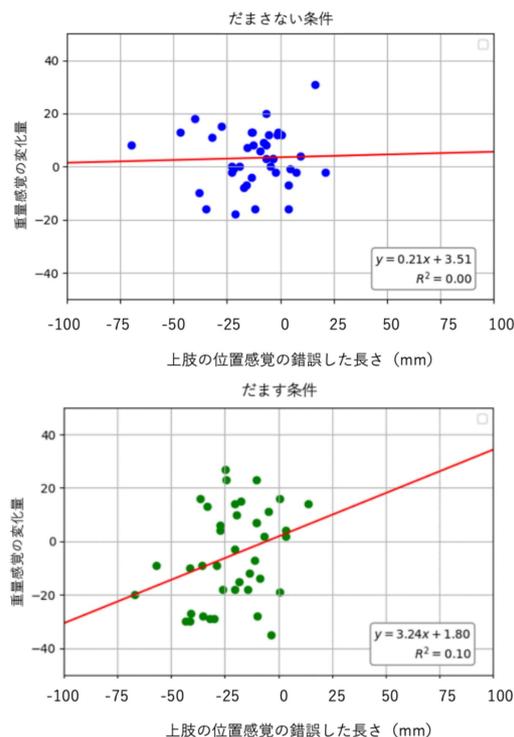


図 4 上肢の位置感覚の錯誤した長さ（mm）と重量感覚の関係

いる。

4. 実験 3: 固有受容感覚の Pseudo-haptics の強度への影響

4.1 実験方法

実験 2 では、物体の主観的な重さを評価したのに対して、実験 3 では、Ph の強度を評価した。仮説として、上肢の位置覚が実際よりも短く錯誤されると、Ph の強度は低下すると予測した。この仮説を検証するため、本実験では振動位置の教示条件（正しい位置を伝える／誤った位置を伝える）を操作し、両条件間で Ph の強度を比較した。

参加者は、実験 2 と同様の装置環境において、仮想空間に提示されたキューブを視覚情報とともに持ち上げるタスクを実施した。このとき Ph を誘発するために、実際の移動量（Control）に対する見かけの移動量（Display）の比率（Control/Display ratio:CD 比）を小さくする操作を行った。具体的には、実際のキューブの移動量を 1.0 とした場合、仮想キューブの移動量は 0.7 に設定され、視覚的な移動量が抑えられることで、より重く感じる錯覚が生じるようにした。錯誤の操作に関わらず、参加者は C/D 比 1.0 でキューブを持ち上げるタスクを行い（基準）、C/D 比 0.7 でキューブを持ち上げた後、Ph の強度について質問紙に答えた。Ph の強度の測定には VAS で評価された。

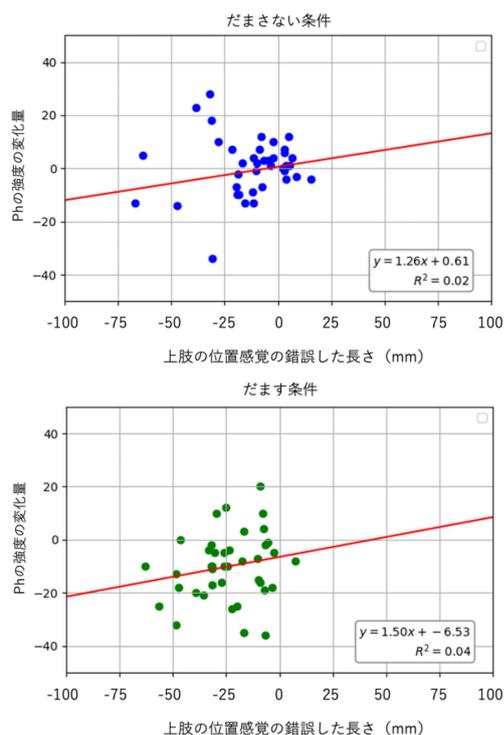


図5 上肢の位置感覚の変化量と Pseudo-haptics の強度の関係

分析の前に、VAS のスコアは、非常に軽いを-50、非常に重いを 50 の数値に変換された。分析では、錯誤の誘導によって変化した上肢の位置覚の誤差量 (mm) と、Ph の強度の変化量との相関関係を条件別に検討した。

4.2 結果

図5に示すように、だまさない条件では、位置覚の誤差と Ph の強度の変化との間に有意な相関は認められなかった ($R^2 = .02$)。一方、だます条件においても統計的に有意とは言えなかったが ($R^2 = .04$)、位置覚の錯誤量が多いほど Ph の強度が増す傾向が確認された。この結果は、位置覚の錯誤が Ph 知覚の調整に何らかの影響を与えている可能性を示唆している。

5. 考察

実験1では、感覚漏斗現象を応用した触覚刺激によって関節位置覚に錯誤を誘導できるかを検証した。その結果、視覚情報を遮断した状態でも、一貫した位置感覚の錯誤が生じた。これは、従来の視触覚同期による誘導手法(小松ら, 2024)を上回る効果であり、視覚を用いずに関節位置覚を操作できる手段として本手法の有効性を示すものである。本実験では、左腕を静止させたまま指し示しにより位置評価を行っており、測定された誤差は運動覚の影響を排除した関節位置覚の変化と解釈できる。この結果は、触覚刺激のみで関

節位置覚を安定的に変化させられることを示し、Ph制御に向けた基盤として十分であることを示唆する。

本研究の目的は、触覚刺激によって誘導される固有受容感覚の錯誤が Ph の強度に影響を及ぼすかを検証することであった。実験3では、錯誤の有無により主観的な Ph 強度が変化する傾向が確認されたが、錯誤量と変化量の間には有意な相関は見られなかった。すなわち、位置覚の錯誤が Ph に影響を与える可能性は示唆されたものの、安定的・予測的な制御手段としての確立には至らなかった。また、Ph の評価は主観的な重さ判断に依存しており、個人差の影響が大きい。今後は、個人差を統計的に扱う手法や、他の要因を統制した実験設計の導入が求められる。

理論的には、本研究は Ph の知覚に固有受容感覚が関与していることを示唆し、Ph が視覚情報だけでなく身体感覚との相互作用によって形成される可能性を示した。特に、触覚刺激と欺瞞操作によって関節位置覚に動的な錯誤を誘導し、Ph との関連性を示す初期的な知見が得られた点は重要である。また、感覚漏斗現象を応用した触覚刺激は、従来の視覚依存的手法よりも位置感覚を錯誤させやすく、固有受容感覚の評価・操作手法としても有用性が高い。この手法は、Ph の強度調整やクロスモーダルな感覚統合の研究において、新たな実験基盤としての活用が期待される。

文 献

- 伴祐樹・宇治土公雄介(2021). Pseudo-haptics 効果の個人差要因解明の基礎検討. 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM), 1B3-1. <https://conference.vrsj.org/ac2021/program/doc/1B3-1.pdf>
- 小松拓豊・前田隼輔・福森聡(2024). VR空間における固有受容感覚のドリフト量と Pseudo-haptics の強度の関係. ヒューマンインタフェースシンポジウム2024論文集 (CD-ROM), 3T-P22.
- Horvath, A., Ferentzi, E., Schwartz, K., Jacobs, N., Meyns, P., & Köteles, F. (2023). The measurement of proprioceptive accuracy: A systematic literature review. *Journal of Sport and Health Science*, 12(2), 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.04.001>
- Vargas, L., Huang, H. (Helen), Zhu, Y., & Hu, X. (2021). Static and dynamic proprioceptive recognition through vibrotactile stimulation. *Journal of Neural Engineering*, 18(4), 046093. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac0d43>
- 石井明日香・佐藤未知・福嶋政期・古川正紘・梶本裕之(2011). 手部触覚による奥行き情報の提示. 第16回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM), 14C-5. <http://jglobal.jst.go.jp/public/201102287656371908>
- Gardner, E. P., & Spencer, W. A. (1972). Sensory funneling: I. Psychophysical observations of human subjects and responses of cutaneous mechanoreceptive afferents in the cat to patterned skin stimuli. *Journal of Neurophysiology*, 35(6), 925–953.
- Capaday, C., Darling, W. G., Stanek, K., & Van Vreeswijk, C. (2013). Pointing to oneself: Active versus passive proprioception revisited and implications for internal models of motor system function. *Experimental Brain Research*, 229(2), 171–180. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3603-4>