

「Slime Hand」における主観的な皮膚伸長距離の同定 Identifying Subjective Skin-stretching Distance on the Slime Hand

今井 健人^{†,*}, 佐藤 優太郎^{†,*}, 小鷹 研理[†]
Kento Imai, Yutaro Sato, Kenri Kodaka

[†]名古屋市立大学大学院芸術工学研究科
Nagoya City University
c215704@ed.nagoya-cu.ac.jp

概要

身体の錯覚研究では、身体変形感を生起する錯覚が多数報告される。我々は、皮膚の変形感を生起する「Slime Hand (SH)」を発見した。SHは、従来錯覚の空間的同期の制約を逸脱する操作を行なってもなお、強力で即席に作用する興味深い錯覚である。本研究では、SHにおける皮膚変形と固有感覚ドリフトを分離する被験者実験を行い、皮膚変形距離が、固有感覚ドリフトの理論的限界を超過していることを示唆する結果を得たので報告する。

キーワード: Non-proprioceptive ownership distortion, body image deformation, slime hand.

1. はじめに

Rubber Hand Illusion (RHI) [1]をはじめとする身体の錯覚研究では、身体イメージの可塑性を示唆するものとして、手指の身体変形感覚を誘発する錯覚が多数報告されている[2-4]。身体変形感覚を生起する錯覚においても、刺激の同期や身体像の形態的類似性が重要であり、基本的には、錯覚生起の条件に、RHIと同等の制約が課されると考えられる[5]。RHIは、実際の手からフェイクハンドまでの距離が、平均で27.5cm程度を超えると弱まることが報告されており[6]、これを踏まえると、身体変形感覚の距離限界もRHIの空間的制約の範囲を超えて変形することは困難であると予想できる。一方、錯覚研究の報告のほとんどは、通常手や指などの形態学的に特徴づけられる身体部位単位を対象としている。そのため、仮に皮膚や筋骨格等の個別のボディ・イメージを抽出した際には、それぞれの組織固有の制約を持つ可能性が考えられる。

我々の研究グループは、「Best Illusion of the Year Contest 2021」にて、皮膚の変形感覚を生起する錯覚「Slime Hand (SH)」(Sato, Imai, and Kodaka, 2021, 記録映像: <https://youtu.be/w2K-VtuokBQ>)を発表した(図1)[7]。SHはMirror Visual Feedback (MVF)の原理を用いた錯覚で[8]、鏡一枚を挟んで片側に体験者

の手を、もう一方の片側にスライムを配置した状態で、体験者が鏡の中のスライムを覗き込んでいるとき、実験者がスライムと体験者の手の皮膚をつまみ、同じ方向へと引っ張ることで生起する。我々がSHにおいてとりわけ重要だと考えるのは、SHの皮膚変形がRHIの空間的制約を大きく逸脱した範囲においてもなお、強力かつインスタントに作用しているように思える点である。この特徴から、我々は、皮膚単体のボディ・イメージは、筋骨格等の深部感覚受容器から得られる固有感覚ベースの制約とは独立している可能性を検討している。筆者らの研究室が行った錯覚の体験イベントにおけるアンケートや体験者のリアクションからは、皮膚単体の変形感覚が生起していることを示唆する結果が得られている。なお、錯覚研究におけるSHの俯瞰的な位置付けや体験会のアンケートの詳細は小鷹らによる別の報告に譲る。

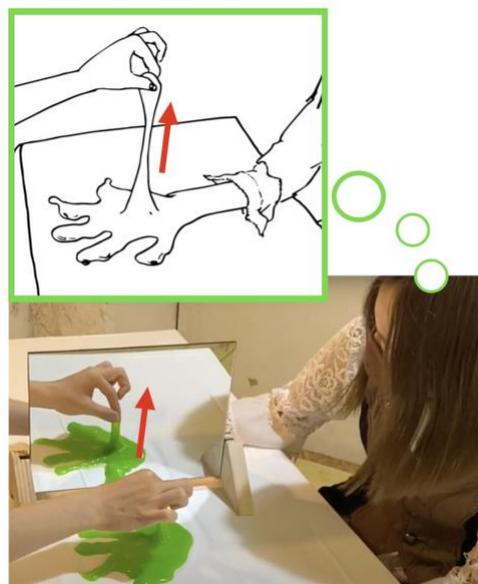


図1 Slime Handのデモの様子

* 第1著者と第2著者は equal contribution とする。

我々の関心は、SHの皮膚変形が、固有感覚の制約から独立したものであることによって生起している可能性を検証することにある。よって本稿では、このプロジェクトの第一段階として、SHにおける皮膚変形を固有感覚変形から分離して抽出し、変形距離の限界を同定することを目的とした実験を実施する。実験ではMVFの環境下で、鏡の左右でスライムがまるで皮膚の一部であるような対応関係を持って操作される条件と、スライムの塊全体が手であるかのような対応関係を持って操作される条件とを比較することで、皮膚変形と固有感覚ドリフトを個別に観察することを試みる。なお、デモ映像の様子からSHの皮膚変形は、変形の方向は問わず生起すると考えられるが、本実験では、RHIの空間的制約との比較のため、スライムを参加者の胸に対して平行な方向(腕に対して垂直方向)に操作した。以上の条件において、皮膚の伸縮感覚をはじめとする5つの錯覚項目について主観評価を行った。さらに各条件における皮膚の変形感覚の距離と固有感覚ドリフトの計測を実施した。

2. 方法

2.1 実験参加者

本実験では、健康な20代の大学生、計23人(男6人、女17人)に参加してもらった。なお、得られた結果から、実験操作が困難であった者を一名除外し、合計22人のデータについて解析を行った。

2.2 実験装置・環境

実験環境はMVFの環境を採用し、長机の上に鏡を設置した。また、皮膚変形およびProprioceptive driftの関連する距離の操作を目印によって統制するため、10色に色分けされたカラーボード(30×57.5cm)を、鏡を隔



図2 実験装置

てた両側に1枚ずつ配置した(図2)。カラーボードの色は鏡を境に左右対称に色分けされており、鏡に近い順から、黒、白、茶、青、水、緑、桃、橙、赤、黄の順番で塗り分けられている。色分けの幅は、黒が12.5cm、他は全て5cm幅とした。スライム(120g)は、直径15cm程度の透明な円形の土台に配置され、鏡面側(参加者から見て左側)のカラーボード上に配置した。スライムは市販のもので、実験操作の途中で千切れることのない伸びの良いものを用いた。さらに、参加者の右手を視界から遮断するため、鏡を境に暗幕が吊られた。

2.3 実験手順

主観評価課題は、スライムの操作(Operation)に関する1要因被験者内実験を計画した。実験条件には、参加者が「プレートに乗ったスライムの一端が引き伸ばされるのを注視する変形移動条件」と、「半透明の土台を動かすことによって、スライムの塊が平行移動するのを注視する非変形移動条件」を設定した。参加者は椅子に座り、鏡の裏側に右手を配置した。実験中の基本姿勢は、鏡に映るカラーボードの端(黄色)が見える位置に身体を傾け、鏡に映るスライムを常に覗く姿勢をとるよう、参加者に説明した。実験者は、鏡面から左右15cmの位置(カラーボードの白色の中央)に、鏡の裏側に参加者の右手の小指の側面を、左側にはスライムが乗った土台の端が合うように設置した。

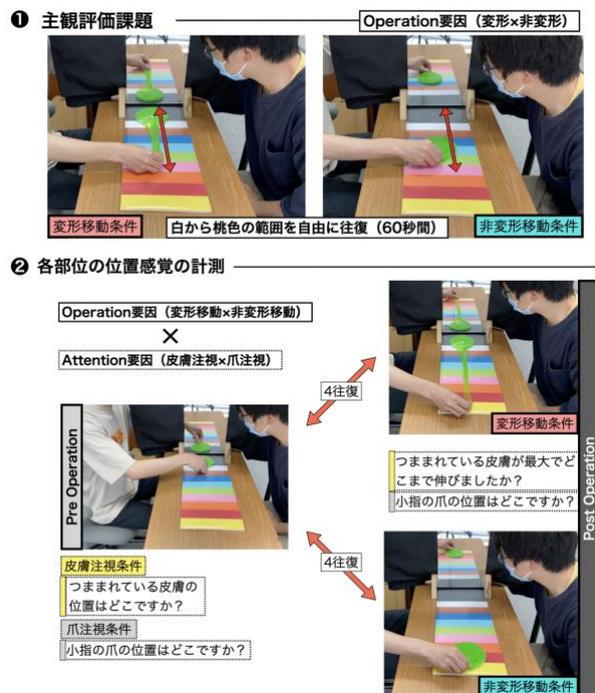


図3 (1) 主観評価課題と (2) 位置感覚の計測

分類	アンケート文
Q1 stretchy skin	手の皮膚が通常より伸びた感じがした。
Q2 proprioceptive drift	手全体が横に移動した感じがした。
Q3 skin ownership	スライムまたはスライムの一部が自分の皮膚であると感じた。
Q4 hand ownership	スライム全体が自分の手そのものであると感じた。
Q5 referral of touch	スライムをつまんだ位置に触覚を感じた。

表1 アンケート

実験セットアップが完了次第、実験者は主観評価課題を開始した。実験者は、変形移動では参加者の手の皮膚とスライムの一部をつまみ、非変形移動ではスライムの乗った土台の端をつまみ、カラーボードの白色の部分から桃色の範囲を、スライムの一部（変形移動）または全体（非変形移動）が行ったり来たりするように60秒間動かした（図3）。本課題は、変形移動と非変形移動条件は交互に実施されるのを1セットとカウントし、課題全体で計2セット行われた。また、2条件の実施順序は参加者ごとに入れ替えた。各課題の直後に、stretchy skin（皮膚の変形感覚）、hand ownership（手の所有感）、skin ownership（皮膚の所有感）、proprioceptive drift（ドリフト）、referral of touch（擬似触覚）の5つの項目に関する主観評価を行った（表1）。アンケートへの回答は、-3（「全く感じない」）から+3（「大変強く感じる」）までの7段階の数字で回答してもらった。0は「どちらでもない」に対応すると説明した。質問は参加者ごとにランダムな順に提示した。

続けて、Operationに関する2つの条件について、手の各部の位置感覚の計測を実施した。本課題では、Operation要因に加え、皮膚の一部の位置感覚を調べる「つままれている皮膚の位置に意識を向ける皮膚注視条件」と手の位置感覚を調べる「小指の爪の位置に意識を向ける爪注視条件」のAttention要因を加えた、2要因被験者内実験（Operation×Attention）を実施した。爪は、手全体の移動を対象とし、一般的なProprioceptive driftの計測と対応する一方、皮膚注視条件は必ずしもProprioceptive driftと対応しないことに注意されたい。課題では、実験者は、2つの条件（変形移動/非変形移動）の対象箇所をつまみ、カラーボードの白色（初期位置）の部分から、黄色（40cm）の範囲までを、直線的に4往復する操作を行った。往復操作の中で、スライムの一部または全体を動かす前（それぞれの端が白色に配置されている状態）のタイミング（Pre Operation）と、ス

ライムの一部または全体をカラーボードの端（黄色）まで動かした後のタイミング（Post Operation）で、参加者に質問を行った。皮膚注視条件ではPre Operation時に「つままれている皮膚の位置」を、Post Operation時に「つままれている皮膚の位置が最大でどこまで伸びたか」をカラーボードの色で回答してもらった。また爪注視条件では、Pre/Post Operationの両方のタイミングで「小指の爪の位置」を感じるカラーボードの色を回答してもらった。これらの操作の順序は、Operation要因の2条件を連続して行うのを1セットとし、Attention要因の2条件ごとに1セットずつ、合計で4セット行われる。参加者は、各条件下において、4往復の最中に合計で8回色を回答するため、実験全体で合計32回カラーボードの色を答えた。各要因を実施する順序は、参加者ごとにランダムに決定した。なお、参加者は主観評価の調査および位置感覚の計測の前にそれぞれ実際の実験と同じ流れで簡単に練習を行い、参加者に回答に慣れてもらった。スライムは、試行毎に取り替え、円の形状が保たれるように統制した。

3. 結果

結果を図5に主観評価、図6に変形距離のグラフを示す。主観評価の各項目について、Operation要因間（変形移動×非変形移動条件）で対応のあるt検定を実施した（ $n=22$ ）。解析結果からは、Q4を除く全ての質問項目で有意な差が得られた（Q1: $t(21)=7.01, p<0.001$; Q2: $t(21)=6.28, p<0.001$; Q3: $t(21)=4.18, p<0.001$; Q4: $t(21)=0.99, p<0.33$; Q5: $t(21)=3.38, p<0.01$ ）。

皮膚変形、および小指の爪の位置の移動距離については、Post OperationからPre Operationを引いた値、すなわち、主観的な初期位置からの皮膚の伸び、および小指の移動距離を算出した。結果は、皮膚変形距離の平均が、変形移動条件では28.8cm、非変形移動条件では20.1cmとなった。小指の爪の位置の計測結果は、平

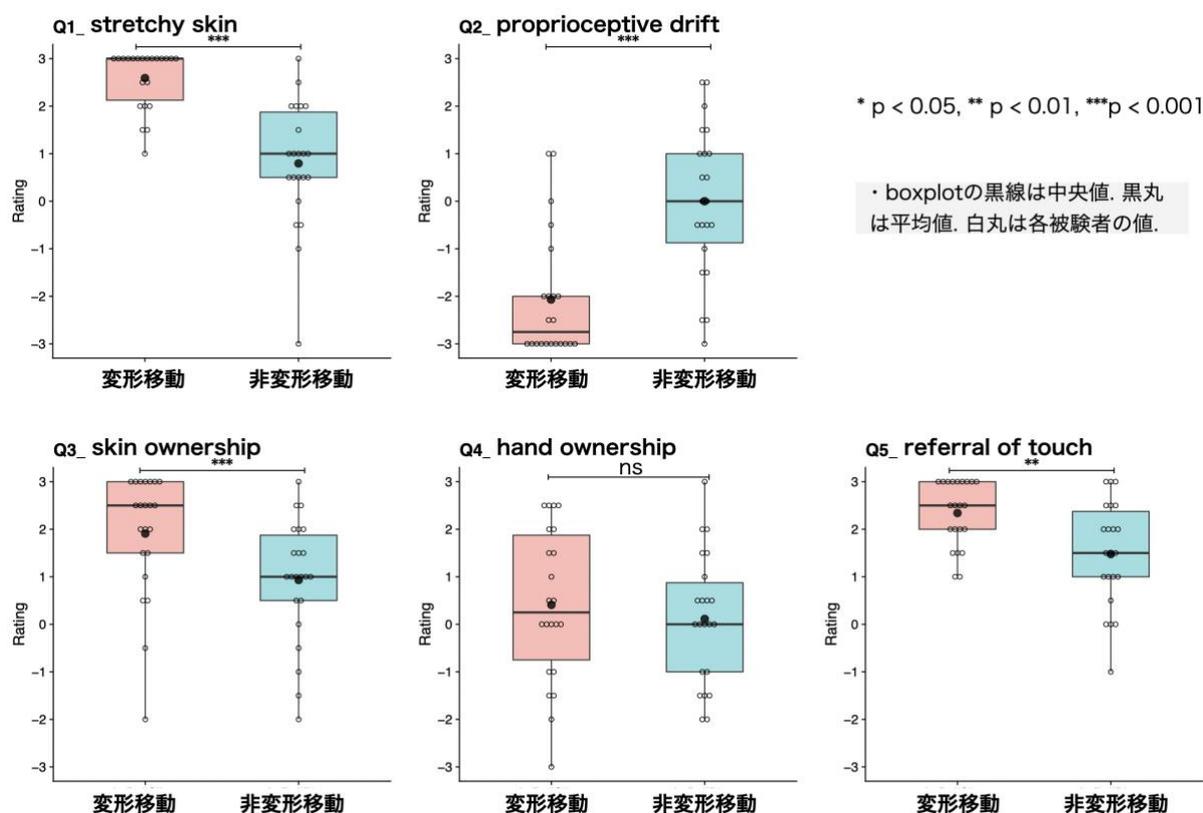


図5 主観評価

均で、変形移動条件では 11.0 cm、非変形移動条件では 17.8 cm となった。皮膚の変形感覚の距離と Proprioceptive drift の計測結果に関して、2 要因分散分析 (Operation × Attention) を実施したところ、Operation 要因のみに主効果が得られた (Operation: $F(1, 21) = 33.75, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.62$; Attention: $F(1, 21) = 0.16, p = 0.69, \eta_p^2 = 0.01$)。また Operation と Attention 間に交互作用が確認された (Operation × Attention: $F(1, 21) = 26.00, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.62$)。さらに、得られた交互作用について、単純効果の検定を行ったところ、Operation における皮膚注視条件において有意な差が得られ ($F(1, 21) = 14.74, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.41$)、爪注視条件では有意傾向な差が得られた ($F(1, 21) = 4.17, p = 0.05, \eta_p^2 = 0.17$)。また、Attention における変形移動条件において有意な差が得られ ($F(1, 21) = 42.16, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.67$)、非変形移動条件には有意な差は得られなかった ($F(1, 21) = 1.59, p = 0.22, \eta_p^2 = 0.07$)。

4. 考察

主観評価の解析結果は、SH では、皮膚のみの変形が

生起していることを支持する結果が得られた。とりわけ、Q1 (Stretchy skin) に関して変形移動条件が有意に高く得られた一方、Q2 (Proprioceptive drift) に関しては非変形移動条件が有意に高い評定値が得られたことは、変形移動条件において、スライムの一部のみを変形させる操作が皮膚のみを選択的にドリフトさせる作用をもたらすことを示唆している。さらに、Q3 (Skin ownership) でも2つの条件間に有意な差が得られ、この結果も、SH が皮膚感覚に作用することを支持する。対して、Q4 (Hand ownership) では、条件間に有意な差が得られなかった。これは、そもそも、本実験の操作や実験環境が、RHI におけるダミーハンドの形態的類似性の観点からして、ownership を生起する水準で行われなかった結果であると考えられる。いずれにしても、Q3 と Q4 の解析結果は、皮膚の所有感変調が、手全体の所有感の変調とは無関係に生じることを強く示すものである。Q5 (Referral of touch) において、変形移動条件が有意に高まったことは、皮膚変形の操作がより、強い触覚の錯覚を生起したことを示すものである。しかし、2つの条件は、どちらも+1 よりも大き

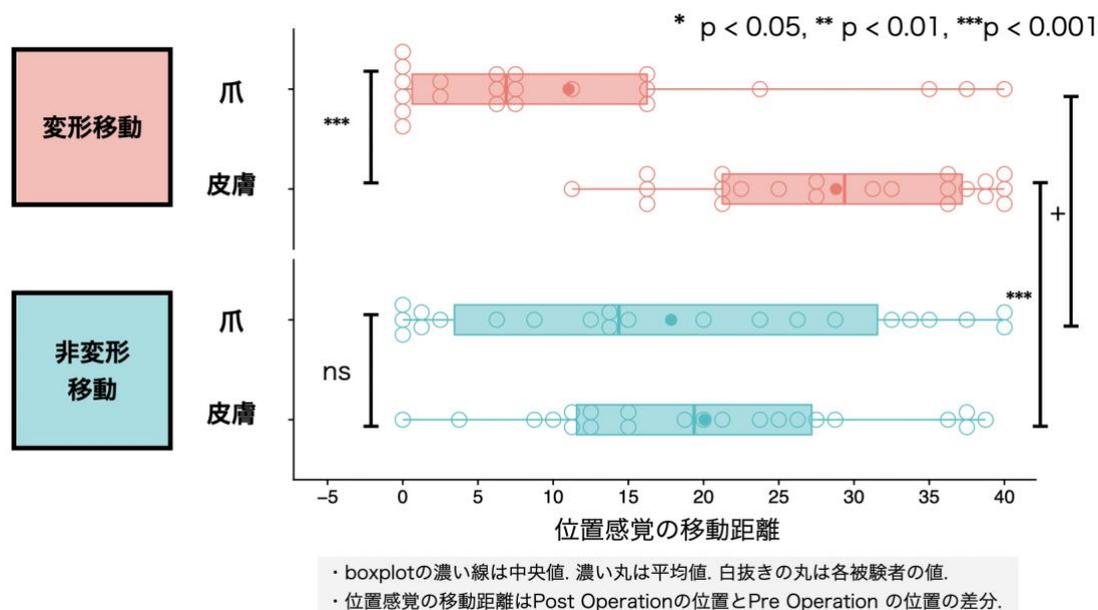


図6 各身体部位（皮膚・爪）の主観的な移動距離

い平均値の評価が得られており、これは、referral of touch が SH 特有の作用とみるよりも、MVF 環境における同期的な触覚刺激が referral of touch を生起させやすい環境であると考えるのが妥当である。

続けて、皮膚の変形距離および小指の爪の移動距離に関する結果においては、「変形移動×皮膚注視」条件時が平均で 28cm 程度となり、「変形移動×爪注視」条件時および、「非変形移動×皮膚注視」と比して有意に大きな値となった。また、Operation と Attention の要因間で得られた交互作用は、スライムの変形が一部のみであったことから、小指の爪の位置の Proprioceptive drift が抑制されたことが影響していると考えられる。これらのことは、SH において、スライムは皮膚を部分的に変形させるような心理的作用をもたらすことを示唆する結果であり、主観評価で得られた結果の解釈とも一致する。

さらに興味深いのは、皮膚の伸長距離が、平均で 28cm 程度となった点である。この結果は、RHI が生起する空間的な限界と類似しており、本実験の実験環境においては、SH の皮膚変形も RHI の生起の限界と同等の範囲で十分に生起することが確認された。他方で、本実験では、スライムを伸ばす操作は最大で 40cm 程度にとどまっており、仮にこの操作をさらに長い距離で行った場合に SH の皮膚変形の距離はさらに大きくなる可能性がある。そのため、SH の皮膚変形の距離限界に関してはさらなる調査が必要である。

最後に、非変形移動条件においても、皮膚の変形の

距離が 20cm 程度得られたことについて考察する。この結果が示すのは、SH の皮膚変形の感覚が必ずしもスライムのような粘性のあるオブジェクトがなくとも生起することを示唆する興味深い結果といえる。実際、SH のデモでは、スライムを使わずとも、体験者が鏡の中の何も無い空間を覗き込んでいる状態で、その空間の空中をつまむような操作をすると同時に体験者の皮膚をつまむと、SH と極めて類似の皮膚の変形感覚が得られることを確認している (Invisible SH)。また RHI のパラダイムでは、透明な身体像に関する ownership が報告されており [9]、さらに、透明身体錯覚には身体変形感を生起するタイプのものが存在することも報告されている [10-11]。今後は、Invisible SH の効果および、報告される透明身体錯覚との差異についても心理実験レベルでの検証を進める。

文献

- [1] Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756–756.
- [2] Newport, R., & Preston, C. (2010). Pulling the Finger off Disrupts Agency, Embodiment and Peripersonal Space. *Perception*, 39(9), 1296–1298.
- [3] Kilteni, K., Maselli, A., Kording, K. P., & Slater, M. (2015). Over my fake body: Body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(MAR).
- [4] de Vignemont, F., Ehrsson, H. H., & Haggard, P. (2005). Bodily Illusions Modulate Tactile Perception. *Current Biology*, 15(14), 1286–1290.
- [5] Ehrsson, H. H. (2019). Multisensory processes in body

- ownership. In *Multisensory Perception: From Laboratory to Clinic*. Elsevier Inc.
- [6] Lloyd, D. M. (2007). Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand. *Brain and Cognition*, 64(1), 104–109.
- [7] Yutaro Sato, Kento Imai, Kenri Kodaka, 「Slime Hand」, Best Illusion of The Year Contest 2021, 2021, 12. (<http://illusionoftheyear.com/2021/12/slime-hand/>) (2022.7.15 アクセス).
- [8] Ramachandran, V. S., Rogers-Ramachandran, D., & Cobb, S. (1995). Touching the phantom limb. *Nature*, 377(6549), 489–490.
- [9] Guterstam, A., Gentile, G., & Ehrsson, H. H. (2013). The Invisible Hand Illusion: Multisensory Integration Leads to the Embodiment of a Discrete Volume of Empty Space. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(7), 1078–1099.
- [10] Byrne, A., & Preston, C. (2019). Mr Fantastic Meets The Invisible Man: An Illusion of Invisible Finger Stretching. *Perception*, 48(2), 185–188.
- [11] Cadete, D., & Longo, M. R. (2022). The long sixth finger illusion: The representation of the supernumerary finger is not a copy and can be felt with varying lengths. *Cognition*, 218(November 2021), 104948.

謝辞 本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2130 の支援を受けた。