

スライムハンド錯覚における固有感覚ドリフトの抑制 Suppression of Proprioceptive Drift in the Slime Hand Illusion

高橋奈里[†], 佐藤優太郎[†], 小鷹研理[†]
Nari Takahashi, Yutaro Sato, Kenri Kodaka

[†]名古屋市立大学院
Nagoya City University
c235719@ed.nagoya-cu.ac.jp

概要

スライムハンド錯覚は、主観的には皮膚変形を生起させるが、過去の行動実験では、固有感覚ドリフトと皮膚変形を十分に分離できていなかった。本稿では、固有感覚ドリフトを抑制するために、実験として上下方向の実験レイアウトを適用した。加えて、引っ張りの強度によって、錯覚効果に差異があるかを検討するために、4つの異なるつまみ方を条件とした。結果は、固有感覚ドリフトを抑制した状態でも、皮膚変形感覚が生起することが示された。

キーワード: proprioceptive drift, rubber hand illusion, slime hand illusion

1. はじめに

RHI(Rubber Hand Illusion : [1])に端を発する錯覚研究では、物理的に不可能な身体変形感覚を生起させる多様な方法が報告されている。我々の研究グループは2022年に、手の皮膚の変形感覚を生起させる「スライムハンド錯覚」(Slime Hand Illusion : SHI)を発表した[2]。SHIはMirror Visual Feedback (MVF)の原理を用いたものであり[3]、鏡を隔てて鏡面側にスライムの塊を、鏡背面に実験参加者の手を配置し、参加者には鏡の中のスライムの塊を見せよう。次に、参加者の手の甲の皮膚を引っ張ると連動させ、鏡面側のスライムを引っ張ることで、鏡の中のスライムの伸長があたかも自らの皮膚の伸長に感じられる錯覚である。SHIは、スライムなしの何も無い空間に対しても同様に生起する(Invisible Slime Hand Illusion : ISHI)。注目すべきはSHIがRHIの錯覚生起の限界[3-4]を超過するような特徴をもつ点にある。それは第一に、皮膚領域に選択的な身体像の変調が生起する点、第二に、固有感覚ドリフト(Proprioceptive drift)の距離限界を超過した変形が生起する点である。これはSHIが、「骨格としての身体」ではなく、「皮膚としての身体」に特化した錯覚であることを示唆するものであり、従来のRHIの空間的制約や形態的類似性の制約を逸脱した身体変容が生じるといふ仮説に基づいている。

本研究の目的は、SHIによる、「皮膚としての身体」

の身体変調が、RHIのパラダイムにおける「骨格としての身体」の制約を超過して生起するという仮説を詳細に検討することである。Kodaka et al., (2022)では、SHIに伴って生起する身体変化が、主観評価のレベルでは、骨格の移動によるものではなく皮膚の変形によるものであることが明らかになった一方で、合わせて行った位置感覚の計測実験では、皮膚の変形と固有感覚ドリフトが混在することが示された[2]。これは皮膚の変形に引きずられるかたちで、手全体のイメージが無自覚に動いたものと考えられる。スライムを変形させない対照条件では、皮膚の位置変化量と手全体の位置変化量との間に有意な差はみられなかったため、SHIが主観的な皮膚変形を生み出していることに間違いはない。他方で、この結果は、皮膚変形が固有感覚のドリフトと独立に生じることが示すものではない。仮に、SHIが「皮膚の身体」に固有の錯覚であるならば、ドリフトが完全に抑制された状態でもなお、皮膚変形が観測されるはずである。本研究の目的は、この仮説を心理実験によって検証することである。

この問題を検証するためには、手全体の固有感覚ドリフトを積極的に抑制するような実験系の検討が必要である。そこで本実験では、対象となる手を机に添えようとして、皮膚を上下方向に操作するレイアウトを採用する。この実験系で仮に固有感覚ドリフトが生起するには、机上面から手が離れる必要があるため、錯覚中に手が常に机に接触しているという触覚情報により、固有感覚の変調なき皮膚像の変調を抽出することに適している。加えて、手の甲の皮膚への4種類の触覚刺激、Pinched & Pulled(つまんで引っ張る)、Pinched(つまむ)、Touched(触れる)、Non-Touch(触れない)が皮膚変形およびドリフトに与える影響を検討するため、触覚に関する要因を設定した。また本実験では、ISHIを採用した。ISHIはスライムを用いないため、上下方向に操作される際の統制困難なスライムの形状等の視覚的な影響を排除できる。以上の条件において、皮膚の伸縮感覚をはじめ

表1 主観評価アンケート項目

	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	手全体が上に移動した感じがした.
Q3	skin ownership	何もない空間に「見えない」皮膚が引っ張られているような感触があった
Q4	hand ownership	テーブルより上の空間に「見えない」手があるように感じた.
Q5	referral of touch	つまんだ位置に触覚を感じた.

とする5つの錯覚項目について主観評価を行なった。続けて、各条件における皮膚の変形距離と固有感覚ドリフト（中指の爪の位置感覚の推移）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21人（男3名、女18名）に参加してもらった。なお、得られた結果から、計測データに不備があった2名を排除し、合計19名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（55.2cm×25.2cm）を設置した。また、皮膚変形量および固有感覚ドリフト量の記録に用いる板（124.9cm×25.2cm）を机の端（参加者から見て右側）に設置した。さらに、参加者の左手を視界から遮断するために、鏡に暗幕を吊るした。

2.3 実験手順

実験計画として参加者の手の甲に与える触覚（つまみ方）に関する1要因参加者内実験を計画した。実験環境を図1に示す。参加者は椅子に座り、左手を鏡の裏側に配置した。この時、参加者の左手の小

指は鏡の裏側から15 cm の位置に設置した。右手は太ももの上に置き、楽な姿勢をとってもらった。実験中、実験者は鏡背面の参加者の手と対称となる位置で、机上の何もない空間を左手の人差し指と親指でつまみ引っ張る動作を行った。これと同時に、鏡背面の参加者の手に対して、各触覚要因の4条件の手続きを実施した。課題中、参加者は、鏡に自分の顔が映らない状態で、鏡像を覗き込む形で実験者の指先を注視した。

実験の具体的な手続きを図2に示す。主観評価課題では、実験者は、鏡面の裏側の参加者の左手を、つまみ方の各条件について、以下のように操作した。鏡面側では、何もない空間をつまみ引っ張る動作を、机上から 50 cm の位置まで3往復行った。参加者には、3往復した後に、0 - 6（0：全く感じない、3：どちらとも言えない、6：非常に感じる）の7段階で評価してもらった。アンケート項目は表1に示すstretch skin（皮膚変形）、proprioceptive drift（固有感覚ドリフト）、skin ownership（皮膚の所有感）、hand ownership（手の所有感）、referral of touch（疑似触覚）の5つであった。

続けて行動実験を実施した。行動実験では、つままれている皮膚の位置と、中指の爪の位置（骨格の位

図1 実験環境

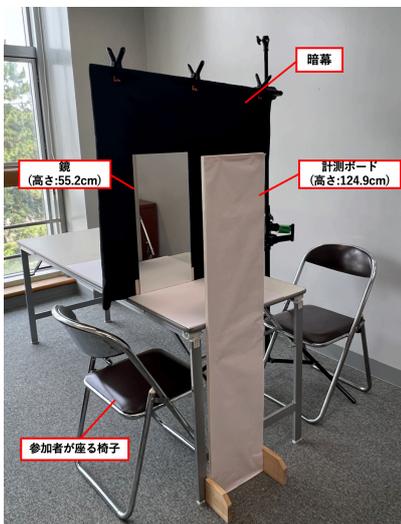


図2 実験手続き

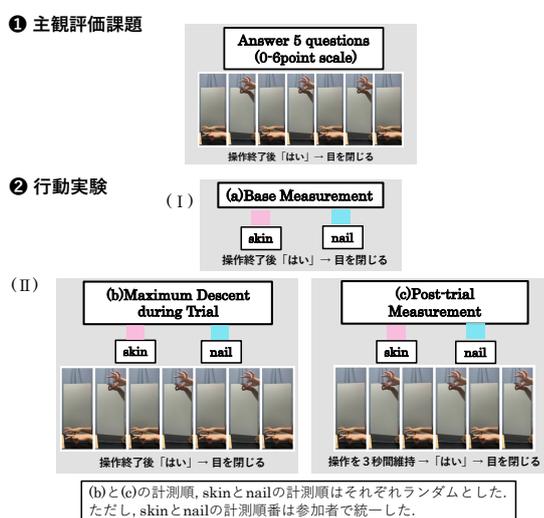


図3 つまみ方

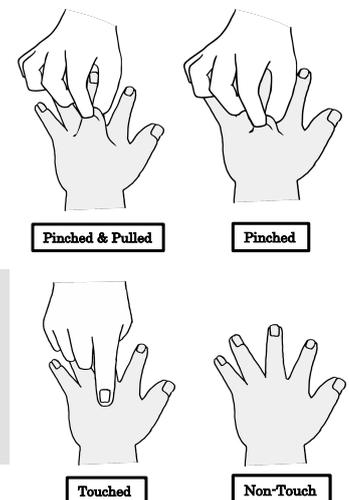


図4 主観評価アンケートの結果

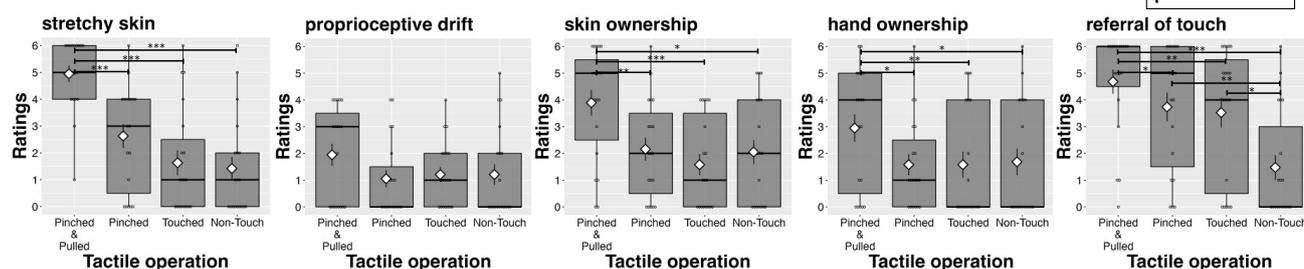
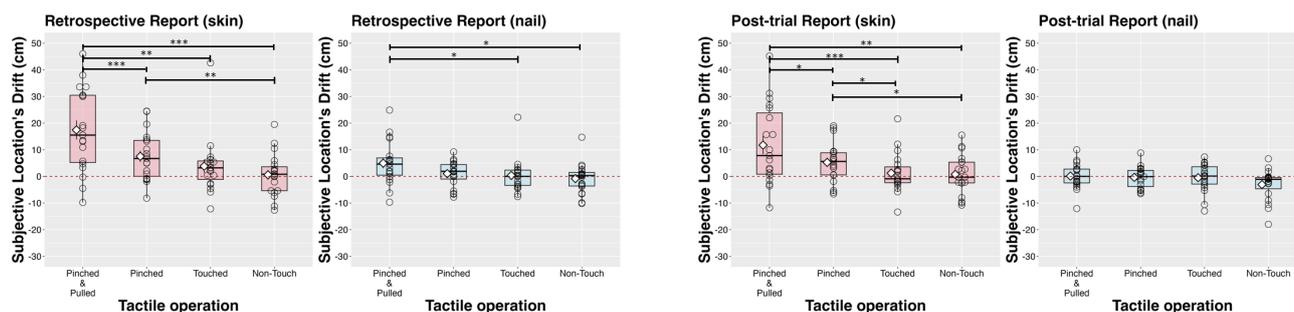


図5 行動実験の結果



置)を調査した。皮膚変形とドリフト距離の計測を始める前に、実験者による視覚誘導がない状態で、4つの触覚条件における皮膚と爪の位置を回答してもらう位置感覚の初期位置を計測した。皮膚・爪の計測皮膚・爪の計測ともに、鏡の奥で参加者の手の甲の皮膚について、触覚に関する4条件に応じたつまみ方を行い、鏡の手前では実験者が何もしない状態で、皮膚の位置と中指の爪の位置を尋ねた。答え方は、計測用ボードに図のように指をさし、実験者はその位置をシールで記録した。

皮膚変形距離と爪のドリフト距離の計測には、課題の後に錯覚中の皮膚および爪の位置の移動量が最大となった位置を思い出して回答させる Retrospective Report と、課題直後の皮膚と爪の位置感覚を回答させる Post-trial Report を設定した。前者は、錯覚中に感じていた身体位置の推移の最大量を回答させるものであり、後者は、従来のRHIにおけるドリフト計測方法に対応している。

Retrospective Reportでは、皮膚・爪注視条件ともに、鏡の奥で参加者の手の甲の皮膚について、各条件に応じたつまみ方を行い、鏡の手前では、実験者が何もない空間をつまみ引っ張る動作を3往復行った。その後、皮膚の位置と爪の位置を尋ねた。

Post-trial Reportでは、鏡の奥で、参加者の手の甲について、同様な動作を行い、鏡の手前では、実験者が何もない空間をつまみ引っ張る動作を2.5往復(机上から50cmの位置で、つまんで引っ張る動作

を維持している状態)した。その3秒後に、皮膚の位置と爪の位置を尋ねた。

3. 結果

主観評価の結果を図4に、変形距離の結果を図5に示す。主観評価の各質問項目(Q1: stretch skin; Q2: proprioceptive drift; Q3: skin ownership; Q4: hand ownership; Q5: referral of touch)で得られた評定値には偏りがあり正規性が仮定できない可能性があったため、解析にはノンパラメトリック検定を採用した。はじめに各質問項目に対して、ノンパラメトリックな1要因参加者内分散分析としてフリードマン検定を実施した($n = 19$)。結果は、全ての質問項目で触覚要因に関するQ2: $\chi^2(3) = 8.84, p = .03$, Q3: $\chi^2(3) = 19.88, p < .001$, Q4: $\chi^2(3) = 16.28, p < .001$, Q5: $\chi^2(3) = 30.99, p < .001$ 。さらに各質問における4つの触覚の条件を比較するため、ウィルコクソンの符号順位と検定による多重比較(ホルム法)を行った。その結果、Pinched & Pulledに着目すると、Q1, Q2, Q3, Q5について、他の3条件よりも有意に評価得点が高かった。また、Q5については、PinchedがTouched, Non-Touchよりも有意に評価得点が高かった。

行動実験について、皮膚変形および中指の爪の位置の移動距離は、それぞれつまみ方の条件で、Retrospective Report または Post-trial Report の値から初期位置を引いた値を採用し、主観的な皮膚変形距離および中指の爪の位置の移動距離を算出した。結果は、Retrospective Report について、皮膚変形距離の平均が、

Pinched & Pulled: 17.45 cm, Pinched: 7.53 cm, Touched: 3.84 cm, Non-Touch: 0.58 cm となり、中指の爪の位置の移動距離の平均は、Pinched & Pulled: 4.95 cm, Pinched: 1.03 cm, Touched: 0.34cm, Non-Touch: -0.84 cm だった。Post-trial Report では、皮膚変形距離の平均が、Pinched & Pulled: 11.74 cm, Pinched: 5.25 cm, Touched: 1.22 cm, Non-Touch: 0.74 cm となり、中指の爪の位置の移動距離の平均は、Pinched & Pulled: 0.12 cm, Pinched: -0.38 cm, Touched: -0.49 cm, Non-Touch: -3.06 cm だった。以上の Retrospective Report および Post-trial Report の皮膚変形距離と中指の爪の位置の移動距離の結果それぞれについて、主観評価と同様にノンパラメトリックな1要因参加者内分散分析としてフリードマン検定を実施した (n = 19)。その結果、Retrospective Report では、皮膚変形と爪の移動距離の両方で触覚に関する有意な主効果が検出された (skin: $\chi^2(3) = 27.86, p < .001$; nail: $\chi^2(3) = 11.16, p = .01$) Post-trial Report について、皮膚変形距離のみで有意な差がみられた (skin: $\chi^2(3) = 22.58, p < .001$; nail: $\chi^2(3) = 5.67, p = .13$)。さらに皮膚変形距離および爪の移動距離についての4つの触覚の条件を比較するため、ウィルコクソンの符号順位和検定による多重比較 (ホルム法) を行った。その結果、Pinched & Pulled に着目すると、Retrospective Report, Post-trial Report 共に他の3条件よりも有意に皮膚変形量が大きかった。また、Pinched が Retrospective Report, Post-trial Report 共に Non-Touch よりも有意に皮膚変形量が大きかった。さらに、Post-trial Report について、Pinched が Touched よりも有意に皮膚変形量が大きかった。中指の爪の位置の移動距離では、Retrospective Report について、Pinched & Pulled が Touched, Non-Touch よりも有意に固有ドリフト量が大きかった。

4. 考察

主観評価については、stretchy skin, skin ownership, hand ownership, referral of touch で Pinched & Pulled と Pinched, Touched, Non-Touch 間で有意に評価得点が高かった。Pinched & Pulled は、他の3つのつまみ方よりも皮膚変形感覚の強度が高いことが明らかになった。

行動実験については、Retrospective Report, Post-trial Report 共に、Pinched & Pulled は他の3条件よりも皮膚変形量が有意に大きく、主観評価と同様に皮膚変形感覚の強度が高いことが明らかになった。また、Pinched が Touched, Non-Touch よりも有意に皮膚変形量が大き

いことから、わずかに皮膚が引っ張られているあるいは触れている場合には、触覚が何もない状態よりも皮膚変形感覚が生起しやすいことが示唆される。さらに、従来の RHI におけるドリフト計測方法に対応している Post-trial Report について、皮膚変形量が平均 11.7cm、固有感覚ドリフト量が平均 0.12cm であった。爪の位置感覚では、つまみ方による主効果は検出されていないことを踏まえるならば、上記の 11.7cm は、固有感覚の変調を伴わない、純粋な皮膚変形量と対応している。すなわち、SHI における皮膚像の変形は、固有感覚の変調の助けを借りなくても生じることが示された。これは本研究の当初の仮説を支持するものである。

本稿と同じレイアウトで実験を行っている MRHI (moving Rubber hand illusion [6]) によれば、一般に縦方向の固有感覚ドリフトは、生起したとしても 2cm ほどである。つまり、縦方向の皮膚変形ドリフトが、これまでの錯覚の制約を大きく超えて生起する点で、SHI が「骨格としての身体」を対象とする RHI と質的に異なるものであることは明らかである。本研究で、固有感覚ドリフトが抑制されたのは、机に対する触覚フィードバックの存在が主因であると考えられる。逆に言えば、皮膚領域では、接触によって自己位置を修正する回路が発動しないか、あるいは限定的にしか影響を受けない可能性が指摘できる。すなわち、触覚フィードバックは、固有感覚ドリフトを抑制するが、皮膚はその限りではない。この点でも、SHI が対象とする皮膚領域の可塑性は、従来の RHI が想定していた身体像の可塑性とは、質的に異なる特性を有していることが示唆される。

文献

- [1] Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756–756.
- [2] Ramachandran, V. S., & Altschuler, E. L. (2009). The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. *Brain*, 132(7), 1693–1710.
- [3] Kodaka, K., Sato, Y., & Imai, K. (2022). The slime hand illusion: Nonproprioceptive ownership distortion specific to the skin region. *I-Perception*, 13(6), 204166952211377.
- [4] 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.
- [5] Ehrsson, H. H. (2019). Multisensory processes in body ownership. *Multisensory Perception: From Laboratory to Clinic*, 179–200.
- [6] Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014). The moving rubber hand illusion revisited: Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. *Consciousness and Cognition*, 26(1), 117–132.