

固有感覚ドリフトに基づく指変形感覚の異方性の検証 Verification of finger deformation's anisotropy on measuring proprioceptive drift

佐藤 優太郎[†], 齋藤 五大[‡], 小鷹 研理[†]
Yutaro Sato, Godai Saito, Kenri Kodaka

[†]名古屋市立大学, [‡]東北大学
Nagoya City University, Tohoku University
sato12yutaro@gmail.com

概要

身体変形錯覚には指の長さ変形に関するものが多数存在するが、幅変形の報告は限られる。このことは、指の長さ変形は幅変形よりも優勢に起こることを示唆する。本研究ではこれを検証するべく、自他の指に同期的に触れることで、選択的な指変形感を生起する double-touch illusion を用いて、固有感覚ドリフト計測に基づく指変形距離を比較した。結果、指変形は幅よりも長さ方向に優勢に生起し、このことには指の関節配置が関係することが示唆された。

キーワード : proprioceptive drift, rubber hand illusion, self-touch illusion, double-touch

1. はじめに

Rubber hand illusion (RHI) [1]などの身体所有感を変調する錯覚は、同期的な視触覚刺激によって、身体イメージが柔軟に変形することを示している。興味深いことに、RHI のパラダイムにおける指の変形感覚を生起する錯覚では、指が伸びるなどの伸縮感覚に関するものが多数存在するのに対し[2], 指を太く変形させる報告は極めて少ない[3]. こうした錯覚の報告数の差異は、指の身体イメージが長さ方向に強い可塑性を持つことを示唆する。他方で通常の指のサイズの知覚では指は実際よりも短く幅広に知覚される[4]. この報告は一見すると、指幅の広さについての感受性の高さを示すように思われるものの、指幅のイメージの可塑性を示すものではない。調べる限り、指の長さ太さの軸方向についての可塑性を比較した報告はなく、変形感覚が指の2軸のどちらで起こりやすいのかはよくわかっていない。

我々は、指変形錯覚の報告数の差異を根拠に、指変形感覚の生起には異方性が存在することを仮説に採択し、研究を進めてきた。仮説の検証には、我々が2020年に考案した自分と他人の指に同期的に触れることで、指の変形感覚を生起する double-touch illusion (DTI) を採用している(図1)。DTIは、RHIや視覚なしのRHIである self-touch illusion[5]と異なり、自分の指への接触を体験者自らが担う。自身の指への接触により、実際の指

の位置をモニタしながら、なおかつ他人の指に所有感を生起させるため、結果として自他双方の指に所有感が生起し、選択的に身体変形を生起させることができる。実際これまでの実験で、指の変形が長さ方向で優勢に起こることを質問紙によって確認している[6]. こうした指の変形感覚は、錯覚中、長さ方向であれば指の先端と根本位置感覚、幅方向であれば指の左右の端の位置感覚の推移を計測することで行動的なレベルで計測が可能である。これは RHI における手指の位置感覚移動の指標である固有感覚ドリフトを、それぞれの指の部位で計測することに同じである。以上のような主観的指標と行動的指標を検証することで、指変形感覚の異方性に関する仮説の強い裏付けが期待できる。

本研究では、指の長さ太さの変形距離を計測することで、固有感覚ドリフトの計測に基づいた指変形感の異方性を検証した。まず質問紙を用いた主観指標による実験を行ったのち、固有感覚ドリフトの計測と、ドリフトに伴う変形感覚に関する質問を行った。結果は、主観指標と行動指標の両方で仮説を支持した。

2. 実験

2.1 実験参加者

実験参加者は大学生 25 名であった(男性 11 名, 女性 14 名; 平均年齢 20.6 歳; 右利き 23 名)。

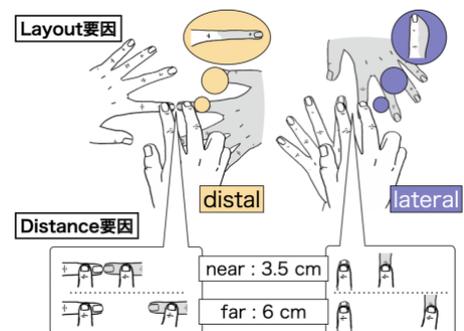


図1 Double-touch illusion を用いた実験要因

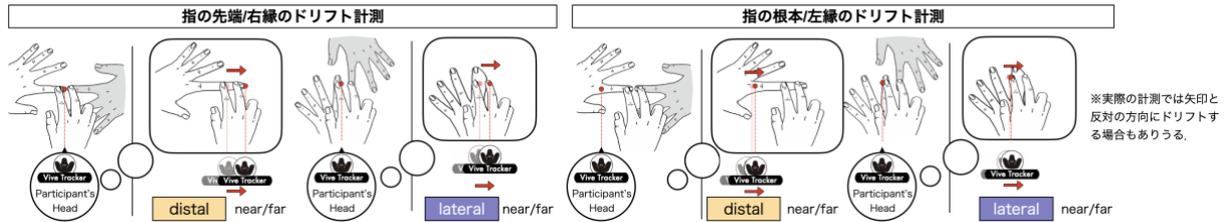


図2 固有感覚ドリフトに基づく指変形距離の計測

2.2 実験計画・実験環境

実験計画は、自他の指の配置による指の変形方向の効果を検証する Layout 要因 (distal: 自他の指が直列; lateral: 自他の指が並列) と、自他の指間の距離の効果を検証する Distance 要因 (near: 3.5 cm; far: 6cm) を設定した 2 要因参加者内計画であった (図 1)。以上の計画について、はじめに所有感と変形感に関する質問を各 3 つずつ行う主観評価課題を実施した。主観評価課題が全て完了した後、行動的な指標となる固有感覚ドリフトに着目した指の変形距離の計測を行った。ドリフトの計測には再度、変形感に関する 3 つの質問を行った。雑音の影響を除くべく、課題中、参加者はヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを聴いた。

2.3 主観評価課題

参加者は着席し、条件に従って机の上に左手を置いた。はじめに行う主観評価課題では、4 条件 (distal-near, distal-far, lateral-near, lateral-far) について、参加者は閉眼で、図 1 のように、自分および実験者の左手の人さし指の第一関節に対して、右手の人さし指が自身の指に、中指が実験者に触れた状態で、30 秒間、同期的に揺らすように触れた (distal では前後, lateral では左右に揺らす)。課題の直後、質問紙に回答した。

2.4 質問紙

質問紙の内容は、右手の中指で相手の指に接触した際の「所有感」に関する項目とその統制項目計 3 つ (図 3 上段, A1-3)、左手の人差し指の「変形感」に関する項目とその統制項目計 3 つであった (図 3 上段, B1-3)。参加者はこれらについて、0 (全く感じない) から 6 (非常に強く感じる) までの 7 段階で回答した。なお、参加者が注意を向ける指の部位が複数あることによって、質問紙への回答が困難となることを避けるため、課題は A と B の質問は個別に実施した。実際には A1-3 の質問は、参加者の右手の中指が実験者の指に触れた時の感覚に注意を向けるよう指示を行い、B1-3 の質問は、参加者自身の左手の人差し指の形に注意を向けるよう

指示を行った。条件の実施順は参加者ごとに無作為化し、2 回繰り返し計測を行った。

2.5 ドリフト課題と変形感覚の主観評価

質問紙への回答が全て完了した後、指変形距離を調べるための固有感覚ドリフト計測を行った。ドリフト計測では、distal 条件の場合、課題中の左手の人さし指の先端および根本の位置感覚の推移を計測し、lateral 条件では、左手の人さし指の第一関節付近の右端と左端の位置感覚の推移を計測した。計測装置としては、参加者はヘッドバンドに取り付けられた位置センサ (Vive Tracker 3.0) が額中央に来るように装着し、額の中央を計測する指があると感じる位置に合わせ続けてもらった (図 2)。計測後、ドリフトに伴う指変形感を調べるため質問 B1-3 を再び行った。計測は distal-near/far では左手の人さし指の先端または根本、lateral-near/far では左手の人さし指の右または左縁を個別に行い、8 回の試行となった。

3. 結果

図 3 に質問紙と指変形距離の結果を示す。解析では、質問紙の評定値や変形距離の分布の偏りがあり正規性を仮定できない可能性が考えられたため、Layout と Distance の 2 要因について、整列ランク変換 (aligned rank transform) を用いたノンパラメトリックな分散分析である ART-ANOVA を行った [7]。また 4 条件間の差異を明らかにするため、交互作用が得られない場合においても多重比較を行った。解析には、整列ランクデータへ適用できる多重比較 (ART-C) [8] に holm 法を用いた。

3.1 主観評価課題

質問紙の解析には、各質問項目 (図 3 上段, A1-3, B1-3) の 2 回の試行の平均値を用いた。2 要因参加者内の ART-ANOVA (Layout × Distance) を用いて解析を行ったところ、Layout の主効果が A1-3, B1-2 で得られた (A1: $F(1, 72) = 32.57, p < .001, \eta_p^2 = .31$; A2: $F(1, 72) = 13.93, p < .001, \eta_p^2 = .16$; A3: $F(1, 72) = 4.95, p = .03, \eta_p^2 = .07$)

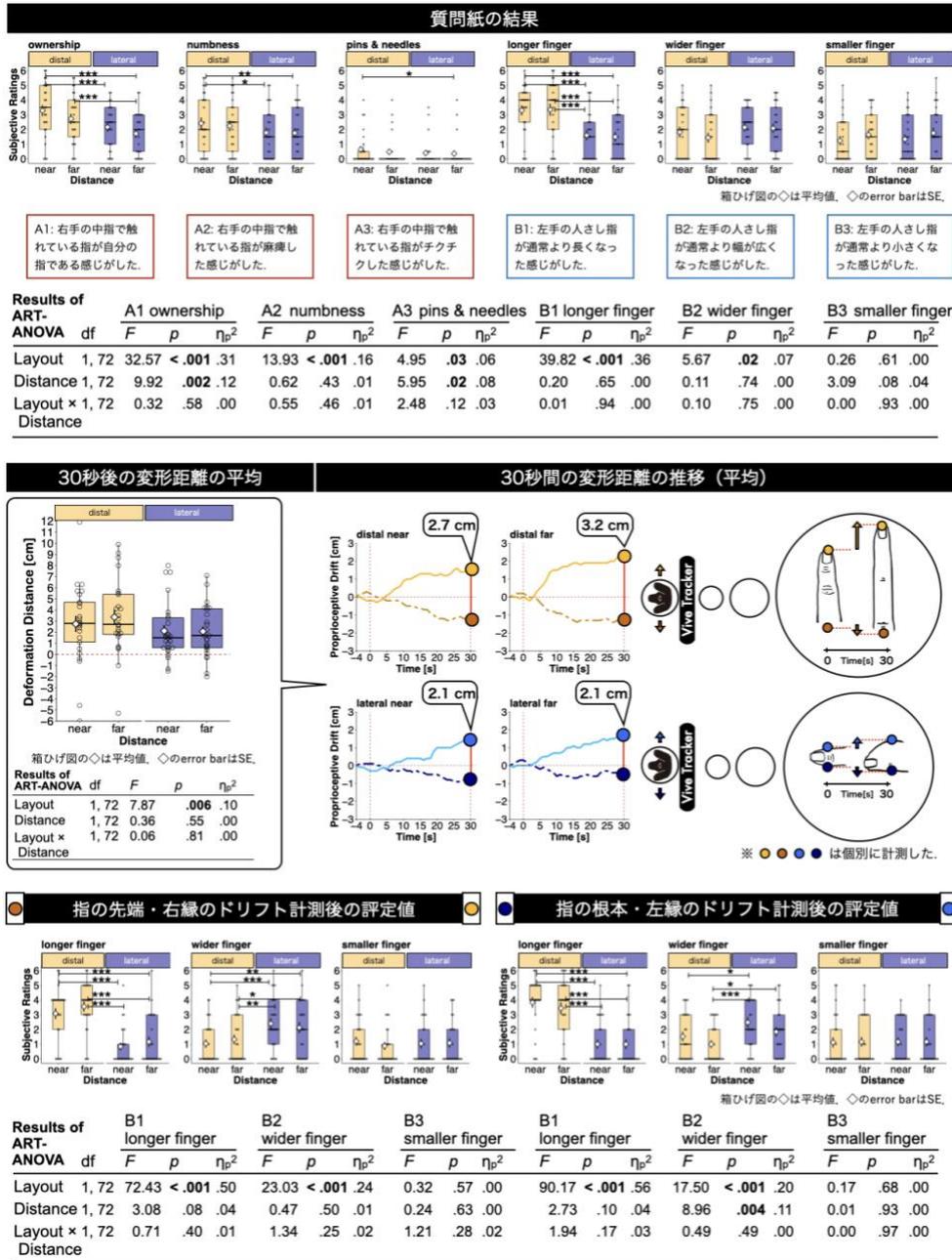


図3 質問紙の解析結果(上段)

固有感覚ドリフトに基づく指変形距離の解析結果(中段)

ドリフト計測に伴う変形感覚に関する質問紙の解析結果(下段)

= .06; B1: $F(1, 72) = 39.82, p < .001, \eta_p^2 = .36$; B2: $F(1, 72) = 5.67, p = .02, \eta_p^2 = .07$. Distance の主効果は A1 と A3 で得られた (A1: $F(1, 72) = 9.92, p = .002, \eta_p^2 = .12$; A3: $F(1, 72) = 5.95, p = .02, \eta_p^2 = .08$) . さらに下位検定を行ったところ, 所有感に関する A1 では distal-near の評定値が lateral-near/far に比べて有意に高く, distal-far の評定値が lateral-far に比べ有意に高かった (all $p < .001$) . 指の長さ変形に関する B1 では, distal-near の評定値が lateral-near/far よりも有意に高く, distal-far の評定値が lateral-near/far よりも有意に高かった (all $p < .001$) .

3.2 固有感覚ドリフト計測と変形感覚の主観評価

固有感覚ドリフト計測に基づく指の変形距離 (図3中段) に関する解析では, 長さ変形の距離を「指の先端のドリフト量-指の根本のドリフト量」とし, 幅変形の距離は「指の右縁のドリフト量-指の左縁のドリフト量」としたものについて, 同様に2要因参加者内のART-ANOVA (Layout×Distance) を用いて解析を行った. 結果は Layout の主効果が検出された ($F(1, 72) = 7.87, p = .006, \eta_p^2 = .10$) . ただし下位検定では有意な差は一切得られなかった. また, 指の先端位置, 指の根本,

指の右縁, 指の左縁の各部位の固有感覚ドリフトの計測後に行った変形感に関する質問項目 B1-3 の解析では, 指の先端または指の右縁の計測においては, B1 と B2 で Layout の主効果が検出された (B1: $F(1, 72) = 72.43, p < .001, \eta_p^2 = .50$; B2: $F(1, 72) = 23.03, p < .001, \eta_p^2 = .24$). 指の根本または指の左縁の計測においても, B1 と B2 で Layout の主効果が検出された (B1: $F(1, 72) = 90.17, p < .001, \eta_p^2 = .56$; B2: $F(1, 72) = 17.50, p < .001, \eta_p^2 = .20$). 以上の結果は主観評価課題の結果を再現した. また B2 で Distance の主効果が検出された (B2: $F(1, 72) = 8.96, p = .004, \eta_p^2 = .11$). 下位検定の結果は, B1 については, 指の先端または指の右縁の計測および指の根本または指の左縁の計測で, 主観評価課題の結果が再現された. B2 の下位検定の結果は図3上段のグラフに記載した.

4. 考察

本研究では, 質問紙による主観的指標とドリフト計測による行動的指標の双方で, 指の長さ変形の錯覚が幅変形に比べ有意に強く生じたことから, 指変形感覚の異方性に関する仮説は支持された.

主観評価課題において, ownership (A1) と longer finger (B1) で参加者と実験者の指の配置による変形方向の効果が検出されたことに加え, ownership および longer finger の解析において, distal-near は lateral-near の評定値より有意に高く, distal-far が lateral-far の評定値より有意に高いことから, 指が等距離に配置された錯覚誘導で, 指の長さ方向への錯覚生起が幅方向よりも優勢に起こることを強く示す. 次に wider finger (B2) で得られた指の変形方向の効果は, DTI が指の幅変形としても作用することを示唆する. ただし指の変形方向の効果は B1 の長さ変形の方が, B2 の幅変形よりも高い (B1: $\eta_p^2 = .36$; B2: $\eta_p^2 = .07$). B1 と B2 の結果を直接比較することは解釈に留保が必要であるが, 以上のことは, 主観的なレベルで長さの変形は幅変形よりも高い感受性があることを示唆する.

指変形距離に関しては, 30秒後の変形距離において指の変形方向の効果がみられ, 長さ変形が幅変形よりも優勢に起こることが示された. また, ドリフト計測に伴う変形感覚に関する質問紙 (B1-3) の結果は, B1 で主観評価課題の結果を再現した.

本研究で確認された指変形感覚の異方性の機序は, 指関節への着目で解釈できる. distal 条件の錯覚過程で

は, 自らの左手の人さし指の第一関節が, 右手の中指で触れる他人の指の位置付近にまでドリフトしたと考えられる. しかし参加者は同時に, 右手の人さし指で自身の指に接触することから, 錯覚中の自身の左手の人さし指の位置はモニタされ, 左手の人さし指の第二・第三関節のドリフトは抑制される. 指の長さの変形はこのように, ドリフトする関節 (第一関節) と固定される関節 (第二・第三関節) の位置の差と言える. 一方で, lateral 条件の錯覚過程では, 指の幅方向には第一関節ただ1つしか存在しないため, 関節をドリフトさせる変形は不可能である. まとめると指変形の異方性は, 関節のドリフトを採用できる変形か否かのような身体変形プロセスの差異によるものと考えられる. 加えて, 通常の指が短くバイアスされることも[4], 指の先端と逆の手の甲の方向へ指関節の位置感覚が可変でもあるという点で, 少なくとも我々の仮説に反する報告ではない.

文献

- [1] Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756-756. <https://doi.org/10.1038/35784>
- [2] Kiltner, 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). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00141>
- [3] Dieguez, S., & Lopez, C. (2017). The bodily self: Insights from clinical and experimental research. In *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* (Vol. 60, Issue 3, pp. 198-207). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2016.04.007>
- [4] Longo, M. R. (2022). Distortion of mental body representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(3), 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.11.005>
- [5] Aimola Davies, A. M., White, R. C., & Davies, M. (2013). Spatial limits on the nonvisual self-touch illusion and the visual rubber hand illusion: Subjective experience of the illusion and proprioceptive drift. *Consciousness and Cognition*, 22(2), 613-636. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.03.006>
- [6] 佐藤優太郎, 齋藤五大, & 小鷹研理. (2022). 指の長さ vs 指の幅: ダブルタッチ錯覚における変形距離限界. *日本認知心理学会発表論文集 日本認知心理学会第19回大会*. 日本認知心理学会.
- [7] Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 143-146. <https://doi.org/10.1145/1978942.1978963>
- [8] Elkin, L. A., Kay, M., Higgins, J. J., & Wobbrock, J. O. (2021). An Aligned Rank Transform Procedure for Multifactor Contrast Tests. In *UIST 2021 - Proceedings of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (Vol. 1, Issue 1). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3472749.3474784>