

仮想空間における体験者の行為が指の伸長感に与える影響の比較

User Actions in VR and Their Effects on Finger Stretching

石原 由貴[†]
Yuki Ishihara

[†]徳島大学
Tokushima University
ishihara.yuki@tokushima-u.ac.jp

概要

体験者自身の能動的な運動意思が指の伸縮錯覚の強度にどのような影響を及ぼすのか明らかにするため、身体部位に対する受動的・能動的伸縮の提示条件、および触覚刺激の有無について比較を行った。結果、ジェスチャーおよびボタン入力といった体験者の能動的な指の伸縮操作の有無による錯覚強度の差異は見られず、視覚刺激と共に触覚刺激を与えることが、最も錯覚を強固にすることが示唆された。

キーワード：Bodily Resizing Illusion, 自己主体感

1. はじめに

手・膝等の Bodily Resizing Illusion を提示することにより、CRPS 等の慢性疼痛が軽減されることが示されている(Preston & Newport, 2011; Stanton, et al., 2018)。先行研究では対象となる身体部位の視覚的な伸縮イメージと共に、押し込む/引っ張る触覚刺激を身体部位に与えることで、視覚刺激のみの提示と比較すると強固に身体部位の変形感が誘起され、疼痛軽減効果が高まるとされる(Stanton, et al., 2018)。しかし、これらの研究で調査がなされている身体部位のモーフィングの提示手法は実験者の操作による提示のみであり、ユーザー自身が能動的にモーフィングを提示した場合の錯覚強度の検討はなされていない。今後疼痛リハビリテーションへの活用を考えた際、補助者無しで実施可能な提供形態を検討するにあたっては、触覚以外の錯覚効果を高める仕組みの調査・検討が必要である。

著者はこれまでに指の伸縮を予期させる身体所作及びコントローラーのボタン押下による体験者自身の能動的入力による指関節のモーフィングを提示し、従来の視覚-触覚同期型の提示との錯覚強度の比較を行った(石原・遠藤, 2024)。その結果、従来の視覚-触覚同期型の条件には及ばないものの、受動的に指を伸縮された時よりも、実験参加者が能動的に指を伸縮する入力を行う条件が、錯覚効果が高くなることが示唆された。ただし以前の実験結果では指の伸長距離が先行研究(Hansford, et al., 2024)よりもかなり長く、錯覚効果が全体的に薄くなってしまった可能性があるために、指の伸長距離を短くして再実験を実施する。また、他

の条件と比較して従来の視覚-触覚同期型による錯覚強度が最も高いことを踏まえ、本実験では体験者自身が自身の指をつまみ触覚刺激を与える条件を新たに追加する。

2. 実験手続き

2.1 実験刺激

本実験では左手の人差し指を対象に、体験者自身の能動的な運動意思が錯覚強度にどのような影響を及ぼすのか明らかにするため、身体部位に対する受動的・能動的伸縮の提示条件、および触覚刺激の有無(本当に引っ張っているかどうか)について比較し、体験者自身の行為が錯覚の強度にどのような影響を及ぼすのか比較する。

本実験ではVR空間内で1試行につき、指の伸長と伸縮を、交互に30秒間繰り返す。伸縮する部位は左手人差し指の先端の関節であり、2.4sかけて2.1cmの速さとなるよう移動した。この時、<手の提示条件>として下記の6条件を用意した(手の提示条件：表1; 図1)。

表 1 <手の提示条件>

分類	設問
①Passive-Tactile	実験者によって左手の指を掴まれ、左手の人差し指が伸縮する様子を提示される条件
②Positive-Controller	被験者自身の右手のコントローラーの操作によって、左手の人差し指を引っ張る様子を提示される条件。
③Passive-NoController	実験者には触れられることなく、左手の人差し指が伸縮する様子を提示される条件。
④Positive-Gesture	被験者自身の右手で左手の人差し指を掴む仕草を行い、左手の人差し指が伸縮する様子を提示される条件。
⑤Positive-Tactile	被験者自身の右手で左手の人差し指を掴み、左手の人差し指が伸縮する様子を提示される条件。右手のハンドトラッキングは行わず、指をつまんだポーズの右手のモデルが固定で提示される。
⑥Control	ハンドトラッキングが OFF の状態 (CG の手が現実と異なり開いている) で、③Passive-NoController 条件を提示する条件。

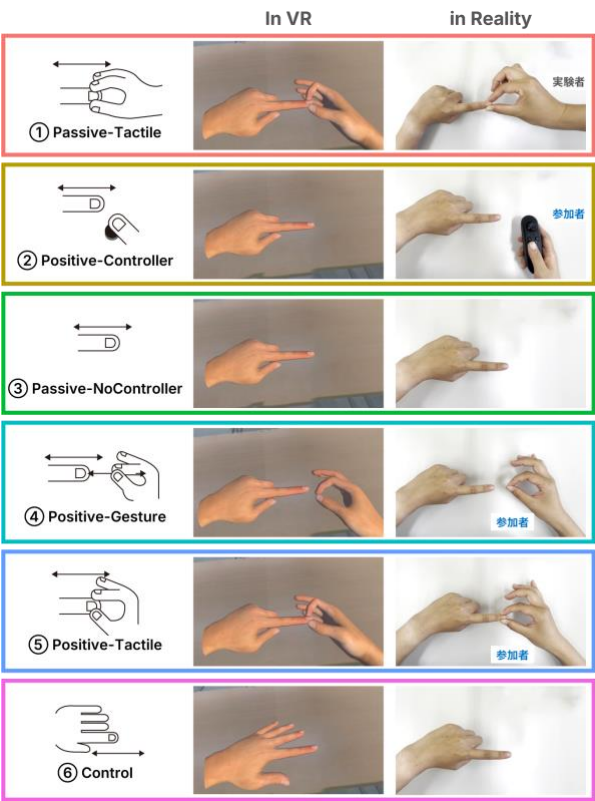


図1 <手の提示条件>における指の伸縮

VR アプリケーション内ではハンドトラッキング機能を用いて、実験参加者の手の動きが再現される CG の手が提示される。手はリアルな質感に近づけるため、人肌のテクスチャを用いた(Pohl & Mottelson, 2022)。実験時は 50bpm のメトロノーム音を流し、実験参加者が指の伸縮を切り替える目安として用いた(2 拍毎に指が伸びる/縮む)。また、①[Passive-Tactile] および ⑤[Positive-Tactile]においては、指が伸びると共に、指を優しく引っ張り、指が縮む際には指を優しく押し込んだ。④[Positive-Gesture] ⑤[Positive-Tactile]以外の条件においては、右手は常に実験参加者の膝の上に置かれた。

2.2 実験 1

本実験では徳島大学に所属する 37 名(男性 13 名, 女性 24 名; 平均年齢 21.0 歳; 内男性 1 名のみ左利き)を対象とした人差し指の伸縮錯覚の誘発実験を行った。

実験参加者はテーブルの前に座り、事前に仮想空間内で行う操作について口頭で説明を受けた上で、HMD (Oculus Quest3) を装着する。そして身体正面に左手を浮かせ、手のひらを下に向けて人差し指一本を立てて握り込み、身体と腕を水平にした状態で、VR コンテンツを体験する。この時、姿勢の維持を目的として、実験参加者は左側に配置された肘置きに左腕を置いた。提示する VR アプリケーションのフレームレート

は 72fps で安定していた。

各条件において、実際に指が伸びた感覚が得られたか等を確認するため、アンケートによる評価を実施する。指の伸縮感、触覚的感覚の強さ、CG の手に対する身体所有感、自己主体感に関連した設問にコントロールを合わせて構成された 5 問(表 1)を、実験参加者に口頭で尋ねた。設問は 1 試行毎にランダムな順序で提示され、実験参加者は回答する際、HMD を被った状態で目を閉じ、これらの項目について 7 件法(−3:全くそう思わない〜 3:とてもそう思う)で口頭にて回答を行った。

表 1 アンケートの設問

分類	設問
Stretchiness	自分の指が普段よりも長くなったかのように感じた
Tactile	CG の指が伸びた時、本物の指も右側に引っ張られているように感じた
Ownership	CG の手が自分の手そのものであるかのように感じた
Agency	自分自身で指の長さをコントロールしているように感じた
Control	左手が 2 本以上あるように感じた

1 試行目は最も錯覚強度が強くなることが予想される①[Passive-Tactile]を実施した。2 試行目以降は、他の条件の錯覚強度がどの程度であるか計測するため、① [Passive-Tactile]における錯覚の程度を 50 としたマグニチュード推定による錯覚強度 (CG の手の形状と自分の手の形状が一致している感覚の強さ) の申告を行った (錯覚強度の比較)。説明時、①[Passive-Tactile 条件]の倍の錯覚強度であったと感じた場合には 100、全く錯覚を感じなかった場合には 0 というようにレーティングする基準を示した。

2.3 実験 2

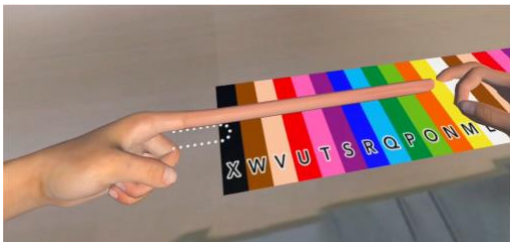


図2 ドリフト量の計測

指の伸長距離の許容量についての調査として実験 2 を行った。本実験では実験 1 に参加した徳島大学に所属する 27 名(男性 9 名, 女性 18 名; 平均年齢 21.2 歳; 全員右利き)を対象とした。

実験環境は実験 1 と同様である。姿勢のみ、指先の微小な動きによって、計測に支障をきたさないよう、手

の姿勢は手のひらを実験参加者側に向けた姿勢で行われた。各条件において指の伸長感がどこまで保つことができるのかを確かめるため、指の伸縮を交互に15秒間繰り返した後、20cmを限界値としてCGの指を10秒間伸長させ、実験参加者には自身の左手の指先がどこに位置するように感じるのかを尋ねた（ドリフト量の計測）。VR空間内に左から右に向かって2cm幅刻みのカラーバーを表示し、実験参加者の左指の腹が位置すると感じた場所にあるバーに記載されたアルファベットを回答してもらい、ドリフト量の計測を行った（図2）。

3. 結果

3.1 実験1

図3はアンケートの各設問への回答について、<手の提示条件>毎に示したものである。各設問における<手の提示条件>を要因とした、1要因被験者内分散分析を行ったところ、全ての条件において、主効果が有意であった（Stretchiness: $F(5, 180) = 6.71, p < .001, \eta^2 = .13$; Tactile: $F(5, 180) = 12.59, p < .001, \eta^2 = .23$; Ownership: $F(5, 180) = 10.05, p < .001, \eta^2 = .19$; Agency: $F(5, 180) = 30.16, p < .001, \eta^2 = .41$; Control: $F(5, 180) = 3.73, p < .001, \eta^2 = .08$ ）。

アンケート設問毎に、Tukey法による多重比較を行ったところ、指の伸縮感について尋ねたStretchinessの設問において、①[Passive-Tactile]が他の<手の提示条件>と比較して有意に評定値が高い傾向が示された（多重比較の結果は図3のグラフ内に記載）。しかしながら、他の条件間で有意な差異は③[Passive-NoController]-⑥[Control]の間にのみ見られ、指の伸縮距離を短くした今回の実験においても、従来の受動的に触覚を付与される手法のみ、強固な指の伸縮感が得られた。

また、①[Passive-Tactile]を基準として回答を行った錯覚強度の比較（図4）についても<手の提示条件>を要因とした、1要因被験者内分散分析を行ったところ、主効果が有意であった（ $F(5, 180) = 13.21, p < .001, \eta^2 = .23$ ）。そこでTukey法による多重比較を行ったところ、①[Passive-Tactile]は他の全ての条件に対し、有意に強固な錯覚であったことが示された（多重比較の結果は図4のグラフ内に記載）。さらに、⑤[Passive-Tactile]は②[Positive-Controller]よりも錯覚強度が有意に高くなり、ボタンの操作という能動的な操作以上に、触覚的な提示が錯覚強度の向上に必要であることが示唆さ

れた。

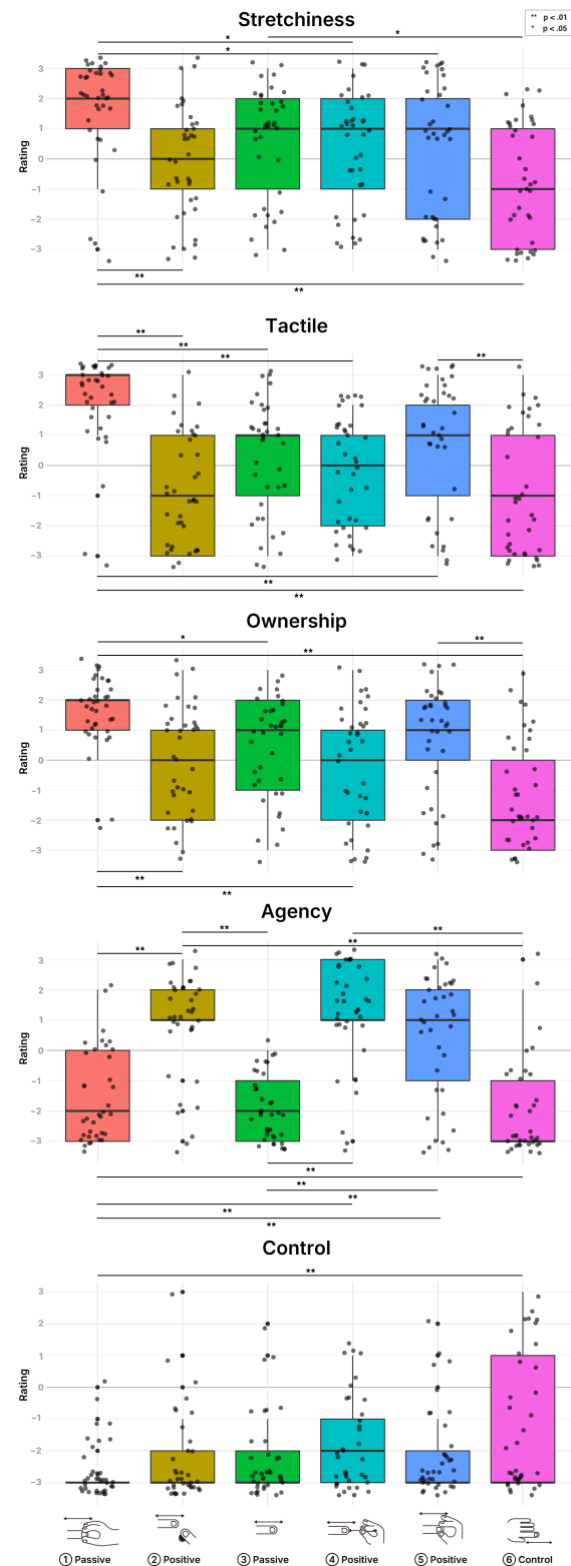


図3 実験1：アンケート結果

さらに触覚、身体所有感、自己主体感が錯覚強度に寄与しているのかを調査するため、各質問肢と錯覚強度の比較の結果についてピアソンの積率相関係数を調べたところ、いずれも正の相関関係が見られた

(Tactile : $r = .61$, Ownership : $r = .59$, Agency : $r = .31$) .
ただし、触覚刺激をいかに感じていたかを問う Tactile
が最も錯覚強度と強い相関が見られたことから、自
己主体感を伴うジェスチャーやコントローラーによ
る指の伸縮の提示よりも、受動的ではあっても、何ら
かの触覚刺激を与えることが、強い指の伸縮感を誘起
することが示唆された。

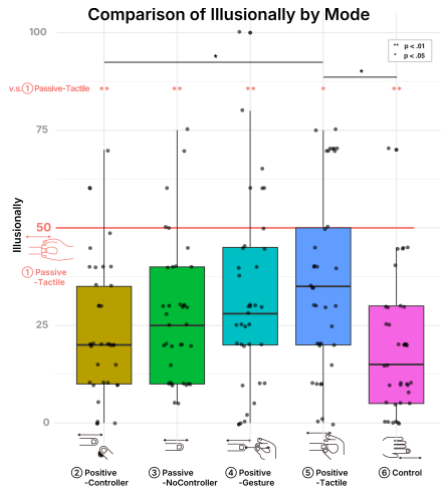


図 4 実験 1：錯覚強度の比較

3.1 実験 2

図 5 はドリフト量の計測結果を示したものである。
各設問における<手の提示条件>を要因とした、1 要因
被験者内分散分析を行ったところ、全ての条件におい
て、主効果が有意であった (Stretchiness: $F(5, 130) = 4.07$,
 $p < .01$, $\eta^2 = .09$) . Tukey 法による多重比較を行ったと
ころ、指の伸縮感について尋ねた Stretchiness の設問に
おいて、①[Passive-Tactile] が ⑥[Control], ⑤[Passive-
Tactile]がよりも有意に大きかった。

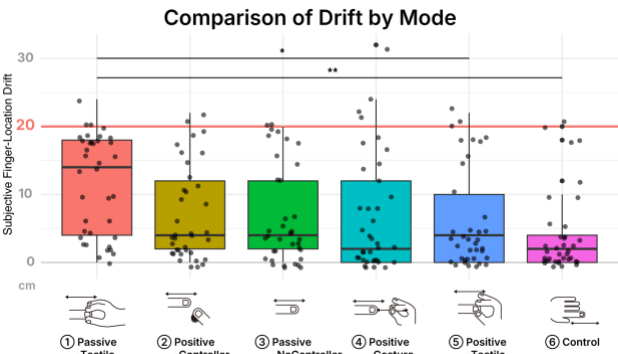


図 5 実験 2：ドリフト量

実験 1 において錯覚強度が高いと考えられた
⑤[Passive-Tactile]のドリフト量が低くなった原因とし
て、この条件のみ実験参加者の右手を左手に触れてい
る条件であることから、右手の位置感覚が強く意識さ
れ、伸縮が大きく起こる実験 2 の環境下においては、錯

覚を妨げるようになったと考えられる。

4. まとめ

本実験により、指の伸縮距離を短くした場合におい
ても他者により触覚刺激を付与される、視覚-触覚同期
型による錯覚の提示手法が、指の伸縮に対する錯覚強
度が最も強くなることが示された。著しく身体所有感
を損なう⑥[Control]以外には、錯覚強度に大きな差異
は見られず、ジェスチャーやコントローラーを用いて
体験者自身の能動的な運動意思を刺激したとしても、
指の伸縮に対する錯覚強度はそれほど強化されない可
能性がある。

伸縮距離が短い場合には、体験者自身で触覚を付与
することで錯覚を強固にできる可能性が示唆されたが、
伸縮距離が長くなる場合には、刺激を与える側の手の
固有感覚が妨げとなり、錯覚を弱める可能性がある。

ただし、錯覚に関連した設問はいずれの回答の分散
が大きく、錯覚に入りやすい条件は個人差がある可能
性がある。引き続き実験参加者を増やし、クラスター
分析による参加者の傾向毎の分析を行いたい。

文献

Preston, C., & Newport, R. (2011) “Analgesic effects of multisensory illusions in osteoarthritis.” *Rheumatology*, Vol.50, pp.2314–2315.

Stanton, T. R., et al., (2018) “Illusory resizing of the painful knee is analgesic in symptomatic knee osteoarthritis.” *PeerJ*, 2018(7), e5206

石原, 遠藤: 仮想空間における“つまみ動作”を用いた能動的関節位置移動による指の伸縮錯覚の誘発; インタラクシオン 2024 論文集, 2B-44, pp.820-824 (2024)

Hansford, K. J., Baker, D. H., McKenzie, K. J., & Preston, C. E. J. (2024). Multisensory processing and proprioceptive plasticity during resizing illusions. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale*, 242(2), 451–462.

Pohl, H., & Mottelson, A. (2022). Hafnia hands: A multi-skin hand texture resource for virtual reality research. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 719506.

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 22K17940 の助成を受けた
ものです。また、本環境の制作にあたり(株)GOCCO.遠藤
孝則様にご協力を頂きました。ここに謝意を表します。