

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

石原由貴^{†1} 遠藤孝則^{†2}

概要: 手・膝等の伸縮錯覚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先行研究によって示されている. 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により, 強固な伸縮錯覚の誘起を実現している. しかしながら, 触覚を与えるためには補助者が必要となることから, 簡易に実施することが困難である. そこで本研究では, 体験者自身の能動的な操作による伸縮錯覚の強化について検討を行い, 伸縮を予期させる身体所作による入力(つまみ動作)を取り入れた伸縮錯覚の誘発環境を制作した. さらに, 伸縮錯覚における能動的伸縮意思と伸縮を予期させる身体所作が, 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, 被験者実験を行った. 結果, 従来の視覚-触覚の同期により誘起される錯覚強度には及ばないものの, 能動的な伸縮錯覚及び, 伸縮を予期させる身体所作による入力が, 視覚刺激のみで受動的に提示される伸縮錯覚の誘起よりも強固になることが示唆された.

1. 背景

身体部位の視覚的モーフィング像の提示により, 手・膝等の伸縮感と共に, 伸縮感が得られた部位に対し CRPS 等の慢性疼痛が軽減されることが, 先行研究により示されている[1-3]. これらの例では対象となる身体部位を覆い隠すように提示される, 身体部位が伸び縮みする視覚イメージと同期したタイミングで, その部位を優しく押しこむ/引っ張る触覚刺激を同時に付与し, 強固な伸縮錯覚及び疼痛抑制効果を誘起している. この伸縮錯覚は視覚提示のみによっても伸縮錯覚の誘起が可能であると報告がなされているが[3], その疼痛抑制効果は視覚-触覚が同期していた場合よりも劣ることが示されている[2]. しかし視覚-触覚が同期した伸縮錯覚の誘起には, 患部を引っ張る補助者が必要となる. 伸縮錯覚は継続して実施することにより, 疼痛の抑制効果がより高まること[2,3]が示唆されていることから, 補助者無しで, 簡易に実施・継続できる伸縮錯覚の誘起環境の検討が重要となる.

簡易的な環境で強固な伸縮錯覚を誘起するためには, 補助者が必要になってしまう視覚-触覚の同期に代わる, 新たな伸縮錯覚の誘起手法が必要となる. 腕の運動錯覚を誘起する実験においては, 能動的な運動意思が視覚的な運動の提示により誘起される運動錯覚を強化することが報告されている[4]. そこで本研究では, 一般家庭向けに販売されている HMD のハンドトラッキング機能をベースとした, 体験者自身の能動的な操作を用いた伸縮錯覚の誘起環境を作成し, 能動的な操作が伸縮錯覚の強度にどのような影響を与えるかについて, 検討を行った.

2. 制作

体験者自身の能動的な操作による伸縮錯覚の誘起について検討するため, 著者らは Meta Quest 向けのアプリケーション“*Weird Chillout*”を制作した[5]. これは HMD のハンドトラッキング機能を用いて, 左手の関節付近を右手の親指と人差し指でピンチする, あるいは洗濯バサミを模したオブジェクトで挟みこむ「つまみ動作」を行った状態で, 右手あるいは左手の位置を移動させることで, ピンチされた関節部分が移動し, 左手の指が伸びたような形状を提示する機能が備わっている(図1). このアプリケーションの体験者からは「指が本当に伸びた感じがする」「手の関節がグチャグチャになって変な感じがする」といった意見が得られ, 一定の身体変形感が得られたことがインタビューによる聞き取りレベルで示された.



図1 Weird Chillout による指の伸長

指の伸縮錯覚は提示された手の CG モデル自体の形状のみによってもある程度もたらされることが予想される[3]が, 本環境に取り入れた「つまみ動作」による体験者自身の能動的な手の関節位置の移動操作が, 伸縮錯覚の強度にどのような影響を及ぼしているのかは, 明らかになっていない. そこで本研究では I. 体験者自身の能動的な伸縮意

^{†1} 金沢工業大学
^{†2} (株)GOCCO.

思及びⅡ.伸縮を予期させる身体所作による入力(つまみ動作)が伸縮錯覚にどのような影響を及ぼすのかを被験者実験により,明らかにする.著者が認知科学会第40回大会において報告した実験においては,Ⅰ,Ⅱ双方の伸縮錯覚に対する明確な影響の程度を計測することができなかった[6].この理由として,従来から伸縮錯覚の誘起に用いられている視覚-触覚の同期による伸縮錯覚の強度が非常に強く,7件法によるアンケートによる調査では,他の条件で感じられた伸縮錯覚の程度に対する回答が曖昧なものになってしまった可能性がある.そこで本研究では,視覚-触覚が同期する条件を基準に回答を行うマグニチュード推定法を用いた,従来手法と比較した伸縮錯覚の強度を明らかにする.

3. 実験

3.1 手の提示条件

本実験では家庭用のHMD(Meta Quest Pro)を使用した左手の人差し指に対する伸縮錯覚の誘発実験を行った.実験参加者はHMDを装着した状態で机の前に座る.左手は人差し指を立て,他の指は握りこんだ姿勢を取り,握り込んだ指が下にくるよう,机に設置した姿勢を取る.その上で,下記の<手の提示条件>を提示する.

- ① [Passive-Action] 補助者により指が引っ張られるタイミングと同期して提示される人差し指の伸縮イメージを提示(視覚-触覚の同期:受動的に伸縮)
- ② [Passive-Toggle] 人差し指の伸縮イメージを提示(視覚のみ:受動的に伸縮)
- ③ [Active-Action] 体験者自身が,右手で左手の人差し指第一関節の近くの空間をつまんで引っ張る仕草(つまみ動作)を実施.その動きに同期した人差し指の伸縮イメージを提示(視覚-伸縮を予期させる右手の操作:能動的に伸縮)
- ④ [Active-Toggle] 体験者自身によるコントローラーのボタン操作に同期した人差し指の伸縮イメージを提示(視覚のみ:能動的に伸縮)
- ⑤ [Control] 視覚的な手の姿勢と実際の手の姿勢が異なる状態下での,人差し指の伸縮イメージを提示(ハンドトラッキングを無効にした上で,[Passive-Toggle]条件と同様の提示を実施.CGの手は一本指を立てた姿勢で提示されるが,この条件のみ,本物の左手は全ての指を開き,指を浮かせた状態で実施する)

それぞれの<手の提示条件>において,HMD内にて提示される指の伸縮前・伸縮後の様子を図2に示す.いずれの<手の提示条件>においても,人差し指の最大長は20cmを元の指に付加した長さとしている.③[Active-Action]は操作している右手のピンチ位置の移動スピードと同様であるが,

他の条件における人差し指が伸びるスピードは,伸縮前の自然な指の長さから,ボタンを押下して2秒後に最大の指の長さとなるよう,調整した.また,③[Active-Action]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.

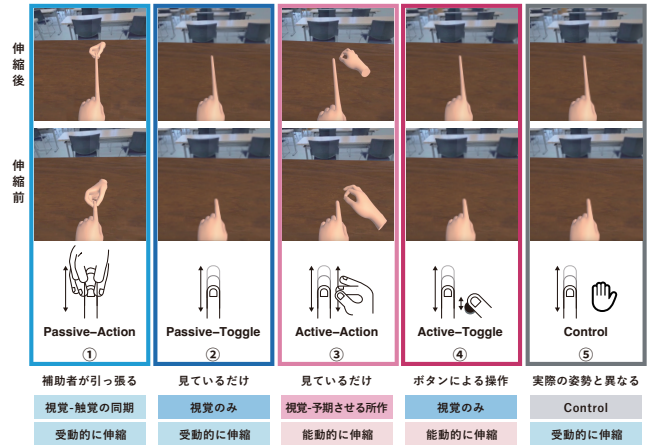


図2 <手の提示条件>

3.2 評価方法

最も錯覚強度が強くなることが予想される【Passive-Action条件】と比較し,他の条件の錯覚強度がどの程度であるか計測するため,マグニチュード推定による錯覚強度の申告を行ってもらう.実験参加者は【Passive-Action条件】時の「CGの手形状と自分の手形状が一致している感覚の強さ」を10とした場合に,各試行の錯覚強度がどの程度であったかについて,回答する(例:同程度であれば10,半分程度であれば5,2倍であれば20.1刻みで回答.)

さらに,主観的評価指標として,アンケートによる評価を実施する.主観的な左手人差し指の伸縮感,CGの左手に対する身体所有感,自己主体感に関連した設問にて構成された4問(表1)を実験参加者に提示し,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)で回答を求めた.

表1 アンケートの設問

分類	設問
指の伸縮感	Q1:自分の指が本当に伸縮しているように感じた
身体所有感	Q2:CGの手が自分の手であるかのように感じた
自己主体感(運動)	Q3:自分の意思でCGの手を動かすことができるように感じた
自己主体感(形状変化)	Q4:指の長さを思い通りに変化させることができると感じた

また客観的指標として,伸縮刺激を提示した後,左手の人差し指がどの程度伸びたと感じたのか,計測を行った(ドリフト量の計測).実験内にて提示する,ドリフト量

の計測フェーズにおいては、左手の CG モデルを非表示にし、手前から奥にかけて 2cm 幅のカラーコードを仮想空間内の机の天板に提示する。このカラーコードは 1 色毎にアルファベットが 1 文字記載され、実験参加者は左手の人差し指の腹があると感じる位置の色またはカラーコードに記載された文字を回答する。

3.3 実験手続き

本実験では金沢工業大学の学生 8 名（男性 4 名、女性 4 名；平均年齢 21 歳；内男性 2 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 を装着した。HMD 内で提示する仮想空間内には、実験参加者の前に配置されているテーブルと同じ高さに合わせて CG のテーブル、実験参加者の左右の手の位置・動きと連動した CG の手が表示される。左手の姿勢は基本的には人差し指を一本立てた姿勢を取り、CG 上のテーブル上面中央のガイドに人差し指が配置されるように合わせた。

左手の配置完了後、テーブル上にカラーコードを示し、左手の人差し指を最大値まで伸ばした際、実験参加者から見た人差し指の腹の位置がどこにあるように見えるかについて聞き取りを行った。その後、カラーコードを非表示にした上で指の長さを自然な長さへと戻し、つまみ動作による人差し指の伸縮操作に慣れるため③[Active-Action]条件で実験内の手続きについて練習を行った。

実験時には、指を最大値まで伸ばす指の伸長（2 秒程度）と指の収縮（2 秒程度）を交互に繰り返し行う。この指の伸縮操作フェーズを開始して 27 秒後に、テーブル上に「Stretch」という文字が表示される。この表示の後、実験参加者は直ちに指を最大値まで伸ばし、伸縮操作を開始して 30 秒を経過するまで最大値の長さを保持し続ける。その後、手の CG モデルが消え、ドリフト量の計測のために、テーブル上にはカラーコードが表示される。この際、実験参加者は可能な限り素早く左手の人差し指の腹があると感じる位置のカラーコードの色ないし記載の文字を口頭で回答した。ドリフト量の回答後、実験参加者は両手をリラックスさせた状態にし、「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」への回答と、アンケートへの回答を口頭にて行う（アンケートについては、実験者がランダムな順序で読み上げ、1 試行毎に異なる設問の順序で回答を行った）。

人差し指の伸縮操作フェーズからアンケートへの回答までを 1 試行とし、実験参加者 1 名に対し、5 種の<手の提示条件>をランダムに 2 周分提示した（計 10 試行。連続して同じ条件を提示しない順序で提示）。また手の緊張をほぐすため、実験参加者は 1 試行毎に数回両手を握る・開く動きを行った後、次の試行に移る。

4. 結果

4.1 【Passive-Action 条件】との錯覚強度の比較

図 3 は「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」についての回答についての実験参加者平均を示したものである。これについて<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 ($F(4, 28) = 13.71, p < .001, \eta^2 = .46$)。そこで Holm 法による多重比較を行ったところ、①[Passive-Action]が②[Passive-Toggle]、④[Active-Toggle]、⑤[Control]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）。また、③[Active-Action]は②[Passive-Toggle]と比較して有意に評定値が高い傾向が示された。この結果は、今回用意した条件と比較して、視覚・触覚が同期する①[Passive-Action]の伸縮錯覚が強固であることを示している。しかし、①[Passive-Action]と③[Active-Action]の間に対しては有意な差異は見られなかったことから、③[Active-Action]の伸縮錯覚の強度は、①[Passive-Action]には劣るものの、他の条件よりも強固な伸縮錯覚を誘起していた可能性が唆されている。

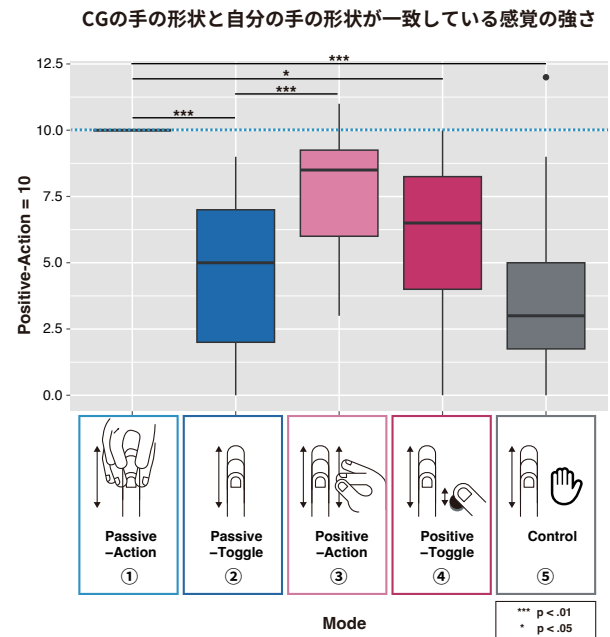


図 3 【Passive-Action 条件】との錯覚強度の比較

4.2 アンケート

図 4 はアンケートの各設問への回答について、各実験参加者の各設問に対する<手の提示条件>毎の回答の実験参加者平均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 (Q1: $F(4, 28) = 10.70, p < .001, \eta^2 = .52$; Q2: $F(4, 28) = 8.42, p < .001, \eta^2 = .44$; Q3: $F(4, 28) = 25.84, p < .001, \eta^2 = .69$; Q4: $F(4, 28) = 19.95, p < .001, \eta^2 = .65$)。こちらもアンケート設問

毎に, Holm 法による多重比較を行った。

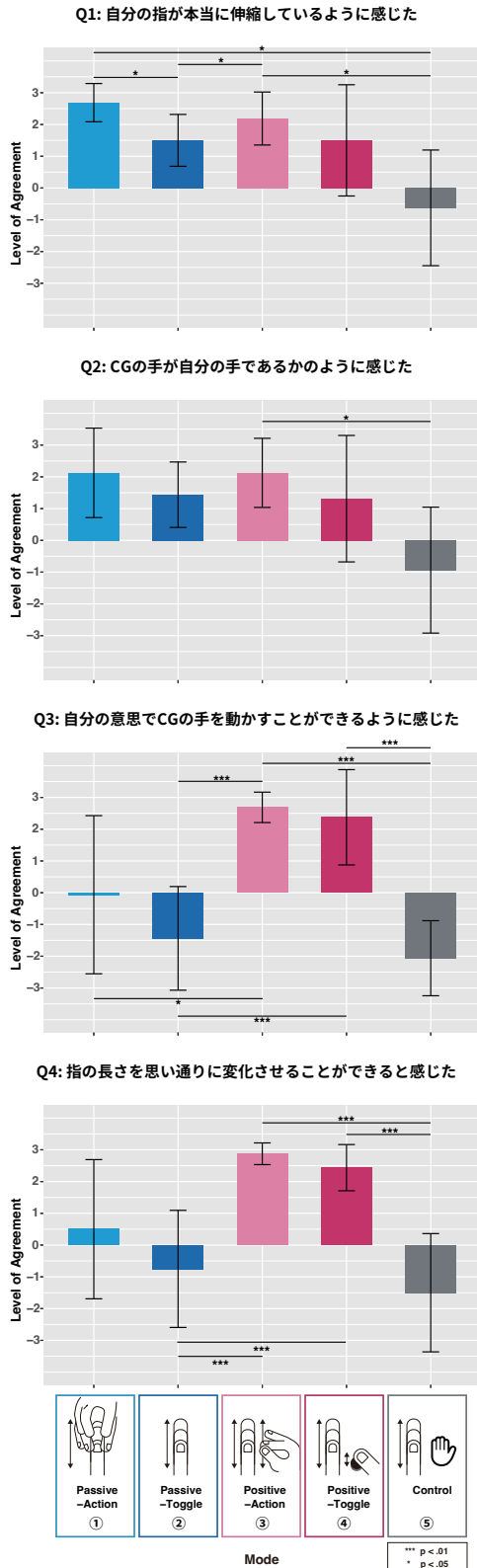


図 4 アンケートの実験参加者平均

指の伸縮感について尋ねた Q1 の設問においては, ① [Passive-Action] が ② [Passive-Toggle], ⑤ [Control] と比較して有意に評定値が高く, ③ [Active-Action] も ② [Passive-Toggle], ⑤ [Control] と比較して有意に評定値が高い傾向が

示された (以下, アンケートに対する多重比較の結果は図 4 のグラフ内に記載)。この結果は, ① [Passive-Action] による指の伸縮感が最も強固であったことを示しているが, ③ [Active-Action] が次いで指の伸縮感が高く感じられていることを示唆している。また, 全体で見ると ⑤ [Control] のみ評定値平均が負の値を取っていることから, 伸縮錯覚が得られなかった可能性がある。

身体所有感について尋ねた Q2 の設問においては, ③ [Active-Action] が ⑤ [Control] と比較して有意に評定値が高い傾向が示された。他の条件間に有意な差異は見られなかったが, グラフの概形からは ⑤ [Control] の評定値平均のみが負の値をとっていることから, 提示される手の姿勢と実際の手の姿勢が異なる ⑤ [Control] のみ, 身体所有感が得られなかったと考えられる。

運動に関する自己主体感について尋ねた Q3 の設問においては, ③ [Active-Action] が ① [Passive-Action], ② [Passive-Toggle], ⑤ [Control] と比較して有意に評定値が有意に高く, ④ [Active-Toggle] が ② [Passive-Toggle], ⑤ [Control] と比較して有意に評定値が高い傾向が示された。③ [Active-Action], ④ [Active-Toggle] は共に実験参加者自らの意思によって伸縮を操作する能動的条件であるため, 他の条件と比較して運動主体感が高く感じられたと考えられる。

形状の変化に関する自己主体感について尋ねた Q4 の設問においては, ③ [Active-Action] 及び ④ [Active-Toggle] が ② [Passive-Toggle], ⑤ [Control] と比較して有意に評定値が高い傾向が示された。③ [Active-Action], ④ [Active-Toggle] は共に実験参加者が能動的に伸縮を操作する条件であるため, Q3 と同様, 他の条件と比較して手の形状変化に対する自己主体感が高く感じられたと考えられる。

4.3 ドリフト量

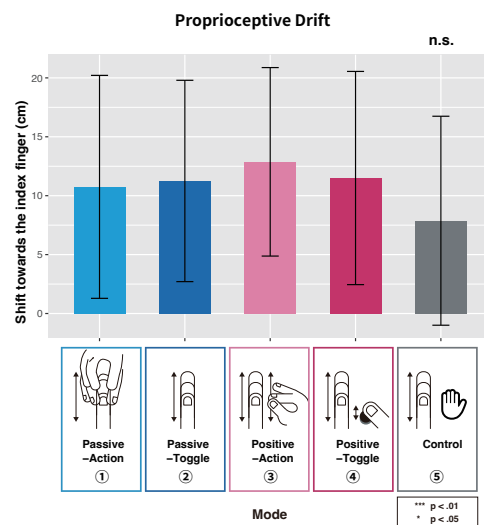


図 5 ドリフト量の実験参加者平均

カラーコードを用いた計測によって計測された実験参加者のドリフト量の平均を<手の提示条件>別に示したグラ

フを図 5 に示す。このドリフト量について<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、主効果は見られなかった ($F(4, 28) = 1.36, p = .271, \eta^2 = .04$)。グラフの概形からも、分散が非常に大きく、⑤[Control]においても視覚刺激によるものか、一定のドリフト量が報告されている。

5. 考察

【Passive-Action 条件】との錯覚強度の比較においては、従来から用いられてきた視覚-触覚の同期を行う①[Passive-Action]による伸縮錯覚が最も強固であることが示された。しかしながら、体験者自身の能動的な運動意思及び伸縮を予期させる身体所作であるつまみ動作を取り入れた③[Active-Action]が、指の伸縮が受動的に提示される②[Passive-Toggle]よりも強い錯覚強度を示していた。このことは、受動的に伸縮を提示されるよりも、能動的かつ伸縮を予期させる操作を併用することで、ある程度強固な伸縮錯覚を誘起できることを示唆している。類似した事例として、直接的に指の像を提示しなくとも、伸縮を予期させる引っ張る手の動きのみを視覚的に明示することで指の伸縮錯覚を誘起できたとの報告がある[7]。この報告は視覚-触覚の同期を用いた受動的な伸縮錯覚であるものの、伸縮を予期させる行為を提示することが、本実験結果同様、錯覚強度にポジティブな影響を与えることを示唆している。

能動的な操作を取り入れた③[Active-Action]④[Active-Toggle]においては、Q3, Q4 の自己主体感についての評定値が他の条件よりも高くなっていった。このことは実験参加者の主観としても、これらの条件が「自身で CG の手を操作している感覚」が高いことを示している。④[Active-Toggle]の条件は能動的ながらも伸縮を予期させる行為を視覚的に提示しない条件である。【Passive-Action 条件】との錯覚強度の比較においては ④[Active-Toggle]は①[Passive-Action]以外との有意な差異は見られなかったものの、主観的な指の伸縮感を示す Q1 のアンケートにおいては①[Passive-Action]④[Active-Toggle]との間には有意な差異は見られなかった。対して、受動的条件である②[Passive-Toggle]は①[Passive-Action]よりも有意に低いことが示唆されている。実験参加者数が少ないために差異が明確にならなかった可能性があるものの、視覚的には同一条件であっても、能動的に伸縮操作を行う④[Active-Toggle]の方が、受動的な伸縮を提示される②[Passive-Toggle]よりも、高い伸縮感を得ることができていた可能性がある。

一方で、身体所有感について尋ねた Q2 については分散が大きく、<手の提示条件>による有意な差異は③[Active-Action]と⑤[Control]の間のみであった。⑤[Control]については仮想空間内で提示されている手の姿勢と、実際の手の姿勢が異なるため、身体所有感は大きく下がる

られる条件である。一方で他の条件間における有意な差異がなかったことは、ハンドトラッキングによる視覚-運動感覚の同期により、一定の身体所有感がいずれの条件であったとしても誘起されていたことが示唆される。

ドリフト量に関しては今回いずれの条件間にも有意な差異が見られなかった。身体所有感と身体の空間的位置知覚である身体定位は異なる処理過程を経ており[8]、身体所有感が無くともドリフトが発生するという報告[9]がなされている。今回の実験においても、直前の視覚刺激に引き寄せられ、伸長感の有無に関わらず、ドリフトが生じてしまった可能性がある。

本実験により、体験者自身の能動的な伸縮意思及び伸縮を予期させる身体所作による伸縮錯覚の誘起が、従来用いられている視覚-触覚の同期による伸縮錯覚には及ばないものの、伸縮錯覚を強固にすることが示唆された。能動的な運動意思は、運動能力の向上に役立つとも言われていることから[10]、リハビリテーションの文脈においても能動性を取り入れることは、ポジティブな効果を生み出す可能性がある。今後は実験参加者数を増やし、より明確に<手の提示条件>間の差異について調査を行うと共に、他の身体部位などにもこの手法を適用し、伸縮錯覚の強度と、実際に疼痛軽減の効果がみられるのかを明らかにする。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 22K17940 の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Preston, C., & Newport, R. (2011) "Analgesic effects of multisensory illusions in osteoarthritis." *Rheumatology*, Vol.50, pp.2314–2315.
- [2] Stanton, T. R., et al., (2018) "Illusory resizing of the painful knee is analgesic in symptomatic knee osteoarthritis." *PeerJ*, 2018(7), e5206
- [3] Lewis, J. S., et al., (2021) "Visual illusions modulate body perception disturbance and pain in Complex Regional Pain Syndrome: A randomized trial." *European Journal of Pain*, 25(7), pp.1551–1563.
- [4] Metral, M., et al., (2013). "Trying to Move Your Unseen Static Arm Modulates Visually-Evoked Kinesthetic Illusion." *PLoS ONE*, 8(11), e80360.
- [5] "Weird Chillout". <https://weirdchillout.studio.site/>, 2020 年発表 (参照 2023-12-21).
- [6] 石原由貴, (2023) "仮想空間における所作を利用した身体伸縮錯覚の誘発", 認知科学会第 40 回大会発表論文集, pp.138-141.
- [7] Byrne, A., & Preston, C. (2019). "Mr Fantastic Meets The Invisible Man: An Illusion of Invisible Finger Stretching." *Perception*, 0(0), 030100661882106.
- [8] Matsumiya, K. (2019). "Separate multisensory integration processes for ownership and localization of body parts." *Scientific Reports*, 9(1), pp.1–9.
- [9] Rohde, M., et al., (2011). "The Rubber Hand Illusion: feeling of ownership and proprioceptive drift do not go hand in hand." *PloS One*, 6(6), e21659.
- [10] K. Matsumiya, (2021). "Awareness of voluntary action, rather than body ownership, improves motor control." *Scientific reports*, 11(1), 418.