

仮想空間における所作を利用した身体伸縮錯覚の誘発 Using gestures in a virtual space to evoke the feeling of stretching the body.

石原 由貴[†]

Yuki Ishihara

[†]金沢工業大学

Kanazawa Institute of Technology

y.ishihara@neptune.kanazawa-it.ac.jp

概要

体験者自身の能動的な運動意思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、身体部位に対する受動的・能動的伸縮の提示条件を比較した。結果、主観評価においては伸縮が能動的/受動的に行われるかどうか、また伸縮を予期させる身体所作による入力であるかに関わらず、指の伸縮イメージを視覚的に提示することで、一定程度の伸縮錯覚の誘起が為されることが示唆された。

キーワード: 身体イメージ, VR, 身体変形感, 身体所有感, 運動主体感

1. 背景

バーチャル環境を利用し、CGの身体に対して身体所有感(これは自身の身体の一部であるという感覚)を誘起することによる、リハビリテーションへの活用が着目されている[1]。これらの例では実際の身体とディスプレイ上にて提示するCGの身体の間に、視覚-触覚の同期や視覚-運動感覚の同期を創り出すことで、CGの身体に身体所有感を与えている。そうした研究の一つに、患部に伸縮錯覚を誘発することによりCRPSなどの慢性疼痛を軽減する例がある[2-4]。これらはディスプレイ上に患部(手・指・膝)が伸び縮みする様子を提示すると同時に、補助者がその部位を優しく押す/引っぱることで、対象となる身体部位があたかも伸縮したかのような感覚を誘発している[2,3]。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は可能とされるものの[4]、その疼痛緩和の程度は視覚-触覚の同期を用いたものよりも劣ることが示されている[3]。

しかしながら、触覚を用いる場合には患部に触れ、圧を加える補助者が必要となる。伸縮錯覚による疼痛緩和の効果は繰り返し継続することで高まることが報告されていることから[3,4]、利用者が手軽にリハビリテーションを実施できる環境を検討することは重要である。よって簡易で強固な伸縮錯覚を誘起するためには、触覚に代わる、視覚と同期可能な他の刺激提示の検討が必要となる。

そこで本研究では、一般家庭向けに販売されている

HMDを用いた簡易で強固な伸縮錯覚の誘発環境について、検討を行う。HMDには装着者の頭及び手のモーショントラッキング機能が搭載される場合が多く、視覚と連動した動作を用いた感覚間同期を作成できる。

また、鏡を用いた仮想的な腕の運動感覚の誘起実験においては、能動的な運動意思が視覚的な運動の提示による運動錯覚を強化することが報告されている[5]。よって、実験参加者が能動的に身体伸縮錯覚を行うことで、強固な伸縮錯覚を誘起できる可能性がある。

しかし伸縮錯覚においては、体験者自身の能動的な運動意思が伸縮錯覚の強度にどのような影響を及ぼすのかは明らかとなっていない。そこで、本実験では身体部位に対する受動的・能動的伸縮の提示について比較し、体験者自身の能動的な運動意思が伸縮錯覚にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。

2. 方法

2.1 手の提示条件

今回提示する条件として、受動的・能動的伸縮の提示に加え、伸縮を予期させる身体所作による入力についても比較を行う。これは、隠された実際の指を引っ張ると同時に、指を引っ張る動作を提示した実験[6]において、隠された手の指が伸びているかのような感覚を得られたことが報告されていることから、指の伸縮を暗示する行為が伸縮錯覚を誘起する可能性があるためである。

本実験では家庭用のHMD(Meta Quest 2)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。手のモデルの提示には標準機能として用意されているハンドトラッキング機能を用い、実験参加者の手の動きと位置をトラッキングしている。

実験参加者はHMDを装着した状態で机の上に左手を置き、人差し指を少し浮かせた状態を保持したまま、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（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（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指を引っ張る仕草に同期した人差し指の伸縮イメージ（視覚-伸縮運動の視覚的イメージ:能動的に伸縮）
- ④ [Active-Toggle] 体験者自身によるコントローラのボタン操作に同期した人差し指の伸縮イメージ（視覚のみ:能動的に伸縮）
- ⑤ [Control] 目を閉じたまま実験を受ける条件

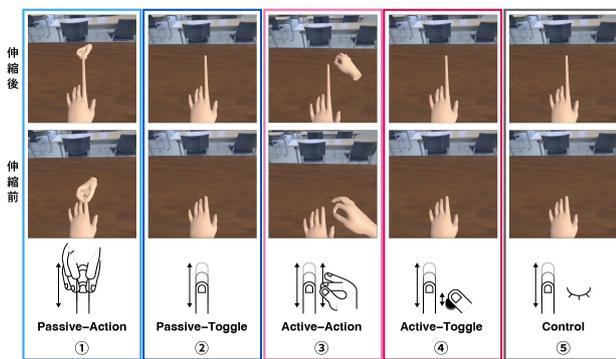


図1 各<手の提示条件>における指の伸縮

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1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を付加した長さとした。また、人差し指が伸びるスピードは、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、他の条件において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。

2.2 評価手法

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コントロールを合わせて構成された8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)で回答を口頭で求めた。

さらに、客観的指標として、伸縮刺激を提示した人差し指がどの程度伸びたと感じたかについて計測を行った(ドリフト量の計測)。ドリフト量の計測時には、仮想空間上から手のモデルを非表示にした上で、手前か

ら奥にかけて2cm幅のカラーコードを提示し、左手の人差し指の腹があると感じる位置の色を回答してもらった。

表1 アンケートの設問

分類	設問
指の伸縮感	Q1: 自分の指が普段よりも長くなったかのように感じた Q2: 自分の指が本当に伸縮しているかのように感じた
身体所有感	Q3: CGの手が自分の手であるかのように感じた
自己主体感	Q4: 指の長さを誰かに操作されているかのように感じた Q5: 自分の意思でCGの手を動かすことができるかのように感じた Q6: 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
Control	Q7: もう一本左手の人差し指があるかのように感じた Q8: 指を直接引っ張られているかのように感じた

2.3 実験参加者

本実験では金沢工業大学の学生37名(男性31名、女性6名;平均年齢21.1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。

2.4 実験手続き

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を装着する。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のテーブルと、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。CGのテーブルの上面中央には指を配置するためのガイドが描かれ、実験参加者はこのガイドに合わせて左手の人差し指を配置する(手のひらを下にした状態)。

手の配置が完了した後、テーブル上にカラーコードを示した上で左手の人差し指を最大値まで伸ばした様子を提示し、実験参加者から見て人差し指の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、所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)を交互に繰り返す。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「Pull」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た。その後、自動的に手のCGモデルが消え、テーブル上にはカラーコードが表示される。この状態が提

示された後、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色を口頭で回答した。この回答後、アンケートの設問を実験者がランダムに読み上げる。実験参加者は両手をリラックスさせた状態で、このアンケート8問に口頭で回答した。

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試行として、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。連続して同じ条件は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、次の試行に移った。

3. 結果

今回は指を浮かせた角度によるノイズでドリフト量を正しく計測することができなかったことから、アンケートによる主観的評価のみ報告する。

図2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<手の提示条件>毎の平均を元に、各アンケートに対する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: $F(4, 144) = 38.97, p < .001, \eta^2 = .29$; Q2: $F(4, 144) = 40.82, p < .001, \eta^2 = .34$; Q3: $F(4, 144) = 43.32, p < .001, \eta^2 = .36$; Q4: $F(4, 144) = 55.22, p < .001, \eta^2 = .49$; Q5: $F(4, 144) = 82.04, p < .001, \eta^2 = .56$; Q6: $F(4, 144) = 46.82, p < .001, \eta^2 = .40$; Q7: $F(4, 144) = 3.93, p < .001, \eta^2 = .02$; Q8: $F(4, 144) = 67.73, p < .001, \eta^2 = .46$)。以下、一定以上の効果量があった

結果(Q7以外)についてより詳細な分析を行った結果を報告する。

アンケート設問毎に、Holm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Q1, Q2の設問において、①[Passive-Action]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2のグラフ内に記載)。これは主観レベルでは視触覚が同期する①[Passive-Action]による伸縮感の誘起が最も強力であることを示すものである。他の条件においても確認すると、目を閉じて実験を受ける⑤[Control]のみが他の条件と比較して有意に評定値が低かった。②[Passive-Toggle], ③[Active-Action], ④[Active-Toggle]の評定値平均はいずれも正の値となっていることから、これらの条件においても①[Passive-Action]には劣るものの、一定程度の伸縮錯覚の誘起が確認された。ただし、②-④の条件間には評定値の有意な差異が見られなかったことから、身体部位に対する受動的・能動的伸縮の提示及び伸縮を予期させる身体所作による入力であるかどうかについては、主観的な伸縮感に影響を及ぼさないことが示唆されている。

また身体所有感について問うQ3においても、⑤[Control]と比較すると、いずれの条件も有意に評定値が高かった。また、①[Passive-Action]と比較すると②[Passive-Toggle], ④[Active-Toggle]の評定値は有意に低かった。①は視触覚の一致により、他の条件よりもCGの手に対する身体所有感が高まることが予想された。しかし、同じく触覚を用いない③[Active-Action]において①[Passive-Action]との有意な差異が見られなかったことは、ボタン入力ではなく、右手による伸縮所作に

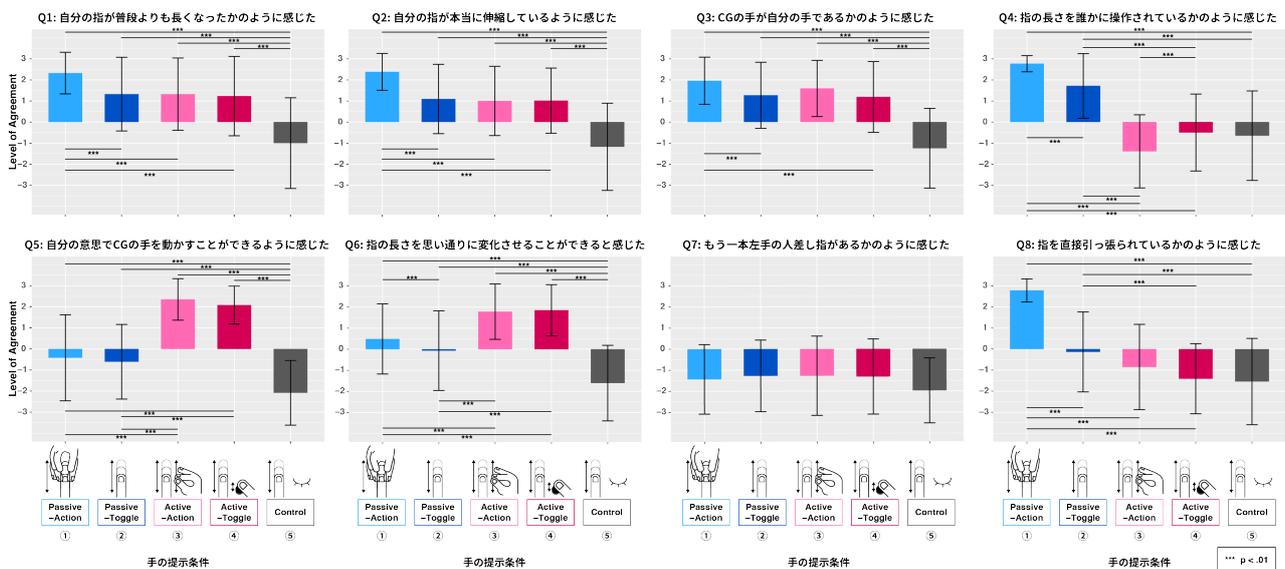


図2 各アンケート項目における被験者平均

よる視覚-運動感覚間の同期が、CGの手に対する身体所有感を保持した可能性を示している。ただし平均値に大きな差異は見られないことから、⑤[Control]以外の条件では、ほぼ同等の身体所有感が誘起されていたことが考えられる。

自己主体感に関わる Q4, Q5, Q6 のアンケートについて確認すると、Q4 においては①[Passive-Action]がいずれの条件よりも評定値が有意に高く、次点で②[Passive-Toggle]の評定値が他の条件よりも有意に高かった。実験者に指の長さを操作される受動的な体験においても、視触覚の同期した条件が、より強く受動性を印象づける体験をもたらすことが示唆されている。また、実験参加者が能動的に指の長さを操作する③[Active-Action]、④[Active-Toggle]を比較すると、③[Active-Action]の方が有意に評定値は低く、伸縮を想起させる所作による入力がボタンによる入力よりも運動主体感を強化していることが示唆された。しかしながら Q5, Q6 の設問においては、③[Active-Action]、④[Active-Toggle]の間に有意な差異は見られなかった。

4. 考察

本実験環境においては伸縮が能動的/受動的に行われるかに関わらず、指の視覚的伸縮イメージによって一定程度の伸縮錯覚の誘起が見込まれることが示唆された。伸縮感についてのアンケート (Q1, Q2) からは、①[Passive-Action]の条件に見られるような視触覚の同期により誘起される伸縮感の誘起が最も強固であることが示されている。実験参加者が能動的な意思を持って指を伸ばす操作を行っているかどうかに関わらず、伸縮錯覚の強化にはやはり視触覚の同期が必要であることが示唆された。

また、実験参加者が能動的に指の伸縮を行う条件において、ボタンにより指の長さを操作する条件と、伸縮を想起させる所作により指の長さを操作する条件との間に、有意な評定値の差異は見られなかった。よって、今回の結果は主観レベルにおいては能動的な伸縮の誘起、及び伸縮を想起させる所作による入力は、伸縮錯覚を強化しないことが示唆された。目を閉じていた⑤[Control]以外の条件は、いずれも CG の左手に対する一定の身体所有感の誘起が確認された。今回用意した実験環境においてはハンドトラッキング機能により、常に視覚-運動感覚間の同期が行われている状態であった。よって、視覚-触覚の同期を含む①[Passive-

Action]以外の条件は、視覚-運動感覚間の同期を超える伸縮錯覚への寄与が行われなかったために、伸縮感の差異が確認できなかった可能性がある。

また、自己主体感に関わる設問 (Q4-6) においては、③[Active-Action]及び④[Active-Toggle]が他の条件と比較して有意に自己主体感が高いことを示す結果であったものの、伸縮錯覚への寄与は見られない。視覚-運動感覚間の同期における身体所有感と運動主体感について観察した先行研究[7]においては、運動主体感が無くとも身体所有感は誘起可能であることが示唆されている。よって伸縮錯覚においても、能動的であるか否かは伸縮錯覚の強度には影響を及ぼさない可能性がある。ただし、運動主体感を誘起することによる、運動能力の向上がもたらされるとされていることから[9]、リハビリテーションの文脈においては、運動主体感をもたらす環境について検討を続けることは有益と考える。よって、ドリフト量による客観的指標による計測と、高い自己主体感をもたらされた条件による疼痛抑制効果についての計測を、追実験として行う必要がある。

文献

- [1] Matamala-Gomez, M., et al., (2019) "Immersive Virtual Reality and Virtual Embodiment for Pain Relief." *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 279.
- [2] Preston, C., & Newport, R. (2011) "Analgesic effects of multisensory illusions in osteoarthritis." *Rheumatology*, Vol.50, pp.2314-2315.
- [3] Stanton, T. R., et al., (2018) "Illusory resizing of the painful knee is analgesic in symptomatic knee osteoarthritis." *PeerJ*, 2018(7), e5206
- [4] 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.
- [5] Metral, M., et al., (2013). "Trying to Move Your Unseen Static Arm Modulates Visually-Evoked Kinesthetic Illusion." *PLoS ONE*, 8(11), e80360.
- [6] Byrne, A., & Preston, C. (2019). Mr Fantastic Meets The Invisible Man: An Illusion of Invisible Finger Stretching. *Perception*, 0(0), 030100661882106.
- [7] 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, pp.117-132.
- [8] K. Matsumiya, (2021). "Awareness of voluntary action, rather than body ownership, improves motor control." *Scientific reports*, 11 (1), 418.

謝辞

本研究はJSPS 科研費 22K17940 の助成を受けたものです。また、本実験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。