

# 脚伸縮感覚の誘導要因における主体感と筋運動の分離 Induction Factor Separation between Kinesthesia and Agency in Elastic Legs Illusion

岡田 莞助<sup>†</sup>, 小鷹 研理<sup>‡</sup>  
Kansuke Okada, Kenri Kodaka

<sup>†</sup>名古屋市立大学芸術工学研究科  
Graduate School of Design and Architecture, Nagoya-City University  
kenrikodaka@gmail.com

## 概要

我々は、これまでに、足をつっぱる方向の筋運動に対して、仮想空間上の脚のイメージが伸張する場合も、収縮する場合も等しく伸縮感覚が誘導されるという知見を得ている。本稿において、筋負荷と主体感を分離することを目的に、脚入力に加え指入力による脚の伸縮感覚への効果を検証した。結果、順逆等価の効果が指入力では成立しないことがわかった。これは、脚の伸縮錯覚に筋負荷が積極的に関与していることを示唆するものである。

**Keywords:** body transform illusion, full-body illusion, elastic leg illusion;

## 1. はじめに

物理空間と仮想空間の両者にまたがって複数感覚に同期刺激を与えることで、仮想空間内の、変形した身体やアバターに体験者の身体所有感を投射できることが知られている[1][2]。このサイズ感の変調は、身体サイズに紐づけられた種々の自己イメージ(例えば、身体満足度の変調[3])にまで作用し、さらに、主観的な痛みを増減させることが報告されている[4][5]。さらに、痛みの増減において重要なのは視覚-触覚間の作用が時間的に同期することであり、視覚刺激(伸張-収縮)と触覚刺激(引張る-押し込む)の方向性の一致は重要でないことが示唆されている[6]。こうした報告は、身体像を伸縮させることが、身体マップの再組織化を促進する可能性を示唆するものである。したがって、身体像伸縮の機序を様々な身体部位で明らかにしていくことは、神経可塑性の見地からも非常に有用な題材を提供するものと期待される。

我々は、以上の見地から、HMDを用いて腕や脚の伸縮する感覚を誘発する研究を継続的に行ってきた[7]。2019年に発表した「Elastic Legs Illusion (以下、ELI)」[8]では、特に脚が伸縮するような錯覚を誘発させることを試みている。図1に示すように、体験者は長座体前屈の姿勢をとり、両脚の裏にあてがったスタンドを、ゴムチューブを介して手で引っ張ることで、腕と脚にそ

れぞれ互いが相反する方向の力を発生させる。ゴムを引く力の大きさは、脚とスタンドの間にかませた体重計によって計測されており、この力が大きくなるほど、仮想空間にCGで表現された自分の脚が伸びていく(Kinesthesia-vision correlation)。ELIは、研究室の展示において、44人中33人の体験者が、脚が伸縮する感覚を、「強い」または「大変強い」のレベルで報告しており[9]、これまでに我々が発表した他の伸縮錯覚と比しても[10][11]、遜色のない水準で伸縮の感覚を誘導するものである。興味深いことに、「Elastic Legs Illusion」では、現実の脚に加えられる力の方向が、脚の収縮する方向であるのに対して、映像上では、「脚が伸長する」映像が呈示されている(kinesthesia-vision incongruent)。ELIにおいて、身体に対し外的な圧力が発生するとき、筋肉の内的な補償作用が逆方向に働く(伸張反射)という生理学的知見を踏まえると、ELIにおいて、外力(収縮)と内的な補償作用(伸張)のいずれもが、伸縮する脚のイメージと同調するという仮説が成立する。以上を踏まえて、本研究では、「筋運動は順逆両位相の伸縮イメージと適合する」という仮説を被験者実験にて検証することを目的としている。昨年、我々が行った実験では[17]、ELIの機構を体験する被験者に対し、物理的に脚がつっぱっていくのと同時に、脚が伸びる映像または縮む映像のいずれかを呈示し、脚の伸縮感覚の強

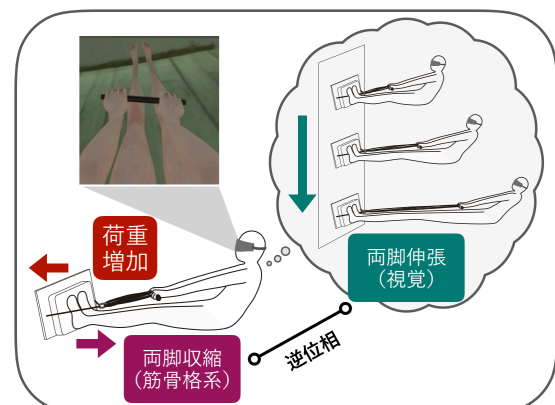


図1 Elastic Legs Illusionの機構

度について質問するものであった。この実験では、いずれの映像でも変わらない強度の伸縮感覚が得られた一方、行為主体感による影響については十分に考慮されていなかった。具体的には、「ゴムを引っ張る」および「脚を押し込む」という行為の意思そのものが、一定の水準で脚の伸縮を操作する感覚を促しているため、純粋な脚への筋肉負荷の増減のみによって伸縮感覚が誘発されているとは言えなかった可能性がある。以上を踏まえて、本研究では、主体感の影響を加味した実験系を構築し、脚に作用する筋運動の要因の有無を、主体感と分離して検証することが主たる目的である。

## 2. 実験

### 2.1 被験者

実験には、12人の被験者（男性10人、女性2人）が参加した。被験者は全員大学3年生であり、学部3年向けに開講している授業の教材として実験に参加した。

### 2.2 実験系・実験要因の設計

被験者は6種類の入力方式（「順脚負荷」「逆脚負荷」「順指負荷」「逆指負荷」「ボタン操作」「受動呈示」）によって、HMDを通して一人称視点で表示される右脚の伸縮の操作を行う。全ての入力方式を通じて、被験者は、立位の姿勢で右脚を体重計に乗せ、左手は用意された台の上に置いた状態で課題を行う。「順脚負荷」「逆脚負荷」は、被験者が右脚に体重をかけることによって、仮想空間上の右脚が伸縮する一方で「順指負荷」「逆指負荷」は、左手の台の上に設置された圧力センサの表面を人差し指で押し込むことによって伸縮が行われる。このうち、「順脚負荷」「順指負荷」（以下、順負荷）は、体重計に負荷をかけていない状態では右脚は基準の長さ（1倍）であり、体重・圧力が増加することで最大2倍まで伸張する。これとは逆に、「逆脚負荷」「逆指負荷」（以下、逆負荷）は、体重計に負荷をかけていない状態で、右脚は既に2倍に伸縮した状態にあり、体重・圧力が増加することで、もとの基準長にまで収縮する。「ボタン操作」は、左手にコントローラを握り、ボタンを押している間のみ、圧力とは無関係に脚が定速で最大2倍まで伸張し、ボタンを離すと元の基準長にまでやはり定速で収縮する方式である。最後に「受動呈示」は、被験者は何の操作もせず自動で伸縮する脚を傍観する方式である。

「ボタン操作」「受動呈示」は、他の筋運動あり4つの方式（以下、筋運動群）にとっての対照群である。「ボタン操作」には主体感が伴う一方で、「受動呈示」では主体感の影響が排除されている。したがって、「ボタン」と「受動呈示」の方式を比較することによって主体感による効果を、直接分析することができる。加えて、筋運動群と対照群との比較によって本研究の主題である、筋運動と主体感それぞれの効果を分離して検証することが可能となる。

筋運動群の4つの条件は、＜脚負荷 - 指負荷＞（脚指要因）と＜順負荷 - 逆負荷＞（順逆要因）による2要因の混合デザインとなっている。順逆要因において、負荷をかけることによって脚が伸びる順負荷は、Agency Congruentの方式であるといえる。一方で、既に述べているように、順負荷は、筋運動としては収縮に相当するため、脚の伸張の方向とは矛盾する。この観点では Kinesthesia-vision Incongruent である。逆に、逆負荷においては、Agency Incongruent であるが、運動感覚と視覚の関係では Kinesthesia-vision congruent であるといえる。以上を踏まえ、筋運動群について二要因分散分析を行い各要因の効果を検証することによって、筋運動と主体感の効果を分離して分析することが可能となる。

### 2.3 手順

実験は、1人の被験者に対して、既に説明した6通りの条件からなる試行を、それぞれ2回、合計12回の課題を行う。各条件の順序については、最初の6回についてはランダムに配列し、2回目のセットでは、最初の順序を維持して行った。「受動呈示」を除く5つの方式の課題では、被験者はHMDを装着した状態で40秒間、自由に伸縮の操作を行ってもらい（典型的には、1.5秒間かけて荷重を右脚もしくは指にかけ変形しきった長さまで伸ばしたあと、もう1.5秒かけてもとの長さに戻していく）。「受動」では、同じく1.5秒かけて伸びたあと1.5秒かけて縮んでいく。各試行の後で、「自分が映像の脚の伸縮を操作している感じ」（Agency）、「自分の脚が伸縮する感じ」（Ownership）、そして「酔い」（VR Sickness）の強さを11段階（0-10）で評価させた。

### 2.4 結果

図Nに各質問項目に関する実験結果を示す（N=12）。まず Agency の結果について記す。6つの水準（入力

方式) に対して、一要因分散分析を行ったところ主効果が得られたため ( $F(5)=21.7, p<0.001$ ) , Ryan 型による多重比較 (有意水準 10%, 以下同) を行ったところ, 「受動呈示」に対して、全ての方式が有意に高い主体感を持つことがわかった (全て  $p<0.001$ ) . さらに、詳しい傾向を得るため、繰り返しによる検定過誤の可能性に留保しつつ、各条件間で対応ありの t 検定 (両側検定) を行ったところ, 「順脚負荷」の方式において, 「逆脚負荷」「ボタン操作」に対して有意に高い水準の主体感が確認された ( $p<0.01, p<0.02$ ) . 最後に、筋運動群に対して二要因分散分析を行ったところ、順逆要因にのみ主効果を得た ( $F(1,11)=12.5, p<0.005$ ) .

次に、Ownership の結果について記す。全ての入力方式に対して一要因分散分析を行ったところ、主効果に有意傾向がみられたため ( $F(5)=2.27, p=0.06$ ) , Ryan 型による多重比較を行ったところ, 「順脚負荷」が「逆指負荷」に対して有意に高い伸縮感覚を得るとの結果を得た ( $p<0.006$ ) . 各条件間の対応あり t 検定では「逆指負荷」と比較して「順脚負荷」「順指負荷」で有意に高い伸縮感覚を得た ( $p<0.02, p<0.02$ ) . また、筋運動群に対する二要因分散分析によって、2 つの要因の主効果について、それぞれ有意傾向が見られた ( $F(1,11)=3.39, p=0.093$  for 脚指要因;  $F(1,11)=3.88, p=0.075$  for 順逆要因) .

最後に、VR-Sickness に関する結果を述べる。全ての

入力方式に対して一要因分散分析を行ったところ、主効果に有意差がみられたため ( $F(5)=2.26, p<0.03$ ) , Ryan 型による多重比較を行ったところ, 「受動呈示」において, 「順脚負荷」「順指負荷」「ボタン操作」と比較して有意に高いレベルの酔いが報告された ( $p<0.002, p<0.01, p<0.02$ ) . さらに、各条件間の対応あり t 検定では上記の条件対に加えて, 「順指負荷」「逆指負荷」間でも有意差を得た ( $p<0.02$ ) . また、筋運動群の 2 要因分散分析 (脚指要因・順逆要因) において、2 つの要因の主効果は検出されなかった。

3. 考察

まず Agency と VR-Sickness の主観評価に関する結果を要約する。容易に予想されたように, 「受動呈示」は、他のどの方式と比しても Agency の主観評価が有意に低く報告されている。さらに、筋運動型に注目した分析によって、順逆要因に主効果が得られた。すなわち、筋肉に負荷をかけて視覚上の脚を伸張させる方式は、負荷を緩めることによって脚を伸張させる方式に対して強い主体感を与える傾向にある。加えて、相対的に主体感の低い傾向にあった「受動呈示」と「逆指負荷」は、VR 酔いの主観評価においても高く報告される傾向にある。詳細な分析は控えるが、ここで主体感と酔いに負の相関が存在するのは明らかである。すなわち、

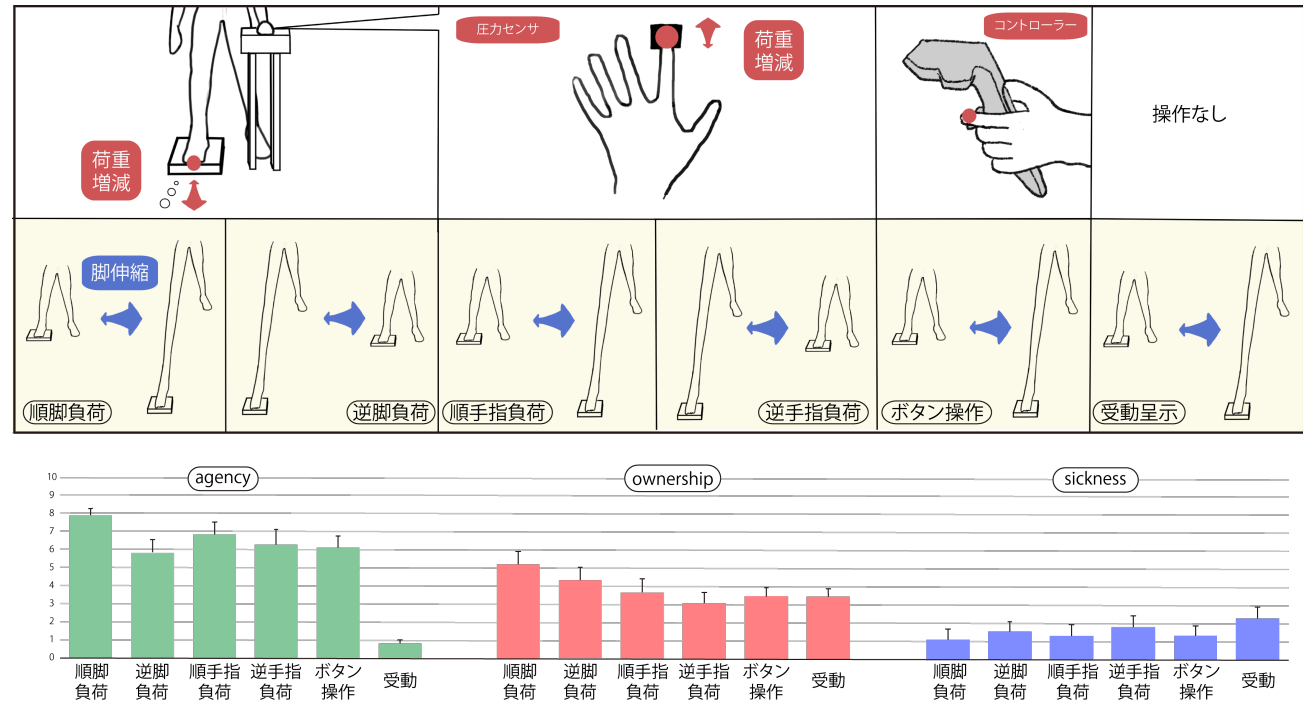


図4 実験2のイメージと結果

運動に伴う視覚予期が、実際の HMD 内の視覚運動と整合的である（押して伸びる、離して縮む）ことは、そのまま高い主体感を保証するが、この関係が不整合であったり、あるいはそもそも運動入力が存在しない場合、主体感は損なわれ、酔いの生じやすい状況となる。

以上の要約のうえで、Ownership の結果について検討したい。まず何よりも注目すべきは、Ownership の主観評価において、いずれの筋運動群の入力方式も、「ボタン操作」または「受動呈示」と比して、有意な効果を示さなかった点である。これは、主体感から分離された筋運動が、伸縮感覚の向上に対して何ら寄与していないことを示唆するものである。そもそも、筋運動型ではない無い「ボタン操作」と「受動呈示」との条件間でも全く主観評価に差はみられない ( $p=1.0, n.s.$ )。この点だけとりだすと、伸縮感覚の誘発において、「筋運動」のみならず「主体感」までもが全く有効な作用を持っていないように考えられる。

他方で、筋運動群の条件間の分析では、Agency Incongruent である「逆負荷」よりも、Agency Congruent である「順負荷」の入力でより高い伸縮感覚の主観評価が報告される傾向にある。この中で特に興味深い点として、対応あり t 検定によれば、「順指負荷」と「逆指負荷」間では有意な差が得られている一方で ( $p<0.012$ )、「順脚負荷」と「逆脚負荷」との間では有意な差が検出されていない ( $p=0.26, n.s.$ )。後者は、前回の ELI 環境における我々の実験結果[17]を再現するものである。つまり、指入力では、入力方向の逆転に伴う Agency の減退に連動して Ownership が減退するのに対して、脚入力では、Agency の減退にも関わらず、なお Ownership が一定の水準で踏みとどまっていると整理することができる。先に説明したように、「逆脚負荷」では、kinesthesia-vision correlation の水準で整合的である（つまり筋運動の収縮に対して脚の像も収縮する）。この種の congruent な相関は、Body ownership Illusion における複数感覚同期の原理においてポジティブな因子として働いているものと予想される。つまり、少なくとも筋運動群内の順逆要因の分析によって、脚にのみ生じている「筋運動」の効果を指摘することができる。

次に、本研究の中心的な論点である「順脚負荷」における反転投射の有無について検討する。まず、Agency, Ownership, VR-Sickness のいずれの主観評価の項目についても、「順指負荷」と「順脚負荷」との有意差は確認されていないことに注目したい。これらの結果は、脚のイメージに直接的に向けられる反転投射の作用に否定

的である。他方、順負荷の Agency が対逆負荷で有意に増大する作用は、脚入力にのみ見られる。また、「ボタン操作」に対して有意な Agency の増大を示す入力方式も「順脚負荷」のみである。以上の部分的な結果を踏まえると、「順脚負荷」には、主体感をベースとする他の方式と比しても、Agency をことさら増大する因子が含まれていると考えることが自然である。ここでは、反転投射の効果が、この種の因子に関与しているという可能性を指摘したい。この仮説に従うと、反転投射の効果は Ownership（伸びている感じ）よりも、むしろ Agency（伸ばしている感じ）の水準で現れることになる。反転投射の作用がおそらくは主観的な水準に基礎を持つであろうことを念頭におくと、この非対称性には一定の根拠が認められるだろう。この種の反転投射の Agency への効果については、今後の重要な論点としたい。

最後に、Ownership の主観評価において、全 6 水準を対象とした分析では、筋運動および主体感の効果が全く得られなかった点について再び検討したい。t 検定のレベルでは、「順脚負荷」のみ、「ボタン操作」「受動呈示」に対して有意傾向を示しており ( $p=0.08, p=0.07$ )、実際には、被験者数や検定の手法を調整することで、異なる結果が得られる可能性は十分に考えられる。一方、そうした事情を差し置いても、Agency や VR-Sickness と比して、主体感や筋運動が Ownership に与える効果がそれほど明確ではないという点は注目に値する。身体所有感の錯覚では、「主体感」が積極的な効果を持たないことはこれまでもたびたび報告されている[18]。加えて、「受動呈示」のような状況での身体所有感の向上は、ラバーハンド錯覚でも報告されており[19]、実際のところ、本実験結果は、身体所有感に関する理論と大きく矛盾するものではない。この種の、視覚優位の所有感変調に対する感度は個人の共感性に関わる尺度の強弱が関係していることが報告されており[20][21][22]、本実験においても同様に個人差の影響が強く関わっていると考えるのが自然である。とりわけ、本実験系の場合、それほど共感尺度の高くない被験者であっても、先行する筋運動型の課題において脚が伸縮する筋運動イメージを体験することによって、「受動呈示」や「ボタン操作」の課題において Ownership を内的に立ち上げやすい状況がつくられている可能性がある。こうした効果が無作為化したり、順序の効果の有意性を検証したりするには、今回の実験の被験者数は不十分である。今後の課題としたい。

## 文献

- [1] van der Hoort, B., Guterstam, A., Ehrsson, H. H. (2011). Being Barbie: the size of one's own body determines the perceived size of the world. *PloS One*, 6(5), e20195.
- [2] Normand, J. M., Giannopoulos, E., Spanlang, B., Slater, M. (2011). Multisensory stimulation can induce an illusion of larger belly size in immersive virtual reality. *PLoS ONE*, 6(1).
- [3] Preston, C., Ehrsson, H. H. (2014). Illusory changes in body size modulate body satisfaction in a way that is related to non-clinical eating disorder psychopathology. *PloS One*, 9(1)
- [4] Moseley, G. L., Parsons, T. J., Spence, C. (2008). Visual distortion of a limb modulates the pain and swelling evoked by movement. *Current Biology : CB*, 18(22), R1047-8.
- [5] Ramachandran, V. S., Brang, D., McGeoch, P. D. (2009). Size reduction using Mirror Visual Feedback (MVF) reduces phantom pain. *Neurocase*, 15(5), 357-60.
- [6] Stanton, T. R., Gilpin, H. R., Edwards, L., Moseley, G. L., & Newport, R. (2018). Illusory resizing of the painful knee is analgesic in symptomatic knee osteoarthritis. *PeerJ*, 2018(7)
- [7] 小鷹研理：「筋運動誘導型 Elastic Limb(s) Illusion に関する研究の展望」，日本人工知能学会第 33 回大会，019.6
- [8] 安楽大輝，森光洋，小鷹研理：Elastic Legs Illusion — 脚を長く伸ばす体操，第 23 回情報処理学会シンポジウム・インタラクシオン 2019，2019.3
- [9] Kodaka, Kenri and Anraku, Taiki and Okada, Kansuke and Mori, Koyo (2020) Elastic Legs Illusion, Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, interactivity
- [10] 曾我部愛子，森光洋，小鷹研理：ぶら下がりによる自重変化を利用した腕が伸縮する感覚の誘発，第 20 回情報処理学会シンポジウム・インタラクシオン 2016，2016.3
- [11] Kodaka, K., Mori, K. (2017). Stretch(m) makes your arms elastic. In *SIGGRAPH Asia 2017 VR Showcase, SA 2017*.
- [12] Preston, C., Ehrsson, H. H. (2014). Illusory changes in body size modulate body satisfaction in a way that is related to non-clinical eating disorder psychopathology. *PloS One*, 9(1)
- [13] Newport, R., Auty, K., Carey, M., Greenfield, K., Howard, E. M., Ratcliffe, N., ... Themelis, K. (2015). Give It a Tug and Feel It Grow: Extending Body Perception Through the Universal Nature of Illusory Finger Stretching. *I-Perception*, 6(5)
- [14] Preston, C., Newport, R. (2011). Analgesic effects of multisensory illusions in osteoarthritis. *Rheumatology (Oxford, England)*, 50(12), 2314-5.
- [15] Lewis, J. S., Kersten, P., McCabe, C. S., McPherson, K. M., Blake, D. R. (2007). Body perception disturbance: a contribution to pain in complex regional pain syndrome (CRPS). *Pain*, 133(1-3), 111-9.
- [16] 伊藤宏司：筋運動制御機構，計測と制御，Vol.25, No.2
- [17] 岡田莞助，小鷹研理：筋運動は順逆両位相の伸縮イメージと適合する，日本認知科学会第 36 回大会，静岡大学，2019.9
- [18] 小鷹研理：「HMD による構成的空間を舞台とした「三人称的自己」の顕在化」，2018 年度人工知能学会全国大会，2018.6
- [19] A Durgin, F. H., Evans, L., Dunphy, N., Klostermann, S., & Simmons, K. (2007). Rubber hands feel the touch of light. *Psychological Science*, 18(2),
- [20] Asai, T., Mao, Z., Sugimori, E., & Tanno, Y. (2011). Rubber hand illusion, empathy, and schizotypal experiences in terms of self-other representations. *Consciousness and Cognition*, 20(4), 1744-1750.
- [21] Marotta, A., Tinazzi, M., Cavedini, C., Zampini, M., & Fiorio, M. (2016). Individual Differences in the Rubber Hand Illusion Are Related to Sensory Suggestibility. *PLOS ONE*, 11(12), e0168489.
- [22] Burin, D., Pignolo, C., Ales, F., Giromini, L., Pyasik, M., Ghirardello, D., ... Pia, L. (2019). Relationships Between Personality Features and the Rubber Hand Illusion: An Exploratory Study. *Frontiers in Psychology*.