

筋運動誘導型 Elastic Limb(s) Illusion に関する研究の展望

Prospects of Studies on Elastic Limb(s) Illusion based on Muscletension-Elastication Correlation

小鷹研理^{*1}

KENRI KODAKA

^{*1}名古屋市立大学芸術工学研究科

Graduate School of Design and Architecture, Nagoya-city University

This article outlines a series of studies on elastic limb(s) illusion based on muscletension-elastication correlation and discusses how these illusion studies contributes to exploring the body-image plasticity.

1. はじめに

筆者の研究室（小鷹研究室）は、2016 年以降、HMD を使って腕または脚が伸縮する感覚を誘発する研究を継続的にすすめている。本稿では、この一連の研究の総称として、「Elastic Limb(s) Illusion」あるいはその略語として ELiI という名前を用いる。このプロジェクトの中で、これまでに 4 つの異なるシステムを考案してきたが、いずれについても、運動学的な力学作用（引っ張る/引っ張られる、押し込む/押し込まれる）と、見かけ上の四肢の長さの伸張との動的な関連付けをベースとし、それらの作用量を体重計の値を通して見積もる点で共通している。後に触れるように、これらの 4 つのシステムは、過去に様々な展示会で出展され、錯覚の誘発に関して極めて個人差の少ない手法であることを示してきたが、個々のシステムについて得られている効果の認知的根拠および、各システム相互の関連について、これまでに俯瞰的に論じる機会がなかった。本稿では、4 つのシステムをあらためて概観し、他の研究者によって報告されている関連研究と比較しながら、Elastic Limb(s) Illusion 研究の学術的な展望を議論したい。

2. 身体変形感研究の周辺

Elastic Limb(s) Illusion は、身体所有感の変調に関して蓄積された古典的な知見を下敷きにしている。以下では、ELiI と関連の深い、身体変形感に関するここ 10 年の諸研究を概観する。

よく知られているように、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、仮想空間内の身体やアバターに体験者の身体所有感（Ownership）が投射される。本稿の関心に照らして注目すべきは、所有感の変調が、所有された身体のサイズ感をも引き込んで変調する点にある。例えば、自分とはサイズの異なるアバターに対して視触覚の同期刺激を与えると、自分自身の身体のサイズ感がアバターと同化する方向で変形することが知られている [Hoort 2011][Normand 2011]。このサイズ感の変調は、実際に外部空間のスケールを縮小／拡大させるとともに [Hoort 2014][Hoort 2016]、身体の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 [Preston 2014]）にまで作用する。

近年とりわけ注目されているのは、サイズ感の変調が主観的な痛みに与える影響に関するトピックである。例えば、特殊な鏡を使って手のサイズを拡大・縮小して呈示した 2 つの報告では [Moseley 2008][Ramachandran 2009]、サイズ感の大小に対応

するかちで主観的な痛みが増減することが紹介されている（ここでは、視触覚バイモダル細胞によるトップダウンの関与について検討が必要である）。他方で、CRPS（複合性局所疼痛症候群）の患者に対して指の主観的なサイズをリアルタイムに伸縮させるシステム（MIRAGE[Newport 2015]）を用いた場合、伸張・収縮ともに痛みの感覚を低減する効果が確認されている [Preston 2011]。ここで注目すべきは、Moseley や Ramachandran らの実験系では、身体サイズの変形感を誘発する際に、はじめからサイズの異なる手・腕を静的に呈示している一方で、MIRAGE システムでは、通常のサイズから伸びたり縮んだりする過程も含めて動的に変形イメージを呈示している点である。すなわち、前者は単なる「身体変形感」の誘発である一方で、後者は「身体伸縮感」を内包した「身体変形感」の誘発であると区別することができる。

CRPS の患者は、主観的な身体イメージのサイズ感に齟齬を抱えていることが報告されており [Lewis 2007]、したがって、特定の身体マップを表象する神経細胞群の一部が、何らかの原因により不適当な学習のスパイラル（不使用の学習：Learned-non-use）に置かれ、物理的状態を正確に更新できない凍結状態に陥っていると考えられる。MIRAGE のようなシステムで、連続的にサイズが増減する（つまり様々なスケールを内包する）視覚イメージを与えることは、問題のある神経細胞群を全般的に再活性化させ、身体マップを再組織化することにつながる可能性がある。

3. Elastic Limb(s) Illusion

3.1 錯覚原理

筆者らが提案する Elastic Limb(s) Illusion は、一人または複数で成立する特定の運動形式を通して、体験者の手脚に伸張または収縮の力学的作用を与え、その力の大きさを HMD 空間内の手脚の伸張度と連動させるものであり（muscletension-elastication correlation）、MIRAGE で前提とされている錯覚原理を、身体全体に拡張して適用したものと整理することができる。また、全てのシステムに共通する手法的な新規性として、腕や脚に具体的に作用している力を、体重計からリアルタイムに取り出す点を挙げるができる（weight-based muscletension estimation）。ただし、以下に示すように、この体重計の実際の使われ方は、システムによって大きく異なる。以下に、図 2 を参考にしながら、小鷹研究室がこれまでに考案した 4 つのシステムの概略を示す。

連絡先: 464-0083 愛知県名古屋市千種区北千種 2-1-10, ken-rikodaka@gmail.com

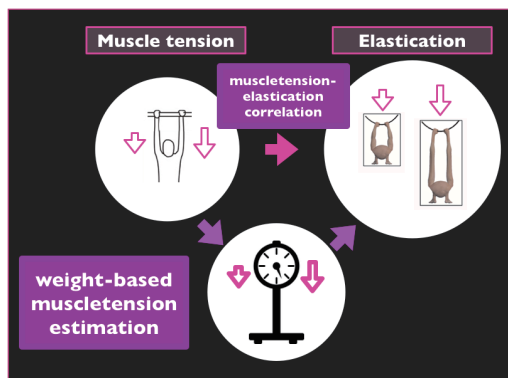


図 1: Principle of elastic limbs illusion

3.2 システム概略

『Underground Diver』[曾我部 2016] は、HMD を着用した体験者が懸垂の要領で鉄棒にぶら下がることによって、両腕に対して、ぶら下がりに対する反作用の伸張力を上向きに発生させる（下方ぶらさがり）。このとき、腕にかかる力は、体験者の足元に置かれた体重計の減少量（自重比）によって見積もることができる。なお、このシステムのみ、HMD の視点として、アバターの頭部をやや後方から観測する Full Body Illusion 視点を採用している。

『Stretchar(m)』[Kodaka&Mori 2017] は、HMD を着用した体験者が両手でハンドルを握った状態で後方に体重を傾け、相対する実験者がそのハンドルを支えることで（後方ぶら下がり）、やはり体験者の両腕に対して伸張力を発生させる。このとき、腕にかかる力は、体験者の足元に置かれた体重計の増加量（自重比）によって見積もられる（つまり、この過程で、実験者の体重が体験者の側へと部分的に移動する）。

『Elastic Arm Illusion』[森・小鷹 2018] では、仰向けに寝転がった体験者の片手を、実験者が、やはりハンドルを介して上方へと引っ張り上げる（上方引っ張られ）。体重計は、実験者の側の足元に置かれ、この体重計の増加量によって腕にかかる力が推定される。つまりこのシステムでは、体験者とは異なる他人の身体状態の変化を通して体験者の身体状態が推定されている。この意味で、4 つの ELiI のなかでも、体験者にとって最もストレスフリーなシステム構成となっている。

『Elastic Legs Illusion』[安楽 2019] では、長座位の姿勢で伸ばした両脚の裏をスタンドに接地させ、そのスタンドをゴムチューブを介して自身の腕で手前側に引っ張ることで、手脚に相反する方向で力を発生させる（つっぱり運動）。この力は、つっぱった脚とスタンドの間にかませた体重計の値によって推定する。なお本稿では詳しく述べないが、このシステムは、腕と脚に対して同時に伸縮感覚を誘発することも可能である。

3.3 錯覚の強度・個人差

以上に挙げた 4 つの錯覚誘導システムは、国内外の展示会で公開され、これまでに多くの体験者からの反応を得ている。『Stretchar(m)』と『Elastic Legs Illusion』については、発表された各展示会の中で、体験者に対して簡易的なアンケートを行っており、「自分の腕／脚が実際より伸びるように感じた」かの問い（-3 to +3, 7 段階評価）に対して、前者（腕）については 77% (27/35, エンターテインメント・コンピューティング [石原・森 2017]), 後者（脚）については 75% (33/44, からだは戦場だよ 2018 Δ) の体験者が、実際よりも伸びる感覚を

「強く感じた」または「大変強く感じた」と解答している（+2 or +3）。逆に、錯覚に対してネガティブな回答をした人は、両者に関して、それぞれわずか 1 人であった。他のシステムについてはアンケートを未実施であるが、来場者の反応に大きな違いはないという印象を筆者は得ている。いずれにせよ、以上の結果は、ELiI が、姿勢の違い及び腕・脚の違いに関わらず、極めて個人差の少ない高水準な錯覚を誘導できることを示すものである。

3.4 筋肉の運動学的生理

既に述べた通り、我々の提案している一連の Elastic Limbs Illusion は、筋骨格系と視覚系感覚間相関を錯覚原理として適用している。＜下方・後方ぶら下がり＞、＜引っ張り上げ＞といった運動作用は、体験者の腕に伸張作用を発生させる。この種の物理的に「伸ばされている」という固有感覚と、視覚的な腕の伸張度を同期させるという考え方は極めて直感的であり、また、複数感覚間相関に基礎を置く所有感ベースの錯覚原理の考え方 [Blanke 2012] に沿っている。他方、『Elastic Legs Illusion』において両脚に与えられている「つっぱり運動」の筋運動の方向は、実は、伸張でなく収縮である。ここでは、両脚の筋肉を収縮させる力の大きさと脚の伸張度を同期させていることになり、つまり、物理世界における作用と仮想世界における作用があべこべとなっている。それにも関わらず、既にした通り、『Elastic Legs Illusion』は、これまでの腕伸縮錯覚と同程度の錯覚強度を生み出している。この謎を紐解くための準備として、筋肉の伸張・収縮の生理的側面を以下で確認する。

筋肉が「伸びた感じ・縮んだ感じ」は、筋骨格系に分布する感覚受容器を通して取得されると考えられている。[伊藤 1986]によれば、筋肉に分布する筋紡錘は、筋が伸張することでインパルスが増大する一方、筋肉と骨をつなぐ組織である腱付近に分布する腱器官は、筋肉からの張力をモニタし、結果的に筋肉が収縮されることでインパルスが増大する。これらの情報は脊髄の運動ニューロンを介して、筋を望ましい長さに保つべく、負のフィードバックとして即座に対象の筋肉へと差し戻される（伸張反射）。外的に発生した緊張方向とは逆の方向の補償作用が内的に発生するという生理的知見は、『Elastic Legs Illusion』における「あべこべ」の問題を考えるとときに極めて示唆的である。というのも、『Elastic Legs Illusion』の感覚間同期にとって、HMD 上の伸びゆく脚のイメージと同期しているのは、外力（収縮）ではなく、内的な補償作用（伸張）の方であるという解釈が成立するからだ。この解釈を拡大すると、特定の筋運動に対して、順逆いずれの視覚イメージを適用しても、等しく伸縮感覚が誘導されることも考えられる。つまり、「伸ばす」と「縮む」は同じ 1 つの現象の表と裏のような関係にあり、文脈によって、前景化される筋運動の方向が決定するという仮説が成立するだろう。この問題を詳しく検討するため、これまでに発表したものと同一の筋運動に対して、HMD 上で収縮イメージを呈示した際に、伸張イメージと同等の伸縮感覚が得られるかどうかを検証することは、今後の重要な課題である。

3.5 視点ドリフト型と作用点ドリフト型

4 つのシステムは、HMD 上で手または脚が実際の長さよりも伸張する点で共通しているが、力が作用する接点となる手先・足先の HMD 空間上の位置が固定か可変かによって、2 つのグループに分けることができる。例えば、『Underground Diver』は、手先は鉄棒の位置に固定され、頭と肩が地面へと沈んでいくことで両手が伸張する。同様に『Elastic Legs Illusion』では、足先がスタンドの位置に固定され、腰が後方へとスライドしていくことで両足が伸張する。この両者は、手先・足先が固定さ

れ、視点（つまり上半身）が移動することで手脚が伸張するため「視点ドリフト型」に分類される。他方で、「作用点ドリフト型」に分類される『Stretchar(m)』『Elastic Arm Illusion』では、視点は物理世界の頭部の位置に固定する一方で、手先は、力が作用する方向へ（正確には視点から手先へと向かうベクトルの延長線上で）と、連続的にドリフトしていく。すでにアンケートでも示している通り、いずれのドリフト型でも高い水準の伸縮感覚を誘発することが可能である。

視点ドリフト型と作用点ドリフト型は、「自分が動くことによる変形」か「端点が動くことによる変形」かの選択に関わるものであり、同一の筋運動の事象において許容される、（相対的に同一な）視覚的伸張イメージの解釈の2つのバリエーションである。実際、全てのシステムは、（発表されものとは対照的な）もう一方の視覚解釈を採用することも可能である。ここで浮上する興味深い問いは、ある特定の筋運動に対して、錯覚にとって有用な視覚解釈は一方に定まるのか否か、というものだ。筆者ら設計者の経験的な印象としては、ある筋運動のタイプによって、もう一方の視覚解釈を採用することで錯覚強度が大きく減退することもあるが、必ずしも明確に区別できないケースも存在するように感じている。この種の偏りがどのような機序で生じるかを検討するのも今後の課題である。

4. おわりに

Elastic Limb(s) Illusion の4つのシステムについて、それらのシステム相互の関連性を俯瞰的に整理し、今後の展望を述べた。とりわけ、ELiIにおいて、1つの物理的な筋運動形式に対して、HMD上で全く異なるタイプの変形イメージが対応できる可能性を指摘した。これらの問題の実験科学的な検証は、身体イメージの可塑性の探求において、極めて有用な知見を提供するものと期待される。

謝辞

本研究の一部は、中山隼雄科学技術文化財団の助成を受けた。

参考文献

- [Hoort 2011] 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.
- [Normand 2011] 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).
- [Hoort 2014] van der Hoort, B., & Ehrsson, H. H. (2014). Body ownership affects visual perception of object size by rescaling the visual representation of external space. *Attention, Perception, and Psychophysics*.
- [Hoort 2016] Van Der Hoort, B., & Ehrsson, H. H. (2016). Illusions of having small or large invisible bodies influence visual perception of object size. *Scientific Reports*.
- [Preston 2014] 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), e85773.
- [Moseley 2008] 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.
- [Ramachandran 2009] Ramachandran, V. S., Brang, D., & McGeoch, P. D. (2009). Size reduction using Mirror Visual Feedback (MVF) reduces phantom pain. *Neurocase*, 15(5), 35760.
- [Preston 2014] 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), e85773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085773>
- [Newport 2015] 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).
- [Preston 2011] Preston, C., & Newport, R. (2011). Analgesic effects of multisensory illusions in osteoarthritis. *Rheumatology (Oxford, England)*, 50(12), 23145.
- [Lewis 2007] 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(13), 1119.
- [ノーマン・ドイジ 2016] ノーマン・ドイジ, 脳はいかに治癒をもたらすか, 紀伊国屋書店, 2016
- [曾我部 2016] 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
- [Kodaka&Mori 2017] Kodaka, K., & Mori, K. (2017). Stretchar(m) makes your arms elastic. In *SIGGRAPH Asia 2017 VR Showcase*, SA 2017.
- [森・小鷹 2018] 森光洋, 小鷹研理: Elastic Arm Illusion, VR Creative Award 2018 (Finalist), 2018.8.25
- [安楽 2019] 安楽大輝, 森光洋, 小鷹研理: Elastic Legs Illusion 一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
- [石原・森 2017] 石原由貴, 森光洋, 室田ゆう, 小鷹研理: HMDを介したボールを引っ張り合うことによる腕が伸縮する感覚の誘発, 情報処理学会シンポジウム・エンタテインメントコンピューティング, 2017.9.16
- [Blanke 2012] Blanke, O. (2012). Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nature Reviews. Neuroscience*, 13(8), 55671.
- [伊藤 1986] 伊藤宏司: 筋運動制御機構, 計測と制御, Vol.25, No.2

Overview of Elastic Limb(s) Illusion

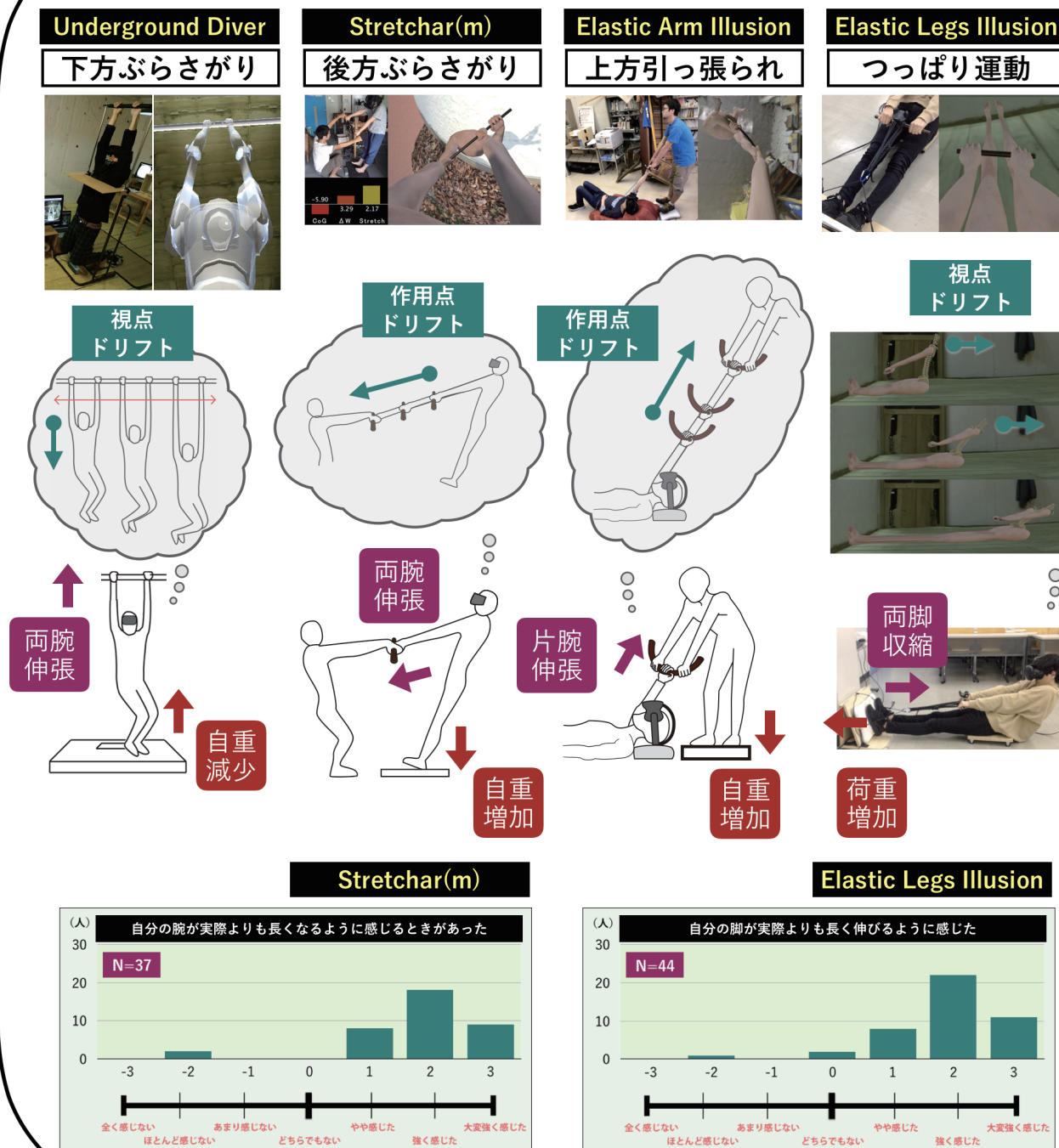


図 2: Overview of elastic limb(s) illusion