

Elastic Legs Illusion — 脚を長く伸ばす体操

安楽大輝^{†1,a)} 森光洋^{†1} 小鷹研理^{†1,b)}

概要：

筆者らの研究グループは、近年、HMD 環境において「腕にかかる筋肉負荷」と、VR 空間内で視覚的にシミュレートされた「腕の伸び率」とを連動させることによって、腕の伸縮感覚を誘発する装置群 (c.f. Elastic Arm Illusion) を発表してきた。この手法は、原理的には腕以外の身体部位にも適用可能であるが、対象となる身体部位を何らかのかたちで物理的に引っ張ることが必須であり、その制約が、把持機能を持たない脚の伸縮感覚への導入を妨げていた。本稿では、手足の協調作用により脚全体に筋肉負荷がかかる手法を提案し、これをベースに設計した脚の伸縮感覚を誘発する装置の仕組みを解説する。また、展示において実施したアンケートにより、本装置が、個人差の少ない強力な錯覚作用を生み出すことが実証されたのでここに報告する。

1. 背景

VR システムにおいて、体験者の運動感覚と HMD 内に視覚的に表示されるアバターの運動イメージを連動させることで、アバターの身体部位に対して体験者の身体イメージを投射することが可能であることはよく知られている。この種の、身体の所有に関わる主観的な感覚のカテゴリーは、実験科学の世界では身体所有感 (ownership) と呼ばれ、複数感覚間の同期によって比較的容易に変調が可能であることが様々な実験で明らかとなっている [1]。身体所有感の変調は、様々な副作用を生み出す点は重要である。例えば、自分とは極端にサイズの異なるアバターに対して、Rubber Hand Illusion の要領で同期した視覚刺激を与えると、自分自身の身体のサイズ感も変形することがわかっている (Barbie Doll Illusion[2])。またこの錯覚作用を応用し、指を引っ張ると同時に、連続的に伸びた指の映像をモニタ上で表示することで、指が長くなる感覚を与えるシステムも発表されている [3]。

我々の研究グループは、このようなサイズ感の連続的変化 (伸縮感覚) に注目し、HMD 環境において腕が伸縮する感覚を誘発する装置を、過去数年にわたって相次いで発表している。例えば、2016 年に発表した「Underground Diver」では、鉄棒にぶら下がることで徐々に自重が減少することに注目し、この自重の減少量を、HMD 空間において提示するアバターの腕の伸び率と連動させた [4]。2017 年に発表

した「Stretchar(m)」では、体験者と実験者がポールを引っ張り合う状況下で、(ここでは逆に) 自重の増加率をアバターの腕の伸び率と連動させるシステムを提案した。このシステムは、国内会議 [6] の体験者に実施したアンケート (N=37) で、7 段階 (-3 から +3) で評価をしてもらったところ、73% の体験者が「大変強く感じた (+3)」または「強く感じた (+2)」と回答し、Negative な rating をしたのはわずかに 2 名であった。また、同様の原理を用いて片腕のみを引っ張り上げるように改良した「Elastic Arm Illusion」は、VR Creative Award 2018 における Finalist に選出されている [7]。

さて、これらのシステムは、基本的には身体所有感の錯覚の原理における多感覚同期を導入したものである。具体的には、「身体部位にかかる筋肉負荷」と「アバターの腕の伸び率」を同期させている (muscle-tension-elastication correlation)。このとき、前者の負荷をどのように自動的に計測するかが課題となる。例えば、素直なアプローチとして、生理学的に直接筋電などを計測する手法を適用することは可能であるが、対象となる身体部位に計測器を装着することは、体験者にとって大きな負担となり、自然なインタラクション環境を設計する上でおおきな障害となる。我々の着想のオリジナリティーは、直接に「筋肉負荷」を計測することをあきらめ、代わりに、自重の変化を通して間接的に「筋肉負荷」を推定することにある (weight-based muscle-tension estimation)。これら二つの仕組みを組み合わせることこそが、強力な錯覚を生み出すための設計原理となっている (図 1)。

この設計原理自体はあらゆる身体部位に適用可能である。

^{†1} 現在、名古屋市立大学

^{a)} antyan4869@gmail.com

^{b)} kenrikodaka@gmail.com

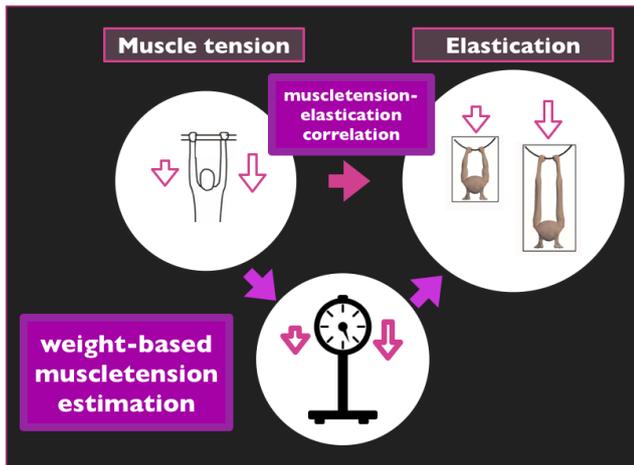


図 1 Principle of elastic limbs illusion

要約すると、対象となる身体部位が引っ張られるような状況に加えて、それに伴い自重が変化するような動力的インタラクション空間を構築できればよい。他方で、素朴に言って、腕と異なり、手のつながっていない（したがって把持機能を持たない）脚に対して筋肉の負荷をかけるような状況をしつらえるのは容易ではない。そのことが、脚の伸縮感覚を扱う装置を検討することを困難にしていた要因となっていた。本稿では、手足の協調作用により脚全体に筋肉負荷がかかる手法を提案し、これをベースに設計した脚の伸縮感覚を誘発する装置の仕組みを解説する。

2. アプローチと実装

2.1 muscletension-elastication correlation

図 2 に示すように、体験者は長座位の姿勢で伸ばした脚の裏をスタンドへと接地させる（二段目）。このスタンドの中心にはアンカーが固定され、体験者が把持するハンドルと何重かに巻かれたゴムチューブを介して繋がっている（三段目）。ここで、体験者が上半身を背面に反らし、腕を伸ばしたままの状態をハンドルを後方に引っ張ることによって、腕の筋骨格系には伸張する方向で負荷が、他方で、脚の



図 2 Interaction flow between player's physical action and avatar-legs' elasticsation.

筋骨格系には収縮する方向で負荷がかかる。この負荷の変化量を、HMD 空間内で一人称視点で提示される腕あるいは肢の伸び率に変換することによって、ownership illusion の基本原理である多感覚同期を成立させる（最下段は HMD 内の一人称視点、最上段はアバターを右側面から見た図）。

2.2 weight-based muscletension estimation

上記の筋肉負荷の変化量は、伸ばした脚とスタンドの間にかませた自重測定器（本実装では Wii Board を使用した）の値によって推定可能である。実際、ハンドルを引っ張る前段階の、腕に全くテンションがかかっていない状態では、自重の値はゼロのままであるが、ひとたび重心を後ろに反らしていくと、ハンドルを介してスタンドが手前側後方に引っ張られる作用と、脚を前方へと押し出そうとする逆の作用が不動の接地面において拮抗する。この「押し合う力」の程度が、Wii Board によって計測される。

2.3 実装環境

HMD 環境として VIVE を使用した。ベースステーションによって計測されるのは、体験者の頭部に装着する HMD と、ハンドルの中央部分に装着された VIVE Tracker のみである。

自重測定器の時刻 t における値が $Z_{waist}(t)$ を示すとき、HMD 空間内の身体各部の仮想的な奥行き座標 $\bar{Z}_{part}(t)$ は、VIVE 環境によって計測される各部の物理的な奥行き座標 $Z_{part}(t)$ を使って、以下のように計算される。

$$\bar{Z}_{head}(t) = Z_{head}(t) + c * W(t) \quad (1)$$

$$\bar{Z}_{shoulder}(t) = \bar{Z}_{head}(t) \quad (2)$$

$$\bar{Z}_{waist}(t) = Z_{waist}(t) + c * W(t) \quad (3)$$

$$\bar{Z}_{hands}(t) = \bar{Z}_{head}(t) - (Z_{head}(t) - Z_{hands}(t)) \quad (4)$$

$$\bar{Z}_{feet}(t) = Z_{feet}(t) \quad (5)$$

なお、 $Z_{head}(t)$ は HMD によって計測される頭部の位置、 $Z_{hands}(t)$ は Tracker によって計測されるの両手の位置であり、これらの値は時事刻々と変化する信号である。一方で、物理的な腰の位置である $Z_{waist}(t)$ は、開始時に直角の長座位状態における頭部の位置として設定され、体験者がハンドルを引っ張る過程で、腰の位置は実際には全く変化しない。また、脚先の位置に関しては、物理世界 (Z) ・仮想世界 (\bar{Z}) にかかわらず不動である点は重要である。このとき、HMD 空間における脚の長さは、 $\bar{Z}_{waist}(t)$ の変化に従って変化する。 c は、伸縮の程度を決定する係数であり、実際には脚の長さが最大 3 倍程度変化するように調整した。

なお、後で示す腕の伸縮感覚と脚の伸縮感覚の違いを検討するために、脚と腕が同時に長く伸びていくように、 $\bar{Z}_{hands}(t)$ と $Z_{hands}(t)$ とを等値として扱うモードを設定し

た。このモードを『腕脚伸縮モード』と呼び、前記の『脚伸縮モード』(式4)と区別する。

3. 展示における反応

設計したシステムは、岐阜市やながせ倉庫・ビッカフェギャラリーで12月22・23日に開催された研究室展示『からだは戦場だよ 2018 Δ (デルタ)』において、はじめて一般に公開された。デモンストレーションは、最初『脚伸縮モード』を試してもらい、その後で『腕脚伸縮モード』へと移行し、どちらの伸縮感覚がより強いかを意識しながら錯覚を体験してもらった。その後で、「自分の腕/脚が実際よりも長く伸びるように感じた」か否かについて、7段階で評価してもらった。なお有効回答人数は44人であった。

実験の結果をヒストグラムとして図*に示す。図に示すように、腕と脚にかかわらず、ほとんどの体験者が、伸縮感覚に対してポジティブな印象を抱いていることがわかる。実際、脚に関しては75% (33/44)、腕に関しては59% (26/44) の人が、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」と解答した。また、伸縮感覚についてネガティブな評価をした人は、腕・脚ともに44人中わずか1人であった。また、腕と脚の伸縮感覚について、対応のあるt検定を行ったところ、両者の間で統計的に有意な差は検出されなかった ($t(43) = 1.41, p > 0.16$)。以上の結果は、本システムが、脚の伸縮感覚を非常に高いレベルで誘発できることを示している。

デモ中またはデモ後に得られたコメントによって、ほぼ全員の体験者が、実際の全く動いていないにも関わらず腰を搭載する座面が前後にスライドする感覚を極めて明確に感じていることがわかった。これは、本システムによって誘発された脚の伸縮感覚が、腰の移動イメージを媒介として得られていることを示唆するものである。また、体験後に自分の実際の脚が短くなっているように感じられていることを告白する者も散見され、本システムが現実の身体感覚にさえ少なからずの影響を与えることが示唆された。以上の結果は、脚にまつわる身体イメージ・運動イメージの豊かな可塑性を示すものである。今後、より慎重に設計された心理実験によって、これらの効果を精緻に検証することが現時点での課題である。

参考文献

- [1] Blanke, O. (2012). Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nature Reviews. Neuroscience*, 13(8), 55671.
- [2] 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.
- [3] 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 Per-

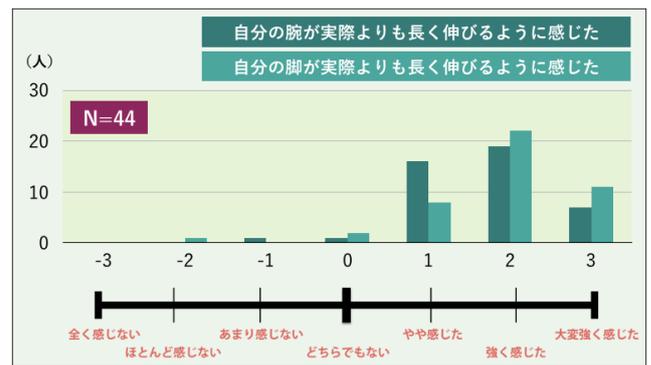


図3 Experimental result obtained in the laboratory exhibition.

- ception Through the Universal Nature of Illusory Finger Stretching. *I-Perception*, 6(5), 2041669515599310.
- [4] 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, 科学技術館, 2016.3
- [5] Kodaka, K., & Mori, K. (2017). Stretchar(m) makes your arms elastic. In *SIGGRAPH Asia 2017 VR Showcase*, SA 2017. <https://doi.org/10.1145/3139468.3139476>
- [6] 石原由貴, 森光洋, 室田ゆう, 小鷹研理: HMDを介したポ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ビューティング, 2017.9.16
- [7] 森光洋, 小鷹研理: Elastic Arm Illusion, VR Creative Award 2018 (Finalist), 2018.8.25