

腕の能動的な運動における自己受容感覚刺激による把持物体変調

Modulation of a Hand-held Object's Property through Proprioceptive Stimulation during Active Arm Movement

○学 牛山 奎悟 (電通大) 高橋 哲史 (電通大)
梶本 裕之 (電通大)

Keigo USHIYAMA, The University of Electro-Communications, ushiyama@kaji-lab.jp
Akifumi TAKAHASHI, The University of Electro-Communications, a.takahashi@kaji-lab.jp
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

The purpose of this study was to investigate whether stimulation of the proprioceptors in the arm during active movement can affect not only the proprioception of the arm but also the perception of the hand-held object. If it is possible to control the perception of a hand-held object through stimulation to the body, it can be applied to virtual-reality interfaces and controllers, which can be used in a wide range of situations. In the experiment, participants were given a context in which they grasped an object and actively moved. Proprioceptive stimulation was applied to participants using vibration and skin stretch based on the kinesthetic illusion. They were asked to evaluate the perception of the object and the arm. Consequently, it was found that the perception of not only the arm but also the hand-held object could be changed, although there were large individual differences.

Key Words: Hand-held Object, Kinesthetic Illusion, Proprioception

1. はじめに

人は筋や腱、皮膚、関節に存在する自己受容器からの求心性の信号を利用して肢の位置や、身体の運動について知覚している。筋と腱の接合部に位置するゴルジ腱器官は主に筋の張力のセンサであり、筋紡錘は肢の位置や速度のセンサである [1, 2].

これらの自己受容器を刺激することによって、力や運動の錯覚現象が生起することが知られており、特に筋紡錘を刺激する手法が多く研究されている。Goodwin らは腱に約 100 Hz の振動を提示することで、物理的に動いていない腕が動いているように知覚される運動錯覚を報告した [3]。また、皮膚けん引や腱への電気刺激によっても同様の錯覚が生起することが報告されている [4, 5].

運動錯覚は反射的な現象ではなく、受容器からの信号が脳内で処理されることで生起すると考えられている [6]。視覚や皮膚触覚や姿勢のコンテキストにも影響を受けることから他の感覚からの入力も運動錯覚に関与し得ることが分かる [7-9]。刺激した部位が動くような感覚が生起するだけではなく、自己の身体に触れた状態で上腕二頭筋の腱に振動提示することで、鼻が伸びたり、姿勢が傾いたりなど身体表象を変化させることが可能である [10]。このように運動錯覚は純粋に肢の運動感覚を生起させるだけではなく、自己受容感覚を変調させる手法として捉えることができる。

これまでの多くの運動錯覚に関する研究は、自己の身体姿勢及び運動に関する錯覚現象を対象とするものだった。一方で、運動錯覚に強いコンテキスト依存性があることや、自己受容器が自己の身体だけではなく、触れている物体の重さや長さの知覚にも寄与している [11] ことを考えると、触れている対象物の特性を変調させ得るのではないかと考えられる。例えばヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) の分野で把持している物の重さや長さを変化させるバーチャルリアリティ (VR) 体験におけるインタフェースが数多く開発されているが [12, 13], 自己受容器を刺激し、物の知覚をコントロールすることによって、同様に把持物体の重さや長さなどの物理的特性を知覚的に変化させるインタフェースを構築可能になると考えられる。

本稿では、物を把持して運動するというコンテキストにおいて、運動錯覚を提示ないし自己受容感覚を刺激することで、把持物体の物理特性の知覚が変化し得るかを調査する。単純な周期運動を行っている最中に、同じ周期の自己受容感覚刺激を異なる位相で行い、被験者の主観的回答によって提案手法の可能性を検証する。

2. 実験

2.1 実験セットアップ

本実験では、能動的な運動として日常的にもものを持ち上げる時や利用する時に行う前腕の運動に注目した。把持物体として、約 30cm の円筒状の棒 (157g) を用意し、この棒の下端を持ち、水平面を下限とした肘関節の伸展及び屈曲の周期運動を被験者に行わせた。運動と同時に上腕二頭筋と腕橈骨筋の遠心腱に対して振動刺激を行い、さらに肘の前腕側の部分において皮膚けん引を行った (Fig. 1)。腱振動刺激が運動錯覚を生起させるのによく用いられる方法であり、皮膚けん引と組み合わせることで錯覚が増強されることが報告されているため、この 2 種類の刺激を採用した [5]。運動錯覚が知覚されづらくなることを避けるため、運動周期は 2 s (0.5 Hz) に設定した。

腱振動刺激の周波数は Roll らの報告をもとに鮮明な錯覚を生起させることができた 70Hz に設定した [14]。振動提示には、ボイスコイル型の振動子 (Acouve Lab, Vp 210) を使用した。PC ソフトウェア (Cycling' 74 Max8) により 70 Hz の正弦波を 0.5 Hz の正弦波で振幅を変調した信号を生成し、オーディオインタフェース (Roland, OCTA-CAPTURE) とオーディオアンプ (FX-AUDIO-FX-202 A/FX-36 A PRO) を通し振動子に信号が入力された。

皮膚けん引は肘の前腕側にキネシオテープ (20×25 mm) を貼付し腕に装着したサーボモータ (Tower Pro pte ltd, SG-90) と直径 0.3 mm のつり糸で連結し、糸をけん引することにより提示した。サーボモータの回転軸には糸を巻き取るためのアクリルで作成した直径 39 mm のボビンを取り付けた (Fig. 1)。周期運動と同じ 0.5 Hz の周波数で、正弦波的に皮膚けん引を提示した。振幅は 45 degrees であり、ボビンの直径より、最大

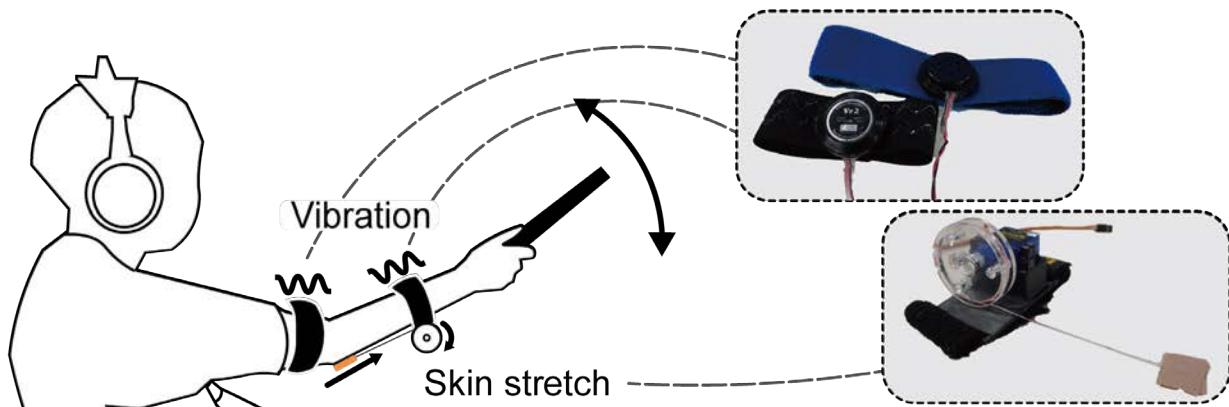


Fig. 1 Movement image, and the vibrators and skin stretch device used in the experiment.

けん引量は約 15 mm であった。このけん引量はけん引によって動かされる感覚が生起するように著者による予備実験により決められた。

2.2 実験手法

運動中のあるタイミングで運動錯覚を生起させる、または自己受容感覚を変化させることで把持物体の物性を変調できると仮定した。周波数や振幅などの振動と皮膚けん引の刺激パラメータは固定し、周期運動と刺激との位相及び刺激手法を変化させることで実験を行った。

運動と刺激間の関係を Fig. 2 に示す。運動の下限となるタイミングで振動刺激の振幅が最大となる位相を基準として、運動に対する刺激の位相を 180 degrees まで 7 段階 (0, 30, 60, ..., 180 degrees) で変化させた。

刺激手法の条件は皮膚けん引のみ (only skin stretch), 振動刺激のみ (only vibration), 二つの組み合わせ刺激 (combined stimulus) の 3 条件とした。本稿では被験者に提示された刺激の位相は振動刺激の位相を代表的に用いて表現される (皮膚けん引のみの条件においても、この規則に従って表現される)。皮膚けん引の位相は、どの条件においても振動から相対的に位相を -60 degrees ずらしたタイミングで刺激が最大になるように設定した。この位相差は著者による予備実験によって、振動と皮膚けん引を組み合わせることで把持物体がより重いとよく知覚できた値に決定した。

以上の刺激の位相と刺激手法の条件に加えて、棒を持つか持たないかの 2 条件と合わせ 7 (phase) × 3 (stimuli) × 3 (bar) の計 42 条件で被験者ごとに実験を行った。

被験者による主観評価を用いて把持物体の知覚変化について調査した。被験者には 10 項目のアンケートを 7 段階のリッカートスケールで回答させた (Table 1)。自己の腕と把持した物とを主語のペアとして、重さ、長さ、重心位置、外力、抵抗感・加速感に変化があるかどうかを調べた。刺激がない時の感覚を基準として、両端に対となる感覚を設定した。被験者に感覚の偏見を持たせないために本研究が目的とする物の重さや長さなどの感覚だけではなく、腕に対する回答や外力などの要素を含めた。

2.3 実験手順

本実験には 13 名の被験者 (21-26 歳, 男性 10 名, 女性 3 名, 一人のみ左利き) に参加してもらった。

まず被験者に、本実験は「腕の運動を行っている際に腕に刺激をすることで感覚にどんな変化が生起するか調査する」と伝え、実験全体の流れを説明した。

その後、被験者の右腕に振動子と皮膚けん引装置を装着し

た。それぞれ、伸縮性のあるバンドで固定をした。振動子は被験者に等尺性収縮を行ってもらい、目的の筋の位置を確認し腱の近辺に配置された。皮膚けん引装置はキネシオテープを肘近辺の前腕の尺側に貼付し、けん引するための糸がたわまないように装着された。皮膚けん引装置と前腕部の振動子の位置が重なってしまう場合は、一つのコイルで固定した。装着後、振動子とテープの位置および振動振幅の調整を行った。被験者が腕を宙に浮かせた状態で、実際の実験と同じ方法で刺激した際に、伸展方向に前腕の運動または前腕への力を知覚できるように振動子とキネシオテープの位置調整を行い、振動振幅は十分に動かされる感覚が生起するように設定した。被験者の内一名のみ、どちらも知覚できない被験者がいたが、そのまま実験は続行した。

次に、腕の周期運動について練習を行った。前腕が水平面と平行になる角度を下限となるように伝え、被験者が動かしやすい振幅で運動を行ってもらった。最初に、ディスプレイ上の正弦波状に上下に動くスライダーに合わせながら腕を動

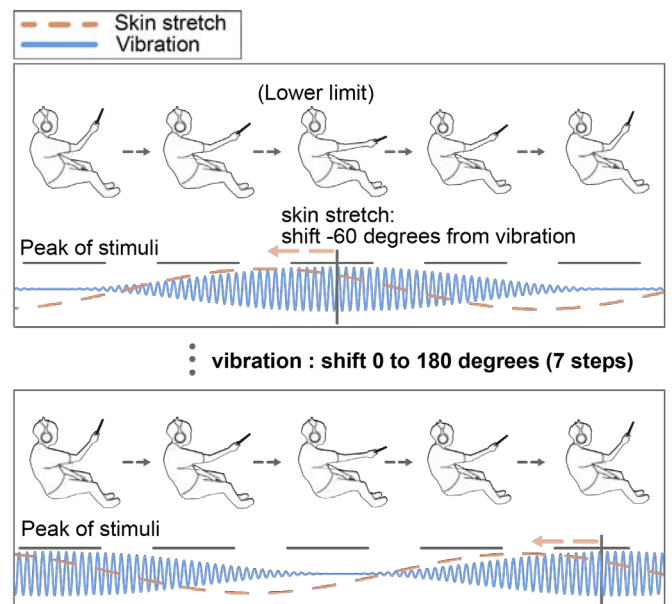


Fig. 2 Timelines of the movement and the stimuli. The top timeline shows the condition where the phase of vibration is 0 degree (i.e., the vibration amplitude is maximum at the lower limit of the movement). The bottom timeline shows the condition where the phase of stimuli is shifted 180 degrees. Skin stretch is always shifted -60 degrees from vibration.

Table 1 Items for subjective evaluation.

Item	Minimum (1)	Maximum (7)
Item1	持っている物が軽くなった	持っているものが重くなった
Item2	腕が軽くなった	腕が重くなった
Item3	持っている物が短くなった	持っているものが長くなった
Item4	腕が短くなった	腕が長くなった
Item5	持っている物の重心が前に移動した	持っている物の重心が後ろに移動した
Item6	腕の重心が前に移動した	腕の重心が後ろに移動した
Item7	持っているものが下向きに押されていた	持っているものが上向きに押されていた
Item8	腕が下向きに押されていた	腕が上向きに押されていた
Item9	持っている物の動きに抵抗感があった	持っている物の動きに加速感があった
Item10	腕の動きに抵抗感があった	腕の物の動きに加速感があった

かしてもらい、同時にヘッドフォンからピンクノイズとメトロノームの音を提示した。メトロノームの音はスライダーが最下点（運動の下限）となるタイミングで提示された。被験者が運動の方法に慣れた後に、目を閉じてもらい、メトロノームの音のみを頼りに腕を動かす練習をしてもらった。練習は、実験者がスライダーの動きと閉眼した状態の被験者の運動が大体一致していると確認できるまで続いた。練習の際には、振動や皮膚けん引は提示されなかった。

練習後、具体的な各試行の手順を被験者に説明した。被験者には、各条件で練習時と同様に連続して運動を行ってもらった。刺激の有無が5周期ごとに自動的に切り替わり、刺激がない時の感覚を基準（7段階リッカートスケールにおける4）として刺激がある時の感覚の変化について回答してもらった。被験者は何回でも運動を行うことができ、アンケートに回答可能であると被験者が確信した際に回答をしてもらった。またアンケートに回答中においても、感覚の確認を行って良いとした。さらに、アンケート項目にないような感覚が生じた際には、自由回答やコメントをしてもらった。

棒の有無（2条件）と刺激方法（3条件）とを組み合わせた6条件を被験者ごとにランダムに設定し、この条件内で刺激の位相の7条件をランダムに設定した。7条件ごとに1分間の休憩を設け、被験者が疲労を感じた際には随時休憩をとるようにした。

3. 実験結果

物体の重さと長さ、重心位置知覚の位相変化について、刺激ごとのグラフを Fig. 3 に示す。把持物体の知覚が変化し得るかに注目するために棒を持つ条件で項目を絞って表示している。それぞれのグラフにおいてバーが表示されていない条件があるのは、過半数の被験者が変化なしと評価したため第一、三四分位数が4となってしまうからである。各刺激手法及び刺激の位相の条件のデータに対して有意水準5%でWilcoxonの符号順位検定により中央値が4であるか検定をしたところ、運動と刺激の位相差が90 degreesで皮膚けん引のみの条件における重心位置の変化（ $p = 0.038$ ）と、位相差が90、

120 degreesで組み合わせ刺激の条件における重さ知覚の変化（それぞれ $p = 0.025$, $p = 0.021$ ）に有意差があった。有意差はみられなかったが多くの条件で把持した棒の知覚が変化することがあったと分かる。

4. 考察

Fig. 3より、被験者の多くが把持物体の変化を知覚できない条件や、同じ条件でも対となっている知覚変化が起きている。これは被験者に大きい個人差があったことが一つの原因であると考えられる。ほとんどの被験者が実験中に棒の知覚が変化することを回答することがあったが、被験者によって変化を知覚する刺激や位相の条件が異なっていた。

被験者ごとの周期運動のずれや実験による疲労もデータの分散が大きくなってしまった原因の一つだと考える。下限のタイミングは統制をしていたが、運動の速度と振幅の違いにより動かしている中での刺激タイミングが被験者間で少しずれてしまい厳密に運動の統制はできていなかった。

一方で、実験中ほとんどの被験者が、腕が押される感覚や引っ張られる感覚、運動に対する抵抗感を報告していた。これは自己受容感覚への刺激が機能していたことを示唆しており、その感覚変化が把持物体の物性変化として知覚されるために本実験の条件では不十分であったと考える。本実験では刺激方法など著者による予備実験によって決めた部分が多い。刺激方法や運動統制の方法について再度検討する必要がある。

4.1 把持物体の物理特性の変化

本実験により、把持物体の物理的特性が変化し得ることが分かった。Fig. 3より、特に重さ感覚と重心位置の変化が多く知覚され、長さの変化はあまり知覚されなかった。筋紡錘が重さ知覚に貢献していること [2] より腱振動による重さ変化は妥当だと考える。重心位置の変化はつまり、運動のモーメントの変化を被験者が知覚していたと考える。これにより長さ知覚も変化すると期待していたが、多くの被験者が長さ変化を知覚できなかった。これは、棒の長さが分かっている状態では長さが増減したと解釈するのが困難だったからではないかと考える。把持する棒の長さも変化する条件にすることで、変化が知覚なりやすくなる余地がまだあり、把持物体の長さ知覚の変化について更なる調査を行いたい。

4.2 運動と刺激の位相差について

皮膚けん引のみの条件において、運動と刺激との位相差が90 degreesの際に物の重心位置が有意に後ろに移動していた。皮膚けん引の位相は振動に対して-60 degreesのタイミングに設定していたので、運動に対しては30 degreesの位相差で皮膚けん引が提示されていた。つまり、皮膚けん引は運動と同じ、もしくは少し遅れたタイミングで提示されることで把持物体の重心位置の知覚を変化させることができたと言える。

一方で、運動との位相差が90および120 degreesの組み合わせ刺激によって有意に把持物体が重くなっていた。重さ知覚は皮膚けん引のみでは有意に変化しなかったことと振動のみでは被験者による回答の分散が大きくなったことより、被験者は振動による重さ変化と皮膚けん引による重心位置変化が組み合わせることで把持物体の重さ変化を安定して知覚することができたと考えられる。

運動に対する位相差が90 degreesであるということは、棒を振りあげる運動の速度が最大になるタイミングで振動刺激の振幅が最大になる。つまり、運動の速度に合わせて、感覚的に運動を阻害するように振動を提示することで重さ知覚を効果的に変調可能である可能性がある。

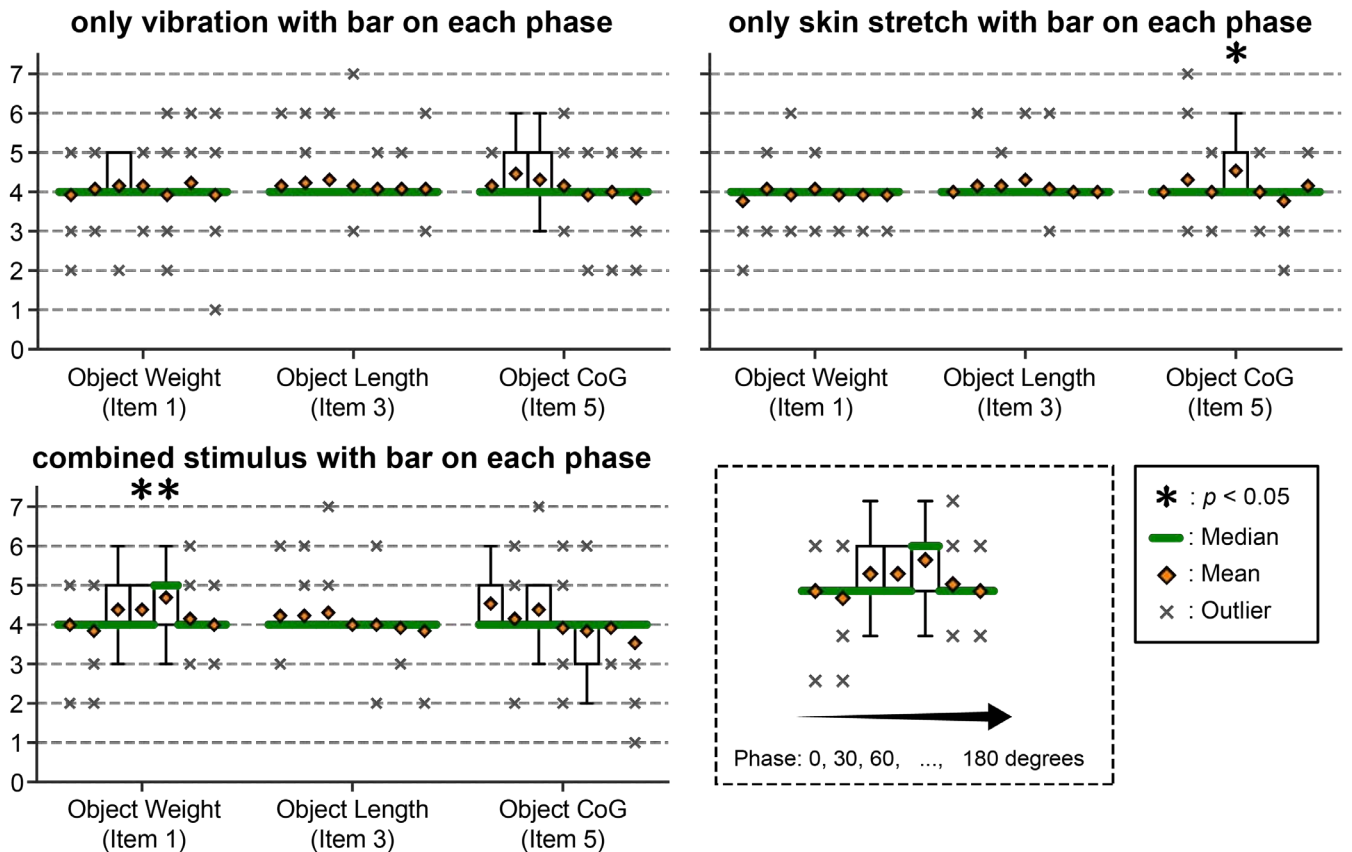


Fig. 3 Phase changes in the perception of weight, length and center of gravity of the rod. For each data group, the condition of phase corresponds to 0 to 180 degrees from left to right (For only skin stretch, the phase difference corresponds to -60 to 120 degrees).

5. おわりに

本稿では、能動運動の際に、腕の筋と皮膚の自己受容器へあるタイミングで刺激を提示することで把持物体の重さや長さなどの自己受容感覚が寄与している物理的特性が変化し得るか調査を行った。初期検討として、単純な前腕の伸展及び屈曲方向の周期運動を採用し、運動に合わせて周期的な刺激を行った。様々なパラメータを変化させていき、把持物体及び被験者の腕への感覚を被験者に主観評価をさせた。腕だけではなく、棒を持った状態で運動を行うことで、その変化が持っている物に及ぶことが分かった。棒の特性の変化としては、重さと重心位置の変化がよく観測された。しかしながら、被験者間知覚の差があったことや物体の知覚変化が生起しない被験者もあり、統計的に有意な変化がある実験条件は少なかった。将来的に実験条件を修正し、物性を安定的に変調させる手法や定量的な知覚変化について更なる調査を行いたい。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP18H04110 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] U. Proske, S. C. Gandevia, "The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force," *Physiol. Rev.*, vol. 92, no. 4, pp. 1651–1697, Oct. 2012.
- [2] U. Proske, T. Allen, "The neural basis of the senses of effort, force and heaviness," *Exp. Brain Res.*, vol. 237, no. 3, pp. 589–599, Mar. 2019.
- [3] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, P. B. C. Matthews, "The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents," *Brain*, vol. 95, no. 4, pp. 705–748, 1972.
- [4] H. Kajimoto, "Illusion of motion induced by tendon electrical stimulation," in *2013 World Haptics Conference (WHC)*, Apr. 2013, pp. 555–558.
- [5] D. F. Collins, K. M. Refshauge, G. Todd, S. C. Gandevia, "Cutaneous receptors contribute to kinesthesia at the index finger, elbow, and knee," *J. Neurophysiol.*, vol. 94, no. 3, pp. 1699–1706, Sep. 2005.
- [6] E. Naito, *Sensing Limb Movements in the Motor Cortex: How Humans Sense Limb Movement*, vol. 10. 2004.
- [7] D. Hagimori, N. Isoyama, S. Yoshimoto, N. Sakata, K. Kiyokawa, "Combining Tendon Vibration and Visual Stimulation Enhances Kinesthetic Illusions," in *2019 International Conference on Cyberworlds (CW)*, Oct. 2019, pp. 128–134.
- [8] E. Rabin, A. M. Gordon, "Prior experience and current goals affect muscle-spindle and tactile integration," *Exp. Brain Res.*, vol. 169, no. 3, pp. 407–416, Mar. 2006.
- [9] K. Goey, O. Bradfield, J. Talbot, D. L. Morgan, U. Proske, "Effects of body orientation, load and vibration on sensing position and movement at the human elbow joint," *Exp. Brain Res.*, vol. 133, no. 3, pp. 340–348, Aug. 2000.
- [10] J. R. Lackner, "Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation," *Brain*, vol. 111 (Pt 2), no. 2, pp. 281–297, Apr. 1988.
- [11] M. T. Turvey, G. Burton, E. L. Amazeen, M. Butwill, C. Carello, "Perceiving the width and height of a hand-held object by dynamic touch," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 24, no. 1, pp. 35–48, Feb. 1998.
- [12] A. Zenner, A. Kruger, "Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 23, no. 4, pp. 1285–1294, Apr. 2017.
- [13] E. Fujinawa, S. Yoshida, Y. Koyama, T. Narumi, T. Tanikawa, M. Hirose, "Computational design of hand-held VR controllers using haptic shape illusion," in *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA, Nov. 2017, no. Article 28, pp. 1–10.
- [14] J. P. Roll, J. P. Vedel, "Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography," *Exp. Brain Res.*, vol. 47, no. 2, pp. 177–190, 1982.