

指先への振動刺激提示による重さ錯覚の発生条件と錯覚強度

○金起鍊 (名古屋大学), 岡本正吾 (東京都立大学), 秋山靖博 (名古屋大学), 山田陽滋 (名古屋大学)

○Giryeon KIM (Nagoya University), Shogo OKAMOTO (Tokyo Metropolitan University),
Yasuhiro AKIYAMA (Nagoya University), and Youji YAMADA (Nagoya University)

Abstract : The weight affects the impression of the lifted object, and its presentation is also necessary for realistic tactile expression. The principles of how people perceive weight are not completely understood yet. There are many factors that affect the perception of weight, and the perception of weight can be manipulated by controlling certain factors. Our research group found a weight illusion that simple vibration stimuli presented to the fingertips make objects feel heavy. This study reports the effect of the vibration frequency on the weight illusion caused by vibration. The acceleration thresholds which cause the weight illusion were investigated by psychophysical experiments, and intensities of illusion were compared for five different frequencies from 30 Hz to 300 Hz. The acceleration thresholds were smaller at lower vibration frequencies, and the intensities of the weight illusion tended to be stronger at lower frequencies than at higher frequencies. The principles of this illusion are unknown at this moment, however, it is expected to be widely used in the field of haptic applications because of its easiness of implementation.

1. 緒言

ヒトは重さを他の情報と結び付けて覚えるため、持ち上げた物の重さから結び付けた情報を連想し [1], これは物に対する印象に影響する。重い物を貴重な物だと感じる現象がその例の一つである [2]。バーチャルリアリティの分野でも臨場感のある触感表現のために疑似的な重さの表現方法が研究されている [3-5]。しかし、ヒトが重さを知覚する原理についてはまだ完全に解明できていない。

ヒトは多感覚的なメカニズムにより重さを知覚しており、重さ知覚に影響する要因は複数ある [6]。物を持ったときの筋・腱および皮膚中の機械受容器の活動の他にも、物を持つ前の見た目が重さ知覚に影響する [7-9]。ヒトが正確な重さを知覚することは難しく、重さ知覚に影響を与える要因が操作されると、質量が不変であっても重さが増減したように感じられる。すなわち、重さ知覚の錯覚が生じる。

皮膚感覚は重さの知覚に影響する要因の一つである [10, 11]。皮膚は変形した方向に力を感じるため [12]、重力方向の皮膚の変形により物を重く感じるようになる。物の重さが軽いほど皮膚感覚が重さ知覚に及ぼす影響が大きくなり [4, 13]、特に、200 g 以下の質量では皮膚感覚の影響が深部感覚のそれを上回るという報告がある [4]。この知覚原理を利用し、皮膚に接触したアクチュエータを動かすことで疑似的な重さを表現することができる [3-5, 14-16]。

振動刺激の提示により重さを表現する手法も報告されている。非対称な振動刺激を提示すると、振幅が大きい方向に力を感じ [17-19]、その方向が重力方向の場合は物を重く感じる。振動刺激の提示タイミングを制御することで重さを表現する研究報告もある。手で物を動かすときに加速度が発生するタイミングに合わせて振動を提示することで物が重く感じられる [20, 21]。

本研究グループの先行研究では約 60 Hz の単振動を指先に提示することで物を重く感じる錯覚が発生することを発見した [22]。過去に報告された手法とは違い、対称な振動刺激を重力と垂直な方向に連続的に提示したにも関わらず、重さの錯覚が報告された。この重さ錯覚は単振動の振動刺激だけで実装が可能な利点があり、小型で軽量の重さ提示装置の開発に役立つと期待される。本研究ではこの重さ錯覚の実用化のため、重さ錯覚が発生する条件と錯覚が最も大きく発生する周波数条件について調査した。

2. 実験

2.1 実験 1: 重さ錯覚が発生するための振動加速度および変位

2.1.1 参加者

13 名の男性の健常者が実験に参加した。参加者は全員右利きで 20 歳以上の成人だった。参加者は実験の前にインフォームドコンセントに署名をし、内容に同意した。

2.1.2 装置と刺激

ボイスコイル式の振動子 (Vp408, Acouve Laboratory, Inc., Japan, 85 g) を利用し振動を提示した。振動子への入力信号はファンクションジェネレータ (SG-4105, Iwatsu Electric Co., Ltd., Japan) により生成され、オーディオアンプ (FX-AUDIO-FX252A, North Flat Japan Co., Ltd., 114 Japan) を用いて信号を増幅し振動子に入力した。実験では 5 条件の単振動 (30 Hz, 60 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz) が提示された。



Fig. 1: 振動子を持ち上げた様子. 参加者は重力と垂直な方向に振動が提示されるように振動子を持ち上げた.

加速度は重さ錯覚が明らかに発生する値から重さ錯覚が明らかに発生しない値を含む範囲で調整され、周波数ごとに提示した加速度の範囲が異なった。周波数条件ごとに10水準以上の加速度が1.25の公比で設定された。加速度の範囲は著者らが行った予備実験により決めた。加速度の測定は実験中に参加者の親指が当たる振動子の側面に振動子 (Model-2320B, Showasokki Co., Ltd., Japan) を取り付け、アンプ (Model-4035-50, Showasokki Co., Ltd., Japan) で加速度計からの信号を増幅して行った。

2.1.3 方法

実験は心理物理学実験の極限法に従い、周波数条件ごとに、重さ錯覚が発生する最小の加速度条件、すなわち、閾値を調べた。参加者は Fig. 1 のように振動子を右手に持ち振動刺激を体験した。参加者には指5本を全部振動子に当てるようにした。振動子は指との接触面から法線方向に振動し、重力方向と垂直な方向に振動が提示された。参加者は肘と手首を机に付けずに腕全体を使って振動子を持ち上げた。

皮膚感覚が振動刺激に順応することを防ぐために、3秒の間隔で振動刺激の提示と未提示を繰り返した。参加者は振動刺激を体験し、重さ錯覚の発生について2択 (発生した, 発生していない) で回答した。上昇系列では重さ錯覚が発生しない加速度条件から始まり、加速度を段階的に上げ、参加者が重さ錯覚を始めて感じたときに試行を終了した。下降系列では上昇系列とは反対に、重さ錯覚が発生する加速度条件から始まり、加速度を段階的に下げ、参加者が重さ錯覚を感じなくなった時点で試行を終了した。周波数条件ごとに3回の上昇系列と3回の下降系列が交互に行われた。実験中はヘッドホンを着用してピンクノイズを参加者に提示し、振動による音が聞こえないようにした。

2.1.4 解析

上昇系列では最初に重さ錯覚が発生した刺激とその直前の刺激の加速度の幾何平均値をその試行の閾値とした。下降系列では重さ錯覚が発生しなくなった最初の刺激とその直前の刺激の加速度の幾何平均値をその試行の閾値とした。周波数条件ごとに、合計6回の上昇系列と下降系列の閾値を幾何平均し、各参加者の周波数別の閾値を計算した。ここで、求めた加速度の閾値結果とそのときの刺激の周波数を用いて変位を計算し、変位の閾値を求めた。

2.2 実験 2: 重さ錯覚の強度

2.2.1 参加者

14名の男性1名の女性、合計15名の健常者が実験に参加した。参加者は全員右利きで20歳以上の成人だった。参加者は実験の前にインフォームドコンセントを提供し、実験参加の同意を示した。

2.2.2 装置と刺激

実験1と同じなボイスコイル式振動子を用いて、5条件の単振動 (30 Hz, 60 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz) を提示した。振動刺激の加速度は周波数ごとに一つが用意され、30 Hz で 4.4 m/s^2 , 60 Hz で 9.5 m/s^2 , 100 Hz で 13.8 m/s^2 , 200 Hz で 59.8 m/s^2 , 300 Hz で 109.7 m/s^2 であった。これらの加速度は、実験1の初期段階で5人の参加者から測定した各周波数の平均加速度閾値よりも2 dB 高い加速度とした。ここで参照した5人の閾値結果と実験1の13人の閾値との差は平均3.5%だった。

2.2.3 方法

参加者は、実験1と同様に、右手の5本指を使い、肘と手首を付けずに振動子を地面に垂直な方向に持ち上げた。各刺激の周波数を公開せず、5つの振動刺激を参加者に提示した。参加者は振動刺激を一つずつ体験し、それぞれの振動刺激により発生する重さ錯覚の強度順位、すなわち、重く感じた順位を重複順位なしで回答した。参加者は比較が十分に行われるまで何回でも任意の振動刺激を体験することができた。ただし、実験1と同じ理由で、振動刺激を3秒以上に連続で体験できなかった。この順位付け試行を参加者ごとに2回行った。実験中参加者にはヘッドホンを着用してピンクノイズを提示した。

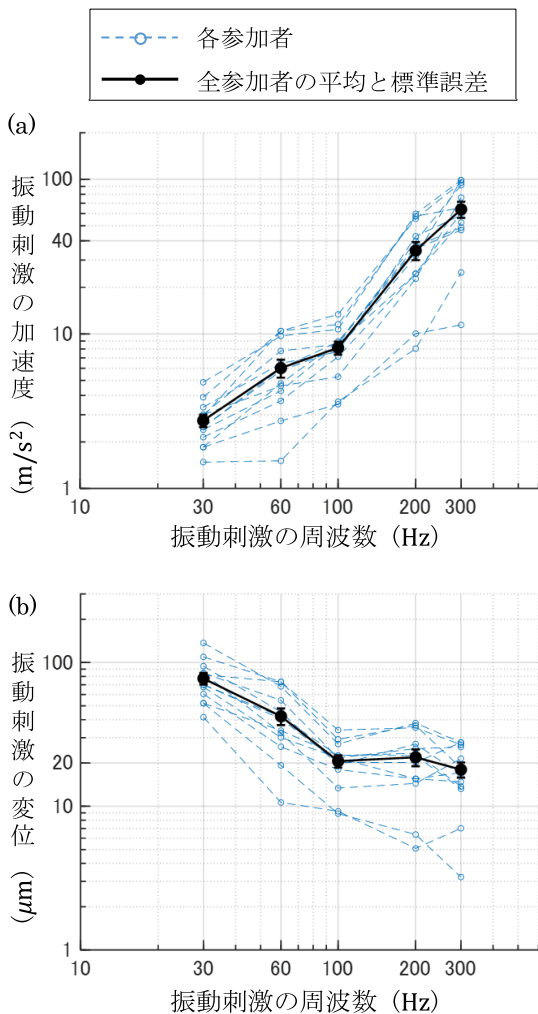


Fig. 2: 各周波数条件で重さ錯覚が発生する (a) 加速度の閾値 (b) 変位の閾値. 線より上の加速度, 変位条件では重さ錯覚が発生するが, 線より下の条件では重さ錯覚が発生しない.

2.2.4 解析

参加者ごとに2つの試行での結果を比較し, 2つの試行の結果が大きく異なる場合はその参加者を解析の対象から除去する予定であった, しかしながら, そのような参加者はいなかったため, 2つの順位結果の平均値を各参加者の順位として用いた. 5種類の振動刺激の順位結果を, Wilcoxon signed-rank test を用いて比較し, 有意水準は Bonferroni の方法で補正した.

3. 結果

3.1 重さ錯覚の閾値

Fig. 2 (a) は周波数条件ごとに重さ錯覚が発生する加速度の閾値を表している. 本実験で最も周波数が低い 30 Hz

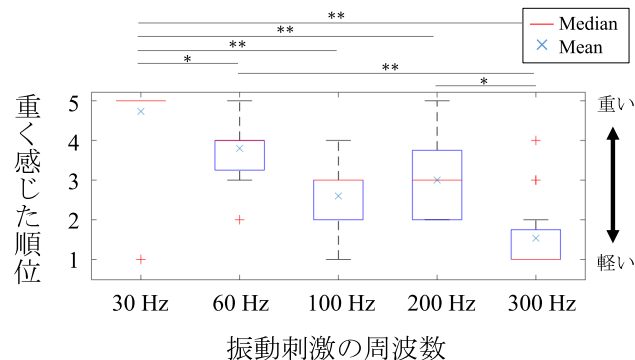


Fig. 3: 参加者が感じた重さ錯覚の強さ順位を表す箱ひげ図. 数字が大きい順位ほど重く感じたことを意味する. * と ** はそれぞれ有意水準 5% と 1% を意味する.

では, 重さ錯覚が報告されるための加速度閾値が最も低く, 周波数が高くなるほど重さ錯覚の発生のために大きい加速度が必要だった. 特に, 100 Hz 以下の振動刺激では閾値が 10 m/s^2 を超えなかったが, 200 Hz 以上の振動刺激では閾値が約 35 m/s^2 まで上昇した. Fig. 2 (b) は加速度から計算した変位の閾値を表している. 加速度の閾値とは反対に, 周波数が大きくなるほど閾値が下がる傾向を見せた. 重さ錯覚が発生する変位の閾値は人が振動を知覚できる変位より 100 倍以上高く, 振動刺激は十分に知覚されるものである [23].

3.2 重さ錯覚の強さ

Fig. 3 は5つの振動刺激の重さ錯覚の強さの順位を箱ひげ図で表している. 数字が大きいほど参加者が重く感じたことを意味する. 振動刺激の周波数が低いほど重さ錯覚の効果は強い傾向を見せた. 周波数が最も低かった 30 Hz の振動刺激が最も錯覚が強いと報告され, 他の振動刺激の順位と有意確率 1% もしくは 5% 以下で, 差が認められた. このとき, 30 Hz の振動刺激と 60 Hz の振動刺激の間の有意水準は 1.5% だった ($T = 316, p = 0.0151$). 他に, 60 Hz の振動刺激と 300 Hz の振動刺激の間にも有意な差が認められた ($T = 331, p = 0.0021$).

4. 考察

二つの実験をとおして, 全ての参加者が一定以上の加速度の振動刺激で重さ錯覚を感じることを確認した. 先行研究でも 10 人の全ての参加者が振動刺激により重さ錯覚を感じ, この重さ錯覚が多くの参加者に発生することを示した [22]. しかし, 参加者の感想によると, 感じる錯覚の大きさには個人差があり, 重さ錯覚の強さを質量に換算することができなかった [22].

二つの実験から、広い周波数帯 (30–300 Hz) の振動刺激で重さ錯覚が発生することを確認したが、重さ錯覚の大きさと重さ錯覚が発生する閾値が振動刺激の周波数によって異なることがわかった。よって、振動による重さ錯覚を実装するにはこの周波数依存性を考慮する必要がある。強い重さ錯覚を実装したい場合は、実験で最も大きい重さ錯覚を起こした 30 Hz の振動刺激のように低い周波数の振動刺激が望ましい。しかし、共振を利用し振動を提示する触覚振動刺激子の場合は、提示周波数が共振周波数から離れるほどその出力が弱くなる特性がある。特に、小さいサイズの振動子の多くはその共振周波数が約 100 Hz で [24]、本実験で重さ錯覚が最も強かった 30 Hz とは離れている。そのため、小型の触覚振動刺激子を用いる場合には、重さ錯覚の発生に必要な閾値を超える振動刺激の出力ができるかに注意する必要がある。

実験 2 の結果として、錯覚の効果が最も高かった振動刺激の周波数は 30 Hz だった。この周波数帯では、機械受容ユニットの中でも、FAI が最も活性化されやすい [25]。ただし、本実験では装置の限界により 30 Hz 以下の周波数で実験を行うことができなかったため、30 Hz 以下の周波数帯で活性化されやすい SAI については検討ができなかった。したがって、錯覚に関係する受容ユニットを特定することはできない。また、振動刺激が指先のみではなく、指や手、腕まで伝播するため、重さ錯覚に皮膚感覚のみが関与しているとは限らない。一方で、振動の周波数が高いほど、錯覚の強度は弱くなった。このことは、200–300 Hz の振動に敏感な FAII が、この重さ錯覚を仲介している可能性が低いことを意味する。

振動刺激により重さ錯覚が発生した原因の可能性の一つとして、緊張性振動反射が考えられる。この現象は筋が伸びるときに発火される筋紡錘が、筋の活動と無関係に、皮膚の上から与えられた機械刺激により賦活されることで、疑似的な深部感覚が生じる現象である [26, 27]。本実験では振動刺激により指の屈筋が賦活された結果、重さ錯覚が生じた可能性がある。緊張性振動反射が発生しやすい周波数帯は筋肉によって異なる。下半身の場合は 30–50 Hz で活性化されやすく [28, 29]、これは実験 2 で錯覚の大きさが有意に高かった 30–60 Hz と同じような周波数帯だが、本実験で最も刺激されたと考えられる前腕の筋肉の場合は 100–150 Hz で活性化されやすい [30]。しかし、指には筋肉がないため、指に提示した振動により緊張性振動反射が生じるかどうかは不明であり、刺激される筋肉によっては物を重く感じるだけではなく、軽く感じる可能性もある [30]。緊張性振動反射が関与しているかどうかは、さらなる研究の上に結論付けられなければならない。

振動を提示したことで把持した物が滑りそうになり、より強い把持力で物を握ることで重さ錯覚が発生した可能

性がある。実験では、振動提示後に把持力が増加したと感想を述べた参加者もいた。把持力が増えることは、把持のための筋活動に関する求心性信号と中枢性運動指令 (努力感 [31–34]) の両方が余分に発生することを意味し、その結果、振動する物体が重く感じられる可能性がある。しかし、本実験では把持力が測定されず、把持力の上昇が重さ錯覚に影響を与えているかについても追究できていない。

5. 結言

本研究では単振動を指先に提示することで物を重く感じる重さ錯覚について調査した。特に、この錯覚の実用化のために、錯覚が発生する条件と錯覚の大きさが周波数によってどのように変化するかを調査した。振動子を用いた 2 つの実験の結果、この錯覚は広い周波数帯 (30 Hz–300 Hz) で一定以上の加速度または変位を満たすことで発生し、振動数が低いほど錯覚の効果が大きいことを確認した。

本研究で調査した振動による重さ錯覚は振動子と単振動の振動刺激だけで重さの表現が可能のため、過去に紹介された重さ提示装置に比べてアクチュエータの振動制御が簡単という実装の際の利点がある。そのため、触感提示の分野で広く使われることを期待している。特に、振動子は小型かつ軽量に製作できるため、触感ディスプレイの小型化と軽量化に寄与することを期待している。ただし、この錯覚が発生する原理がまだ完全に説明できていなく、錯覚の大きさに個人差がある。

参考文献

- [1] J. R. Flanagan, J. P. Bittner, and R. S. Johansson, “Experience can change distinct size-weight priors engaged in lifting objects and judging their weights,” *Current Biology*, vol. 18, no. 22, pp. 1742–1747, 2008.
- [2] N. B. Jostmann, D. Lakens, and T. W. Schubert, “Weight as an embodiment of importance,” *Psychological Science*, vol. 20, no. 9, pp. 1169–1174, 2009.
- [3] K. Minamizawa, S. Fukamachi, N. Kawakami, and S. Tachi, “Interactive representation of virtual object in hand-held box by finger-worn haptic display,” in *In Proceedings of IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2008, pp. 367–368.
- [4] K. Minamizawa, D. Prattichizzo, and S. Tachi, “Simplified design of haptic display by extending one-point kinesthetic feedback to multipoint tactile feedback,” in *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*, 2010, pp. 257–260.
- [5] I. Choi, H. Culbertson, M. R. Miller, A. Olwal, and S. Follmer, “Gravity: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality,” in *Proceedings of Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2017, pp. 119–130.

- [6] G. Buckingham, "Getting a grip on heaviness perception: a review of weight illusions and their probable causes," *Experimental Brain Research*, vol. 232, no. 6, pp. 1623–1629, 2014.
- [7] A. Charpentier, "Analyse experimentale de quelques elements de la sensation de poids," *Archive de Physiologie Normale et Pathologiques*, vol. 3, pp. 122–135, 1891.
- [8] R. R. Ellis, and S. J. Lederman, "The material-weight illusion revisited," *Perception & psychophysics*, vol. 61, no. 8, pp. 1564–1576, 1999.
- [9] P. Walker, B. J. Francis, and L. Walker, "The brightness-weight illusion," *Experimental Psychology*, vol. 57, no. 6, pp. 462–469, 2010.
- [10] R. S. Johansson, and G. Westling, "Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects," *Experimental Brain Research*, vol. 56, no. 3, pp. 550–564, 1984.
- [11] R. S. Johansson, and I. Birznieks, "First spikes in ensembles of human tactile afferents code complex spatial fingertip events," *Nature Neuroscience*, vol. 7, no. 2, pp. 170–177, 2004.
- [12] K. Matsui, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Relative contribution ratios of skin and proprioceptive sensations in perception of force applied to fingertip," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, no. 1, pp. 78–85, 2013.
- [13] F. E. van Beek, R. J. King, C. Brown, M. D. Luca, and S. Keller, "Static weight perception through skin stretch and kinesthetic information: Detection thresholds, jnds, and pses," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 1, pp. 20–31, 2020.
- [14] A. L. Guinan, M. N. Montandon, N. A. Caswell, and W. R. Provancher, "Skin stretch feedback for gaming environments," in *Proceedings of IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games*, 2012, pp. 101–106.
- [15] A. L. Guinan, M. N. Montandon, A. J. Doxon, and W. R. Provancher, "Discrimination thresholds for communicating rotational inertia and torque using differential skin stretch feedback in virtual environments," in *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*, 2014, pp. 277–282.
- [16] J. Park, Y. Oh, and H. Z. Tan, "Effect of cutaneous feedback on the perceived hardness of a virtual object," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 4, pp. 518–530, 2018.
- [17] T. Amemiya, H. Ando, and T. Maeda, "Lead-me interface for a pulling sensation from hand-held devices," *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 5, no. 3, pp. 1–17, 2008.
- [18] T. Tanabe, H. Yano, and H. Iwata, "Properties of proprioceptive sensation with a vibration speaker-type non-grounded haptic interface," in *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*, 2016, pp. 21–26.
- [19] H. Culbertson, J. M. Walker, and A. M. Okamura, "Modeling and design of asymmetric vibrations to induce ungrounded pulling sensation through asymmetric skin displacement," in *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*, 2016, pp. 27–33.
- [20] S. Okamoto, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Vibrotactile stimuli applied to finger pads as biases for perceived inertial and viscous loads," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 4, no. 4, pp. 307–315, 2011.
- [21] H. Nagano, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Vibrotactile cueing for biasing perceived inertia of gripped object," *Haptic Interaction*, pp. 17–20, 2015.
- [22] 金起鍊, 岡本正吾, 秋山靖博, 山田陽滋, "振動触刺激による重さ錯覚: 内観報告と行動量は一致しない", 第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2020, pp. 1F1–03.
- [23] A. Brisben, S. Hsiao, and K. Johnson, "Detection of vibration transmitted through an object grasped in the hand," *Journal of Neurophysiology*, vol. 81, no. 4, pp. 1548–1558, 1999.
- [24] L. A. Jones, and A. Singhal, "Perceptual dimensions of vibrotactile actuators," in *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*, 2018, pp. 307–312.
- [25] S. J. Bolanowski Jr, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky, "Four channels mediate the mechanical aspects of touch," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 84, no. 5, pp. 1680–1694, 1988.
- [26] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. Matthews, "Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception?" *Science*, vol. 175, no. 4028, pp. 1382–1384, 1972.
- [27] D. Burke, K.-E. Hagbarth, L. Löfstedt, and B. G. Wallin, "The responses of human muscle spindle endings to vibration of non-contracting muscles," *Journal of Physiology*, vol. 261, no. 3, pp. 673–693, 1976.
- [28] M. Cardinale, and J. Lim, "Electromyography activity of vastus lateralis muscle during whole-body vibrations of different frequencies," *Journal of Strength & Conditioning Research*, vol. 17, no. 3, pp. 621–624, 2003.
- [29] L. N. Zaidell, K. N. Mileva, D. P. Summers, and J. L. Bowtell, "Experimental evidence of the tonic vibration reflex during whole-body vibration of the loaded and unloaded leg," *Plos One*, vol. 8, no. 12, p. e85247, 2013.
- [30] B. J. Martin, and H.-S. Park, "Analysis of the tonic vibration reflex: influence of vibration variables on motor unit synchronization and fatigue," *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 75, no. 6, pp. 504–511, 1997.
- [31] H. E. Ross, and K. Bischof, "Wundt's views on sensations of innervation: a reevaluation," *Perception*, vol. 10, no. 3, pp. 319–329, 1981.
- [32] R. M. Enoka, and D. G. Stuart, "Neurobiology of muscle fatigue," *Journal of applied physiology*, vol. 72, no. 5, pp. 1631–1648, 1992.
- [33] D. McCloskey, P. Ebeling, and G. Goodwin, "Estimation of weights and tensions and apparent involvement of a "sense of effort"," *Experimental Neurology*, vol. 42, no. 1, pp. 220–232, 1974.
- [34] S. Gandevia, K. Killian, and E. Campbell, "The effect of respiratory muscle fatigue on respiratory sensations," *Clinical Science*, vol. 60, no. 4, pp. 463–466, 1981.