

# 指先への振動提示による重さ錯覚と把持力調整の関係

Research on weight illusion by vibratory stimuli to fingers

○正 金 起錬 (名大) 正 岡本 正吾 (都立大)  
正 秋山 靖博 (信州大)

Giryeon KIM, Nagoya University

Shogo OKAMOTO, Tokyo Metropolitan University

Yasuhiro AKIYAMA, Nagoya University

Understanding the mechanisms of weight illusions lead to effective presentations of weight perception. This paper investigated a weight illusion caused by simple vibration applied to the fingertip from the perspective of grasping force. Five vibratory stimuli with different frequencies from 30 Hz to 300 Hz were tested, and the change in grasping force and the intensity of the weight illusion caused by the vibratory stimuli were investigated. The lower the frequency of the vibration stimuli, the higher the grasping force and the reported weight illusions. These results suggest that the presentation of a single vibration stimulus increases the grasping force and makes the object feel heavier.

**Key Words:** Haptics, Vibration, Illusion, Weight, Grasp force

## 1 緒言

物の重さは質量で表現されるが、ヒトがその定義どおりに重さを感じるには限らない。重さの知覚には複数の要因が影響している [1]。深部感覚が重さ知覚に主に影響していると思われるが、例えば、皮膚感覚も重さ知覚に影響している [2, 3, 4]。重さを知覚するメカニズムについては長期間に渡って議論が続いており、密度や慣性のような他の物理情報から重さを推測するとの報告 [5, 6, 7]、経験と学習が知覚に影響するとの報告 [8, 9]、運動指令と感覚の比較により重さを判断するなどの報告がある [10, 11, 12]。

重さ知覚に影響している要因を操作することにより、ヒトは実際の重さと異なる重さを知覚できるようになる。すなわち錯覚である。重さ錯覚の原因を調べることは重さ知覚メカニズムの理解にも繋がる。重さ錯覚の代表的な例としては Size-weight illusion がある [13]。等価な重さでも体積が異なる物体を持ち上げた際に、体積が小さい物を体積が大きい物よりも重く感じる錯覚である。原理については議論が続いているが、持ち上げた物の重さが予想と異なることが原因でこのような錯覚が発生すると考えられている [10, 14]。類似の例として、材質、色、明るさの場合でも重いと予想した物を軽く感じるという重さ錯覚が発生する [15, 16, 17]。このように、重さ錯覚の多くは物の見た目に由来する。

手に触刺激を提示することも重さの錯覚につながる。物を把持しているとき、持った物に働く重力の方向に皮膚が変形するため、重力方向に皮膚変形を発生させることで物を重く感じる [4, 18, 19]。振動刺激を提示することで重さを表現する手法もある。非対称振動の加速度が大きい方向に主として力が感じられるため、重力方向の非対称振動により物を重く感じる [20, 21, 22]。また、慣性力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をより重く感じる [23, 24]。

われわれは指先に単振動を提示することにより持ち上げた物を重く感じる錯覚を発見した [25, 26]。この錯覚は一定以上の強度を持つ振動により発生し、30 Hz から 300 Hz までの広い振動数範囲で発生する。対称な振動刺激によって生じるという点、重力と垂直な方向に提示された振動によっても生じる点、把持運動と

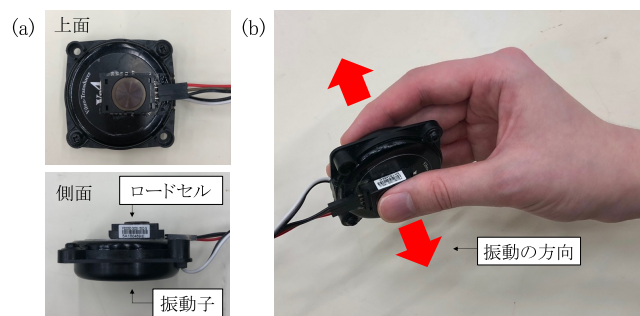


Fig.1 Outline of the apparatus and experiments

無関係に連続的に提示された振動によって発生する点が従来の重さ提示手法とは異なり、その錯覚の発生原理も従来に報告された錯覚とは考えられる。

手指への連続的な振動によって錯覚が発生する理由の一つとして把持力調整 [27, 28, 29, 30] が考えられる。ヒトは運動指令が多く発生する運動を高強度な運動と感じる [29]。この錯覚の場合は、振動する物体を把持するために振動しない物体を把持するときよりも多くの把持力を使うため、より重く感じられるのではないかと仮説立てられる。本研究は、指先への振動提示による把持力の変化と重さ知覚の変化を調べることで、当錯覚の発生原理の解明とヒトが重さを知覚するメカニズムを理解することを目標とする。この研究の実験は東京都立大学日野キャンパスの倫理委員会の許可を得て行われた (#389)。

## 2 実験

### 2.1 参加者

10人の男性と1人の女性、合計11名の健常者が実験1と実験2の両実験に参加した。参加者は全員右利きで20歳以上だった。

### 2.2 実験1: 振動提示による把持力変化の計測

振動刺激の提示による把持力の変化量を測定した。Fig. 1 (a) のようにボイスコイル式の振動子 (Vp408, Acouve Laboratory, Inc., Japan, 85 g) にロードセル (FS2050-0000-1500-G,

Table 1 Properties of five different stimuli

	振動数	加速度	振幅
刺激 1	30 Hz	5.5 m/s <sup>2</sup>	156 μm
刺激 2	60 Hz	11.9 m/s <sup>2</sup>	84 μm
刺激 3	100 Hz	17.4 m/s <sup>2</sup>	44 μm
刺激 4	200 Hz	75.3 m/s <sup>2</sup>	48 μm
刺激 5	300 Hz	138.1 m/s <sup>2</sup>	39 μm

TE Connectivity, Switzerland) を付けた装置を用いて振動の提示と把持力の測定を行った。振動数と加速度が異なる 5 種類の単振動刺激を用意し、オーディオアンプ (FX-AUDIO-FX252A, North Flat Japan Co., Ltd., Japan) で増幅し振動子に入力した。振動刺激の加速度は、先行研究 [26] で調べた、各振動数で錯覚が発生する最小の加速度より 3 dB 高い値とした。刺激の振動数と加速度は Table 1 のとおりであった。加速度は加速度計 (Model-2320B, Showasokki Co., Ltd., Japan) とアンプ (Model-4035-50, Showasokki Co., Ltd., Japan) を用いて測定し、振幅は振動数と加速度から算出した。

把持力の測定は 5 種類の振動刺激のそれぞれに 5 回行われ、参加者ごとに合計 25 回の測定が行われた。提示順はランダムとした。まず、参加者は振動が提示されていない装置を Fig. 1 (b) のように、振動が重力方向と垂直に提示されるように、右手で把持し持ち上げて静止した。次に、単一の周波数を有する振動刺激が 3 秒間提示された。振動刺激の提示タイミングは参加者に知らせなかった。参加者は振動刺激の提示が終わってから 1 秒後に装置を下ろし、100 g と 200 g の分銅を順番に持ち上げた。試行間には参加者の意思を確認し、必要に応じて休憩を設けた。

参加者は親指をロードセルの上に、他の 4 本の指は反対側に当て装置を把持した。腕や手首を机の上に置くことは禁止され、腕全体を使って装置を持ち上げた。このとき、必要最小限の把持力で装置を把持するように指示した。また、音の影響を防ぐため、ヘッドホンを用いてピンクノイズを再生した。

振動提示前の把持力と振動提示後の把持力を比較し、各振動刺激での把持力の変化量を計算した。振動提示前の把持力は振動提示直前の 1 秒間の把持力の平均とした。振動提示後の把持力は振動提示開始から 1 秒が経ってからの 1 秒間の把持力の平均とした。振動刺激の周波数ごとに参加者 12 人の把持力変化量の平均と標準誤差を求め、その変化量を両側 *t* 検定により調べた。

### 2.3 実験 2: 重さ錯覚の強度順位

振動刺激の提示による重さ錯覚の内観的な強度を調べた。刺激には実験 1 で使われた 5 種類の振動刺激に加え、振動を提示しない条件を追加し合計 6 種類の刺激を用いた。刺激の振動数は参加者に公開されなかった。参加者は実験 1 と同様の姿勢で装置を右手で把持し持ち上げたまま、任意の順番で 6 種類の刺激を体験し、重いと感じる順位を重複なしに答えた。このとき、参加者は強度の比較が十分にできるまで何回でも振動刺激を体験することができた。各参加者は以上の課題を 2 回行った。

各参加者について、2 回の課題の平均順位を算出し、解析に用いた。平均順位には、同順位も含まれた。振動刺激間の順位は Wilcoxon signed-rank test に Bonferroni の補正を施して比較した。更に、実験 1 で調べた把持力の変化量から変化量の順位と重さ錯覚の強度順位との相関係数 (Spearman's rank correlation coefficient) を求めることで、把持力の変化量と重さ錯覚の関係を調べた。

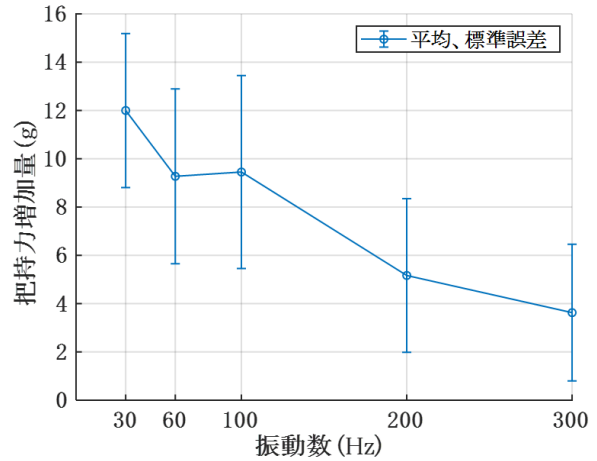


Fig.2 Increment in grip force for each stimulus. Means and standard errors among the participants.

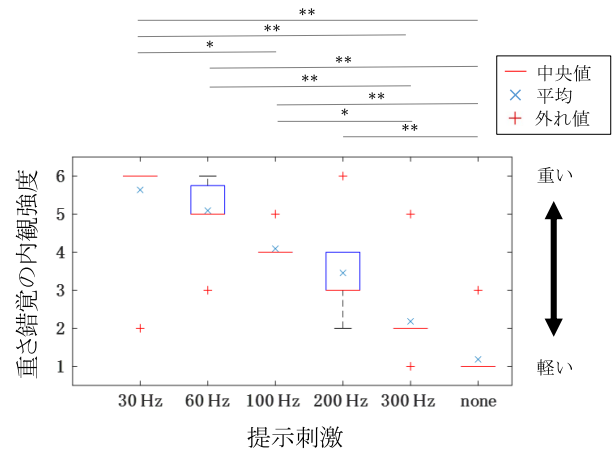


Fig.3 Rank of perceived vibratory stimuli heaviness

## 3 結果

振動刺激ごとの把持力変化量の平均値と標準誤差を Fig. 2 に示す。有意水準 5% 以下で把持力が上昇した条件は、30 Hz ( $t(10) = 3.76, p = 0.004$ ) と 60 Hz ( $t(10) = 2.56, p = 0.028$ ), 100 Hz ( $t(10) = 2.36, p = 0.040$ ) であり、比較的に振動数が低い条件であった。振動刺激を提示する前の把持力の平均値は 59.7 g で、30–100 Hz の振動刺激では把持力が 9 g 以上上昇した。50 g から 200 g の物を持ち上げるときの重さ知覚の Weber 比がおおよそ 6–13% である [31, 32, 33] ことを考慮すると十分に大きな変化である。また、振動数と把持力変化には負の相関があった ( $\rho = -0.27, p = 0.050$ ), 振動数が低いほど把持力の変化量が大い傾向があった。

重さ錯覚の強度順位の結果を箱ひげ図を用いて Fig. 3 に示し

Table 2 p-values between each conditions

Stimulus	60 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	None
30 Hz	0.582	0.020	0.086	0.004	0.001
60 Hz	-	0.069	0.134	0.006	0.002
100 Hz	-	-	0.616	0.021	0.001
200 Hz	-	-	-	0.082	0.005
300 Hz	-	-	-	-	0.057

た。数字が大きい順位ほど参加者が重く感じたことを意味する。Table 2 のとおり、振動刺激がない条件に比べて 300-Hz を除く振動条件が重く感じられ、振動刺激の振動数が低いほど重いと感じられる傾向があった。他に、有意水準 1% 以下の有意差が認められた条件は 30 Hz と 300 Hz 間 ( $T = 181.5, p = 0.004$ ) と、60 Hz と 300 Hz 間 ( $T = 182.5, p = 0.006$ ) だった。

重さ錯覚の強度と把持力変化量の順位相関係数は 0.63 ( $p = 1.3 \times 10^{-8}$ ) で、正の相関を見せた。これは、把持力変化が大きい刺激ほど重く感じられたことを意味する。

#### 4 考察・議論

実験の結果、振動刺激の周波数が低いほど把持力上昇量と重さ錯覚の強度が大きい傾向があり、把持力上昇と重さ錯覚の間には正の相関 ( $\rho = 0.63$ ) があった。これは重さ錯覚において把持力調整がその要因の一つであることを示唆す。しかし、把持力上昇量の差が大きい 30 Hz と 100 Hz の間でも重さ錯覚の順位が有意に違った点 ( $p = 0.02$ ) や、振動数が低い刺激で把持力がより上昇したにも関わらず軽く感じた参加者 (Fig. 3 の外れ値) が居たため、把持力調整だけでは本錯覚の発生原理をすべて説明できない。

実験の結果、振動数が低い振動刺激ほど把持力が大きく上昇した。これは、機械受容ユニットの中で把持力調整に影響している FAI の特性が原因だと考えられる。FAI は滑りのような皮膚変形を検知することで把持力調整に大きく影響し、3–40 Hz 周波数域で活性化されやすく、周波数が高い刺激ほど鈍感になる [34]。われわれの実験では、振動刺激によって指腹と振動子の間に一時的な全もしくは部分滑りが発生したと予想される。このとき、周波数が低い刺激ほど FAI が多く活性化され、把持力が大きく増加したと考えられる。しかし、Table 1 のように振動数が低い刺激ほど振幅が大きかったため、低周波の振動刺激で実際に大きい滑りが発生し把持力が増加した可能性もある。

振動の提示により重さの錯覚が発生する例として緊張性振動反射がある。緊張性振動反射は、筋肉が伸びるときに発火される筋紡錘を筋・腱への機械刺激で発火させることで、運動の錯覚が発生する現象である [35, 36]。筋肉によって発火されやすい振動数や必要な振動加速度もしくは振幅が異なる [37, 38, 39]。しかし、指には筋肉が存在しないため、指先に提示した振動が上腕の筋肉の筋紡錘を有効に発火させたかは本研究では分からない。また、発火された筋肉によっては物を軽く感じることもあるため [37]、緊張性反射の影響を調査するためには、実験で提示した振動刺激がどの筋肉を効果的に刺激したかを明らかにする必要がある。

#### 5 結言

本研究は指先への単振動の提示により発生する重さ錯覚と振動刺激による把持力変化の関係を調べることで、ヒトが重さを知覚するメカニズムを理解することを目標とした。本稿では 5 種類の振動数が異なる振動刺激を提示し、把持力の変化量と重さ錯覚の強度を参加者実験により調べ、把持力調整が錯覚に及ぼす影響について考察した。実験の結果、把持力の上昇量と重さ錯覚の強度には正の相関 ( $\rho = 0.63$ ) があり、振動数が低い振動刺激ほど把持力の上昇量と重さ錯覚の強度が大きかった ( $\rho = -0.27$ )。

本研究の結果は、把持力の変化が重さ知覚に影響する可能性を示唆する。把持力の変化の他に錯覚に影響を及ぼした要因の有無と、単振動の振動刺激により把持力が上昇する理由については更なる研究が必要である。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J. C. Stevens, and L. L. Rubin, “Psychophysical scales of apparent heaviness and the size-weight illusion,” *Perception & Psychophysics*, vol. 8, no. 4, pp. 225–230, 1970.
- [6] E. L. Amazeen, and M. T. Turvey, “Weight perception and the haptic size-weight illusion are functions of the inertia tensor,” *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, vol. 22, no. 1, p. 213, 1996.
- [7] Q. Zhu, and G. P. Bingham, “Human readiness to throw: The size-weight illusion is not an illusion when picking the best objects to throw,” *Evolution and Human Behavior*, vol. 32, no. 4, pp. 288–293, 2011.
- [8] 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.
- [9] G. Buckingham, and M. A. Goodale, “Lifting without seeing: The role of vision in perceiving and acting upon the size weight illusion,” *PLoS one*, vol. 5, no. 3, p. e9709, 2010.
- [10] H. E. Ross, “When is a weight not illusory?” *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 21, no. 4, pp. 346–355, 1969.
- [11] C. M. Davis, and W. Roberts, “Lifting movements in the size-weight illusion,” *Perception & Psychophysics*, vol. 20, no. 1, pp. 33–36, 1976.
- [12] A. Gordon, H. Forssberg, R. Johansson, and G. Westling, “Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip,” *Experimental brain research*, vol. 83, no. 3, pp. 477–482, 1991.
- [13] A. Charpentier, “Analyse experimentale de quelques elements de la sensation de poids,” *Archive de Physiologie Normale et Pathologiques*, vol. 3, pp. 122–135, 1891.
- [14] J. R. Flanagan, and M. A. Beltzner, “Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size-weight illusion,” *Nature Neuroscience*, vol. 3, no. 7, pp. 737–741, 2000.
- [15] R. R. Ellis, and S. J. Lederman, “The material-weight illusion revisited,” *Perception & psychophysics*, vol. 61, no. 8, pp. 1564–1576, 1999.
- [16] C. J. Warden, and E. L. Flynn, “The effect of color on apparent size and weight,” *American Journal of Psychology*, vol. 37, no. 3, pp. 398–401, 1926.
- [17] P. Walker, B. J. Francis, and L. Walker, “The brightness-weight illusion,” *Experimental Psychology*, vol. 57, no. 6, pp. 462–469, 2010.

- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] H. Nagano, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Vibrotactile cueing for biasing perceived inertia of gripped object," 2015, pp. 17–20.
- [25] 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.
- [26] ———, "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", 第 22 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, 2021, pp. 1F3–09.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] L. A. Jones, "Perception of force and weight: Theory and research." *Psychological bulletin*, vol. 100, no. 1, p. 29, 1986.
- [30] R. M. Enoka, and D. G. Stuart, "Neurobiology of muscle fatigue," *Journal of applied physiology*, vol. 72, no. 5, pp. 1631–1648, 1992.
- [31] E. E. Brodie, and H. E. Ross, "Sensorimotor mechanisms in weight discrimination," *Perception & Psychophysics*, vol. 36, no. 5, pp. 477–481, 1984.
- [32] H. E. Ross, and E. E. Brodie, "Weber fractions for weight and mass as a function of stimulus intensity," *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 39, no. 1, pp. 77–88, 1987.
- [33] Y. Hiramatsu, D. Kimura, K. Kadota, T. Ito, and H. Kinoshita, "Control of precision grip force in lifting and holding of low-mass objects," *Plos One*, vol. 10, pp. 1–19, 2015.
- [34] K. O. Johnson, "The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 11, no. 4, pp. 455–461, 2001.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] L. N. Zaidell, K. N. Mileva, D. P. Sumners, 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.