



# 能動運動中の運動錯覚生起による把持物体の重さ感覚変調

Modulation of Heaviness Sensation of Hand-held object by Kinesthetic Illusion during Active Arm Movement

牛山奎悟<sup>1)</sup>, 高橋哲史<sup>1)2)</sup>, 梶本裕之<sup>1)</sup>

Keigo USHIYAMA, Akifumi TAKAHASHI, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {ushiyama, a.takahashi, kajimoto}@kajimotolab.jp) 2) 日本学術振興会

**概要：**人は閉眼状態でも把持物体の重さや大きさを知覚することができる。この知覚には筋などの自己受容感覚が利用されていることが知られている。そこで腱振動による運動錯覚によって自己受容感覚を変化させることで物体の知覚を変調できるのではないかと考えた。本研究では物体をより重く知覚させることを目標とし、物体を把持し運動をしている際に運動錯覚を生起させた際の重さ感覚の変化について調査した。実験の結果、運動中に運動錯覚を生起させることで重く知覚させることは可能であり、刺激パターンによって効果が変わり得ることが分かった。

**キーワード：**重さ感覚, 自己受容感覚, 運動錯覚, 腱振動

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 空間内の物体を把持している、または触れている感覚を提示することは体験の没入感や臨場感を向上させる上で重要な要素である。しかし、無数の VR 空間内のオブジェクトに対応した実物体を用意することは困難であるため、一つのデバイスによって様々な物体を把持している・触れている感覚を提示する VR コントローラが多く開発されている [1]。

一般に振動感覚の提示を超えた触力覚提示は大掛かりな装置が必要であるが、錯覚現象によりこの問題を解決する提案が数多く行われている。視覚提示によって触力覚にも影響を及ぼすことが知られており、刺激の簡便さから疑似的な触覚提示に頻繁に用いられる手法である。この視覚錯覚の錯覚現象は Pseudo-haptics として知られ、ユーザのシステムへの入力に対してフィードバックする映像を変化させることで重さや剛性などの触力覚が変化したように知覚させることができる [2]。また皮膚触覚への刺激に関しても振動による単なる接触の有無の提示だけではなく、把持感覚や形状の変化を提示可能である [1]。しかしながら、錯覚を提示可能な量にはある程度制約が存在する。

自己受容感覚は身体的位置や運動の感覚である。把持した物体の重さや長さなどの特性は実際に腕を動かした方が知覚しやすいことから分かるように、自己受容感覚は物体の知覚にも貢献しており [3]、自己受容感覚の錯覚を利用することで、錯覚による感覚提示の幅を広げることができる。と考える。

自己受容感覚の代表的な錯覚としては運動錯覚が挙げられ、これは実際には動いていない肢があたかも動いているかのように感じる現象である。特に筋紡錘やゴルジ腱器官、皮膚受容器が自己受容感覚に大きな貢献をしていると考えられている [4]。運動錯覚には特に筋紡錘の寄与が大きいとされており、錯覚生起のために腱や筋に 70 Hz から 80 Hz 程度の振動を提示し筋紡錘を刺激する手法がよく用いられる [5]。これまで運動錯覚は純粋な身体運動感覚を錯覚させる手法として研究されることが多く、物体把持時に錯覚を生起させた際の物体知覚への影響については予備的な検討にとどまっている [6]。

そこで本研究では、運動錯覚によって把持物体の変調可能な要素や変化量について調査する。我々は前報 [6] において、棒を把持し周期運動を行っている際に自己受容感覚を刺激することにより把持物体の特に重さや重心位置の知覚が変化する可能性を見出した。本稿では、特に変化が顕著であった重さ知覚に焦点をあて、刺激条件を改善し重さの変調程度について評価を行った。

## 2. 実験

実験には 12 名の被験者 (男性 11 名, 女性 1 名, 右利き 10 名, 21 歳~26 歳) を募った。

被験者には自身の腕が見えない状態で、後述する円筒形の試料を把持した状態で運動させ重さを知覚させた。三種類の刺激条件下で知覚された基準試料の重さと比較試料の重さを繰り返し比較していき、基準と同等の重さを求め

ることで、刺激によってどの程度重さ感覚が変調されたか調査した。

## 2.1 実験器具と刺激装置

実験環境の全体を図 1 に示す。ついたてを設置し被験者からは自身の腕は見えなようにした。被験者には振動提示のために 4 つの振動子 (Acouve Lab, VP210) を肘と手首にサポーターで装着した。これらの振動子は上腕二頭筋と上腕三頭筋の腱 (図 2 における 1 番と 3 番) と手首の橈側と尺側 (図 2 における 2 番と 4 番) に配置していた。そして被験者に皮膚感覚によって重さが識別できないように手袋を装着させ、腕のトラッキングのために手と肘の部分に光学式モーションキャプチャ (OptiTrack V120 Duo) 用の再帰性反射マーカを固定した。振動子は PC とオーディオインターフェース (Roland, OCTA-CAPTURE) を接続し、オーディオアンプ (FX-AUDIO- FX202A/FX-36A PRO) を介して駆動された。振動子を駆動するための信号はあらかじめ Python により音声ファイルとして作成した刺激波形を PC 上のソフトウェア (Cycling'74, Max8) で再生し入力された。

試料を持ち上げる際の動きを統制するために、被験者はディスプレイを見ながら実験を行った。ディスプレイには運動教示のために、被験者自身の上腕の机からの角度を表すスライダーを表示した。これらのスライダーの描画や、肘と手の位置からの前腕の角度の計算、振動子を駆動するタイミングの管理はゲームエンジンソフト (Unity) を利用して実装された。

使用した試料を図 3 に示す。試料は直径 32 mm (内径 29 mm)、長さ 150 mm の円筒状のアルミパイプに水と塩、または砂 (約  $1.2 \text{ g/cm}^3$ ) と砂鉄 (約  $2.8 \text{ g/cm}^3$ ) の配合率を変えて中に詰めていくことで作成された。試料は 160 g から 330 g まで 10 g 刻みで作成された。

## 2.2 実験条件

静止状態よりも能動的に動いている方が重さを識別しやすいため、本実験において被験者には運動をしてもらうことで重さを知覚してもらった。図 4 に示すように、運動は肘を机に置いた状態で、机の上から前腕の角度が  $45^\circ$  になるまで錘を持ち上げて、机に下す動作を 0.5 Hz の正弦波状に行うように教示された。

実験では三種類の刺激条件が採用された。二つが振動を提示する条件 (Gravity 条件と Velocity 条件) で一つが振動を提示しない Control 条件である。Gravity, Velocity 条件の刺激波形を図 4 に示す。Gravity 条件は運動開始から終了まで継続的に上腕二頭筋の腱と手首の橈側 (1 番と 2 番) に振動を提示し続ける条件である。Velocity 条件は運動開始から運動のピークまで上腕二頭筋の腱と手首の橈側 (1 番と 2 番) に振動提示し、運動のピークから運動の終了まで上腕二頭筋の腱と手首の尺側 (3 番と 4 番) に振動を提示する条件である。刺激波形は 70 Hz の正弦波を立ち上がりと立下りに急激に振幅が変化しないように台形波で振幅変調し作成された (図 4)。

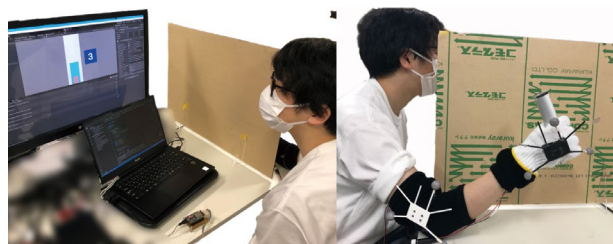


図 1: 実験環境の全体図。

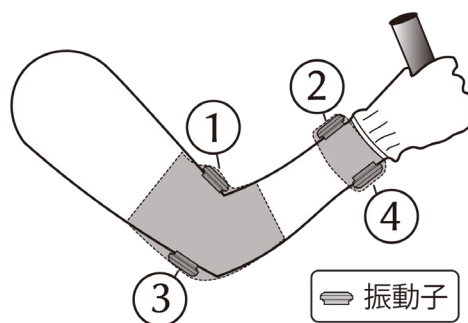


図 2: 振動子の配置図。



図 3 使用した重さ試料。

二種類の振動提示する条件は物体をより重く知覚させることを意図して設定された。Velocity 条件は、前報の結果より運動の速度を抑えるように自己受容感覚刺激をすることで重く知覚する傾向があったことを基に設定された。運動方向に対して逆方向の運動錯覚を生起させることにより運動の抵抗感を定常的に提示することを意図した。Gravity 条件は、重さは重力の影響を受けることを考慮し定常的に伸展方向の錯覚を生起させることを意図して設定された。

各刺激条件による重さ知覚の変化について仮説を述べる。Velocity 条件は運動の速度を抑える、抵抗感を提示する刺激条件である。速度を抑えるような成分は空気抵抗感や粘性感につながると考えられるが、前報を踏まえると動かしにくさが提示されることによって重さ感覚の変化につながり得ると考える。一方で Gravity 条件は重力の影響を常時感じさせることを意図しているため、Velocity 条件より重さの変化として解釈しやすく、結果として同じ振動振幅であればより重く知覚させると考える。したがって、Control 条件と比較し Gravity 条件と Velocity 条件のどちらも把持物体をより重く知覚させ (仮説 1)、Gravity 条件の方が重く知覚させる (仮説 2) と仮説を立てた。

実験では PEST [7] に則った上下法を利用し、各条件の

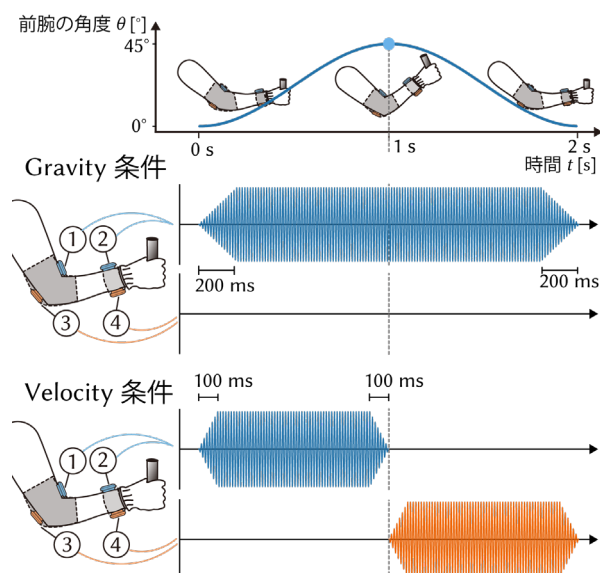


図 4: 試料を持ち上げる運動の波形と、刺激条件ごとの刺激波形及び刺激を提示したタイミング。

基準の重さに対する主観的等価点（各刺激条件下で基準試料の重さと同等の重さを知覚される試料）を調査した。また各試行において基準試料は常に 200 g とした。被験者が次の比較する刺激強度予測しづらくするために最も軽い試料（160 g）から始める上昇系列と最も重い試料（330 g）から始める下降系列とを混ぜて系列をランダムに選択し比較を行った。

### 2.3 実験手順

被験者に実験を概説した後、振動子をサポータにより身体に配置した。特に肘の 1 番と 3 番の振動子を配置する際には、被験者に上腕二頭筋と上腕三頭筋の等尺性収縮を行ってもらい腱の位置を確認した。各振動子の振幅は加速度センサ（LIS331, Sparkfun）を用いて較正を行った。各振動子の振動振幅はオーディオアンプとソフトウェアのボリュームを調節することで、加速度振幅が  $80 \text{ m/s}^2$  から  $90 \text{ m/s}^2$  の範囲内になるように統制された。振幅の調整をした後に、被験者が錯覚を知覚可能か確認した。実験で提示する振動パターン（1 番と 3 番および、2 番と 4 番）を提示して被験者に前腕が動いているように感じるか解答してもらった。

各条件下で実際に比較を行う前に、被験者が運動方法に慣れるために練習を設けた。被験者には図 5 に示すように運動教示のためと自身の腕の角度を表す二つのスライダーが提示されていた。運動教示用のスライダーが上下に動き、その動きに合わせるように錘を持ち上げる動作を行ってもらった。被験者が自信をもって重さを知覚できるようになるまで練習を行い実際に重さの比較する試行に進んだ。

条件の順番による影響をなくすために、刺激条件の提示順序（6 通り）は被験者全体で均等になるようにした。全条件を通して、被験者は最初に基準試料を把持し運動を行い重さを知覚し、実験者が試料を交換した後、同様に比較試料を把持し運動を行い、重さを知覚した。二つの重量を

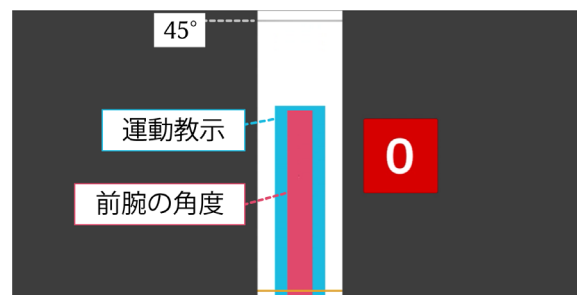


図 5: ディスプレイに表示していた運動教示用のスライダーと被験者の前腕の角度に対応するスライダー。

比較し、基準に対して比較試料が重いか軽いかわき強制的に二択で回答してもらった。運動している間以外で重さを知覚できないように、運動を行う期間以外では、錘には触れる程度で把持しないように被験者に留意させた。

実験中は被験者にはヘッドフォンを装着してもらった。被験者が運動をする間のみ、ヘッドフォンからピンクノイズとメトロノームの音を流した。メトロノームは 1Hz で提示し、視覚に加えて運動の開始、上限、終了のタイミングの手掛かりとして利用してもらった。

### 3. 実験結果

SPSS (Statistics 24 Advanced, IBM) を利用し統計解析を行った。各被験者の刺激条件ごとの結果は上昇系列と下降系列の平均をとった値とした。刺激条件間で知覚された重さの差を調査するために一元配置反復測定分散分析 (RM-ANOVA) を実施した。さらに各条件間の差を調査するために Bonferroni 法を利用した多重比較を行った。統計解析は有意水準 5% で実施した。

刺激条件ごとの全被験者の平均主観的等価点の重量を図 6 に示す。振動条件の主効果は有意であった ( $F(2, 22) = 15.133, p < 0.001$ )。多重比較の結果、Gravity 条件と Control 条件 ( $p = 0.011$ )、Velocity 条件と Control 条件との間に有意差がみられた ( $p = 0.001$ )。一方で、Gravity 条件と Velocity 条件との間に統計的有意差はなかった ( $p = 0.246$ )。

Gravity 条件の平均値は 250g (95%信頼区間は下限が 230 g, 上限が 270 g)、Velocity 条件の平均値は 235 g (95%信頼区間は下限が 216 g, 上限が 253 g) であった。それぞれの基準の重さ (200 g) に対する変化率は 25% と 17.5% である。

### 4. 考察

振動を提示した二種類の条件において、被験者は刺激を提示しない Control 条件と比べて統計的に有意により重く知覚していた。よって仮説 1 は支持される結果となった。さらに、仮説 2 は統計的に支持される結果とはならなかったが、Velocity 条件より Gravity 条件の方が重く知覚される傾向があり、被験者からも Gravity 条件の方が重く感じたとコメントがあった。Control 条件の結果を見ると多くの被験者が基準と同等の値になっているため、本実験において被験者は重さを比較できていたと考える。

Velocity 条件は物体が重く知覚されていたが、振り上げ



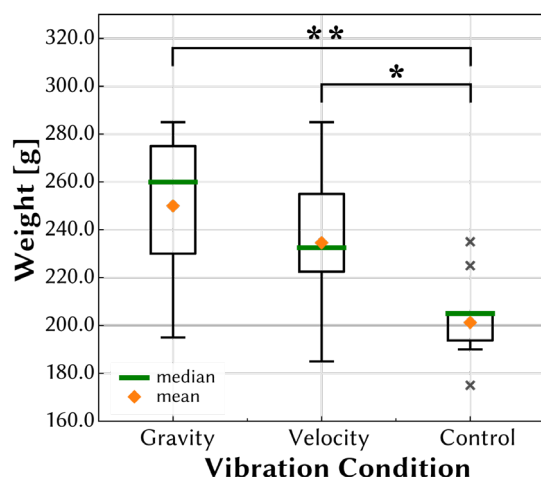


図 6 全被験者の刺激条件ごとの箱ひげ図. 基準試料は 200g. (\*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.5$ )

る時に抵抗感を感じ、振り下げる時には加速感・運動が促進される感覚が生じたという、意図しない感覚を報告する被験者が多かった。これは、振り上げる際には錯覚が生じていたが、振り下げる時には振動による反射が生じてしまっていた可能性がある。実験で提示する振動パターンで比較の前に錯覚が生起することを確認していても振り下げる際の加速感を報告する被験者がいたため、能動運動によって筋の状態変化したことが影響していたと考える。一方で、Gravity 条件では反射が起こったようにコメントする被験者はいなかった。Velocity 条件において振り下げる際に反射が生じた場合、力を感じる方向は Gravity 条件と同様になるため、重さの変化が Gravity 条件と同じようになった可能性がある。

本実験で設定した刺激条件によって重さ知覚が変化した理由を考える。第一に筋紡錘からの中枢神経系への信号も重さ知覚に貢献していることから [4]、腱振動により筋紡錘内の求心性神経の発火頻度が増加したことがより重く知覚されることに寄与した可能性がある。多くの被験者は Gravity 条件の方が重く知覚されており、中には Velocity 条件では重さ知覚が変化しない被験者もいた。したがって、筋紡錘への刺激だけでは説明できない要素があると考えられる。第二に動きが阻害されることによる運動の努力感の向上が重さ知覚の変化につながった可能性が考えられる [4]。実際に複数の被験者から動きが阻害されることによって、重くなったように感じられたとコメントしており少なくとも効果があったと考える。しかしながら、全刺激条件において重さ知覚がほぼ変化しなかった被験者は、重さ変化ではなく腕に外力が働いている感覚だったとコメントしていたことを考慮すると、抵抗感と重さの知覚の仕方にはある程度個人差があると考えられる。第三に、Pseudo-haptics と同様に運動の変位を錯覚することによって重さ知覚が変化した可能性が考えられる。本実験では腕の位置を映像で被験者にフィードバックし、運動量を統制していた。被験者から「刺激があった時に想定よりも腕を持ち上げられなかったから、重く感じた」とコメントがあったことより、

運動錯覚によって腕の運動量について視覚と自己受容感覚とでずれが生じることで重く知覚されたと考える。

## 5. おわりに

本研究は把持物体の特性の知覚に自己受容感覚が利用されていることを踏まえて、運動錯覚によって自己受容感覚を変化させることで物体の特性を変化し得るのではないかと考え、まず重さ知覚に着目し定量的な評価を行った。より重く知覚させることを意図した刺激条件の下、被験者には基準の重さを知覚してもらい、比較用の錘が基準錘に対して重いか軽いかを回答させ、刺激による重さ感覚の変化量を調査した。実験の結果として、設定した二種類の振動刺激の条件は刺激を提示しない条件に比べて統計的に有意により重く知覚された。さらに重力に拮抗する筋を継続的に刺激する条件が一番重く知覚される傾向にあった。以上より、物体を把持し運動をしている際に運動錯覚を生起させることで把持物体を重く知覚させることは可能であり、振動の提示するパターンによって効果が変化し得ると分かった。運動錯覚によって重さが変化した理由をさらに調査するために、運動錯覚によって把持物体を軽く知覚させる手法や、形状変化の提示する手法について調査を行う。

**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] Heo, S., Lee, J., Wigdor, D., "PseudoBend: Producing Haptic Illusions of Stretching, Bending, and Twisting Using Grain Vibrations," in UIST, 2019, pp. 803–813.
- [2] Ujitoko, Y., Ban, Y., "Survey of Pseudo-haptics: Haptic Feedback Design and Application Proposals," IEEE Transactions on Haptics, pp. 1–1, 2021.
- [3] Turvey, M. T., "Dynamic touch," Am. Psychol., vol. 51, no. 11, pp. 1134–1152, 1996.
- [4] Proske, U., Allen, T., "The neural basis of the senses of effort, force and heaviness," Exp. Brain Res., vol. 237, no. 3, pp. 589–599, Mar. 2019.
- [5] Taylor, M. W., Taylor, J. L., Seizova-Cajic, T., "Muscle vibration-induced illusions: Review of contributing factors, taxonomy of illusions and user's guide," Multisensory Research, vol. 30, no. 1, pp. 25–63, 2017.
- [6] Ushiyama, K., Takahashi, A., Kajimoto, H., "Modulation of a Hand-held Object's Property through Proprioceptive Stimulation during Active Arm Movement," in Extended Abstracts of CHI, 2021, pp. 1–6.
- [7] Taylor, M. M., Creelman, C. D., "PEST: Efficient Estimates on Probability Functions," J. Acoust. Soc. Am., vol. 41, no. 4A, pp. 782–787, 1967.