



# 多点同時振動刺激による運動錯覚の増強

Reinforcement of Kinesthetic Illusion by Simultaneous Multi-Points Vibratory Stimulation

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

Keigo USHIYAMA, Satoshi TANAKA, Akihumi TAKAHASHI, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, ushiyama@kaji-lab.jp)

2) 電気通信大学 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {tanaka, a.takahashi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

**概要:** 腱への振動刺激により運動錯覚が生じることが知られているが, 先行研究の多くは, 主に 1 点への振動刺激に対する錯覚の特性を調査するものであった. 2 つの協同筋の 2 点の腱を振動刺激した際の運動錯覚に関する研究は存在するものの, より多数の協同筋を同時に振動刺激した場合については調査されていない. そこで本研究では, より強い運動錯覚を生起させることを目的として, 腕、及び胸部に対して振動刺激を行い, 生起した運動錯覚の強さについて調査する.

**キーワード:** 腱振動刺激, 運動錯覚, 触覚インタフェース

## 1. はじめに

VR アプリケーションにおいて, 臨場感を向上させるために運動感覚は欠かせないものである. 現在, 運動感覚を提示するためには体験者に実際に運動をしてもらうような装置が用いられている. しかしながら, 物理的な運動を伴わずに運動感覚のみを提示できれば, 比較的コンパクトな装置を実現することが可能であると考えられる. そこで我々は運動錯覚という現象に注目した.

運動錯覚とは, 肢の位置や動きの感覚の錯覚のことであり, 腱に 100Hz 程度の振動刺激を加えることで生起することが知られている[1]. この錯覚は刺激した筋が伸びる方向に運動しているような感覚が生じる. 例えば上腕二頭筋の腱を刺激した場合は腕が伸展する錯覚が生起する.

生起する運動錯覚の方向は, 刺激する筋の機能に対応した方向である. 筋紡錘の発火頻度に対し振動周波数を対応づけることである程度意図した方向への肢の運動錯覚を提示することが可能である[2].

さらに, 運動錯覚を生起させるための条件についての先行研究も存在する. 手首の伸展方向の錯覚を生起させるための振動条件[3]や皮膚に対する振動子の押し込み力が一定以上あれば, 腱ではなく筋腹を振動刺激した場合でも運動錯覚を生起させることが可能であることが報告されている[4].

VR 応用のために運動錯覚を用いるならば, 実用に耐えうる強さの錯覚を生起させる必要がある. 錯覚を増強する方法としては, 振動周波数を変えること[5]や両端の腱を同時に刺激したり, 協同筋を刺激したりすること[6]が有効であるという知見がある.

そこで本研究では運動錯覚の更なる増強を目的として,

より多くの協同筋を刺激した場合に錯覚がどのように変化するか調査を行った.

## 2. 実験

### 2.1 実験セットアップ

実験システムを図 1 に示す. システムは振動提示部と計測部から構成される. まず, 振動の提示方法について述べる. ソフトウェア(Cycling '74 & M17 Max 7)により 70Hz の正弦波を生成しオーディオインタフェース(Roland, OCTA-CAPTURE)の 7 つのチャンネルに同じ信号を出力した. そしてアンプ (FX-AU DIO- FX202A/ FX-36A PRO)を通し, サポーターで身体に固定した 7 つの振動子(Acouve Lab Vp2 シリーズ Vp210)によって振動刺激を提示した. 生起した運動錯覚の方向や大きさを被験者に反対側の腕で表現してもらうために肩と手首にトラッカ(HTC Vive Tracker)を装着した.

### 2.2 実験条件

共著者 2 名を含む 21 から 25 歳までの右利きの男性を対象に実験を行った. はじめに 6 名に対し実験を行ったが 1 名実験に不備があったので追加実験を行い, 計 7 名に対して実験を行った.

本研究において, 振動を提示する際の姿勢, 及び振動子の位置と振幅は筆者による予備実験において錯覚が強く生起した条件に設定された.

振動子の位置を図 2 に示す. 本実験では腕が伸展する感覚が生じると予想される 7 ヶ所に対し, 振動刺激を提示した. 1 番は大胸筋鎖骨部, 2, 4 番は烏口腕筋, 3, 5 番は上腕二頭筋, 6 番は腕橈骨筋, 7 番は橈側手根屈筋などの手関節の屈筋の腱を想定した位置である.

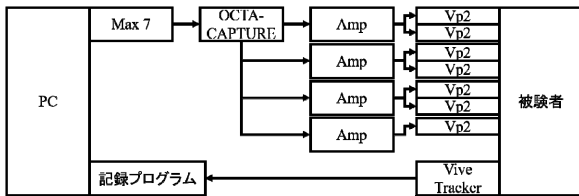


図 1 実験システムブロック図

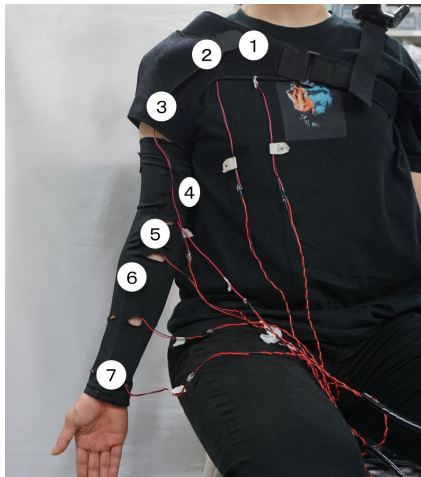


図 2 振動子の配置

振幅はそれぞれの位置で筆者の腕に振動子を固定した時に、振動の最大加速度が  $80 \text{ m/s}^2$  から  $100 \text{ m/s}^2$  になるように調整を行った。さらに実験時には、意図した振幅で提示が行われているか確認をするために、それぞれの被験者で代表として 5 番(図 2)の振動子の振動加速度の計測を行った。

### 2.3 実験手順

実験は椅子に座った状態で行った。また被験者に対し振動提示を行う際には事前に姿勢教示を行い、教示した姿勢になってもらうようにした。

実験装置を装着する時は腕、肩を触りながら位置を確認し振動子を配置していった。図 2 のように、1 番は鎖骨下部の肩側の位置に、2 番は烏口突起の下部に配置した。3 番は上腕二頭筋と三角筋との境に、4 番は上腕の内側の中間に配置した。5 番は肘関節の上部に、6 番は肘関節下部に、7 番は手関節に配置した。また、2、4 番は位置の判断が難しいので、実際に振動を提示し調整を行った。腕が細く振動子がサポータだけでは固定できない場合はマジックテープで固定するようにした。

装置装着後に、5 番の振動子(図 2)と皮膚との間に加速度センサ(SparkFun LIS331)を挟み、振動の加速度を計測した。加速度センサによって痛覚が生じることを避け、加速度のみの計測を分けて行った。

実験では、表 1 に示すような 3 種類の振動条件で刺激を行った。被験者ごとにすべての条件を異なる順番で提示を行った。また、追加した被験者は実験に不備があった被験者の提示順で実験を行った。

計測を行う前に、各条件をランダムに提示し、伸展方向

表 1 振動条件

条件	位置 (図 2 より)
条件 1	5 番
条件 2	5, 6 番
条件 3	1~7 番

に運動錯覚が生じるか練習を行った。最低で 6 回、最大で 9 回の振動提示を行うことで、被験者全員に伸展方向の運動錯覚が生起することを確認した。同時に、生起した錯覚と同じ角度になるように反対側の腕で表現を行ってもらい、各振動提示後には、錯覚の方向の明確さと錯覚の大きさの 5 段階評価を回答してもらった。

そして 5 分間の休憩の後、運動表現の計測を行う本実験を行った。振動条件を 1 回ずつ 10 秒間の提示を行い、それぞれの振動提示の間には 1 分間の休憩を設けた。また練習時と同様に運動表現と錯覚の評価をしてもらった。

実験中の疲労を避けるために、休憩中はリラックスした状態で振動提示する時のみ教示した姿勢になってもらうようにした。

## 3. 実験結果

実験に不備があった被験者を除き 6 名の実験結果のみを示す。

### 3.1 運動錯覚の評価

方向の明確さの評価の平均値と標準偏差を図 3 に示す。Friedman 検定の結果、条件 2 と条件 3 に関して有意水準 5% で有意差が見られた。条件 1 は被験者 6 人が 3 と回答したため、標準偏差は 0 になった。大きさの評価も同様に図 4 に示す。大きさについては、条件 1 と条件 3 の間で有意水準 5% で有意差がみられた。

### 3.2 運動錯覚の表現

運動表現をした腕の角度変化のグラフを図 5 に示す。このグラフは図 6 に示している肩のトラックの座標系における被験者ごとの y 軸周りの回転運動と、条件ごとの平均角速度をプロットしたものである。求めた値はグラフとともに図 5 に示す。

回転運動のグラフは手首トラックの座標を肩トラックの座標系の座標に変換し、初期値をオフセットとして角度の変化のみをプロットしたものである。また、直線的な変化をしていないデータも存在するが、変化の傾向を見るために最小二乗法により直線近似を行い条件ごとの平均角速度を求めた。

運動表現において、x 軸周りの回転も一部の被験者にある程度含まれていたが、予備実験より想定した運動は y 軸周りの回転であり、被験者それぞれの運動表現の主な成分は y 軸周りの回転であったので、今回は x 軸周りの回転を考慮しないこととした。正の値は伸展方向の回転、負の値は屈曲方向の回転を示す。

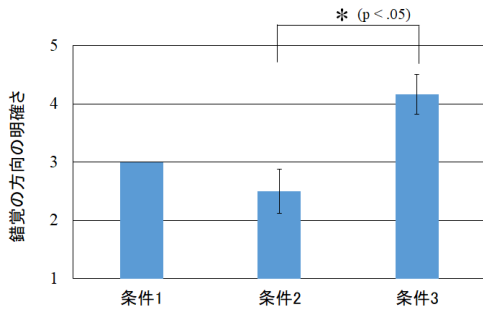


図 3 錯覚の方向の明確さ

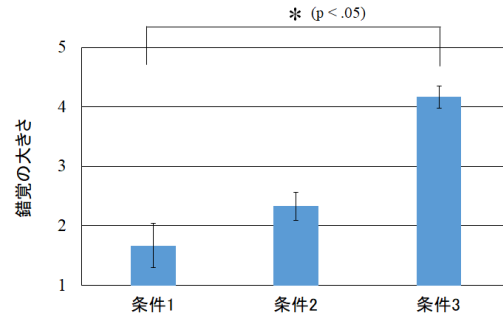


図 4 錯覚の大きさ

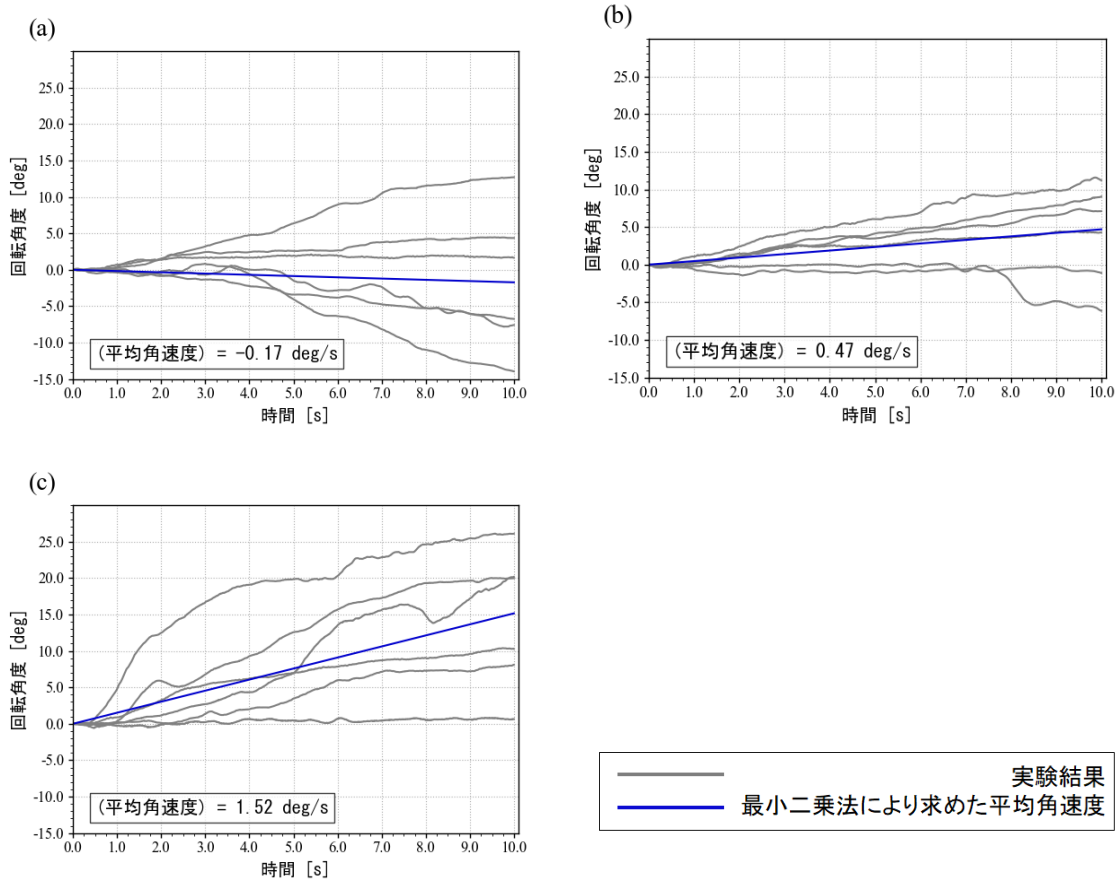


図 5 運動表現の実験結果と最小二乗法により求めた条件ごとの平均角速度のグラフ

(a) 条件 1, (b) 条件 2, (c) 条件 3

### 3.3 加速度の計測

5 番の振動子(図 2)の加速度は、被験者 4 名はおおよそ  $80\text{m/s}^2$  から  $100\text{m/s}^2$  の値になっていたが、マジックテープにより固定した 2 名の被験者の加速度は  $20\text{m/s}^2$  から  $40\text{m/s}^2$  まで減衰していた。

## 4. 考察

錯覚の方向は、条件 1、条件 2 において屈曲方向や外転方向に錯覚を感じたとコメントをする被験者がいたが、条件 3 においては全員が伸展方向の錯覚が生じたこと述べていた。さらに図 3 より、条件 3 は伸展方向に他の条件に比べて明確に錯覚が生じていたという特徴が見られる。

錯覚の大きさに注目すると、条件 2、3 の間で有意差は

みられなかったが、平均値としては二つの条件の間に差がある傾向があるように見え、標準偏差と比べて大きな差が存在する。したがって、振動子の数を増やし刺激する協同筋を増やすことは運動錯覚の大きさの増強に対し少なくとも効果がある。

図 5 より条件ごとの平均角速度の傾向を見ると、振動子の数が増えるにつれて増加していることが分かる。また、屈曲方向に運動表現をする被験者も段々と減少している。複数の被験者において運動表現が屈曲方向になってしまった理由は、緊張性振動反射が起こってしまい実際に筋の収縮が生じたからだと考えられる。しかし、振動提示をしている腕がほとんど動いていないが屈曲方向に運動表現をしている被験者もあり、屈曲方向に錯覚が生じていたと

いう可能性もある。

さらに被験者によって、錯覚の起こりやすさに大きなばらつきがあった。共著者を含めこの実験以前に運動錯覚を経験したことのある被験者は比較的強く運動錯覚が生じる傾向にあった。マジックテープでの固定による振動条件の変化や意図した位置を刺激できていなかった可能性、振動子のケーブルによる微妙な張力も錯覚に影響を与えたと考える。

各条件で強く伸展方向の運動錯覚が生じ、条件3において被験者の中で最も大きく運動表現をした被験者のデータを図7に示す。条件3の全体的なグラフの傾きを見ても約2.5 deg/sであり、先行研究[5]で報告された角速度と比較すると、上腕二頭筋と腕橈骨筋の腱を刺激した時と大きな差はない。したがって、刺激する協同筋を増やすことで錯覚を増強することは可能だが、単純に刺激点を増やすだけでは増強するのは難しく、他にどのような条件が必要か調査する必要がある。



図6 肩のトラッカの座標系

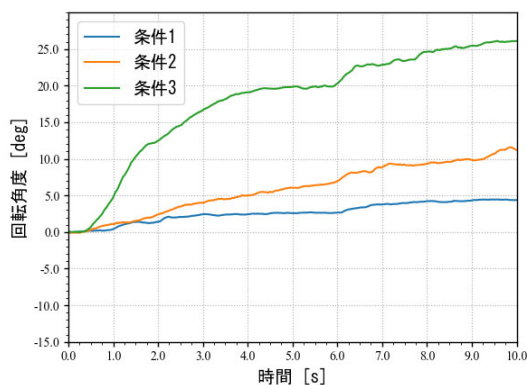


図7 全体的に強く錯覚が生じた被験者の角度変化のグラフ

## 5. おわりに

本研究では、刺激する協同筋を増やすことで腕の伸展方向の運動錯覚を増強することを試みた。刺激箇所を増やすことはある程度効果があることが判明したが、今回の実験では条件の数と被験者数が少ないことや振動条件の統制が取れていなかった点でデータが不十分であるので、刺激する協同筋を増やすことの効果をさらに調査していく必要がある。

将来的には、他の運動においてもより多くの協同筋を刺激することで生起する運動錯覚にどのような効果があるのか、同時に皮膚変形を行う[7]など他の感覚刺激と組み合わせることでより強い錯覚を生起できるか試みる予定である。

## 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] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and 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, pp. 705–748, 1972.
- [2] J. P. Roll, F. Albert, C. Thyron, E. Ribot-Ciscar, M. Bergenheim, and B. Mattei, "Inducing Any Virtual Two-Dimensional Movement in Humans by Applying Muscle Tendon Vibration.," *J. Neurophysiol.*, vol. 101, pp. 816–23, 2009.
- [3] 本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡徹, 大岡昌博, "振動刺激条件の相違が運動錯覚の誘発と知覚量に及ぼす影響," *TIVRSJ*, vol. 19, pp. 457–466, 2014.
- [4] F. Ferrari, F. Clemente, and C. Cipriani, "The Preload Force Affects The Perception Threshold of Muscle Vibration-Induced Movement Illusions," *Exp. Brain Res.*, vol. 237, pp. 111–120, 2019.
- [5] J. P. Roll and J. P. Vedel, "Kinaesthetic Role of Muscle Afferents in Man, Studied by Tendon Vibration and Microneurography," *Exp. Brain Res.*, vol. 47, pp. 177–190, 1982.
- [6] H. Yaguchi, O. Fukayama, T. Suzuki, and K. Mabuchi, "Effect of simultaneous vibrations to two tendons on velocity of the induced illusory movement," *2010 Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBC'10*, pp. 5851–5853, 2010.
- [7] D. F. Collins, K. M. Refshauge, G. Todd, and S. C. Gandevia, "Cutaneous Receptors Contribute to Kinesthesia at the Index Finger, Elbow, and Knee," *J. Neurophysiol.*, vol. 94, pp. 1699–1706, 2005.