



運動錯覚の惹起のために与える振動刺激の周波数と 腱の固有振動数の関連性の解明

Elucidation of relationship between vibration stimulation frequency inducing Kinesthetic Illusion
and tendon natural frequency

久保拓夢¹⁾, 小村啓¹⁾, 本多正計²⁾, 大岡昌博¹⁾

Takumu KUBO, Hiraku KOMURA, Masakazu HONDA, and Masahiro OHKA

1) 名古屋大学 情報学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

2) 静岡県工業技術研究所沼津工業技術支援センター (〒410-0022 静岡県沼津市大岡)

概要: 運動錯覚惹起に必要な振動刺激の周波数条件については、諸説あり未だ確定されていない。その原因として、腱の固有振動数に個人差があることが考えられる。そこで本研究では、腱固有振動数の個人差、負荷の印加による腱固有振動数の変化、および無負荷・負荷時の最適周波数を定量化した。その結果、負荷の印加に伴って腱固有振動数が増加してその結果最適周波数も増加するケースと負荷の印加によって最適周波数がむしろ減少する現象が認められた。

キーワード: 「運動錯覚」, 「振動刺激」, 「固有振動数」, 「力触覚-基礎」

1. 緒言

運動錯覚とは、腕や手首など四肢の腱器官に振動刺激を与えたとき、実際に四肢が動いていないにもかかわらず、あたかも動いているように感じる錯覚現象である。この現象は、皮膚上から腱に与えた振動刺激が筋紡錘に伝搬し筋が伸張されたと感じることによって引き起こされる[1]。

この錯覚を応用すると、複数の腱に適切な刺激を与えることで、人に運動を感じさせることも可能になる。これにより例えば、寝ながらにして他人の運動の追体験が可能になるような今までにない VR への活用が期待される。

このように運動錯覚を応用するためには、振動刺激の条件によって錯覚がどのように変化するかを調査する必要がある。しかし、腱に与える振動刺激の条件と四肢がどれくらい動いたかと感じる感覚の大きさ(錯覚量)の関係性について詳細な調査報告は十分でない。

そこで本研究では、四肢のうち手首部分の進展方向の錯覚について調査を進めてきた先行研究[2][3]に引き続き、振動刺激の周波数と腱の固有振動数の関連性を調査した。

2. 運動錯覚現象

運動錯覚とは、四肢の腱器官に振動刺激を与えたときに、実際には動いていないにもかかわらず、四肢の運動を知覚してしまう錯覚現象のことである。1972年に Goodwin らによって初めて報告された[1]。この現象は、筋紡錘(筋肉が弛緩し伸張されたときに発火する固有感覚受容器)を振動で刺激することで、筋紡錘が発火し、その信号を脳が受け取ることで生じるとされている。このとき、振動刺激によ

って強制的に筋紡錘を発火させることで、筋肉が伸長しているような動きを感じる。

過去に行われた研究では、腱の固有振動数と運動錯覚の生じる振動刺激の周波数が類似していることが分かった。しかし、振動刺激と腱固有振動数の関係については不明な点が多い。過去の研究[4]では、腱の固有振動数の値と、その腱での運動錯覚が強くなる振動刺激の周波数帯が類似することが分かった。そこで、本研究では、腱固有振動数の個人差が運動錯覚誘発のための振動刺激の周波数条件に影響すると考えた。つまり、腱の固有振動数と同じ周波数の振動刺激を与えれば、運動錯覚が強くと誘発できると考え、右手首の橈側手根屈筋に注目して調査を行った。

3. 実験 1

3.1 実験参加者

22歳から25歳の健常な男性5名(A, B, C, D, Eとする)が実験に参加した。参加者には予め実験内容の説明を十分に行い、同意を得た上で実験に協力してもらった。実験の内容は、事前に名古屋大学の倫理委員会で検討・承認されている。

3.2 実験装置

インパクトハンマー(DYTRAN Corp.5800SL)を用いた固有振動数測定装置(図1)では、右手首の橈側手根屈筋(FCR)(図2)にインパルスを与え、加速度センサ(DYTRAN Corp. 1051V2)で応答を観測する。インパルスハンマーおよび加速度センサの信号は計測フロントエンド(A&D Company AD-3661(WCAmini))に送られ、パソコン

上のソフト (A&D Company WCAPRO) を用いて FFT 解析を行う。これにより、腱の固有振動数を測定する。

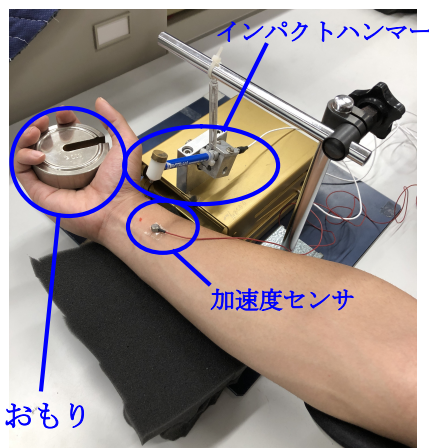


図 1 : 固有振動数測定装置

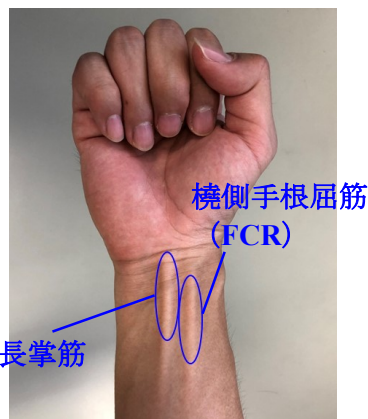


図 2 : 実験で使用する腱

3.3 実験方法

実験では、1 試行で右手首上の FCR にインパルスをおよそ 2 [s] おきに 10 回与え、60 [s] の休憩を設けた。この試行をおもり (0.5 [kg], 1 [kg]) を持った場合とおもりを持たない場合で行った。これにより、腱の固有振動数の個人差および腱に負荷を印加したときの固有振動数の変化を調査した。

インパルスを与える位置は図 2 に示す×印の場所とした。この点は FCR が皮膚表面の浅い位置にあり、腱が鮮明で、インパルス応答が伝わりやすい位置である。

また、被験者にはおもりの有無に関わらず、手首を曲げないようにしてもらった。

3.4 実験結果と考察

この実験で得られた FCR の固有振動数の測定結果を図 3 に示す。この結果、負荷のない状態において FCR の固有振動数は 46 [Hz] から 98 [Hz] となり、70 [Hz] を中心として ± 25 [Hz] 程の個人差があることが分かった。

また、負荷が大きくなるにつれて、固有振動数も高くなっていることが分かった。これは、弦の固有振動数 (基本振動) が、張力によって高くなる現象と同じだと考えられる。つまり、腱に負荷が印加されることによって張力が増大し、それにより固有振動数が高くなったためと考えられ

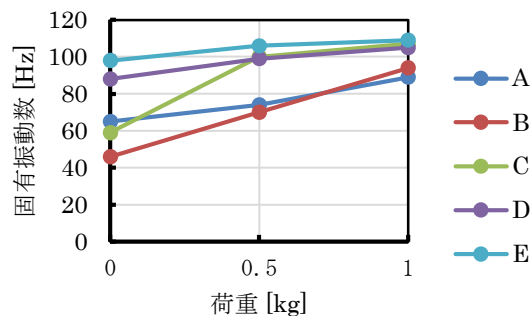


図 3 : おもりでの負荷の印加による腱固有振動数の変化

る。したがって、腱の固有振動数には個人差が存在し、腱に与える負荷の印加の大きさによって、腱の固有振動数は変化することが分かった。もし、腱の固有振動数が運動錯覚の振動刺激の周波数条件に影響するならば、負荷を印加して腱の固有振動数を高くした場合、運動錯覚を誘発させる振動刺激の周波数は高くなると考えられる。

4. 実験 2

4.1 実験参加者

22 歳から 24 歳の健常な男性 4 名 (F, G, H, I とする) が実験に参加した。参加者には予め実験内容の説明を十分に行い、同意を得た上で実験に協力してもらった。実験の内容は、事前に名古屋大学の倫理委員会で検討・承認されている。

4.2 実験装置

卓上型の運動錯覚誘発システム (図 4) を用いて、右手首の FCR に振動刺激を与える。これにより、手首関節に伸展方向へ曲がる錯覚を誘発させる。

まず、右手部の加振器の先端には、力センサが取り付けられており、腱への押し込み力を計測する。振動刺激の生成には、小型加振器 (EMIC Corp. 511-A) を用いる。ファンクションジェネレータ (nF Corp. WF1974) から電気信号を生成して、加振器先端部を通じて実験参加者に与える振動へ変換する。

運動錯覚で生じた錯覚量を測定するために、左手部にはロータリーエンコーダ (Maxon motor Corp. HEDS-5540) が取り付けられている。ロータリーエンコーダからの信号はマイクロコンピュータで角度に変換され、D/A 変換器を介して計測フロントエンドに入力される。

4.3 実験方法

実験 2 では、実験 1 と同じ位置に振動刺激を 30 [s] 呈示した後、30 [s] の休憩を設けた。これを 1 試行とし、振動刺激として 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 [Hz] の 9 種類の周波数をランダムな順番で全て与えて錯覚の変化を測定した。その後、それと同様の実験を右手首の進展方向に 5 [N] の負荷を印加した状態で行った。なお、全ての条件で振動刺激の加速度は 100 [m/s²]、腱への押し込み力は 0.2 [N] から 0.4 [N] の間とした。



図4：運動錯覚誘発システム

錯覚量は、右手首に感じた錯覚を左手首で再現してもらい、その角度をロータリーエンコーダで計測することで測定した。また、実験参加者には錯覚誘発に集中してもらうように、イヤーマフで聴覚を遮断し、目を閉じて視覚を遮断してもらった。

4.4 実験結果と考察

この実験において、無負荷時の結果を図5に、右手首に負荷を印加したときの結果を図6に示す。錯覚角度における正の値は手首が伸展方向に曲がったことを表す。無負荷時では、錯覚角度の範囲が1.5°~44°となっていて錯覚角度の個人差が大きい。図5から、被験者ごとについて最大の錯覚を生じる周波数（最適周波数）を調べると、F, G, H, Iについて、それぞれ80, 50, 100, 40[Hz]である。

一方負荷時の図6では、錯覚角度の範囲-5.6°~32°となり、これも個人差が大きいが無負荷時と比べて範囲が約5°狭まっている。また、手首が屈曲方向に曲がったと感じた結果もあった。最適周波数を被験者ごとに調べると、F, G, H, Iについてそれぞれ50, 60, 40, 80 [Hz]である。

以上の検討からわかるように、4人被験者の内GとIについては負荷時の最適周波数は無負荷時より上昇している。しかしFとHについては、負荷時の最適周波数がむしろ低下する結果となっている。これは、負荷時では筋の張力が大きくなり、筋の張力を検知するゴルジ腱器官が反応した結果、屈曲方向の感覚が表れて進展方向の錯覚量を低下させたのではないかと考えられる。

最適周波数について、過去の研究[1][2]では70~100Hzであったのに対して、現在の当研究室では50~60Hzとしている。このような食い違いがあるのは、右腕の状態が実験ごとに異なっていて、最適周波数を上昇させたり下降させたりする要因が組み合わさったためだと考えられる。

5. 結言

運動錯覚と腱の固有振動数の関連性を調査するため、腱の固有振動数および負荷を印加した時の腱の固有振動数を測定した。その結果、負荷を印加すると固有振動数が上昇することが分かった。また、負荷を加えた状態と加えない状態で運動錯覚誘発実験を行うことで、腱の固有振動数

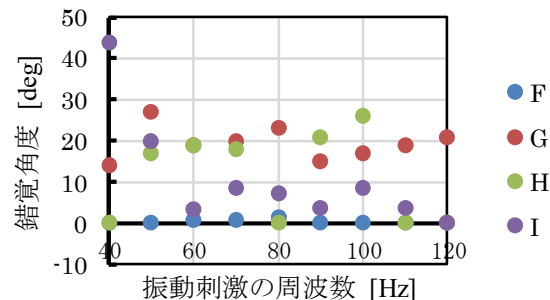


図5：無負荷時の運動錯覚の変化

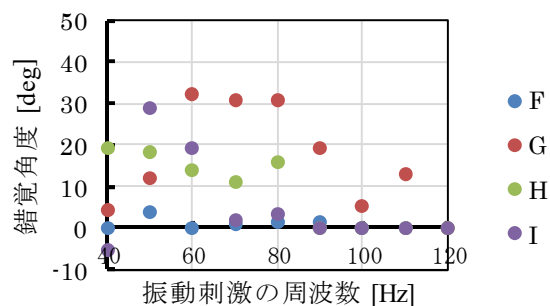


図6：負荷ありでの運動錯覚の変化

と最適振動刺激の周波数の関連性を議論した。今後、実験参加者を増やすとともに、固有振動数測定実験と運動錯覚誘発実験の被験者を紐づけるなどして、本研究で得られた知見の信頼性向上を目指す。

謝辞

本研究は、公益財団法人大川情報通信基金 2018 年度研究助成を受けたことを付記し謝意を表す。

参考文献

- [1] Goodwin, G M., McCloskey, D I, & Matthew, P.B.: Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception?, Science.175, pp. 1382-1384, 1972.
- [2] 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, 第19巻, 第4号, pp. 457-466, 2014.
- [3] 本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡徹, 大岡昌博: 卓上型運動錯覚誘発・評価装置の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 820, pp.1-12, 2014.
- [4] Komura, H., Ikeda, K., Honda, M., Ohka, M., Control method of kinesthetic illusion using natural frequency of tendon toward compact rehabilitation devices, 2019 IEEE/ASME AIM, pp.163-168, 2018.