



# 音楽体験における運動錯覚を用いたノリ動作提示

Music Induced Motion Presentation by Kinesthetic Illusion in Music Experience

成田叡賦<sup>1)</sup>, 中山翔太<sup>2)</sup>, 真鍋光希<sup>2)</sup>, 牛山奎悟<sup>2)3)</sup>, 田中叡<sup>2)3)</sup>, 溝口泉<sup>2)</sup>, 梶本裕之<sup>2)</sup>

Eifu NARITA, Shota NAKAYAMA, Mitsuki MANABE, Keigo USHIYAMA, Satoshi TANAKA, Izumi MIZOGUCHI  
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, narita@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, {nakayama, manabe, ushiyama, tanaka, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

3) 日本学術振興会

**概要:** 音楽に合わせて触覚刺激を提示することで音楽体験が向上することが知られている。我々はさらに音楽体験の中で身体を揺らす「ノリ」の動作に着目した。振動刺激による運動錯覚を利用し、この身体が揺れる感覚を提示することで音楽体験の向上を試みた。本稿では、複数の部位に対し運動錯覚による揺れる感覚を生起させ、音楽体験への印象変化を調査することで提案手法の基礎的検討を行った。

**キーワード:** 腱振動刺激, 運動錯覚, 音楽体験, クロス・マルチモーダル

## 1. はじめに

音楽体験を向上させるために、聴覚以外のモダリティの利用が数多く提案されている。例えば視覚的なエフェクトを用いることは一般に幅広く行われている。また音楽に合わせて振動など触覚刺激を提示する手法も多く提案されている。星野らは、シャワーから出る水流を触覚刺激とし、水流の強弱を音楽と同期させることで体験を向上させる手法を提案した[1]。Karamらは、振動子を取り付けた椅子型のデバイスを開発し、音楽の周波数ごとに振動子を個別に駆動し体験者に振動提示をすることで音楽体験を向上させる手法を提案した[2]。

こうした音楽体験向上のための聴覚以外のモダリティの利用の可能性の一つとして、「運動」があると考えられる。ライブイベントやヘッドフォンなどの音楽鑑賞において、鑑賞者には誘発的な身体動作がしばしば生起する。この身体動作は、ダンスのように異なる種類の動作が合わさったものや、一定の周期で同じ動作を行うものもある。本稿では、この単調な周期的な動作を「ノリ動作」と呼ぶ。ノリ動作は音楽に没入している際に気持ちが高揚することで生起する現象だと考えられる。

こうした身体運動と音楽体験への没入感の関係に着目し、筋電気刺激 (EMS) によって、ノリ動作を提示することで音楽体験の向上が試みられている[3]。一方で筋電気刺激は健常者が日常的に行うにはやや抵抗のある手法であ

り、長時間の刺激で筋疲労を生じる。また不随意に運動を生じさせることが、周囲環境への身体の接触等の問題を引き起こすおそれもあると考えられる。

我々は実際の物理的な運動ではなく、運動感覚のみを生じさせることで、同様の「ノリ動作」を主観的に発生させ、もって音楽体験が向上するのではないかと考えた。運動感覚を生じさせる手法としては運動錯覚を用いる。運動錯覚とは、腱に対して振動刺激を与えることで生起する四肢の動きや位置のずれの錯覚である。例えば、上腕二頭筋の腱に 100 Hz の振動刺激を与えると、腕に伸展方向への錯覚が生起することが知られている[4]。錯覚は筋が伸びる方向に生起する[5]。

運動錯覚は生起までに数秒の遅延があることが報告されており、錯覚強度にも一定の限界が存在する[6]。しかし、拮抗筋を交互に刺激することで、一つの筋への刺激と比較してより強い錯覚が生起することが報告されている[7]。さらに、継続的な EMS が前述のように長時間の利用に向かないのに対して、運動錯覚は運動感覚のみを生起させるため長時間の利用が可能だと考えられる。

本稿では、運動錯覚によって音楽体験を向上させられるか検討する。身体の複数部位への振動提示を音楽に合わせて行うことによって運動錯覚を生起させ、音楽体験への印象がどのように変化するか調査した。

2. 実験

実験には 21 歳～26 歳の男性 6 名が参加した。

3 種類の部位において、音楽の BPM に合わせて拮抗筋への振動刺激を切り替えることで、ノリ動作を提示した。被験者には錯覚の強度と音楽体験の楽しさについて評価してもらった。

2.1 実験システム

振動刺激と音楽刺激提示のシステムを図 1 に示す。

振動子 (Acouve Lab Vp2 シリーズ Vp210) は各部位条件において、腹側と背側に 2 個ずつ計 4 個をサポートまたは腹巻きで固定した。ソフトウェア (Cycling '74 & MI7 Max 8) によって 70 Hz または 220 Hz の正弦波を生成し、オーディオインターフェース (Roland, OCTA-CAPTURE) とオーディオアンプ (FX-AUDIO- FX202A/ FX-36A PRO) を通し腹側の振動子と背側の振動子を交互に駆動した。このときの切り替え周波数は、楽曲の BPM に合わせて、かつソフトウェア内で指定可能な値の範囲の限界である 2.016667 Hz に設定した。

音楽刺激の楽曲には、Aerosmith の「I Don't Want To Miss A Thing」を使用した[3]。この楽曲は BPM121, 4 拍子である。振動刺激の切り替わるタイミングと楽曲の拍子が一致するように、ソフトウェア内で振動刺激の開始と音楽刺激の開始を制御した。楽曲は振動子と同様にオーディオインターフェースよりヘッドフォンに出力された。

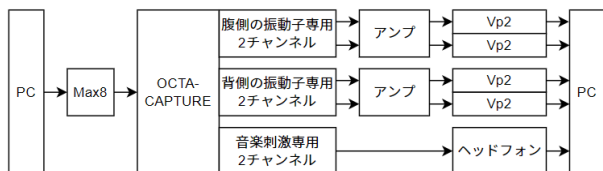


図 1 振動刺激と音楽刺激提示のシステム図

2.2 実験条件

振動刺激を提示する身体部位の条件は、首、腰、膝の 3 条件である。これらは、筆者の予備実験において錯覚が強く生じた、かつ自然なノリ動作である条件として設定された。振動子の位置を黄色の領域で図 2 に示す。本実験で刺激を提示する筋肉は、腹側が屈筋、背側が伸筋であり拮抗筋の対応関係にある。腹側に位置する振動子は伸展方向への運動錯覚を生起させ、背側に位置する振動子は屈曲方向への運動錯覚を生起させる。部位条件についてまとめたものを、表 1 に示す。首部の伸展方向の錯覚は胸鎖乳突筋 (図 2 上段左)、屈曲方向の錯覚は頸板状筋 (図 2 上段右)、腰部の伸展方向の錯覚は内腹斜筋 (図 2 中段左)、屈曲方向の錯覚は腸肋筋 (図 2 中段右)、膝部の伸展方向の錯覚は大腿四頭筋 (図 2 下段左)、屈曲方向の錯覚は大腿二頭筋 (図 2 下段右) の腱を刺激対象としている。

各部位条件において、周波数条件は 0 Hz (音楽刺激のみ)、70 Hz, 220 Hz の 3 条件を設定した。Naito らの研究

から、70 Hz では強い運動錯覚が生起、220 Hz では運動錯覚が生起しない条件[8]として報告されていることを踏まえ、本実験の周波数条件を決定した。

部位条件は被験者間で順序の重複がないようランダムに選択し、各部位条件における周波数条件も同様の方法で選択し実験を行った。

2.3 実験手順

振動子をサポートで配置した後、加速度センサを (Sparkfun, LIS331) を用いて較正を行った。各振動子の振動振幅は、70 Hz, 220 Hz の周波数条件それぞれにおいて加速度振幅が 80 m/s<sup>2</sup> になるようソフトウェア上のボリュームを統制した。このときの振幅の値はソフトウェア上で記録され、周波数条件を変える際には振幅の設定も同時にソフトウェア上で切り替えを行った。



図 2 部位条件における振動子の位置

表 1 部位条件

部位	伸展方向 (腹側)	屈曲方向 (背側)
首	胸鎖乳突筋	頸板状筋
腰	内腹斜筋	腸肋筋
膝	大腿四頭筋	大腿二頭筋

まず各部位条件で 70 Hz, 220 Hz の振動刺激そのものの快・不快について調査した。被験者に 15 秒間、実験で使

用する音楽の BPM に合わせて、腹側と背側で交互に振動刺激を提示した。刺激提示後、5段階リッカート尺度（1：快，5：不快）で回答してもらった。刺激提示の間は被験者に立位を維持してもらった。また刺激前に、実験担当者が被験者の目の前に指を立て、視線を向けてもらうことで姿勢の統制を行った。周波数2条件の順序は被験者内で固定し、被験者間で各順序の実験を行う被験者数が同数になるように選択した。

振動感覚評価を行った後、被験者にヘッドフォンを装着してもらい、周波数3条件において振動刺激と音楽刺激の提示を行った。音楽刺激の楽曲は1コーラスに相当する1分42秒間提示され、振動刺激は腹側と背側で交互に提示された。刺激提示後、7段階リッカート尺度で生じた運動錯覚の強度（1：錯覚はない，7：強い）、音楽体験の楽しさ（1：楽しくない，7：楽しい）について回答してもらった。また0 Hzの条件を除き、条件が終了するごとに被験者から錯覚と音楽体験についてコメントをもらった。なお、0 Hzの条件では錯覚が生起しないことは明らかなため、音楽体験の楽しさのみについて回答してもらった。刺激提示の間は、被験者に目を瞑ってもらい、かつ立位を維持してもらった。また振動感覚評価と同様に、刺激前に姿勢の統制を行った。

1つの部位条件が終了するごとに、被験者に2分間の休憩を設けた。すべての部位条件が終了した後、被験者からコメントをもらった。

### 3. 実験結果

被験者数が6人と少ないため、本実験の結果に対して統計的検定の結果については議論しない。

#### 3.1 振動感覚の快・不快

周波数条件ごとの振動感覚の快不快の評価の結果を図3に示す。70 Hz かつ首の条件では上限値が4.0、下限値が1.0と範囲が大きく、下限値は他の部位条件に比べ低い。70 Hz かつ膝の条件では分散がほとんどなく、中央値が3.0となった。220 Hzの条件では部位3条件とも範囲が等しくなった。

#### 3.2 錯覚強度

周波数条件ごとの錯覚強度の評価の結果を図4に示す。70 Hz かつ膝の条件では中央値が5.5と他の部位条件と比べて高い。また、同じ部位の220 Hzの条件の中央値は3.0と、70 Hzの条件のほうが高くなった。首においても同様に、70 Hzの条件のほうが中央値は高い。一方で腰においては、他の条件に比べ70 Hzと220 Hzで中央値にあまり差がない。

#### 3.3 音楽体験の楽しさ

周波数条件ごとの音楽体験の楽しさの評価の結果を図5に示す。首の条件では、70 Hzの条件における範囲が0 Hzの条件よりも大きく、下限値は0 Hzの条件よりも低い。膝かつ70 Hzの条件では、0 Hzと220 Hzの条件と比べて範囲が大きく、上限値が高くなった。腰の条件は、他の条

件と比較すると、どの周波数条件においても範囲があまり変わらない。

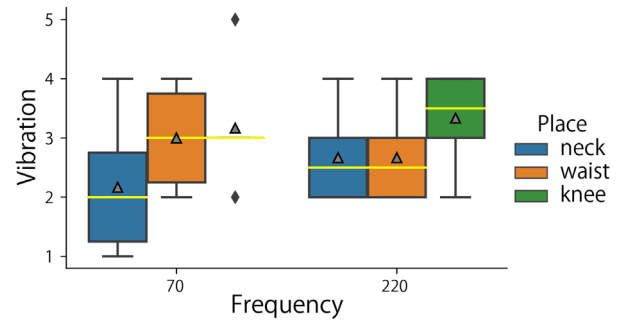


図3 周波数条件ごとの振動感覚の快不快の評価

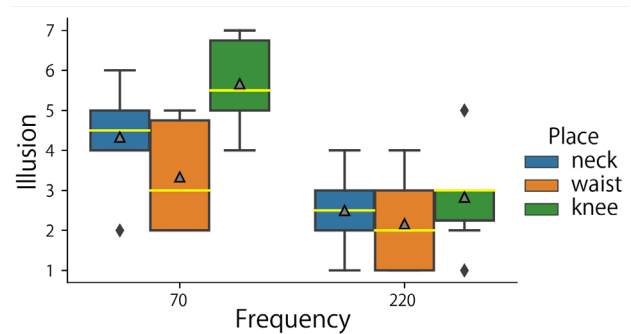


図4 周波数条件ごとの錯覚強度の評価

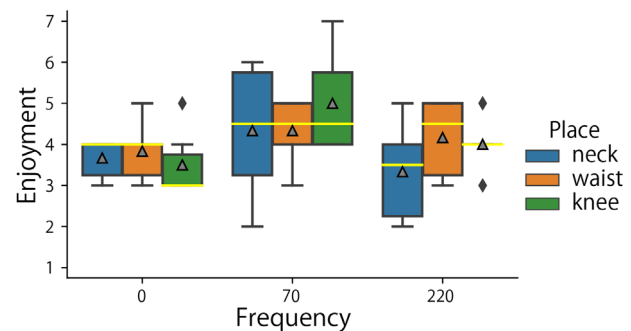


図5 周波数条件ごとの音楽体験の楽しさの評価

### 4. 考察

#### 4.1 振動感覚の快・不快

被験者は、おおむねどの部位条件においても周波数2条件間では振動感覚の快・不快があまり変わらなかったと考えられる。しかし被験者からは、首における低周波の振動が息苦しさやかゆみを生んだとのコメントがあった。首においては70 Hzの条件のほうを不快に感じた被験者と、周波数条件にかかわらず不快に感じた被験者がいたと考えられる。

#### 4.2 錯覚強度

被験者は、70 Hzの条件で膝と首において強い運動錯覚が生起したと考えられる。特に膝における周波数条件間の錯覚強度の差が大きく、複数の被験者から、倒れそうなほど錯覚が強くと生起したとのコメントがあった。70 Hzの条

件で腰においては、複数の被験者から、錯覚が弱かった、錯覚が生起しなかったとのコメントがあった。

被験者からのコメントによると、首の条件では首の前後の揺れの錯覚が生起し、腰の条件では腰の前後の揺れまたは上体の前後の揺れ、膝の条件では膝の屈伸または上体の前後の揺れが生起した。これらは予備実験で確認した運動錯覚であり、想定したノリ動作を提示できていたと考えられる。

#### 4.3 音楽体験の楽しさ

被験者は膝の条件において、周波数条件間における振動感覚の快・不快にあまり差がないことを踏まえ、運動錯覚によって音楽体験の楽しさが増幅されたことが示唆される。複数の被験者から、音楽に合わせて錯覚による揺れが生起したことでノリを感じられたとのコメントがあった。一方で、目を瞑って立っていたため、倒れそうなほど強く錯覚が生起し不安になったとのコメントもあった。よって体験の設計において、錯覚が生起する際の姿勢を考慮に入れる必要があると考えられる。また、錯覚が強く生起したために意識がそちらに向いてしまったとのコメントがあった。よって、むしろ振動の振幅を下げ錯覚強度を弱めることで、音楽体験と運動錯覚によるノリ動作をより自然に融合できる可能性がある。

首の条件においては、運動錯覚によって音楽体験の楽しさが向上した被験者がいる一方で、頭部付近の振動により逆に下がった被験者もいた。音楽体験の楽しさを下げた要因としては、先述した振動の不快さと、それに加え振動が頭に響くことで音楽体験を阻害されたとのコメントがあった。頭部に近い部位への振動提示でも、頭部に振動を伝搬させない方法を検討する必要がある。さらに 220 Hz の条件において、70 Hz の条件よりも音楽体験の楽しさが下がった要因としては、高周波の振動では振動音に音程が感じられ、音楽に大きな干渉があったとのコメントがあった。220 Hz の振動は、音楽体験の向上に適さないことが示唆される。

腰の条件においては、錯覚があまり生起しなかったことで音楽体験の楽しさも向上しなかったと考えられる。音楽体験の楽しさが向上した被験者は、錯覚ではなく振動刺激が寄与したとコメントしていた。

音楽体験の楽しさの評価で一様な結果が得られなかった要因として、普段音楽を聴く際にとるノリ動作の違いにより生じた個人差が考えられる。コメントより、普段音楽を聴く際に膝だけ動かすのではなく、足首や足の付根も一緒に動かしているという被験者がおり、膝ではリズムをとらず首でとるという被験者がいた。音楽体験の評価において、普段のノリ動作も加味すべき要素であることが示唆される。

## 5. おわりに

本研究では、運動錯覚によるノリ動作提示が音楽体験を向上させるのではないかと考え、心理評価実験を行った。

実験では首、腰、膝の部位 3 条件のそれぞれにおいて、音楽に合わせて拮抗筋に交互に振動提示し錯覚を生起させた。振動を提示しない条件と比較し、運動錯覚を提示する条件の方が音楽体験を向上させる傾向があった。同時に調査した振動感覚の快・不快の結果も踏まえると、錯覚の寄与が高いことが考察される。特に、膝における運動錯覚の提示が音楽体験を向上させる可能性があることがわかった。一方で、振動や姿勢による音楽体験の阻害があることもわかり、提示方法の改善が必要だと考えられる。今後は、提示方法の改善に加え、評価内容や条件の見直しを行い実験していく。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] 星野圭祐, 高下昌裕, 蜂須拓, 小玉亮, 梶本裕之, “Jorro Beat:シャワーを用いた全身触覚刺激装置による浴室における音楽体験の向上,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol. 18, no. 2, pp. 77–86, 2016
- [2] M. Karam, F. A. Russo, and D. I. Fels, “Designing the Model Human Cochlea: An Ambient Crossmodal Audio-Tactile Display,” IEEE Transactions on Haptics, vol. 2, no. 3, pp. 160–169, 2009
- [3] 三上紀一, 小川剛史, “音楽体験向上のための電気的筋肉刺激を用いた感情増幅手法の検討,” 情報処理学会研究報告(Web), vol. 2018-GN-103, no. 42, pp. 1–6, 2018
- [4] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. Matthews, “The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents,” Brain, vol. 95, no. 4, pp. 705–748, 1972
- [5] O. White and U. Proske, “Illusions of forearm displacement during vibration of elbow muscles in humans,” Exp Brain Res, vol. 192, no. 1, pp. 113–120, 2009
- [6] M. W. Taylor, J. L. Taylor, and T. Seizova-Cajic, “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
- [7] 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, no. 2, pp. 177–190, 1982
- [8] E. Naito, H. H. Ehrsson, S. Geyer, K. Zilles, and P. E. Roland, “Illusory Arm Movements Activate Cortical Motor Areas: A Positron Emission Tomography Study,” J. Neurosci., vol. 19, no. 14, pp. 6134–6144, 1999