

音楽体験向上のための電氣的筋肉刺激を用いた 感情増幅手法の検討

三上 紀一^{†1} 小川 剛史^{†2}

概要: 映画やライブなどのエンターテインメントの場で聴覚刺激や視覚刺激だけに表現方法を限定せず、他の感覚も用いたマルチモーダルなデバイスや手法が数多く提案されている。本研究では電氣的筋肉刺激装置を用いて音楽に合わせて指先で無意識にリズムを刻ませることで音楽への没入感を増強し、音楽体験を向上させる手法を提案する。本論文ではその提案システムの有効性を検証するために行った被験者実験について述べる。

キーワード: クロスモーダルインタフェース, 感情増幅, 電氣的筋肉刺激, 引き込み効果

Study On Emotion Enhancement Method Using Electrical Muscle Stimulation For Improving Music Experience

NORIKAZU MIKAMI^{†1} TAKEFUMI OGAWA^{†2}

Abstract: Many multimodal devices and methods using other senses have been proposed without restricting the expression method only to auditory stimuli or visual stimuli in entertainment places such as movies and live. In this research, we propose a method to enhance the music experience by improving the immersive feeling to music by inscribing the rhythm unconsciously with the fingertip according to the music using the electric muscle stimulator. In this paper, we describe subject experiments conducted to verify the effectiveness of the proposed system.

Keywords: cross-modal interface, emotional enhancement, electric muscle stimulation, pull-in effect

1. はじめに

近年、映画やライブなどのエンターテインメントの分野で聴覚刺激や視覚刺激だけに表現方法を限定せず、他の感覚も用いたマルチモーダルなデバイスや手法が数多く提案されている。例えば、4D シアタ[1]では、映像という視聴覚刺激に加え、風や香り、振動などの触覚刺激や嗅覚刺激を提示することで、より臨場感溢れる多感覚な体験を提供している。また、ライブでの音楽体験を向上させる取り組みとして、振動スピーカをジャケットに搭載した LIVE JACKET[2]がある。この装置は、ギターソロ、コーラス、ベースやドラムといった各楽器・各パートの音を、ジャケット内の各所に配置したスピーカを連動させて出力することで、ジャケットを着る者の全身を震わせ、まさに「音楽を着る」ような新しい音楽体験を提供している。これまでも音楽に合わせて触覚刺激を提示するクロスモーダルインタフェースに関する研究は盛んに行われており、音楽体験やそれに伴う情動を効果的に増幅できることが報告されている[3][4][5][6]。

本研究では、従来のようなスピーカを利用した音波刺激や振動モータを利用した振動刺激ではなく電氣的筋肉刺激

(Electric Muscle Stimulation, EMS)[7]を用いることにより、触覚刺激に加えて音楽に応じた身体動作を外部から強制的に提示する。音楽に合わせてリズムを無意識に刻ませることで、音楽への没入感を増強し、音楽体験を向上させる手法を提案する。

2. 関連研究

2.1 聴覚と触覚のクロスモダリティに関する研究

音楽への代替的なアクセス手段を提供したり、音楽体験を拡張したりするために、振動刺激[3][4]、音波刺激[5][6]、温冷覚刺激[8]などの触覚刺激を活用した手法が提案されている。振動刺激として振動モータを利用した例では、ジャケットに組み込んだ振動子を音楽に合わせて振動させることで音楽体験を向上させる研究[3]や携帯端末やウェアラブルデバイスでの同時利用を想定し音響に合わせて耳介を振動させることで感情喚起を促す研究[4]がある。音波刺激では、Nanayakkara らは、聴覚障害者や難聴者に音楽を伝えるために、触覚刺激が可能な椅子と音楽を視覚化するためのディスプレイを用いた手法[5]を提案している。この研究では、聴覚障害者の足や手、背中の位置に配置された音楽スピーカから単一の音楽信号を出力し、利用者に音楽

^{†1} 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
^{†2} 東京大学情報基盤センター

Information Technology Center, The University of Tokyo

を体験させている。椅子にボイスコイルを組み込み異なる周波数を人の背中に提示するデバイス[6]もある。ThermOn[8]は触覚刺激として、温冷覚刺激による感情増幅を試みている。音楽の文脈に合わせて温かさ・冷たさを効果的に提示することで、曲の印象が変化したり、快適さといった感情が増加したりしたことが報告されている。上記の例は、振動や温度などの触覚刺激を音楽に合わせて提示することで、音楽のみを提示する場合よりも、効果的に感情喚起を促せることを示している。今後の課題として、振動子やペルチェ素子を用いて同一の触覚刺激を加えるのではなく、個人の好みに応じた振動や温度を提示するためのキャリブレーション機能の実現が求められている。

本研究では、EMS を用いて筋肉の収縮を制御し、音楽に合わせて身体でリズムを刻ませることで音楽体験の向上を目指している。

2.2 引き込み効果に関連する研究

人は脳波、心拍、呼吸数、運動時の筋肉の緊張や弛緩などに常に生体リズムを伴っており、その生体リズムは自分とは異なる外界から感覚器官を通して与えられる周期的入力に影響を受け、その内外のリズムの間に同調現象を生じることがある。これを引き込み効果と呼ぶ。これまで、歩行者に対して周期的な音を与えることで歩行の安定化を行った研究[9]、ロボットの動作リズムを変化させることで人とのコミュニケーションにおいて引き込み効果を図った研究[10]や音楽的ビートを用いて映像的ビートの知覚に局所的な引き込み効果を及ぼす研究[11]が行われている。

本研究では、EMS を用いて曲に合わせて指先で無意識にリズムを刻ませることで、音楽体験を向上させる手法を提案する。聴覚と触覚のクロスモーダル知覚に加えて、無意識にリズム刻ませることで感覚器官を通して与えられる周期的入力に影響を受け、内外のリズムの間に同調現象を引き起こすことで音楽体験与える影響についても検討する。

3. 提案手法

3.1 電氣的筋肉刺激 (EMS)

人間の筋肉は、意識的に動かせる骨格筋のような随意筋と意識的には動かせない心筋や内臓筋のような不随意筋に分類される。身体を動かす際には、脳からの活動電位が神経網を通して骨格筋の末梢神経に伝えられ、対象筋肉を収縮させることで、関節など骨格の可動部を動かしている。EMS は、末梢神経に直接電気刺激を加えることで骨格筋を収縮させる技術である。筋肉に電極を挿入しなくても、皮膚に貼り付けた二つの電極間に電気信号を流すことで運動神経を刺激でき、医療分野だけでなくフィットネスやトレーニングなど様々な分野で利用されている。ヒューマンインタフェースやエンターテインメントコンピューティング

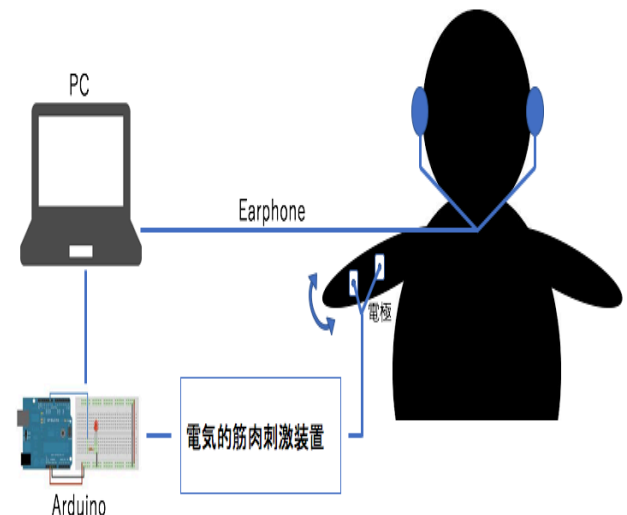


図2 システム概要

など研究分野においても、筋肉を直接制御でき、動かしたい箇所ではなく対応する筋肉がある箇所に電極を貼ればよい。そのため、人の実際の活動を阻害しないことから、EMSの応用が盛んに検討されている[12][13][14]。一方で、EMSは電極間の電気経路の中にある刺激対象ではない筋肉も収縮してしまう可能性があり、電極を貼る適切な位置や筋肉の動作量には個人差があるため注意が必要である。

3.2 刺激対象筋肉の検討

人は音楽を聴く際、音楽に没入するほど「ノリ」と呼ばれる音楽にあわせた身体的反応が現れる。本研究では、音楽にノッている際の身体動作を強制的に外部から発生させることで音楽体験の向上を試みる。音楽にノッている際の動作として、首を振る動作、足でリズムをとる動作、手でリズムをとる動作などが挙げられる。予備検討として、これらの動作をEMSで再現してみたところ、足や首をリズムに合わせて動かすことは対象となる筋肉が多いことなどから困難であった。そこで、足や首よりも動かし易く、個人毎のキャリブレーションも容易な前腕を今回の対象とした。前腕にある総指伸筋(図1)を刺激して手関節を背屈させ、リズムを刻ませることで音楽体験がどのように変化するかを検討した。

3.3 システム概要図

図2に本研究で利用したシステムの概要を示す。電気刺激装置には日本光電工業株式会社の医療用電気刺激装置(SEN-3401およびSS-203J)を使用した。本装置は、最大約100Vまで調整可能であり、人体への安全性を考慮して、定電流オーバー検出機能が内蔵されている。音楽をラップトップPC(Apple社MacBook Air)から再生し、EMSのトリガ制御をマイクロコントローラ(Arduino)により行う。PCからの操

作で刺激タイミング, 刺激時間, 周波数が調整可能である.
また電極は, 日本光電工業株式会社のディスプレイ電極 Vitrode F-150-Mを使用する.

4. 実験

EMSによって外部から与えられたノリ動作がユーザの音楽体験にどのような影響をあたえるのかを調査するために以下の二つの実験を行った.

実験1: 皮膚電位計測による心理評価

実験2: SD法による印象評価およびアンケート評価

4.1 システム概要

4.1.1 曲の選択

音楽のジャンルによってユーザの受ける印象に差が生じる可能性があると考えられる. 例えば, ロックミュージックはクラシックミュージックよりもリラクゼーションを高めながら興奮させる効用[15]がある. 本研究では, 曲にノリ動作としてリズムを刻ませることを考慮して, ロックソングの「I Don't Want To Miss A Thing (Aerosmith, Columbia)」[16]を選曲し, 曲の開始から一番のサビが終わる約100秒までを実験に用いた. 選択した曲における音圧の時間変化を図4, 5に示す. この曲は, 文脈に明確な転換があり, テンポ120BPM, 4拍子で規則的なリズムをとっている. 先行研究[7]でもこの曲が用いられており, 先行研究との比較を今後行う予定である.

4.1.2 EMS 提示パターン

EMS の提示は, 音楽のメロディと時間的同期性の二つの要素に着目して, 刺激を提示する時間を決定した. 音楽の三要素は, メロディ (旋律), ハーモニ (和声), リズム (律動) であると言われている. メロディは音の高さが時間とともに様々に変化し続けることで作られ, ハーモニは協和する音程を持つ複数の音が重なり合って時間とともに様々に変化することで表現される. リズムはメロディ音の強弱, 音色などが一定の規則性を保ちつつ時間とともに変化を続けることで作られる. EMS1 は曲のメロディとの対応に着目した刺激, EMS2 は曲のリズムとの対応に着目した刺激として, 下記のように定義した.

EMS1: 図4に刺激パターンを示す. 提示した曲は0秒から約31秒までがイントロ, 約31秒から約70秒までがAメロディ, 約70秒から約100秒までがサビに相当する. そこで, EMS1 では音楽の文脈変化[詩の開始(約31秒)とコーラスの開始(約70秒)]に着目し電気刺激を加えた. 詳しいタイミングに関しては, 前奏, Aメロディ1, Aメロディ2, サビ1, サビ2と0秒から約100秒を五分分割し音楽パターンを何種類か用意した上で, 被験者6名に対し一対比較法を行い決定した. 刺激パルス幅を

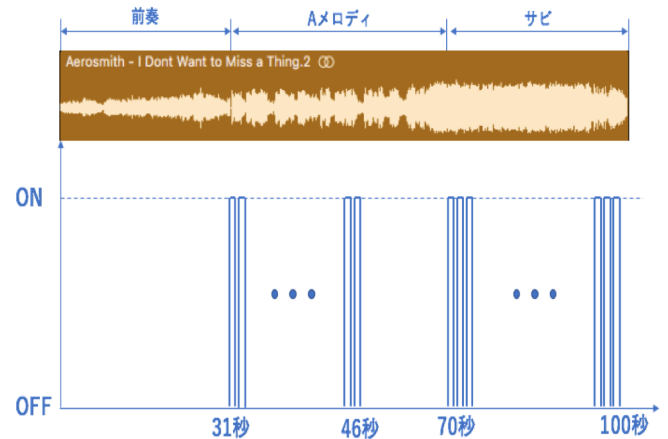


図4 音楽と EMS1

(曲のメロディに着目し電気刺激)

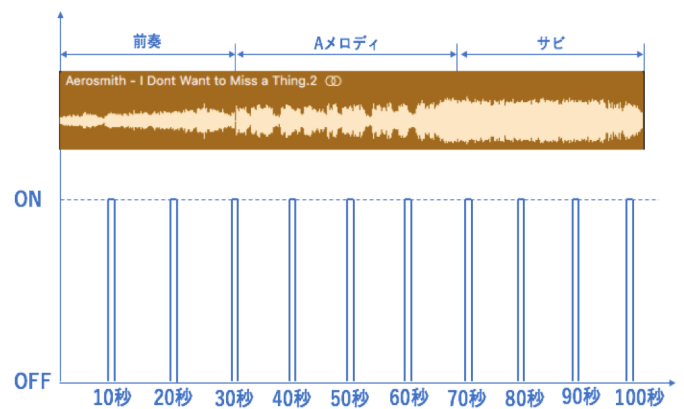


図5 音楽と EMS2

(音楽のメロディに関係なく電気刺激)

1000[ms], 刺激パルス間隔を2000[ms]に設定した. なお刺激提示時間は500[μs]とした.

EMS2: 図5に刺激パターンを示す. EMS2では音楽のメロディに関係なく10秒ごとに電気刺激を提示した. EMS1と同様に, 刺激提示時間は500[μs]で実験を行った.

4.2 実験1: 皮膚電位計測による心理評価

4.2.1 目的

音楽体験中に被験者の皮膚電位を計測することで, 音楽を聴いている際の緊張状態や興奮状態などの心理状態を定量的に測定する. 皮膚コンダクタンス反応 (Skin Conductance Response, SCR) とは, 電気皮膚反応によって皮膚の電気伝導度を測定する方法である. 人間は生物学的に皮膚を流れる電流の抵抗が発汗作用により低くなることわかっており, 人の汗腺は交感神経系によって制御されているため, 皮膚コンダクタンスは心理的または生理的覚醒の指標として使用されている. 音楽を聴いているときの感情状態を測定するために本実験ではSCRを使用する.

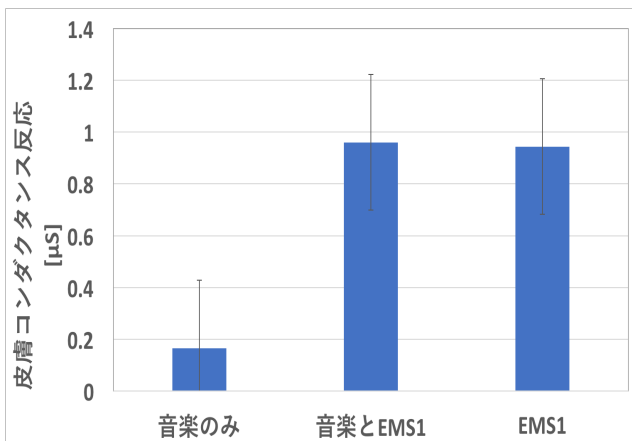


図 6 皮膚コンダクタンス反応

4.2.2 手順

被験者は健康な成人男性 11 名で、聴覚や触覚に対して特に異常は見当たらなかった。実験開始前に被験者ごとにキャリブレーションを行い、電気刺激の電圧を決定した。利き腕の総指伸筋の皮膚表面に電極を貼り、15V から 3V ずつ印加電圧を加え、痛みが生じない範囲での最大値を被験者の同意のもと刺激電圧とした。反対の手の指先には SCR 計測用の電極を貼り、音楽を聴くためのヘッドフォンを装着させた。SCR 計測には ProComp Infiniti (ThoughtTechnology 社)を使用した。提示した刺激条件は以下の通りである。

- 条件 1： 音楽のみ
- 条件 2： 音楽+EMS1
- 条件 3： EMS1

SCR の計測値は周囲の電子機器からのノイズに影響を受けるため、緩やかな増減を繰り返すことがある。そこで本実験では SCR の最大値ではなく、下式で表される SCR 値の時間的変化量で評価する。時刻 t に得られたコンダクタンスを $g(t)$ とする。また曲を流している間の最大条件 2 および条件 3 では、電気刺激が提示される 2 回提示されるため、評価では被験者が最初に電気刺激を受ける曲の開始後 31 秒から 15 秒間の計測値を抽出した ($\alpha = 31[s]$, $\beta = 15[s]$)。

$$\Delta g(t) = \max g(t) - \int_{\alpha}^{\alpha+\beta} \frac{g(t)}{\beta} dt$$

4.2.3 結果と考察

図 6 に提示した 3 条件における全被験者の SCR の平均値を示す。エラーバーは標準偏差である。1 名の被験者は実験前から発汗量が多く、他の被験者に比べて計測値が大きく変動したため外れ値とし、被験者 10 名の結果について解析した。各条件における平均 SCR は、0.147, 0.462 及び

0.302 [μS] であり、標準偏差はそれぞれ 0.166, 0.574 及び 0.681 [μS] であった。Barlett 検定により、条件間 (音楽のみ、音楽と EMS1, EMS1) での等分散性が棄却された ($df=2$, $p<0.01$)。そこで、Kruskal-Wallis 検定を行なったところ、条件間で有意差があった ($\chi^2=7.87$, $df=2$, $p<0.05$)。Tukey-Kramer 検定により多重比較を行なったところ、音楽と音楽と EMS1 間で有意傾向が見受けられた。本実験では順序効果を考慮していないため、今後、順序効果を考慮した検討も進める予定である。

4.3 実験 2：SD 法による印象評価およびアンケート評価

4.3.1 目的

音楽聴取時に EMS を付加することで音楽体験にどのような変化が生じるかを調査するため、SD 法による印象評価を行う。提示する印象語は文献[17]で用いられていたものと同様の語句を用いた。また、自由記述によるアンケート評価も行う。

4.3.2 手順

被験者は健康な成人男性 12 名で、聴覚や触覚に対して特に異常は見当たらなかった。実験 1 と同様に、実験開始前に被験者ごとにキャリブレーションを行い、電気刺激の電圧を決定した。利き腕の総指伸筋の皮膚表面に電極を貼り、15V から 3V ずつ印加電圧を加え、痛みが生じない範囲での最大値を被験者の同意のもと刺激電圧とした。提示した刺激条件は以下の通りである。

- 条件 1： 音楽のみ
- 条件 2： 音楽+EMS1
- 条件 3： 音楽+EMS2

これら 3 通りの刺激を体験させ、音楽体験の印象を図 3 に示す評価語に対して 7 段階 (評定値: -3~3) で評定させた。最後に自由記述によるアンケートも実施した。

表 1 アンケート評価語 [17]

	-3	-2	-1	0	1	2	3	
Dislike								Like
Boring								Interesting
Uncomfortable								Comfortable
Unenjoyable								Enjoyable
Calming								Exciting
Unlively								Lively
Dark								Light
Slow								Fast
Light								Heavy
Hard								Soft

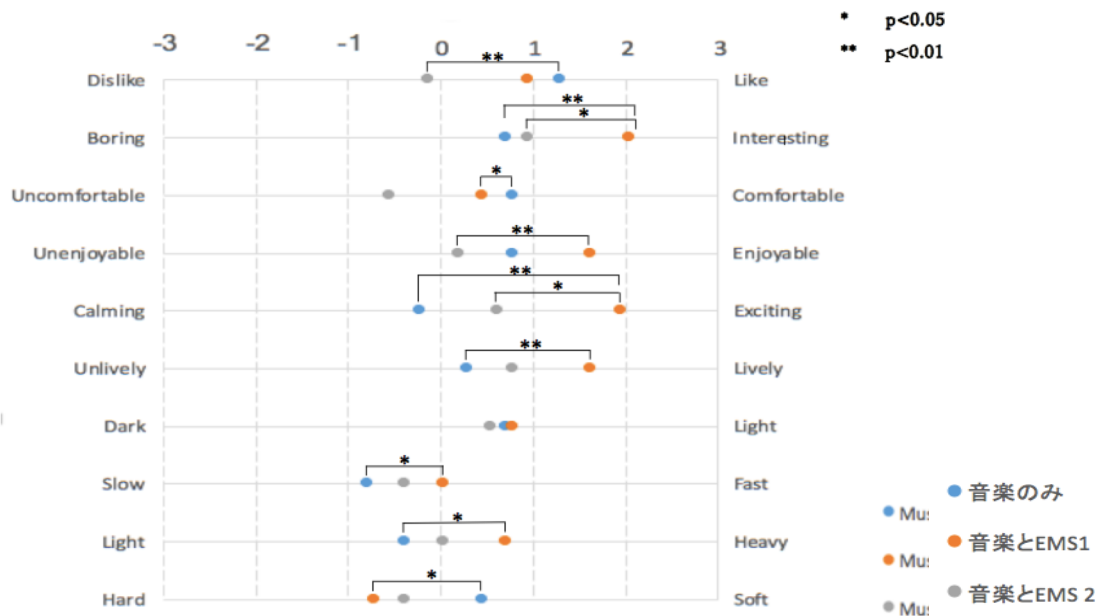


図7 SD法による印象評価

4.3.3 結果と考察

図7に実験結果を示す。各評価語に対する評定得点の平均値を示している。10つの評定語「Like」「Interesting」「Comfortable」「Enjoyable」「Exciting」「Lively」「Light」「Fast」「Heavy」「Soft」それぞれについて検定を行なった。Bartlett検定を用いて、条件間(音楽のみ、音楽とEMS1、音楽とEMS2)で分散が等しいかどうかを検定した。その結果、条件間で分散は均一と判断されたので($df=2, p>0.05$)、一元配置分散分析法を用いて平均に差があるかどうか検定を行なった。条件間で有意な差がみられた評定語($df=2, p<0.05$)に関しては、Tukey-Kramer検定により、多重比較を行なった。

「Interesting」「Enjoyable」「Exciting」「Lively」「Light」「Fast」「Heavy」において曲の文脈に合わせてEMSを提示する条件2は条件1および条件3よりも印象評価による評定得点が大きな値となった。特に「Interesting」「Exciting」において条件1と条件2および条件2と条件3との間に有意差が認められた。自由記述アンケートにあった「音楽のみに比べると曲に合わせて音楽に電気刺激があると高揚感があり興奮した」「とてもテンションが上がる。ライブ感があった」「初めての体験で非常に面白みを感じた」などの意見がこれらの結果に関連していると考えられる。

「Like」「Comfortable」に関しては、聴覚刺激のみを与えた条件1の場合が最も評定得点が高かった。条件1と条件3の間には有意差が認められた。「曲と自分が取りたいリズムとのズレがあり違和感があった」「電気刺激がいつ来

るのかわからないので集中力が途切れてしまった」「触覚刺激に集中してしまい、曲に対する没入感が減ったように感じた」などの意見があり、被験者によって刺激タイミングなどの時間的要求が厳しいこと、EMSに対する抵抗感や違和感があったことが影響している可能性がある。一方、EMSに対する違和感や抵抗感が少なかった被験者の中には、「無意識的にリズム感覚が身体に刻まれテンションが上がった」「指先が身体にあたることによる定期的なフィードバックも音楽体験を高めた気がした」「心地良いリズムが音楽への没入感を増した」などの引き込み効果を感じていたことが分かった。

「Fast」「Heavy」「Hard」に関しても、条件2における評定得点が最も高く、条件1と条件2の間に有意差が認められた。「体に低音が響くような感覚があった」「曲自体の激しさが変わった気がした」「和太鼓演奏を見ている時のような振動感を感じた」などの意見を得ており、音楽体験の際にEMSを効果的に加えることで重量感や曲への印象が変化すると考えられる。

5. おわりに

本稿では、EMSを用いて音楽に没入している際の身体動作を外部から強制的に提示することで、音楽体験を向上させる手法を提案した。具体的には、音楽に合わせて指先でリズムを無意識に刻ませることで、音楽への没入感を増強させた。被験者実験により、「Interesting」や「Exciting」といった感情を増幅させ、曲や音楽体験への印象が変化することが分かった。特に一部の被験者からは

周期的なリズムが提示されることでより音楽体験への没入感が増したといった意見が得られ、引き込み現象が表れていた可能性も示唆された。一方で、好きな音楽ジャンルやテンポなどの音楽嗜好性の相違や音楽経験の有無などの影響によって音楽に対するリズムの合わせ方やタイミングが異なること、EMS への意識の集中によって音楽への没入感が減少してしまうことなど触覚刺激を提示する上での課題も明らかとなった。今後はこれらの課題に取り組む予定である。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)(16K00266)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) <http://www.unitedcinemas.jp/4dx/>(最終参照日 2017,12,24)
- 2) <http://www.hakuhodo.co.jp/archives/announcement/38600/>(最終参照日 2017,12,24)
- 3) Lemmens, P., Cromptvoets, F., Brokken, D., van den Erenbeemd, J., de Vries, and G.-J., A Body-conforming Tactile Jacket to Enrich Movie Viewing, Proceedings of the IEEE World Haptics Conference, pp.7-12, 2009.
- 4) Aou, K., Ishii, A., Furukawa, M., Fukushima, S., and Kajimoto, H. The Enhancement of Hearing using a Combination of Sound and Skin Sensation to the Pinna, Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology 2010, pp.415-416, 2010.
- 5) Nanayakkara, S., Taylor, E., Wyse, L., and Ong, S., An enhanced musical experience for the deaf: design and evaluation of a music display and a haptic chair, Proceedings of the CHI 2009, pp. 337-346, 2009.
- 6) Branje, C., Karam, M., Fels, D., and Russo, F., Enhancing entertainment through a multimodal chair interface, Science and Technology for Humanity, 2009 IEEE Toronto International Conference, pp.636-641, 2009.
- 7) Brian, R., The Physiology of Neuromuscular Electric Stimulation, Pediatric Physical Therapy, Vol.9, No.3, pp.96-102, 1997.
- 8) Akiyama, S., Sato, K., Makino, Y., and Maeno, T., ThermOn-thermo-musical Interface for an Enhanced Emotional Experience, ISWC2013, 2013.
- 9) 渡邊淳司, 吉野治香, 安藤英由樹, 前田太郎, シューズ型インターフェイスを用いた歩行周期の誘導, Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan annual conference 6, pp.47-48, 2001.
- 10) Watanabe, T., E-COSMIC: Embodied Communication System for Mind Connection, Proc. of the 13th IEEE International Workshop on Robot-Human Interactive Communication RO-MAN 2004, pp. 1-6, 2004.
- 11) 長嶋洋一, 音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす引き込み効果, 芸術科学会論文誌, Vol.3, No.1, pp.108-148, 2004.
- 12) Max, P., Stefan, S., and Florian, A., Supporting Interaction in Public Space with Electrical Muscle Stimulation, Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication, pp. 5-8, 2013.
- 13) Ernst, K., Dieter, S., and Steffi, B., Using Neuromuscular Electrical Stimulation for Pseudo-Haptic Feedback, Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology, pp. 316-319, 2006.
- 14) Pedroc, Lc., Alexandrac, Ic., and Patrick, B., Impacto:

- Simulating Physical Impact by Combining Tactile Stimulation with Electrical Muscle Stimulation, Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 11-19, 2015.
- 15) 田川泰, 浦田秀子, 井口茂, 中野裕之, 石橋経久, 楠本真理子, 片田美咲, Saunders, Todd., 山口美和子, 松本愛, 山根幸子, クラシック音楽とロック音楽の相違による心理的ストレス反応と細胞性免疫能変化, Bulletin of Nagasaki University School of Health Sciences, p.89-94, 2002.
 - 16) <http://www.imdb.com/title/tt0120591/soundtrack/>(最終参照日 2017,12,24)
 - 17) Iwashita, T., An experimental study on the individual difference of affective meaning space, The Japanese Journal of Psychology 43, pp.188-200, 1972.