

音楽を聴くときにリラックス効果を高める耳孔振動刺激の最適化

○後藤 優太（東京都立大学），岡本 正吾（東京都立大学）

Optimization of Ear Vibration Stimulation to Enhance Relaxation When Listening to Music

○ Yuta GOTO (Tokyo Metropolitan University), and Shogo OKAMOTO (Tokyo Metropolitan University)

Abstract: Vibratory stimuli applied to the auditory meatus have been shown to enhance relaxation when paired with calming music. In this study, we deliver vibratory stimuli of constant intensity and frequency to the ear canal. However, the optimization of such stimuli for individual users has not been extensively studied. To address this, we utilized a central composite design and response surface methodology, combined with Bayesian optimization, to identify the optimal vibratory parameters for relaxation. A user study demonstrated that the optimized stimuli were rated as significantly more relaxing compared to the condition without vibratory stimuli.

1. 緒言

音楽や映画を含む視聴覚コンテンツ視聴時の感情体験は、それら視聴覚コンテンツの価値判断に影響するだろう。昔から、視聴覚コンテンツの体験時に身体へハプティック刺激を提示することで、そのコンテンツの感情体験を高める研究が行われてきた^{1)~5)}。例えば、ホラー映画のホラーシーンを視聴中に、上体へ振動刺激を提示することで、コンテンツ視聴時の主観的・生理的な恐怖感が上昇した²⁾。視聴覚コンテンツと同時に提示されるハプティック刺激として、上体への振動刺激が用いられることが多い^{1)~3)}。上体への振動刺激は、恐怖を含む、ラッセルの円環モデル⁶⁾における覚醒的な感情を増幅させる。しかしながら、リラックスを含む非覚醒的な感情を有効に増幅させない。

いくつかの研究が、迷走神経分布部位への機械刺激が副交感神経を賦活させることを示している^{7)~9)}。Leeら⁷⁾は、迷走神経の分布部位である耳孔海舟へ空気圧刺激を与えることで、副交感神経の賦活に関わる生体反応の変化が発生することを報告した。われわれの先行研究^{4),5)}で、リラックス音楽視聴時に耳孔へ機械刺激を与えることで、音を聞くときの主観的リラックスが上昇することを示した。先行研究⁴⁾では、振動刺激として、もとの音源のオクターブを変更した振動刺激および、もとの音源をAM変調した振動刺激を使用した。結果、曲ごとに異なる種類の振動刺激が、曲と組み合わせることでその曲の視聴時の主観的リラックスの度合を上昇させた。また、われわれは⁹⁾は、迷走神経分布部位である耳孔へ振動刺激を提示することで、主観的なリラックスのレベルが上昇することを示した。この実験では、参加者自身がリラックスできると感じられるように振動強度は調節された。

本研究では、周波数および強度が一定な振動刺激をリラックス音楽と同時に提示した。先の研究⁹⁾から、効果が高いとされる振動刺激には個人差があることが推察される。しかしながら、これまでに個人ごとにリラックス効果を高める振動刺激を実験的に最適化した

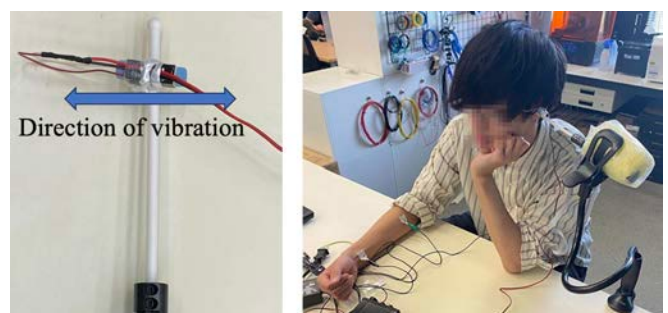


Fig. 1 Experimental apparatus. Left) Vibratory contactor for the auditory meatus. Right) Experimental scene. The vibration was delivered to the left ear.

例はほとんどない。本研究では、中心複合計画と応答曲面法によって、刺激の最適化を行う。さらに、Bayes最適化を組み合わせることによって、より効果的に最適解を決定できる可能性を追究する。上記の最適化手法は、試行回数を削減できることから、個人ごとの最適解を調査するための現実的な方法になりうる。本研究の結果は、エモーショナル・ハプティクス分野の発展に寄与する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1に、耳孔へ振動刺激を提示する装置を示す。この装置は、先端に直径8mmの樹脂球を有する。樹脂球は、ボイスコイルモータ（Haptuator MM3C, Tactile Labs Inc., Canada）によって振動する。樹脂棒は可動式アームによって机に固定され、参加者は可動式アームを動かすことで樹脂棒の位置および角度を調節できた。ボイスコイルモータはDAQボード（USB-6212, National Instruments Co., USA）を通してMATLAB（MathWorks Inc., USA）によって制御した。実験中、参加者は音を聞くために骨伝導イヤホン（Aeropex, Shokz, USA）を装着した。音と振動刺激はMATLABを用いて同期的に提示した。

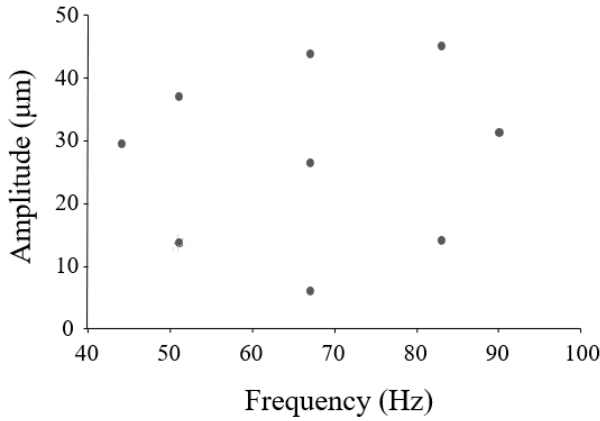


Fig. 2 Nine vibration stimuli determined by the central composite design. These were commonly tested by all participants.

2.2 音刺激

リラックスを喚起するための音刺激として、Lune¹⁰, Samidare¹¹, Unwind¹²の3曲を使用した。曲の長さはそれぞれ90秒間だった。音量は、実験の開始時に参加者がその音を最も心地よく感じる強度にあらかじめ調節された。各試行において、曲の再生開始点はランダムとした。

2.3 振動刺激

実験で用いた振動刺激の周波数および強度は、あらかじめ決められていたものと、実験中に逐一決定された2種類あった。

実験前半では、全参加者共通で、あらかじめ周波数と強度を中心複合計画により決定した9種類の振動刺激を使用した。Fig. 2に、実験前半で用いた9種類の振動の各振動の周波数および振幅を示す。周波数の範囲は44–90 Hz、振幅の範囲は、6.14–45.1 μmだった。振幅は、加速度計 (SHOWASOKKI Co. Ltd, MODEL-2302B) を用いて測定した振動方向の加速度から算出した。9種類の振動刺激のパラメータ (強度および周波数) の最大値および最小値は、著者による事前実験により決定した。その範囲内に、リラックス音楽と同時に提示したときに参加者が感じる主観的なリラックスの度合いが最も高くなる振動刺激が存在するようにした。9点内の中心点の強度および周波数はそれぞれ、各パラメータの最大値と最小値の平均値とした。

実験後半では、それまでに測定した参加者による主観評価に基づいて、そのときにもっとも評価値が高くなる可能性のある振動の周波数および強度を逐一計算した。Fig. 3に、実験中ある参加者に提示した振動刺激の例を示す。

2.4 振動刺激の最適化

実験の後半では、Bayes最適化を用いて、それまでに提示した刺激に対しての主観評価をもとに、次に提示する振動刺激の周波数および強度を決定した。Bayes最適化では、ガウス過程回帰を用いて目的関数の期待

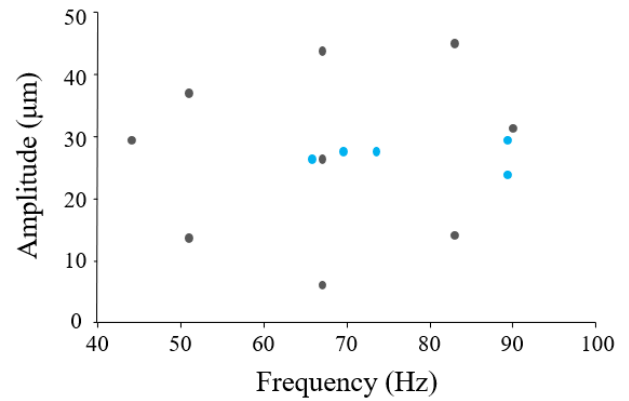


Fig. 3 Example of stimulus parameters determined by the Bayesian optimization method. Gray circles are those determined by the central composite design. Blue circles are those determined by the Bayesian method.

値と不確実性を推定する。さらに、求めた目的関数の期待値と不確実性から獲得関数を計算する。そして、獲得関数が最も大きくなる独立変数の組合せを求めるという最適化手法である。中心複合計画にBayes最適化を組み合わせることによって、中心複合計画と応答曲面法で得られる最適解よりも優れた解が得られる可能性がある。

本研究で用いたBayes最適化の獲得関数には、信頼性上限関数 (Upper Confidence Bound) を用いた:

$$a(\mu, \sigma, N) = \mu + \left(\sqrt{\frac{\log N}{N}} \right) \sigma. \quad (1)$$

$\mu(f, A)$ は任意の振動の周波数 f および振動の強度 A の組合せに対する参加者の応答 (主観的なリラックスの度合い) の期待値, $\sigma(f, A)$ はその標準偏差, N はそれまでに行われた実験の試行回数を示す。カーネル関数には、式 (2) の Gaussian Kernel を用いた。ここで、 $\mathbf{x}, \mathbf{x}' = (f, A)^T$ は任意の振動の周波数および振動の強度からなるベクトルである。

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \theta_1 \exp\left(-\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}{\theta_2}\right) \quad (2)$$

$|\bullet|$ は L^2 ノルムである。カーネル関数のハイパーパラメータ θ_2 は、著者らによる事前の実験により決定した。

2.5 実験手順

参加者は音源ごとに、音を聞きながら、周波数および強度が異なる振動刺激を連続で体験した。それぞれの刺激の体験時間は、15秒とした。刺激を体験したのち、参加者はキーボードを用いて、刺激を体験していた際に感じたリラックスの程度を9段階 (1–9) で回答した。アンケートを回答したのち、最低5秒の間隔を空けて、次の試行が開始された。

参加者には、まず最初にあらかじめ設計された10種類の振動刺激がランダムな順で提示された。ここには、中心複合計画で設計した9種類の振動刺激と振動が提

示されない条件が含まれた。振動が提示されない条件は2回提示され、他の刺激は1回ずつ提示された。振動が提示されない条件においても、参加者は樹脂棒を耳孔に接触させた。

実験後半（12 試行目以降）では、それ以前に提示された、無振動条件を除くすべての振動条件における参加者のアンケートの回答をもとにした Bayes 最適化により、提示される刺激を決定した。この試行は、最大で5回続けられた。5回以内で、Bayes 最適解が収束した場合には、その時点で実験を終了した。収束判定は以下のとおりとした。あるタイミングで求めた最適解と、その直近で求められた最適解について、周波数の差が $\Delta f = 4.6 \text{ Hz}$ 以下であり、振幅の差が $\Delta A = 4.27 \mu\text{m}$ 以下であるとき、解が収束したと判定した。 Δf および ΔA は、それぞれの提示範囲の最大値と最小値の差の0.1倍である。

上記の刺激が提示されたのち、もう一度、最後に提示した振動刺激を参加者はテストした。以上から、それぞれの参加者について最大で1曲につき17試行が実施された。Bayes 最適化による刺激が提示された回数の平均は、3.5回（標準偏差1.0回）であり、17試行が実施された参加者はまれであった。

上記の手順を3曲分繰り返した。3曲が試験される順序は参加者ごとにランダムとした。

2.6 データ分析

参加者ごとに、無振動条件のときの主観評価の値と、実験で提示された最後2回の振動が提示されたときの主観評価の値の差を比較した。主観評価の値の比較には、1標本の t 検定（within-participants design）を用いた。

2.7 実験参加者

実験参加者は、20代前半の健常な男女7名（男性5名、女性2名）であった。すべての参加者は実験の目的を知らなかった。

3. 結果

Fig. 4に、無振動条件でのリラクスの主観評価値および、Bayes 最適解が提示された条件（各個人、各曲での最後の2試行）での主観評価値の箱ひげ図を示す。最適化された振動刺激に対する回答のほうが有意に大きかった（ $t(20) = 3.84, p < 0.01$ ）。

4. 結論

参加者はリラックス音楽と同時に、最適化された耳孔への振動刺激を体験し、振動が提示されない場合と比べて、よりリラックスできると報告した。振動刺激のパラメータは、中心複合計画および Bayes 最適化を用いて最適化されたものであり、15回程度の試行回数で、振動パラメータが決定された。

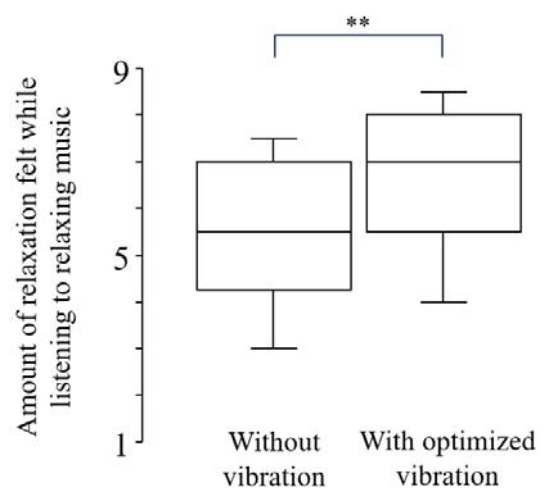


Fig. 4 Box-whisker plots of subjective relaxation levels. (Left) Without-vibration condition. (Right) With-optimized vibration condition. ** indicates a significant difference at $p < 0.01$.

参考文献

- [1] G. Karafotias et al. Intensifying Emotional Reactions via Tactile Gestures in Immersive Films. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications* 13.3, pp. 1–17, (2017). doi: 10.1145/3092840.
- [2] T. Makioka, S. Okamoto, and I. Tara. Fear magnified by vibratory stimuli to the upper-body at predictive horror scenes. *2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics*. (2022), pp. 570–572.
- [3] P. Lemmens et al. A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. *World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. (2009), pp. 7–12. doi: 10.1109/WHC.2009.4810832.
- [4] Y. Goto and S. Okamoto. Relaxation Effects of Auricular Vibration Stimuli Synchronized with Music. *International Symposium on Affective Science and Engineering ISASE2024.0*, pp. 1–4, (2024). doi: 10.5057/isase.2024-C000019.
- [5] Y. Goto and S. Okamoto. Stroking Stimuli to the Ear to Enhance Pleasant and Non-arousing Feelings while Listening to Sounds. *International Journal of Affective Engineering* 23.3, pp. 251–258, (2024). doi: 10.5057/ijae.IJAE-D-23-00019.
- [6] J. A. Russell. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology* 39.6, p. 1161, (1980).
- [7] H. J. Lee et al. Exploratory Investigation of the Effects of Tactile Stimulation Using Air Pressure at the Auricular Vagus Nerve on Heart Rate Variability. *Annals of Rehabilitation Medicine* 47.1, pp. 68–77, (2023). doi: 10.5535/arm.22119.
- [8] A. A. Boehmer et al. Acupuncture at the auricular branch of the vagus nerve enhances heart rate variability in

- humans: An exploratory study. *Heart Rhythm O2* 1.3, pp. 215–221, (2020). doi: 10.1016/j.hroo.2020.06.001..
- [9] Y. Goto and S. Okamoto. Vibratory stimuli to external auditory meatus to cause subjective relaxation. *2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics*. (2024).
- [10] Lune. <https://www.youtube.com/watch?v=ucRQph70hmc>.
- [11] Samidare. <https://recochoku.jp/song/S1012400917/>.
- [12] Unwind. <https://www.youtube.com/watch?v=zPyg4N7bcHM&t=206s>.