



乳様突起への骨伝導振動刺激が上下ベクションに与える効果の 検証

近藤哲太¹⁾, 平尾悠太郎¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 雨宮智浩^{1,2)}

Tetsuta Kondo¹⁾, Yutaro Hirao¹⁾, Takuji Narumi¹⁾, Tomohiro Amemiya^{1,2)}

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {t_kondo,hirao,narumi,amemiya}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

概要: 近年, 視覚誘導性自己運動感覚であるベクションはアトラクションや VR 体験などにおける移動感覚提示手法として広く利用されている. 本研究では大掛かりな装置を用いることなく座った状態のユーザにより強い移動感覚を提示する手法として乳様突起への骨伝導振動刺激を提案し, その有用性を検証した. 実験の結果, 上下ベクションにおいて骨伝導振動刺激による自己運動感覚強度の増大およびベクション持続時間の延長が確認された.

キーワード: ベクション, 自己運動感覚, 骨伝導振動刺激 (BCV), 多感覚統合

1. はじめに

静止している観察者に対して一定方向に運動する視覚パターンを提示すると, 実際には動いていないにも関わらず視覚とは逆方向に動く自己運動を知覚することが知られている. このような自己運動感覚をベクションといい, 停車中の電車内で隣の電車が動き出した際に自分の乗っている電車が動き出したと感じるのはその一例である. このような錯覚を利用すると, 限られた実空間内でより大きな空間を移動する体験が可能となるため, 遊園地でのアトラクションやドライブシミュレータなどバーチャル空間の移動感覚提示手法として広く利用されている. 移動感覚提示において, より強い自己運動感覚を生起させることは重要であり, そのために映像と同期した動きや振動を実際に身体に提示するモーションプラットフォームが用いられることがある. しかしながらこのような手法は大掛かりな装置が必要となり設置可能な環境は限られる. また近年, 大掛かりな装置を用いることなくより強い自己運動感覚を生起させる手法として電流による前庭感覚刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation; GVS)[1] が提案されているが, 侵襲性の懸念 [2] が指摘されている. そこで本研究では小型かつ侵襲性のないデバイスでより強い移動感覚を提示する手法として, ベクション体験時に乳様突起への骨伝導振動刺激を行う手法を提案し, その有用性を検討する.

Weech らは乳様突起への 500Hz の骨伝導振動刺激が回転ベクションのベクション潜時を短縮させることを明らかにしている [3]. しかしながら, 先行研究では回転ベクションに与える効果の検証に限られており, 直線ベクションに与える効果については明らかとなっていない. これを踏まえ予備的な検討を行った結果, 直線ベクションの中でも上下

ベクションが自己運動感覚や VR 酔いにつながる不快感を生起しやすく骨伝導振動刺激の効果が現れやすいことが示唆された. 上下ベクションは飛行体験など現実では体験が困難な体験を表現するうえで重要であり, VR コンテンツ作成における貢献も大きいと考えられる. そこで本研究では, 骨伝導振動刺激が上下ベクション体験へ与える効果の有無を検証すると同時に, 骨伝導振動刺激の振動数による効果の違いにも注目し, 実際に骨伝導振動刺激を VR コンテンツと併用する際の設計指針を探る.

本手法における我々の仮説は, 乳様突起への骨伝導振動刺激が前庭系へのノイズとなり, 前庭感覚情報の信頼度を低下させ, 自己運動知覚における視覚情報が優位となることでベクションが促進されるというものである. この仮説は, Weech ら [3, 4] が主張しているものと同様であり, 感覚統合においては各々の感覚情報の信頼度に応じた重みづけがなされるという最尤推定モデル [5, 6] に基づいた仮説である. 一方で, 骨伝導振動刺激による眼球運動への影響によってベクション体験が変容する可能性も考えられる. 実際, 乳様突起への骨伝導振動刺激によって眼球運動が引き起こされること [7], 眼球運動が自己運動感覚知覚に影響を与えること [8] がそれぞれ知られており, 骨伝導振動刺激がベクション体験に与える効果を検証するうえで眼球運動の影響は無視できないと考えられる. そこで, 本研究ではベクション体験中のアイトラッキングデータも取得し, 眼球運動の要因も考慮に入れて仮説の妥当性について議論する.

2. 実験

着座状態の参加者に対し, 上下方向へ加減速を繰り返すような映像を HMD によって提示すると共に, 乳様突起へ

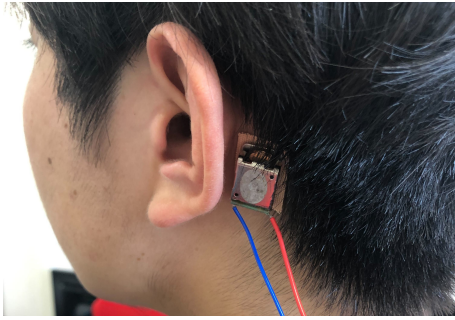


図 1: 骨伝導トランデューサ装着の様子

骨伝導振動刺激を提示した。全ての試行において、実験参加者には自己運動感覚が生起している間コントローラのトリガを引いてもらい、各試行後には自己運動感覚強度及び不快度を整数評価尺度 (Numeric Rating Scale; NRS) で回答してもらうことでベクション体験の主観的評価を行った。実験参加者は前庭機能に障害がなく、聴覚過敏ではない学生 15 名 (うち女性 1 名, 平均年齢 22.7 歳) であった。

2.1 実装

2.1.1 骨伝導振動刺激

本実験では骨伝導振動刺激提示のために骨伝導トランデューサ (電子通商) を用いた。提示の際には Python で生成した波形を Unity で再生し、デジタルアンプ (Lepy LP-2024A+) を用いて増強した。骨伝導トランデューサは図 1 のように乳様突起 (耳の後ろ辺り) に装着した。装着に際して、トランデューサと皮膚が直接接触れるのを防ぐためにキネシオテープを使用し、皮膚にキネシオテープを貼り、その上から両面テープでトランデューサを貼り付けた。また、実験中にトランデューサが剥がれたり、皮膚から浮いたりしないよう、最後に上から骨伝導イヤホン (AfterShokz Aeropex) を装着した。なお、骨伝導イヤホンは固定の目的で使用し、刺激装置としては使用していない。

2.1.2 視覚刺激

実験では HMD として VIVE Pro Eye (片目あたり解像度 1440 × 1600 ピクセル, リフレッシュレート 90Hz, アイトラッキングセンサ搭載) を用いて映像を提示し、バーチャル空間の実装には Unity を用いた。実験で用いたバーチャル空間は半径 4m, 高さ 10m の円筒上にランダムに半径 0.1m の白い球 1000 個 (約 4 個/m²) が配置された環境光のない真っ暗な空間であり、カメラおよび点光源が円筒の中央に配置された。ベクション体験時はそれらの白い球全てが上もしくは下方向に直線的に動き、円筒内で運動が繰り返された。参加者はバーチャル空間内のカメラから見える映像を HMD 内で観察し、球の運動方向と逆方向への自己運動感覚 (ベクション) を知覚すると考えられる。

2.2 実験方法

実験で用いた骨伝導振動刺激条件は振動なし・125Hz・250Hz・500Hz・1000Hz・2000Hz の 6 条件であった。振動のある 5 条件については各振動数ごとに骨伝導トランデューサの振幅をレーザー変位計を用いて計測し、振動数間で振

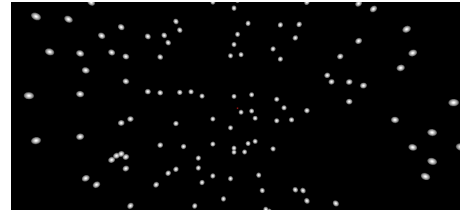


図 2: 実験で用いた視覚運動刺激

動エネルギーが一定となるよう事前にボリュームを統制した。実験中は環境音や雑音などの聴覚情報を遮断するため、参加者は耳栓を着用した。参加者は骨伝導トランデューサおよび耳栓の装着を終えると、まず実験で使用する骨伝導振動刺激 6 条件を体験し、それぞれについて主観的音量を 1 (非常に静か) ~7 (非常にうるさい) の 7 段階 Likert 尺度で回答した。その後 HMD を被り、VIVE コントローラを手を持った状態で椅子に座りベクション体験を開始した。参加者は以下のような流れでベクション体験を行った。

1. 真っ暗なバーチャル空間に白い球と 1 つの赤い点が表示され (図 2), 赤い点の方向に頭及び視線を向ける。
2. 映像が提示されて 6 秒が経過すると赤い点のみが消滅し、その 4 秒後に白い球が運動を開始する。
3. 白い球は上下どちらかの方向に向かって、1m/s² で 7 秒間加速、7m/s で 1 秒間等速運動、1m/s² で 7 秒間減速、0m/s で 1 秒間等速運動という一連の加減速運動を 3 回繰り返す。
4. 3 回の加減速が終了 (開始から 58 秒経過) するとバーチャル空間上に「自己運動感覚強度を 0~100 で、不快度を 0~10 で回答してください」という文章が表示され、参加者は回答を実験者に口頭で伝える。
5. 約 15 秒休憩

骨伝導振動刺激は映像が提示されてから運動が終了するまでの 58 秒間いずれかの条件で常に提示され続けた。また、参加者はベクション体験中に自己運動感覚が少しでも生じた場合、コントローラのトリガを引き続けるよう指示を受けた。実験では 1.~5. を 1 試行として、上方向の運動 6 試行、下方向の運動 6 試行、その後 5 分以上の休憩を挟み、再び上方向の運動 6 試行、下方向の運動 6 試行と計 24 試行行われた。運動方向ごとの 6 試行内で骨伝導振動刺激条件 6 条件がランダムに配置された。なお、実験開始前に 1 試行練習を設ける、運動方向について参加者に事前に告知を行うなど慣れや想定外の運動による自己運動感覚への影響をできるだけ小さくした。また、自己運動感覚強度については 0 が「自分は全く動いておらず、球のみが動いている感覚」、100 が「球は止まっていて自分が完全に動いている感覚」と説明し、不快度については音の不快度は考慮せず映像体験のみによる不快度を回答するよう注意した。

ベクション体験が全試行終了した後、HMD、骨伝導トランデューサ、耳栓を外し、体験についての感想などを回答してもらいインタビューを行った。

2.3 評価方法

本実験では整数評価尺度（NRS）による自己運動感覚強度および不快度の評価、ベクシオン体験中のトリガ操作によるベクシオン潜時およびベクシオン持続時間、VIVE Pro Eye のアイトラッキング機能による眼球運動を評価指標として用いた。全ての評価指標において、得られたデータから振動刺激条件ごとに4試行分の平均値を算出し解析に用いた。以下に評価指標ごとのデータ処理について示す。

自己運動感覚強度・不快度: 各試行後にそれぞれ101段階、11段階のNRSで回答してもらった値をそのまま評価値とした。

ベクシオン潜時: ベクシオン潜時とは視覚刺激が運動を開始してから自己運動感覚が生起するまでの時間のことで、3回の加減速運動において運動が開始されてからトリガが引かれるまでの時間をそれぞれ求め、3つの平均値を算出した。

ベクシオン持続時間: 本実験では運動開始から終了までの間に自己運動感覚が生起していた時間のことをベクシオン持続時間と呼ぶこととし、各試行ごとにトリガが引かれていた合計時間を算出した。

眼球運動: 運動開始から運動終了（映像提示から10秒後から58秒後）までの48秒間においてフレーム間の垂直方向の角度の変位を合計し1秒間あたりの変位に換算することで、1秒あたりの上下方向の角度変位を算出した。なお、瞬きなど何らかの影響でデータが取れていないフレームに関してはデータを除外して計算した。

3. 結果

本実験の目的は骨伝導振動刺激による前庭へのノイズが上下ベクシオン体験にどのような影響を及ぼすかを調査することであり、音が体験に与える効果を調査するものではなかった。しかしながら、本実験で用いた骨伝導振動刺激の周波数は人間の可聴域に含まれるため、一部の参加者からは骨伝導振動刺激の影響よりも音の影響が回答に大きく寄与しているとみられるコメントや結果が得られた。そこで、できるだけ音の影響を除外した解析を行うため、今回は主観的音量アンケートにおける6条件の評価の中央値が5より大きかった参加者3名および回答に音の影響が大きく反映されていたとみられる参加者2名を除いた計10名のデータを解析に用いた。

自己運動感覚強度、不快度、ベクシオン潜時、ベクシオン持続時間、眼球運動の5項目について骨伝導振動刺激の有無による差があるかを調べるために、振動なしをコントロール条件として振動あり5条件との組み合わせ全5通りに対しWilcoxon符号付順位検定を行った。有意水準は5%とし、Holm法による補正を行った。

自己運動感覚強度については振動なしと振動ありの全ての組み合わせ間で有意差が見られた ($p < .05$)。ベクシオン持続時間については、振動なしと125Hz間および振動なしと500Hz間で有意差が見られ ($p < .05$)、振動なし

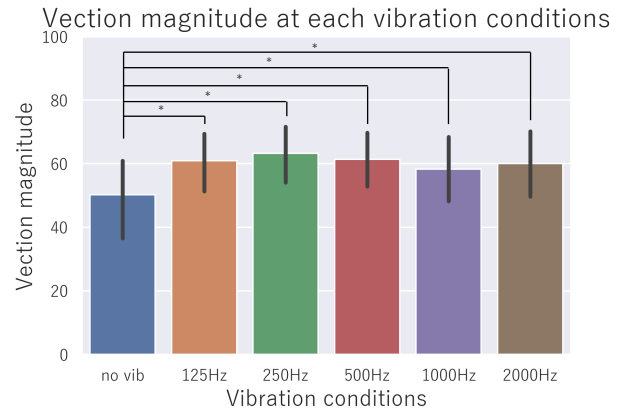


図3: 振動条件ごとの自己運動感覚強度 (*: $p < .05$)

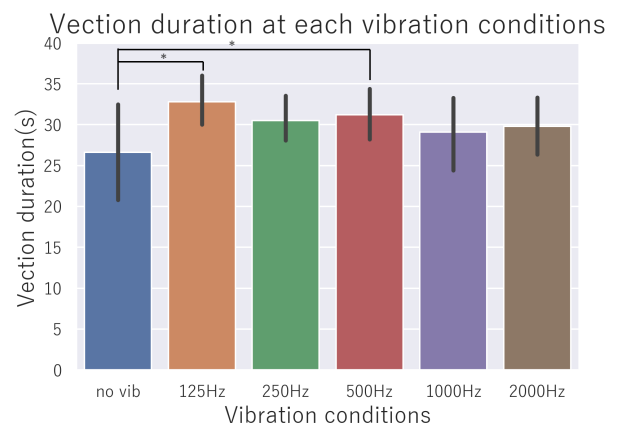


図4: 振動条件ごとのベクシオン持続時間 (*: $p < .05$)

と250Hz,1000Hz,2000Hz間では有意差は見られなかった ($p > .05$)。不快度、ベクシオン潜時、眼球運動の3項目については振動なしと振動ありの全ての組み合わせ間で有意な差は見られなかった ($p > .05$)。有意差が確認された自己運動感覚強度、ベクシオン持続時間の結果のみを図3, 4に示す。

4. 考察

骨伝導振動刺激の全ての周波数条件において振動なし条件より自己運動感覚強度が強くなることが示された。また、眼球運動に関しては骨伝導振動刺激の有無による違いが見られなかったことから、自己運動感覚強度の変化は眼球運動によるものではないと考えられる。これらは、乳様突起への骨伝導振動刺激が前庭系のノイズとなり、前庭感覚情報の信頼度が低下し、自己運動知覚における視覚の手がかりが優位となることでベクシオンが促進されるという我々の仮説を支持する結果となった。

不快度に関しては本手法によって前庭感覚情報の信頼度が低下することで視覚-前庭感覚の感覚統合におけるコンフリクトが減少し、VR酔いが発生しにくくなると予想したが、今回の実験では骨伝導振動刺激による不快度の低下は確認されなかった。これは、VR酔いには視覚、前庭感覚に加えて座面からの触覚情報などの体性感覚の関与も大きい

ことが要因の一つであると考えられる。

ベクション潜時に関しては、先行研究における回転ベクション時のベクション潜時短縮と同様、上下ベクションでもベクション潜時の短縮が確認されると予想したが、今回の実験では骨伝導振動刺激による差は見られなかった。今回ベクション潜時短縮が見られなかったことに関して、加減速間の時間が1秒間で毎回同じであったために参加者がある程度運動を予想してトリガを引いて回答することが出来たことが1つの要因であると考えている。また、ベクション持続時間については125Hzと500Hzでのみ骨伝導振動刺激による持続時間延長の効果が見られた。これは臨床分野における、乳様突起へ骨伝導振動刺激周波数が200-400Hzのときに前庭誘発筋電位（VEMP）反応振幅が最大となるという研究結果[9]と類似しており、500Hz以下の刺激周波数が前庭系へのノイズとしてより有効である可能性を示している。しかしながら、1000Hz、2000Hzは他の周波数に比べて主観的音量が大きく、注意が振動音へ向きやすかったことが原因である可能性もあり、効果的な骨伝導振動刺激の周波数についてはさらなる検証が必要である。

今回の実験は前庭系へのノイズとして骨伝導振動を用いることでベクション体験にどのような変化が見られるかを検証するものであったが、骨伝導振動によって生じる音への注意がベクション体験に大きな影響を与えることも確認された。今回の解析では振動刺激の主観的音量が大きく、振動音に注意が向けられたと考えられる5名の参加者を解析から除外したが、5名のうち4名は振動なしの方が振動ありよりも自己運動感覚強度が大きいと回答した。これは注意が視覚よりも聴覚に向いたことで視覚による自己運動知覚が減衰してしまったことが原因であると考えられる。また、今回解析に用いた10名についても振動音による影響がないとは言い切れない。耳栓による遮音が十分でなく、振動あり条件においてより周囲の環境音が聞こえづらくなることで自己運動感覚が生じやすかった可能性も考えられる。

本実験により振動音への注意がベクション体験に大きく作用することが明らかとなった。我々の目指すところは骨伝導振動刺激を用いて映像と関連する音源やBGMを再生することでVRにおける移動感覚を向上させるという応用である。そのため、実用においては振動音による没入感の低下の影響はほとんどないと考えられる。しかし、実験では振動音の影響をできるだけ排除する必要があるため、今後の実験では骨伝導振動刺激の大きさを小さくする、音響のみによる刺激をコントロール条件とするなどしてさらなる検証を行う。

5. おわりに

本研究では乳様突起への骨伝導振動刺激が前庭系へのノイズとなり自己運動知覚が促進されるという仮説のもと、骨伝導振動刺激が上下ベクション体験時の自己運動感覚強度および不快度に与える効果を検証した。結果、骨伝導振動

刺激を行ったときに骨伝導振動刺激がないときと比較して自己運動感覚強度が増大し、ベクション持続時間が延長されることが確認された。一方で、骨伝導振動刺激が不快度やベクション潜時に与える効果は今回の実験では確認されなかった。本実験では振動音による影響を大きく受けた可能性が高いと考えられ、今後は振動音による影響を打ち消すよう条件設定の見直しを行い、骨伝導振動刺激がベクション体験に与える効果についてさらなる検証を行う。

謝辞 本研究はDMM.comの支援、およびJSPS科研費21H04883、22H03628の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] J. Cress, L. Hettinger, J. Cunningham, G. Riccio, M. Haas, and G. McMillan, "Integrating vestibular displays for ve and airborne applications," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 17, no. 6, pp. 46–52, 1997.
- [2] B. Lenggenhager, C. Lopez, and O. Blanke, "Influence of galvanic vestibular stimulation on egocentric and object-based mental transformations," *Experimental Brain Research*, vol. 184, no. 2, pp. 211–221, 2008.
- [3] S. Weech and N. F. Troje, "vection latency is reduced by bone-conducted vibration and noisy galvanic vestibular stimulation," *Multisensory Research*, vol. 30, no. 1, pp. 65–90, 2017.
- [4] S. Weech, J. Moon, and N. F. Troje, "Influence of bone-conducted vibration on simulator sickness in virtual reality," *PLOS ONE*, vol. 13, pp. 1–21, 03 2018.
- [5] M. O. Ernst and M. S. Banks, "Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion," *Nature*, vol. 415, no. 6870, pp. 429–433, 2002.
- [6] H. Hou and Y. Gu, *Multisensory Integration for Self-Motion Perception*. 01 2020.
- [7] E. D. Cornell, A. M. Burgess, H. G. MacDougall, and I. S. Curthoys, "Bone conducted vibration to the mastoid produces horizontal, vertical and torsional eye movements," *Journal of Vestibular Research*, vol. 25, no. 2, pp. 91–96, 2015.
- [8] J. Kim and S. Palmisano, "Eccentric gaze dynamics enhance vection in depth," *Journal of Vision*, vol. 10, no. 12, pp. 7–7, 2010.
- [9] K. Sheykholslami, M. Habiby Kermany, and K. Kaga, "Frequency sensitivity range of the saccule to bone-conducted stimuli measured by vestibular evoked myogenic potentials," *Hearing Research*, vol. 160, no. 1, pp. 58–62, 2001.