



前庭感覚電気刺激により生じる 主観的視野運動に姿勢が与える影響

黒川晴生¹⁾, 中村文彦²⁾, 杉本麻樹³⁾

1) 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 (〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, haruki0128@keio.jp)

2) 立命館大学 情報理工学部 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, f-naka@fc.ritsumeai.ac.jp)

3) 慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 (〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, sugimoto@ics.keio.ac.jp)

概要: 本研究では、座位、側臥位、仰臥位の 3 姿勢での、前庭感覚電気刺激による主観的視野運動への影響を検討した。HMD(Head Mounted Display) を用いた新たな計測システムで計測を行い、主観的視野運動の回旋角度と前庭感覚電気刺激に対する位相遅れについて分散分析によって評価を行った。実験結果からは、位相遅れについては有意差が示されなかったが、回旋角度については側臥位と仰臥位で有意差が示された。

キーワード: 前庭感覚電気刺激, 前庭動眼反射, 姿勢

1. はじめに

これまで、バーチャルリアリティ分野において、体験者の臨場感や没入感の向上を目的として、前庭感覚提示の方法が模索されてきた。アクチュエータなどで制御されたモーションプラットフォームを利用した手法 [1] が用いられてきた。しかし、この手法では装置が大型になり、使用場面が限られるという問題があった。

一方で、前庭感覚提示の新たな手法として、前庭感覚電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation, 以下 GVS) [2] が提案されている。GVS はもともと前庭疾患の検査などで臨床的に使用されてきた手法で、両耳の後ろの乳様突起部に貼り付けた電極間に微弱な電流を流すことで、直接的に前庭感覚を提示することができる。装置を小型でウェアラブルに設計することが可能なため、体験の自由度を損なわない手法として注目されている。

GVS は前庭感覚だけでなく、眼球運動などの機能にも影響を与え、主観的な視界の傾きが知覚されることが知られている [3]。この視野運動は、加速度を知覚した際に、視界の安定化のために生じられる代償性の眼球運動である前庭動眼反射 (Vestibulo-ocular Reflex, 以下 VOR) による回旋性の眼球運動に起因する要因が最も大きいと考えられている [4]。この視野運動を利用し、音楽のリズムに合わせて視野運動を生起させることで、聴覚だけでなく、前庭感覚と視覚でも音楽を楽しむシステム [5] も考案されている。

GVS による視覚への影響の研究の多くは立位、または座位の研究であり、姿勢変化時の GVS の視覚への影響などの基礎的知見はまだ不足している。中村ら [6] は、GVS による回旋性の眼球運動量に姿勢が与える影響について研究を行った。その結果、姿勢における有意差は示されなかったが、仰臥位と側臥位での GVS において座位よりも提示されている前庭感覚を感じやすいという内観報告が多くあった。

中村らは、実験参加者の眼球の画像をカメラで撮影し、虹彩紋理によるテンプレートマッチングによって計測した眼球の回旋角度を用いて検討を行っており、主観的視野運動については調べていない。

したがって、本研究では、永谷ら [7] が提案した GVS により生じられる主観的視野運動計測の手法をもとにした、HMD(Head Mounted Display) を用いた新たな主観的視野運動計測の手法を提案し、この提案手法によって GVS により生じる主観的視野運動に姿勢が与える影響を調べる。

2. 関連研究

GVS は、電気刺激によって人工的に前庭感覚を誘発する手法であり、その刺激に伴って VOR による眼球運動が生じることが知られている。Watson ら [8] は、片耳または両耳に電極を配置した条件下で直流電流による GVS を行い、眼球運動の方向と量を計測した。その結果、電流によって眼球が陽極側に回旋し、その角度は電流量に依存して変化することが示された。また、GVS によって生じる VOR に加え、水平性の前庭性眼振が生じること報告されており [9][10]、刺激による眼球運動には個人差が大きく、性別による感受性の違いも指摘されている [11]。

こうした GVS に伴う眼球運動は、結果として視覚系にも影響を与え、主観的な視野運動として知覚されることが知られている [4]。Zink ら [3] は、GVS 中における視野の傾きを調整課題によって定量化し、その回旋量が刺激電流の強さに比例することを示した。また、永谷ら [7] は交流電流を用いた GVS により、実験参加者に視野の揺れを打ち消すように視覚刺激の振幅と位相を調整させることで、主観的視野運動の等価点を求め、刺激強度に比例し、周波数に反比例する傾向を明らかにした。

さらに、GVS によって生じられる反応は、実験時の身体

姿勢にも影響されることが知られている。毛塚ら [12] は、仰臥位から徐々に上体を起こす条件での GVS による身体動揺の知覚閾値を調査し、特定の角度 (30°) で閾値が最も低下することを示した。また、中村ら [6] は、座位・仰臥位・側臥位における眼球回旋量を比較し、姿勢による有意差は認められなかったものの、仰臥位や側臥位では前庭感覚の知覚が強まるという内観的報告を得ている。

本研究では、これらの知見を踏まえ、姿勢の違いが GVS による主観的視野運動の知覚に与える影響について定量的に評価を行うことを目的とする。特に、座位・仰臥位・側臥位といった異なる姿勢条件において、交流電流による GVS 中に知覚される視野の揺れを測定し、姿勢と主観的視野運動との関係性を明らかにする。

3. 実験

3.1 実験概要

本実験では、姿勢を変えて体軸に対する重力方向を変化させたときの GVS による主観的視野運動への影響に関する実験を行った。本実験の目的は、各姿勢と、主観的視野運動のゲインとの関係性を明らかにすることである。

実験参加者は 14 人の過去に前庭感覚や視覚に関する疾患の経験のない健康な成人（男性 20 歳から 30 歳、女性 24 歳）であった。

GVS を行っている間の視野運動の主観的等価点を HMD を用いた提案手法によって実験参加者自身に計測させることによって、回旋角度を計測した。使用する電流値はキャリブレーションによって実験参加者ごとに 0.0 mA - 2.0 mA の範囲で決定した。

3.2 計測手法

交流電流を用いた GVS により生じられる視野運動は、視野の中心を回転の中心とした回旋性の視界の揺れである。永谷ら [7] の手法に習い、実験参加者が GVS 実施中に知覚する視野運動の主観的等価点を計測することで、視野運動の定量化を行う。

実験参加者の眼前に、視野の中心を回転中心として回旋性の揺れを起こす線を表示する。この線の揺れの振幅と位相を調整すると、回旋する視野に対して線の揺れがキャンセルされ、回旋する視野のなかで線だけが静止しているように見える。（図 1）

GVS 実施中に線の揺れの振幅と位相を実験参加者自身に調整させること（調整法）で、実験参加者が知覚する視野運動の主観的等価点を求める。本研究の提案手法では、線の表示に HMD を使用するため、ディスプレイやプロジェクターを使用する場合と比較して、任意の姿勢で計測が容易に可能である。

3.3 実験環境

実験は 1 台のコンピュータ (OS: Windows 11, RAM: 16GB, CPU: AMD Ryzen 9 5900X 12-Core Processor, GPU: NVIDIA GeForce RTX 4080) で実施した。また、線の提示

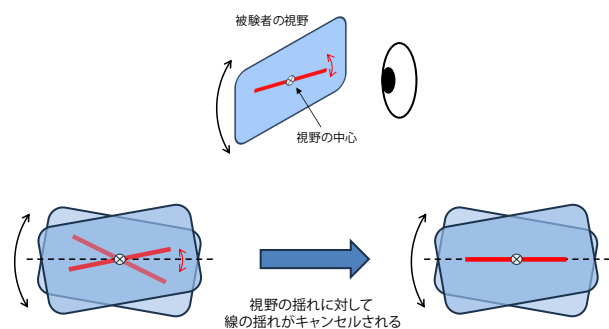


図 1: 視野運動に対して線の揺れがキャンセルされるイメージ図

にはヘッドマウントディスプレイ (HMD: Valve Index¹, 解像度 $1440 \times 1600\text{ px}$, リフレッシュレート 120 Hz) を使用した。

GVS を行う回路は永谷ら [7] が作成したものと同一のものを使用した。実験参加者の両耳の後ろの乳様突起部に電極を貼り付け、その上から固定器具で電極パッドを左右から挟み込むことで電気刺激を行った。（図 2）



図 2: 実験参加者が電極を装着している様子

3.4 実験手順

実験は次の手順で行った。まず、実験参加者の耳の後部を洗顔ペーパーで拭き、電極と固定器具を装着させ、電流値のキャリブレーションを行った。その後、HMD、コントローラを装着させ、提案手法の操作方法を習得させた。

以下の試行を 18 回行い、各姿勢 6 回ずつ計測を行った。姿勢順序についてはカウンターバランスをとった。

1. 実験参加者に座位、側臥位、仰臥位のいずれかの姿勢をとるように指示した。座位では、ヘッドレストのクッションによって頭部を固定させた。側臥位、仰臥位ともに、クッションを頭に敷いて行った。側臥位では、左耳が下を向く方向にした。
2. いずれかの姿勢になった状態から 2 分 30 秒経過後に、線の座標と向きのキャリブレーションを行い、交流電流を用いた GVS を最大 45 秒間行い、線の揺れがキャンセルされるまで振幅と位相を操作させた。また、その間の線の位相と振幅を保存した。
3. 揺れがキャンセルされたことが実験参加者から口頭で伝えられるか、45 秒が経過したら、1) の手順に戻

¹ VALVE INDEX. <https://plaza.komodo.jp/collections/valve-index>

り、次の姿勢で実験を行った。試行数が 18 回になったら実験を終了した。

GVS に用いた交流電流のパラメータは、振幅はキャリブレーションにより決定した値、周波数は 0.4 Hz、位相遅れは 0.0 rad とした。

4. 結果

実験全体を通して測定方法を誤解していた実験参加者 1 名（男性）と、実験途中で酔いを発症し実験を中断した実験参加者 1 名（男性）の実験データは全て除外した。また、他の実験参加者についても、計測途中で PC との接続が切れる、誤った操作を行うなどした試行は計測結果から除外した。加えて、四分位範囲 (IQR) を用いて外れ値とされる計測結果を除外した。

各実験参加者の各姿勢における主観的視野の回旋角度の平均値、標準偏差、それらを求めるために使用したデータ数を図 3 に、GVS の交流電流に対する主観的視野運動の位相の平均値、標準偏差、それらを求めるために使用したデータ数を図 4 に示した。

回旋角度と位相に対して ShapiroWilk 検定を行ったところ、位相は正規性が棄却されたが、回旋角度は正規性が棄却されなかった。よって、回旋角度に対して、姿勢を要因とする 1 元配置分散分析を行った。1 元分散分析の結果、姿勢間の有意差が認められたため、2 姿勢間の比較を、Bonferroni 法による多重比較補正を用いた pairwise-T 検定で行った。その結果、座位-仰臥位、また側臥位-仰臥位において有意差が認められた。(図 5)

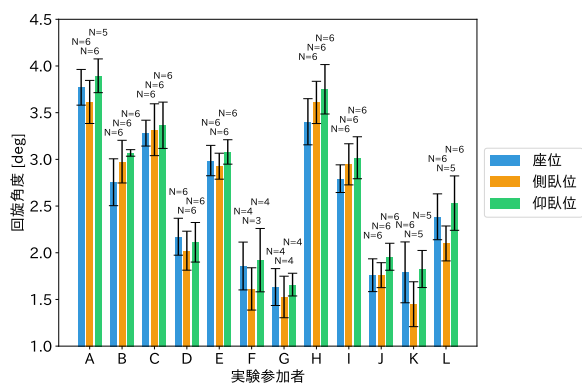


図 3: 各実験参加者の各姿勢における主観的視野の回旋角度の平均と標準偏差

5. 考察

本研究の結果から、GVS による主観的視野運動には、身体の姿勢や、眼球運動以外の要因が複雑に関与している可能性が示唆された。側臥位において、仰臥位よりも主観的視野運動の回旋角度が有意に小さくなる傾向については、姿勢変化によって重力方向の知覚が不正確になること [13] や、姿勢によって GVS による身体動揺感覚の閾値が変化する

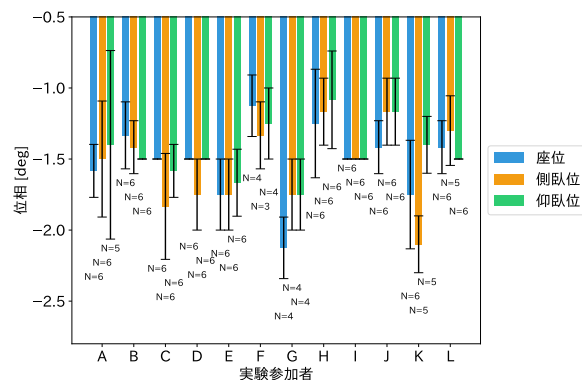


図 4: 各実験参加者の各姿勢における GVS の交流電流に対する主観的視野運動の位相の平均と標準偏差

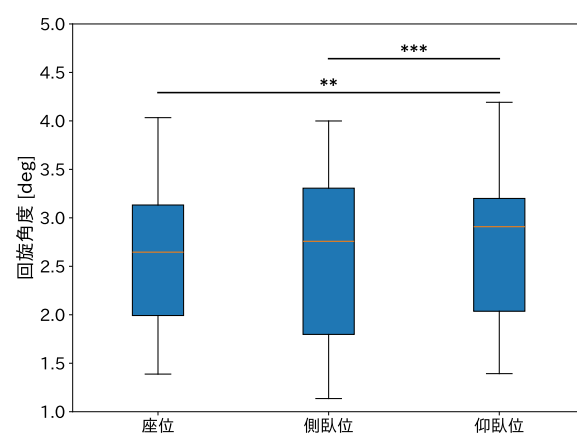


図 5: 各姿勢における主観的視野の回旋角度 (**: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$)

[12] という報告から、単に前庭感覚の入力変化だけでなく、重力方向の知覚や身体動揺感覚の知覚しやすさといった内的要因の影響も含んでいると考えられる。

一方、座位において仰臥位よりも主観的視野運動の回旋角度が有意に小さくなる傾向については、頸反射などの生理的要因による個人差の増大が考えられる。座位では頭部を支えるために頸部筋の緊張が不可避となり、それが眼球運動や主観的視野運動に影響を及ぼした可能性がある。頸反射が眼球的の偏移に影響を与えることは既に報告されており [14]、本研究でもそれが姿勢ごとのぼらつきの一因となったと考えられる。

また本研究では、GVS 刺激中に頭部を固定した状態で主観的視野運動を計測しており、この条件下では姿勢の違いによる半規管への影響は排除されている。したがって、姿勢の違いによって前庭神経への入力に変化し、それが主観的視野運動に影響を与えたとすれば、それは耳石器による変化と解釈でき、本研究結果は、GVS は主に耳石器系を刺激しているという意見 [15][16] を支持する形となった。

実験参加者の一部から得られた内観報告では、「姿勢によって酔いやすさが異なる」「重力方向が分かりにくい」などが

あり、主観的視野運動の回旋角度の変化には、姿勢による感覚変容が寄与している可能性が高い。とりわけ、GVSによる前庭入力が一様であっても、被験者の身体姿勢が変わることで、その出力としての主観的運動感や視野の動きが異なって知覚されることが示唆される。

6. 結論

姿勢の変化によって、体軸に対する重力方向が変化したときの、前庭感覚刺激による主観的視野運動について測定を行った。HMDを用いた提案手法により計測を行い、計測結果について姿勢を要因とする分散分析及びT検定を行った。

統計検定の結果、仰臥位-側臥位、仰臥位-座位において振幅に有意差が示された。本研究の結果から、GVSによる主観的視野運動には、身体の姿勢や、眼球運動以外の要因が複雑に関与している可能性が示唆された。

参考文献

- [1] 広瀬通孝, 大塚隆治, 広田光一. モーションベースを利用した前庭感覚表現に関する基礎的研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 16–22, 1996.
- [2] Taro Maeda, Hideyuki Ando, Tomohiro Amemiya, Naohisa Nagaya, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Shaking the world: galvanic vestibular stimulation as a novel sensation interface. In *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies*, pp. 17–es, 2005.
- [3] R Zink, SF Bucher, A Weiss, Th Brandt, and M Dieterich. Effects of galvanic vestibular stimulation on otolithic and semicircular canal eye movements and perceived vertical. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, Vol. 107, No. 3, pp. 200–205, 1998.
- [4] 永谷直久, 杉本麻樹, 新居英明, 前田太郎, 北崎充晃, 稲見昌彦. 前庭感覚電気刺激による視覚への影響 (「ウェアラブル・ユビキタス技術」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 475–484, 2005.
- [5] Naohisa Nagaya, Masashi Yoshidzumi, Maki Sugimoto, Hideaki Nii, Taro Maeda, Michiteru Kitazaki, and Masahiko Inami. Gravity jockey: a novel music experience with galvanic vestibular stimulation, 2006.
- [6] 中村文彦 プルノマキシム 永谷直久杉本麻樹. 前庭感覚電気刺激による回旋性眼球運動への姿勢が与える影響に関する研究. 第20回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2015.
- [7] 永谷直久, 吉積将, 杉本麻樹, 稲見昌彦ほか. 前庭感覚電気刺激により生じられる主観的視野運動の計測. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 4, pp. 1372–1379, 2012.
- [8] Shaun RD Watson, Agatha E Brizuela, Ian S Curthoys, James G Colebatch, Hamish G MacDougall, and G Michael Halmagyi. Maintained ocular torsion produced by bilateral and unilateral galvanic (dc) vestibular stimulation in humans. *Experimental brain research*, Vol. 122, pp. 453–458, 1998.
- [9] Hamish G MacDougall, Agatha E Brizuela, Ann M Burgess, and Ian S Curthoys. Between-subject variability and within-subject reliability of the human eye-movement response to bilateral galvanic (dc) vestibular stimulation. *Experimental brain research*, Vol. 144, pp. 69–78, 2002.
- [10] Klaus Jahn, Andrea Naeßl, Erich Schneider, Michael Strupp, Thomas Brandt, and Marianne Dieterich. Inverse u-shaped curve for age dependency of torsional eye movement responses to galvanic vestibular stimulation. *Brain*, Vol. 126, No. 7, pp. 1579–1589, 2003.
- [11] Thanh Tin Nguyen, Jin-Ju Kang, and Sun-Young Oh. Thresholds for vestibular and cutaneous perception and oculomotor response induced by galvanic vestibular stimulation. *Frontiers in Neurology*, Vol. 13, p. 955088, 2022.
- [12] 土塚健太郎 小泉直也 杉本麻樹稲見昌彦. 前庭感覚電気刺激を用いた平衡感覚への姿勢による影響に関する検討. 第18回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 1–4, 2014.
- [13] Atsushi Tamura, Yoshiro Wada, Akihiro Kurita, Takeshi Matsunobu, Takuo Inui, and Akihiro Shiotani. Visual effects on the subjective visual vertical and subjective postural head vertical during static roll-tilt. *Laryngoscope investigative otolaryngology*, Vol. 2, No. 3, pp. 125–130, 2017.
- [14] 坂田英治. 耳石器反射に関する臨床的研究—眼球代償性反対回旋測定の診断的意義の検討と臨床検査法の工夫ならびに末梢前庭性眼振における耳石器の影響—. 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol. 65, No. 10, pp. 1165–1177, 1962.
- [15] Bernard Cohen, Sergei B Yakushin, and Gay R Holstein. What does galvanic vestibular stimulation actually activate? *Frontiers in neurology*, Vol. 2, p. 90, 2012.
- [16] Juno Kim. Tonic eye movements induced by bilateral and unilateral galvanic vestibular stimulation (gvs) in guinea pigs. *Brain research bulletin*, Vol. 90, pp. 72–78, 2013.