



前庭電気刺激と HMD による視覚情報提示の 相互作用が自己傾斜感覚に与える影響

栗原徹¹⁾, 植山祐樹²⁾, 原田正範²⁾

1) 防衛大学校 理工学研究科 (〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20, ed24001@nda.ac.jp)

2) 防衛大学校 機械工学科 (〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20, ueyama@nda.ac.jp, mharada@nda.ac.jp)

概要: 本研究は、前庭電気刺激 (GVS) と HMD を用いたフライトシミュレータとを組み合わせ、自己傾斜感覚への影響を検討する。GVS 刺激の強度 (強・弱) と印加時間 (即時・漸増) の計 4 パターンと、映像の有無を組み合わせた条件を設定する。さらに GVS 刺激がない映像のみの条件も加え、各条件下での生理学的傾斜感覚を HMD の傾きを用いて計測し比較検討する。これにより、GVS 刺激と視覚情報が自己傾斜感覚に与える複合的な影響の解明を目指す。

キーワード: 前庭電気刺激, VR シミュレータ, 空間識失調

1. はじめに

航空機の操縦中、空間識失調 (Spatial Disorientation, SD) はパイロットにとって重大なリスク要因であり、航空事故の主要な原因の一つとされている [1]。SD とは、視覚、前庭感覚、体性感覚といった複数の感覚入力の不整合を起こすことで、パイロットが自身の位置や姿勢、運動状態を正しく認識できなくなる現象を指す。特に戦闘機や回転翼機のような高機動飛行を行う機種では、SD が頻発する傾向があり、これが致命的な事故につながる場合も少なくない。

SD の形成には、視覚が最も大きな役割を果たしており、前庭感覚や体性感覚がこれを補完する形で寄与しているとされている。前庭感覚は、内耳の三半規管及び耳石器によって回転加速度や直線加速度を感知するものであり、空間認識の基盤として重要な役割を担っている。しかし、前庭感覚はしばしば錯覚を引き起こし、これが SD の発生メカニズムと深く関わっていることが明らかになっている。例えば、体重力錯覚やコリオリ錯覚といった前庭性の SD は、急加速や旋回時に前庭感覚が誤った情報を脳に伝達することで生じることが知られている。

前庭感覚電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation, GVS) は、この前庭感覚を人工的に操作可能にする技術として注目されている [2]。GVS は、微弱な電流を耳の後ろに配置した電極を介して前庭神経に印加することで、仮想的な加速度感や身体動揺感を誘発するものである。この技術は、小型で持ち運びが容易であり、これまでに歩行誘導や視覚影響の研究に応用されてきた。さらに、GVS は従来の大型モーションプラットフォームとは異なり、簡便かつ安全に被験者に前庭感覚の変化を与えることが可能であり、前庭感覚の研究における強力なツールとして利用されている。

一方で、GVS を用いた前庭感覚刺激が SD の発生やその認識、さらにはパイロットの行動に及ぼす影響についての研究は多くない。特に、GVS による人工的な前庭刺激が、

視覚や体性感覚とどのように相互作用し、SD を引き起こすか、または軽減するかについては、ほとんど解明されていない。GVS を用いることで SD の惹起あるいは軽減に対する効果を明らかにすることで、航空安全向上に向けた技術開発や訓練プログラムの設計において重要な基礎となる。

本研究の目的は、GVS 装置と仮想現実 (Virtual Reality, VR) を用いたフライトシミュレータ環境を組み合わせ、空間識失調に対する影響の検討を行うことである。今回は、GVS 装置と VR 環境による交互作用とその効果について検討を行った。

2. 前庭感覚電気刺激 (GVS)

2.1 GVS の概要

GVS は、耳の後ろ (乳様突起付近) に装着した電極を介し、微弱な電流を前庭神経に印加することで、人工的に前庭感覚を操作できる技術である。前庭器官は三半規管及び耳石器内にある卵形囊、球形囊中の有毛細胞によって構成されている。三半規管では 3 軸の回転角加速度を受容し卵形囊、球形囊では直線加速度を受容している [3]。ここに GVS を用いて電流を印加することにより、実際には存在しない仮想的な加速度感や身体動揺感を誘発することが可能となる。こうした特徴から、前庭機能の解明やリハビリテーション、さらにはヒトの空間認知メカニズムに関する研究で幅広く利用されている。SD の研究においても、視覚や体性感覚との相互作用を探る手段として、GVS は有力なツールとなり得ると考えられる。

2.2 製作した GVS

本研究で使用した GVS 装置はオペアンプである LMC662 と MOSFET を組み合わせた定電流制御部、リレーによる電流方向制御部、Arduino nano と 12bitDA コンバータ (MCP4922) による電流波形制御部から構成される。本装置は、昇圧回路により生成した 300V の高電圧で駆動しており、被験者が電極を頭部乳様突起部に貼付けることで、高

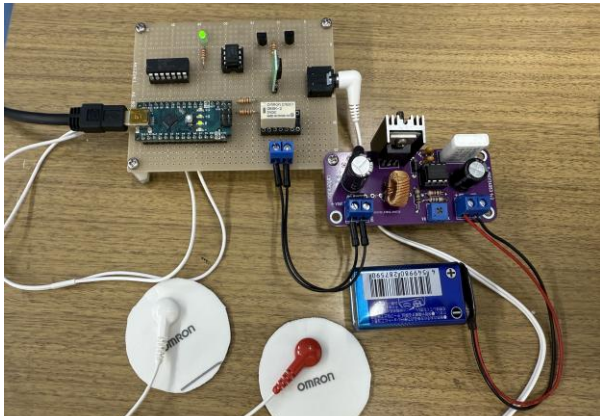


図 1: Appearance of GVS.



図 2: Example of VR scenery in the HMD.

い皮膚インピーダンスを持つ被験者に対しても、前庭感覚への電気刺激として最大で数 mA の目標電流を安定して供給することが可能である。また、装着の容易さ、耐久性と再利用性の高さ、皮膚への密着性に優れる点から、ゲル電極（オムロン社ロングライフパッド）を用いるものとする。製作した GVS を図 1 に示す。

2.3 Arduino による制御

本研究では Arduino から GVS へ制御信号を出力する。本試験で用いたプログラムは、Arduino を PC に接続した状態で信号を入力することで、電流方向の変更、及び信号に対応した電流が流れるものを使用する。

3. フライトシミュレータ

実験環境となるフライトシミュレータを、VR 映像のレンダリングと提示を行う Unity、実験全体のシーケンス管理と GVS 信号生成を行う数値解析ソフトウェア MATLAB、及び GVS 装置への制御信号出力を行う Arduino を連携させることで構築した。図 2 に作成した VR 映像の一部を示す。被験者の視界には、ロール方向の回転を明確に知覚させるため、航空機内のコックピットと遠方の水平線のみを提示している。実験を開始すると映像の中の水平線が傾くことでロールを模擬する。



図 3: Experimental setup.

4. 実験方法

本研究では、実験系の構築と検証を目的として、著者自身を対象に初期検討を実施した。

4.1 実験装置

GVS のゲル電極を耳の後ろ、乳様突起部に貼付した。その後、電極への干渉帽子のためヘアバンドを装着し、HMD（HTC, VIVE XR ELITE）を装着した。実験装置装着時の様子を図 3 に示す。頭部の回転角（ロール、ピッチ、ヨー）は、HMD のトラッキングシステムにより Unity を介して、サンプリングレート 90 [Hz] で PC に記録するように設定した。

4.2 実験条件

電流の種類は約 1 [mA] の弱電流と約 2 [mA] の強電流と定めた。GVS による電流値と仮想的な身体動揺を引き起こす刺激量には相関があることから [2], GVS の弱電流刺激には 15 度、強電流刺激には 30 度の傾きを対応させた。設定した以下の 4 種類から選択することで GVS と VR 映像の同じパターンが開始された。

- パターン 1（弱・速）：GVS では即時弱電流が発生、映像では 10 [deg/s] で 15 度傾く
- パターン 2（強・速）：GVS では即時強電流が発生、映像では 10 [deg/s] で 30 度傾く
- パターン 3（弱・遅）：GVS では 5 秒かけて弱電流まで漸増、映像では 3 [deg/s] で 15 度傾く
- パターン 4（強・遅）：GVS では 5 秒かけて強電流まで漸増、映像では 6 [deg/s] で 30 度傾く

提示条件が GVS のみの場合には映像はブラックアウトし、映像のみの場合は GVS へ信号が送られないようにした。

4.3 実験手順

本実験は、ランダムな順序の全 36 試行（提示条件 3 水準 × GVS パターン 4 水準、各 3 回）で構成した。

実験が始まると、HMD 内に静止したコックピットと水平線が表示されている状態で、被験者は正面を向き、リラックスした状態で待機した。設定された提示条件（「映像のみ」「GVS のみ」「映像+GVS」のいずれか）と GVS パターン

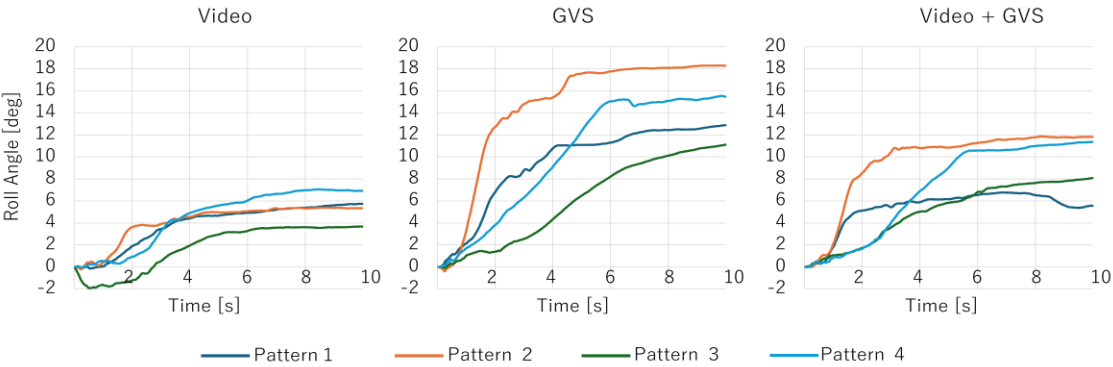


図 4: HMD roll angle for each condition.

表 1: Mean HMD roll angles

Pattern	Video	GVS	Video+GVS
1,Weak-Fast	5.68	12.72	5.48
2,Strong-Fast	5.35	17.96	11.79
3,Weak-Slow	3.67	10.91	7.92
4,Strong-Slow	6.94	15.37	11.28

(4種類のいずれか)に基づき、10秒間の刺激が提示された。この間、被験者は特定の操作は行わず、視覚情報やGVSによって生じる身体の傾斜感覚に対して受動的に反応した。刺激開始から10秒経過の後、VR映像及びGVS刺激を停止し、1試行が終了した。

4.4 データ分析

各試行で記録された頭部の回転角データのうち、本研究では自己傾斜感覚を最も反映すると考えられるロール角を分析対象とした。各試行の刺激開始時のHMD角度を0として、刺激提示終了前1秒間の平均ロール角を、その試行における「自己傾斜角度」として算出した。

5. 結果

各提示条件における測定されたHMDのロール角をパターンごとに平均化したグラフを図4に示す。

また、測定された自己傾斜角度の各条件における平均値を表1に示す。GVSのみを使用した試行での自己傾斜角度はすべてのパターンにおいて映像のみ、及び映像+GVSの試行よりも大きい値を示している。

6. 考察

結果より、GVSのみを使用する条件に比べ映像を使用した場合に自己傾斜角度が抑えられている。これは、GVSの使用に対してVR映像による視覚情報によって傾きが抑えられていることを意味している。VR映像内における水平線が視覚に対し大きな意味を持ち、GVSによる前庭の傾斜感覚よりも有意に働いたと考えられる。実際の空間識失調に

おいても、水平線誤認錯覚[4]のように前庭感覚より視覚情報が有意に働くことで生じるものが存在する。このことから、本研究における検討結果は、視覚と前庭感覚の統合においては視覚が有意に働くという過去の知見と一致している。

一方でGVSパターンによる効果や、提示条件とGVSパターンの交互作用による効果には大きな差が見られなかった。これは、同様に視覚情報が非常に強力であるためと考えられる。本研究では映像とGVSが同方向に傾くよう設定していたため、GVSによる結果の差が視覚情報によるものより小さく、現れにくくなっていると考えられる。

本研究は、著者1名を対象とした初期検討であるため、結果の一般化には至らないと考える。しかし、実験環境の構築、VR環境における視覚と前庭感覚の相互作用を確認することができたことから、今後被験者を増やした本実験が必要である。

7. むすび

本研究では、GVS装置とVR映像を組み合わせ、視覚情報と前庭感覚の交互作用による自己傾斜感覚への影響を調査した。その結果、電気刺激によって与えられた前庭感覚と比べ視覚情報が有意に働き、傾斜感覚が抑制されることを確認した。

今後の研究課題としては、視覚情報と前庭感覚が異なる方向であった場合に視覚情報が与える影響の調査があげられる。また、実際の体性感覚として傾きを与えながら前庭感覚、視覚情報を統合した試験を行うことで、空間識失調に対する影響の確認を行っていく。

参考文献

[1] 垣本由紀子：航空における情報取得とパイロットエラー、国際交通安全学会誌, VoL 26, No 2, 120-129, 2001
[2] 安藤英由樹, 渡辺淳司, 杉本麻樹, 前田太郎：前庭感覚インタフェース技術の理論と応用, 情報処理学会論文誌, VoL 48, No 3, 1326-1335, 2007
[3] 大山, 今井, 和気：新編 感覚・知覚心理学ハンドブック (第三版), 誠信書房, pp. 1317 - 1363, 2000
[4] 田村敦, 田所慎：空間識失調と航空医学, Equilibrium Res, VoL 78, No 4, 242-253, 2019