

ローレンツプロットを用いた映像酔い時の心拍変動解析

寺澤直人^{†1} ト楠^{†1}

概要: 近年、映像酔い (Visually Induced Motion Sickness, VIMS) に対処するために多数の研究がなされている。中では自律神経活動の指標として心拍ゆらぎの低周波 (Low Frequency, LF) 成分と、高周波 (High Frequency, HF) 成分が用いられ、LF 成分を精度良く算出するには約 5 分間の心拍変動データを要する。しかしながら、実際に VIMS の対処を行うためには、VIMS の初期段階での発見が望まれる。そこで、本稿ではローレンツプロット (Lorenz Plot, LP) に注目し、LP を用いた評価方法を提案する。また、従来手法と比較し、VIMS の評価において提案手法の有効性を示す。

Evaluation of Visually Induced Motion Sickness based on Heart Rate Variability using Lorenz Plot

NAOTO TERASAWA^{†1} NAN BU^{†1}

Abstract: In recent years, a lot of studies have been achieved to deal with visually induced motion sickness (VIMS). Low frequency (LF) and high frequency (HF) of heart rate variability are used as indices of autonomic nerve system. To evaluate VIMS about 5 minutes of heart rate variability data are needed to calculate LF components. However, early detection of VIMS is desired in order to conduct an actual visual system considering VIMS. In this paper, we focus on Lorenz plot (LP), and propose an evaluation method using LP. Experimental results in this study indicate an effectiveness of proposed method in evaluation of VIMS by comparing the traditional method.

1. まえがき

近年、映像機器の高精細・高画質化により、手振れなどの激しい画面の動きを含む映像を視聴する際に、視聴者が映像酔い (Visually Induced Motion Sickness, VIMS) を引き起こし、めまいや吐き気を催す問題が起きている。この問題に対処するために、心電図 (Electrocardiogram, ECG) を用いた VIMS の評価に関する研究が報告されている[1][2]。VIMS が起きると、自律神経系の交感神経が活発になり、心拍の間隔に影響をもたらすことがわかっている[2]。

これらの研究では自律神経の評価方法として、R 波と次の R 波までの間隔 (R-R Interval, RRI) を周波数解析して得られる 0.04~0.15Hz の低周波成分 (Low Frequency, LF) と、0.15~0.45Hz の高周波成分 (High Frequency, HF) を用いている。LF は交感神経と副交感神経の双方の活動を表し、HF は副交感神経のみの活動を表すため、これらの情報から自律神経活動を定量的に求めることができる[2]。

VIMS への対処として、VIMS を低減化させるシステムの開発を行っている研究もある[3]。このようなシステムを利用するためには、心拍変動解析の結果より、VIMS を早い段階で発見する必要がある。しかしながら、従来手法では LF 成分と HF 成分を抽出するために周波数解析を行うため、周波数分解能とデータ数の関係から最低でも 4~5 分間の RRI データを必要とし、VIMS の評価を短時間で行うことには適していない。

一方、ローレンツプロット (Lorenz Plot, LP) を利用して、自律神経活動を表す RRI のゆらぎを定量的に求めることができる。また RRI の分散情報を利用するため、比較的少量のデータから自律神経活動の評価が可能である[4][5]。実際に、LP を用いてストレスの評価を行った研究や[6]、副交感神経活動の推定を行った研究があり[7]、LP 法の有効性が報告されている。しかしながら、VIMS の評価に対し LP を用いた心拍変動解析は提案されていない。

そこで、本稿では LP を用いた VIMS の評価方法を提案し、評価時間の短縮を目的とする。評価実験では映像視聴時の RRI を計測し、提案手法及び LF、HF を用いた比較手法による解析結果を比較したうえで VIMS に対して提案手法の有効性を示す。

2. LP による解析方法

正常な ECG は、図 1 のような QRS 波が規則的に現れる。これよりピーク解析で R 波を検出し、RRI を算出する (図 2)。基本的に RRI は一定ではなく常にゆらいでいる。VIMS の影響で交感神経の活動が活発になると、RRI のゆらぎが小さくなり[8]、RRI も減少することが報告されている[7]。よって、RRI を解析してゆらぎの程度を調べることで自律神経活動の評価が可能である。LP による解析は図 3 に示すように横軸を RRI の n 番目、縦軸を RRI の $n+1$ 番目としてプロットしたものであり、RRI の分布を楕円に近似して考える。

^{†1} 熊本高等専門学校 熊本キャンパス, 熊本県合志市須屋 2659-2
National Institute of Technology, Kumamoto College, 2659, Suya, Koshi,
Kumamoto, 861-1102, Japan

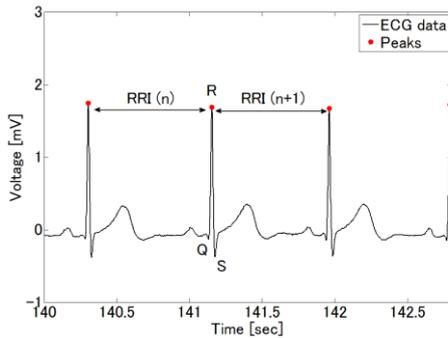


図 1 心電図の元信号

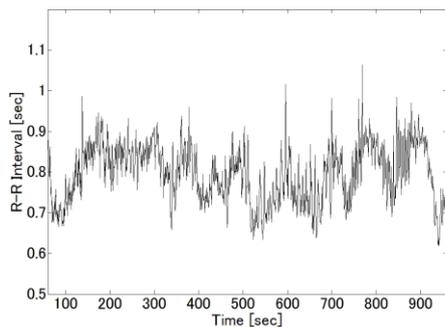


図 2 R-R 間隔 (RRI)

この楕円の面積は RRI のゆらぎを表す指標として用いることができ、定量的に自律神経活動を評価することができる [4].

毎回のプロットには n 点の RRI データを利用する. まず n 点の RRI をプロットし, それから各点を $y = x$ 軸と $y = -x$ 軸に投影する. ここで, $y = x$ 軸において原点からの距離の標準偏差を σ_x と定義する. また, $y = -x$ 軸において原点からの距離の標準偏差を σ_{-x} と定義する. ここで, 楕円の面積 S は次式(1)により求めることができる [7].

$$S = \pi \sigma_x \sigma_{-x} \quad (1)$$

S が減少するほど RRI のゆらぎが小さいことを意味しているため, 交感神経が活発で VIMS が引き起こされていることがわかる.

また, $y = x$ 軸において原点からの距離の平均を d とする. これについても自律神経の活動との相関があることが確認されているため, 評価指標とした [7]. d が減少するほど RRI が短いことを表し, 交感神経が活発で VIMS の影響が出ていると判断できる.

毎プロットに利用する RRI のデータ数 n 及びオーバーラップの設定によって d , S の 2 つの指標から自律神経活動を調べる間隔の調整が可能で, VIMS の評価に要する時間が変わる. 本稿では 1 回の LP に使用する RRI のデータ数は 30 点 (約 30 秒間), オーバーラップはなしと設定して解析する.

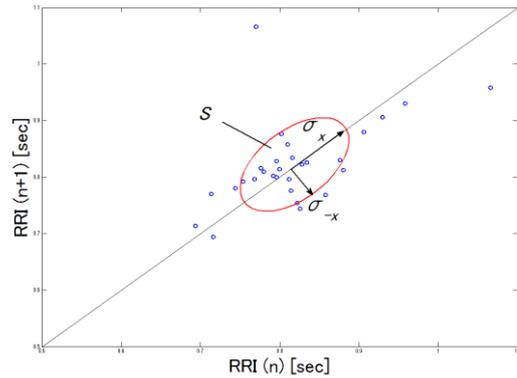


図 3 ローレンツプロット (LP)

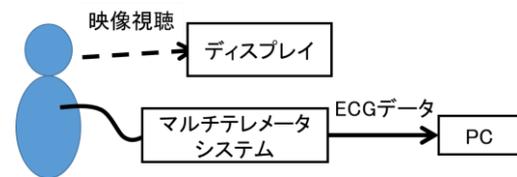


図 4 ECG 測定の概略図

3. 実験

3.1 実験条件

筆者らが独自に撮影した映像を用いて VIMS 評価実験を行った. ECG 測定システムを図 4 に示す. ECG 測定装置はマルチテレメータシステム (WEB-9500, NIHON KOHDEN) を使用し, サンプリング周波数は 500Hz と設定した. また第 II 誘導により心電図の測定を行った. 電極装着前の皮膚の前処理として酒精綿を使用し, 汚れを拭き取った.

被験者は 20 代の成人男性 3 名 (A, B, C) で, 適温の室内で実験を行った. 実験時の被験者の状態は座位で, ディスプレイから被験者までの距離を約 80cm, 21.5 インチのディスプレイを使用し, 画角を水平方向に 33° , 垂直方向に 19° とした.

また映像視聴中において, 被験者 A, B には 30 秒ごとに気分を尋ねた. (1) ~ (5) の 5 段階で評価してもらい,

(1) : 普段通りで気分が良い ~ (5) : 気分が悪いとしてアンケートを行った. 被験者 C については心拍に与える影響を考慮し, 気分を尋ねずに実験を行った.

3.2 実験スケジュール

被験者 A, B に対する実験の流れを図 5 に示す. VIMS の発生には 10 分以上の時間を要した方が好ましいことから [10], 映像視聴時間を 10 分, 休憩時間を 5 分と設定した. 被験者 A, B には映像視聴と休憩を 2 回, 被験者 C には 3 回繰り返した.



図 5 被験者 A, B に対する実験の流れ

実験に使用した映像は 5 分間であったため、リピートして 10 分間の映像にした。VIMS を誘発する要因を映像に多く含ませるために、手振れがひどく、ズームを多用し、ロール角の回転を多く含むものを撮影した[11]。

3.3 LF, HF を用いた解析方法[12]

本稿では LF, HF 成分を用いる解析手法として、従来から多く利用されている LF/HF 指標を選択した。LF と HF の比を取ることで、交感神経活動を定量的に求めるものである。

LF 成分と HF 成分を求めるために周波数解析を行った。まず不等間隔である RRI データを 3 次スプラインにより 10Hz でリサンプリングし、等間隔データにした。次に、リサンプリングしたデータからウェルチ法によるパワースペクトル密度 (Power Spectral Density, PSD) の推定を行った。

窓関数はハミング窓を利用し、セグメント長はデータ長の 1/4、オーバーラップは 25% と設定した。推定した PSD を LF 成分と HF 成分にわけると、0.15Hz に最も近い点 f_b を探し、その点を LF と HF の境目にした。そして $0.04 \sim f_b$ [Hz] と $f_b \sim 0.45$ [Hz] の PSD から、LF/HF を算出した。

4. 実験結果

4.1 被験者 A の実験結果

被験者 A の 1 試行目の映像視聴時における d , S 及び気分のアンケート結果を図 6, 2 試行目の結果を図 7 に示す。図 6, 図 7 はそれぞれ (a) が d と S の結果, (b) が気分のアンケート結果である。

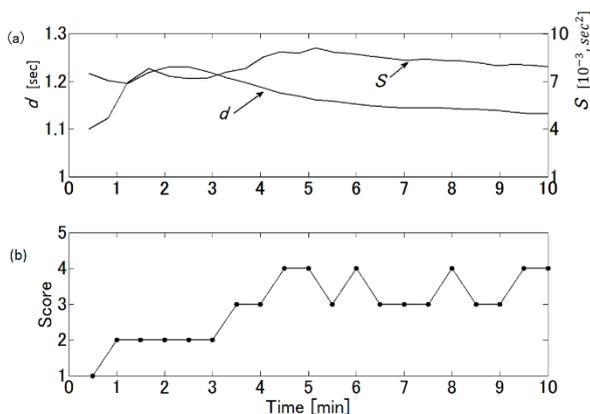


図 6 被験者 A の実験結果 (a) d (実線) と S (破線) の変化 (b) 気分の変化

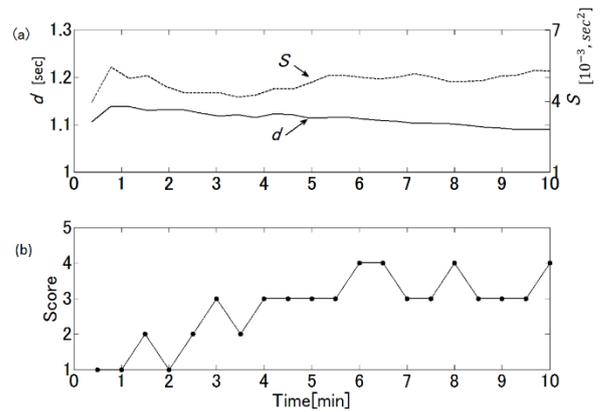


図 7 被験者 A の 2 試行目における d , S , 気分の変化

図 6 (b), 図 7 (b) の結果は、被験者 A には VIMS が 1 試行目と 2 試行目の両方に起きたことを示す。これより図 6 において、映像提示から 3 分後の気分のアンケート結果が 2 から 3 に上昇している部分に注目すると、 d は減少傾向で S は増加傾向にあることがわかる。その後 d は徐々に減少し、 S は約 5 分まで増加した後に減少している。この d , S の推移は VIMS の早期発見のための重要な点である可能性が高い。

2 試行目の結果 (図 7) より、映像提示から 3 分後の気分のアンケートが 2 から 3 に変化した部分を見ると、1 試行目とは違い S は減少傾向である。これは d 及び S が減少すると、交感神経活動が活発であるという従来の結論と一致するものとなった。

図 8 に被験者 A の LF/HF 評価指標を示す。図 8 からは、1 試行目は安静時と LF/HF がほとんど変わらず、2 試行目の映像視聴時のみ LF/HF が増加していることがわかる。これより 2 試行目の映像視聴時に交感神経活動が活発になり、VIMS が起きたことが示される。しかしながら、LP を用いて解析した場合には被験者 A は 1 試行目から VIMS が起きていると示される一方で、LF/HF による解析では検出することができなかった。

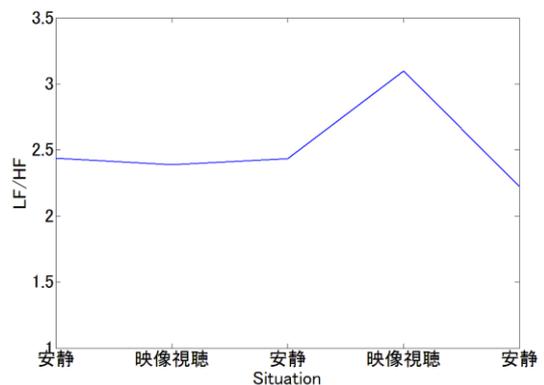


図 8 被験者 A の LF/HF による解析結果

まとめると、LP は 1 試行目の初期段階の VIMS を発見できる可能性のある d , S の変化がみられたが、LF/HF には VIMS の影響が現れなかった。被験者 A の結果からは気分の変化と高い相関が確認でき、 d , S の特徴的な変化が VIMS の判断には利用できる。よって LP 法を用いると比較的短い時間で、かつ早い段階の VIMS を評価することができる。

4.2 被験者 B の実験結果

被験者 A の結果と同様に、被験者 B の 1 試行目の映像視聴時における d , S 及び気分のアンケート結果を図 9、2 試行目の結果を図 10 に示す。

図 9 (b) の結果より気分が常に 1 であるため、被験者 B には VIMS が起きていないと示される。図 9 (a) より被験者 B には映像提示から 1 分後という短い時間に限りこの現象が現れた。その後の d , S に特徴的な変化は現れず、引き続き 2 試行目においても d , S 及び気分に変化はなかった。よって、1 試行目の映像提示から 1 分後以降に関しては、VIMS は起きていないと示される。

図 11 に被験者 B の LF/HF による解析結果を示す。被験者 B は気分のアンケート結果から VIMS は起きていないと示されるが、図 11 の結果からは初めの安静時と比べて映像視聴時の LF/HF が高く、VIMS が起きていると示される。

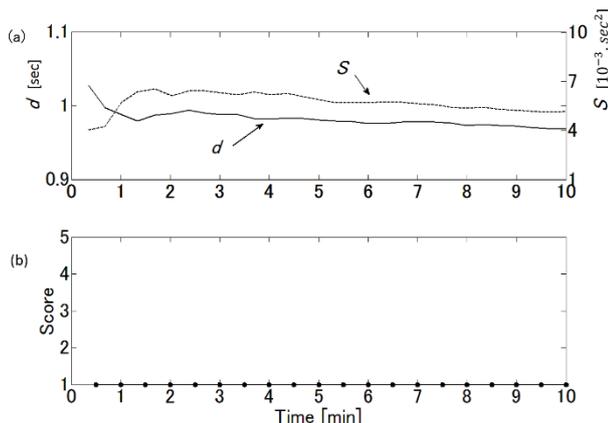


図 9 被験者 B の 1 試行目における d , S , 気分の変化

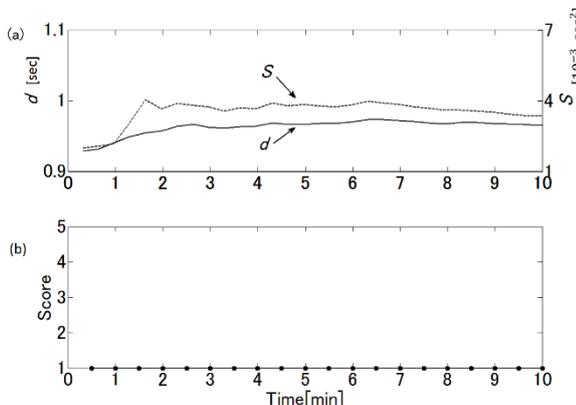


図 10 被験者 B の 2 試行目における d , S , 気分の変化

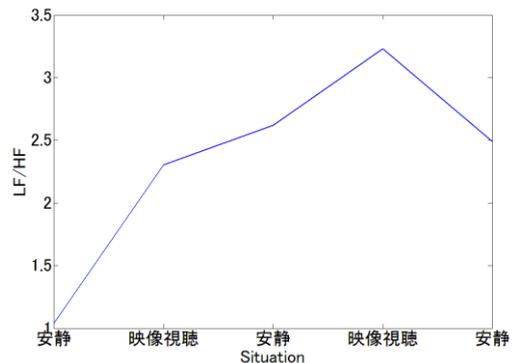


図 11 被験者 B の LF/HF による解析結果

4.3 被験者 C の実験結果

図 12 に被験者 C の d , S の結果を示す。赤の破線は映像視聴終了時刻を表している。また (a) は 1 試行目、(b) は 2 試行目、(c) は 3 試行目を示している。

まず図 12 の全体の結果より、 d に関しては減少傾向であることがほとんどなく、特徴的な変化は現れていない。一方 S に関しては、(a) より映像提示から約 2 分後に急激な上昇がみられ、(b), (c) より映像提示から約 1 分後に減少していることがわかる。 S の結果のみからは VIMS が現れているが、 d の結果からは VIMS は現れていないため、 d と S が相反する結果となった。

図 13 に被験者 C の LF/HF の結果を示す。この結果から、被験者 C は映像を見るたびに少しずつ VIMS を引き起こしていると示される。また 2 回目、3 回目の安静時には LF/HF が減少しているため、VIMS の影響が少しだけ回復していると示される。

LP による解析結果と比較すると、LP の指標 d , S には VIMS の影響が現れなかったが、LF/HF の結果からは VIMS の影響が現れた。また、LF/HF の方が安静時と映像視聴時の差がはっきりと現れた一方、LP の d , S は映像視聴時と安静時の差はあまり現れない結果となった。

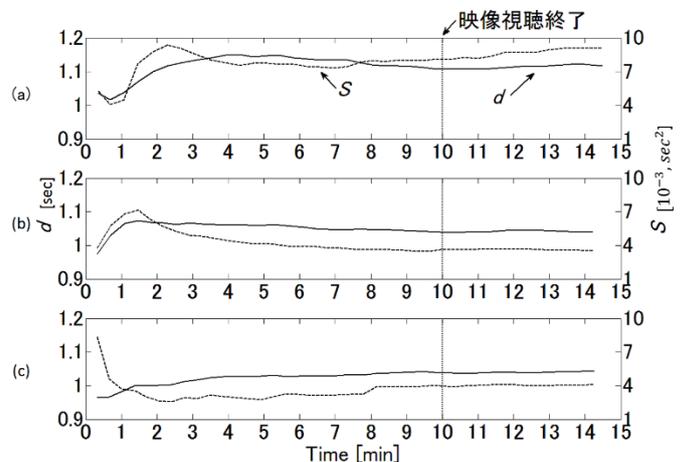


図 12 被験者 C の d , S の推移

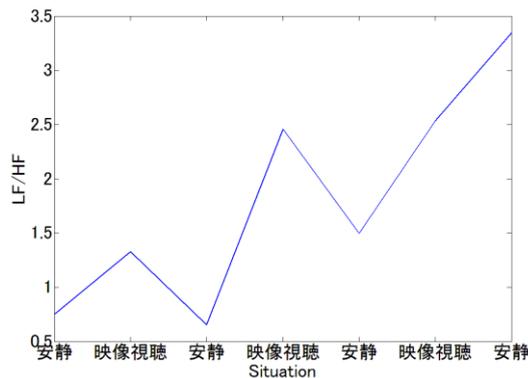


図 13 被験者 C の LF/HF による解析結果

5. 考察

実験結果より、LP を用いて VIMS を評価することができる可能性について考察する。まず、VIMS が起きたにも関わらず S が増加した原因を探る。ここで、図 14 に被験者 A の LP の分布の推移を示す。

図 14 は (a) → (b) → (c) → (d) の順に推移し、それぞれ 1 試行目の 1 回目 (a)、6 回目 (b)、10 回目の LP (c)、及び 2 試行目の 10 回目の LP (d) である。まず 1 試行目の 1 回目と 6 回目の LP の比較をすると、RRI の点が、 d が減少する方向に徐々に推移している。この推移に合わせて S は増加していることがわかる。次に 10 回目の LP 分布は、6 回目と比べて多くの点に RRI が減少し、これに伴って S は減少している。最後に 2 試行目の 10 回目の LP は、1 試行目の 10 回目の LP と比べると RRI の推移が完全に終了して、 S が減少していることがわかる。

以上より、VIMS の早期発見には S の異常な増加、かつ d の減少を検出することで可能になると考えられる。これは d と S の両指標を用いて実現できる方法で、どちらか片方の変化では VIMS を検出できない。

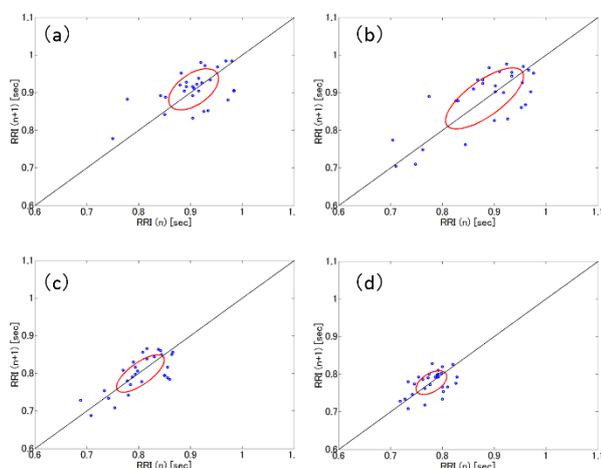


図 14 VIMS 時の LP 分布の推移 (a) → (b) → (c) → (d)

被験者 B の実験結果について、映像視聴初期に S は増加し、 d は減少している。この変化には VIMS が現れているが、被験者 B のデータでは一時的なものであり、その後はほとんど変動していない。VIMS は図 14 のように徐々に現れてくるもので、一時的な変化が起きただけでは VIMS ではない可能性が高い。したがって VIMS は現れていないという結論になり、実際にこれは図 9 (b) の結果と一致する。ただし、これには d 及び S の変化の閾値を設定し、増加・減少の判定をする必要があり、閾値の決定は個人差の問題が現れるため、ニューラルネット等の学習機能を用いる必要がある。

これが実現すれば、LF/HF による解析よりも早い段階で VIMS を発見することができる。VIMS 評価手法のさらなる精度向上のためには、今後の研究で VIMS と評価指標 d 、 S についての関係をより詳しく調べる必要がある。

6. むすび

本研究では、VIMS の発見までに要する時間を考慮し、LP を用いた心拍変動解析の有効性を調べた。その結果、LP 解析の指標 d 、 S に VIMS の影響が現れることが確認できた。また、VIMS 時における d 、 S の変化を分析し、VIMS の評価方法を提案することができた。さらに、LP は従来の自律神経評価指標である LF/HF に比べ、短時間で解析が可能であることが示された。

今後は、被験者数を増やし、データの信憑性を高めることと、VIMS をより精度よく評価するために、VIMS と LP の自律神経評価指標である d 、 S の関係性をより深く解析する必要がある。また、ニューラルネットワーク等による学習機能を用いて d 、 S の閾値設定の際の個人差の問題を解決することが必要であると思われる。

参考文献

- [1] Masaki Emoto, Masayuki Sugawara, Yuji Nojiri, “Viewing angle dependency of visually-induced motion sickness in viewing wide-field images by subjective and autonomic nervous indices”, ELSEVIER, Vol. 29, No. 2, pp. 90-99, Mar. 2008
- [2] 杉田典大, 吉澤誠, 田中明, 阿部健一, 山家智之, 仁田新一, 千葉滋, “映像酔いに対する自律神経系の 2 相性反応”, TVRSJ, Vol. 9, No. 4, pp. 369-376, 2004
- [3] I.Tsubaki, T.Morita, T.Saito, K.Aizawa, “An adaptive video stabilization method for reducing visually induced motion sickness”, IEEE International Conference on, Vol. 3, pp. 497-500, Sept. 2005
- [4] H.Hagiwara, “Estimation of sleep stage in the falling asleep period using a Lorenz plot of ECG RR intervals”, Annual International Conference of the IEEE, pp. 2510-2513, Sept. 2009
- [5] 鈴木清, 砂川尊範, 新田保次, “心拍変動による自転車走行空間の安全性・快適性評価方法に関する研究”, 日本福

社のまちづくり学会, Vol. 14, No. 2, pp. 1-8, 2012

[6] 石田眞二, 武田超, 白川龍生, 鹿島茂, “鉄道サービスにおけるストレス軽減効果の検証”, 運輸政策研究所, Vol. 15, No. 2, pp. 10-19, 2012

[7] 豊福史, 山口和彦, 萩原啓, “心電図 *RR* 間隔のローレンツプロットによる副交感神経の簡易推定法の開発”, 人間工学, Vol. 43, No. 4, pp. 185-192, 2007

[8] 志賀哲, 中尾光之, 山本光璋, “自律神経系活動のスペクトル指標に基づく心拍リズムの解析”, 電子情報通信学会誌, Vol. 96, No. 379, pp. 67-74, 1966

[9] W.T.Lo, Richard H.Y.So, “Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes”, ELSEVIER, Vol. 32, No. 1, pp. 1-14, Feb. 2001

[10] 氏家弘裕, “映像の安心な利用を可能にする映像酔い評価システムの開発”, シンセシオロジー, Vol. 3, No. 3, pp. 180-189, Aug. 2010

[11] Gari D. Clifford, Lionel Tarassenko, “Quantifying Errors in Spectral Estimates of HRV Due to Beat Replacement and Resampling”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 52, No. 4, Apr. 2005

[12] 外山寛, 木竜徹, 岩城護, 飯島淳彦, “自律神経系指標の時間推移からみた映像酔いの評価”, 電子情報通信学会誌, Vol. 109, No. 406, pp. 85-90, 2010