

アクティブシートサスペンションによる 超小型モビリティの乗り心地改善 (マスキングの位相の影響に関する検討)

落合 真輝^{*1} 勝間田 龍翔^{*1} 王 鼎^{*1} 笠松 忍^{*2} 呉 文宝^{*2} 小林 一景^{*2}
黒田 純平^{*2} 池田 圭吾^{*3} 遠藤 文人^{*4} 加藤 英晃^{*5} 成田 正敬^{*5}

Improvement of Ride Comfort of Ultra-compact Mobility Vehicles by Active Seat Suspension (Consideration of the Effect of Masker Phase) by

Masaki OCHIAI^{**1}, Ryoga KATSUMATA^{**1}, Ding WANG^{**1}, Shinobu KASAMATSU^{**2}, Wu WENBAO^{**2}, Ikkei KOBAYASHI^{**2}, Jumpei KURODA^{**2}, Keigo IKEDA^{**3}, Endo AYATO^{**4}
Hideaki KATO^{**5}, and Takayoshi NARITA^{**5}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jul.28, 2025)

Abstract

Improvement of ride comfort for ultra-compact mobility vehicles is required because such vehicles can easily enter narrow and unpaved roads, reducing the driver's ride comfort. Furthermore, vibration control does not always guarantee a comfortable ride for all individuals. As a solution, this study proposes an active seat suspension. To date, our study group has conducted investigations focusing on frequency, jerk, and acceleration amplitude. However, achieving more accurate control will require additional areas of investigation. In this study, LIR, a stress index obtained from differences in cerebral blood flow, and LF/HF, a stress index obtained from ECG heart rate variability, were used for the evaluation. Specifically, an experiment was conducted on nine participants in which the phase of 2 Hz and 8 Hz maskers was varied while they were exposed to unpleasant 4 Hz vibrations. The influence of masker phase on driver ride comfort was examined using biometric information. From the results, an improvement trend was observed in both 2 Hz and 8 Hz masking, but there were differences in the effect depending on the phase, and a phase with a large improvement trend was confirmed.

Keywords: Ride comfort, Active seat suspension, Electrocardiogram, Voice coil motor

1. 緒言

近年、地球温暖化や高齢化社会の観点から、超小型モビリティへの需要が高まっている。これに伴い、国土交通省は令和2年の保安基準改正において超小型モビリティに関する衝突安全基準の緩和を行ったことで、超小型モビリティの需要がより増してくると予想される^{1,2)}。超小型モビリティは型式指定車の場合、長さ2.5 m以下、横幅1.3 m以下、高さ2.0 m以下と小型であるため、幅の狭い道路への通行が容易である。このような狭い道路は未舗装である場合もあるため、一般の乗用車よりも路面の凹凸による振動の入力が大きくなる可能性がある。

路面から振動による乗員の乗り心地低下を防ぐためには、十分なストローク量や減衰性能を持つサスペンションが必要だが、その軽量な車体であるが故に十分な制振性

能を有するサスペンションを車両の4輪のサスペンション全てに設置することは車両の構造上難しい。

そこで当研究グループはこの課題を解決するため、1人乗りの超小型モビリティの座席下部にリニアモータを設置して、座面の加速度を測定して振動を制御する超小型車両にアクティブシートサスペンションを搭載し、乗員の快適性を向上する手法を提案している³⁾。これまでに外乱振動に対しての応答性が高い特徴を持つスライディングモード制御⁴⁾や、予想が困難な振動を安定して制御出来る特徴を持つ μ シンセンス制御の適用⁵⁾により、同期的な路面からの振動を座面で低減できたことを確認している。

一方で、路面からの振動を全て制振する制御が全ての人にとって必ずしも最良な乗り心地をとらないことも確認されている。従って、乗員の体調や心理状態、走行環境によって振動の感じ方が変化すると考えられ、その状況に応じた適切な振動を加えることで、より高度な乗り心地の向上が期待できる。

*1 東海大学大学院工学研究科機械工学専攻
*2 東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻
*3 北海道科学大学工学部機械工学科
*4 福岡工業大学工学部電気工学科
*5 東海大学工学部機械システム工学科



Fig. 1 Photograph of experiment vehicle



Fig. 2 Photograph of active seat suspension

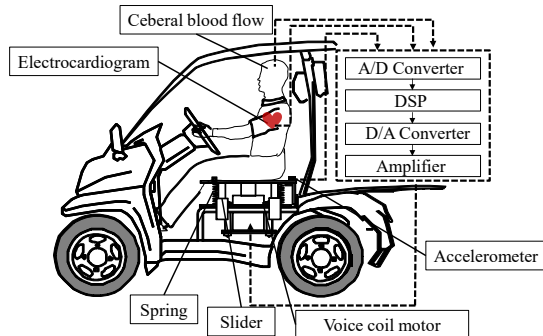


Fig. 3 Schematic diagram of active seat suspension system

そこで著者らは、音響分野において、騒音と異なる音声を重畳することで、人の騒音に対する感度を相対的に低下させ、快適性の向上を図るマスキング^{6,7)}に着目した。このマスキングを車両の振動に応用して、路面から伝わる振動に対して異なる周波数成分の振動を意図的に加える手法を提案した。この手法は単純な振動入力を行う簡易的な手法であり、高度な制御システムを必要としない点から、早期的な実現性の高い制御手法であるが、車体に入力された振動に対するマスキングの研究事例は極めて少ない。当研究グループでは、路面の振動を想定した 5 Hz の振動（マスキング）に対して、異なる周波数の正弦波状の振動（マスキング）を重畳し、不快な振動の感度を相対的に低減させることで、乗り心地の改善が可能であることを明らかにしている⁸⁾。これまでにマスキングの周波数⁹⁾や加速度振幅¹⁰⁾、躍度¹¹⁾に着目して検討を行い、乗り心地がどのように変化するか検討を行ってきた。

しかしながら、このシステムを実際に利用する状況を想定すると、アクティブシートサスペンションは走行中、常にマスキングの振動を発生させるのではなく、乗り心地を特に悪化させる 4~8 Hz の振動が検出されてからマスキングの振動を発生することになる。このときマスキング

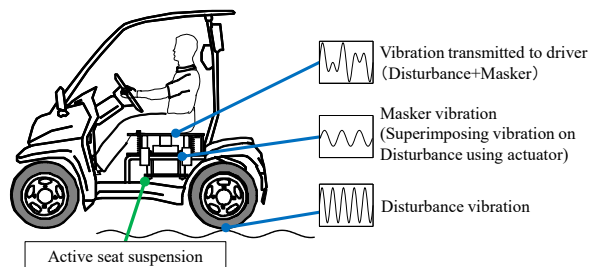


Fig. 4 Masking method

を開始するタイミングによって外乱となるマスキングとマスキングの位相差によって乗員の乗り心地が変化すると考えられる。そこで本研究は、4 Hz のマスキングに対して 2 Hz, 8 Hz のマスキングを重畳し、その位相差を変化させた。このとき乗員の乗り心地を定量的に評価するため、加振された実験協力者の心電図と脳血流を計測し、乗員の乗り心地評価を行った。

2. アクティブシートサスペンションを搭載した超小型モビリティ

2.1 実験車両

本研究で使用した超小型電気自動車の写真を Fig. 1 に、シート下に搭載するアクティブシートサスペンションの写真を Fig. 2 に示す。加えて、制御系を含めた概略図を Fig. 3 に示す。Fig. 2 のとおり、アクティブシートサスペンションは座面となるシート板を支えるようにコイルスプリングを 4 本配置し、シート板の変位を上下方向のみとするため、4 本のリニアスライダが設置されている。これらのコイルスプリングとスライダと並列に制御用アクチュエータとしてリニアモータの一種であるボイスコイルモータを座面中央に設置した。

シート座面には加速度ピックアップが設置され、座面の加速度を測定する。得られた加速度ピックアップの信号は、A/D 変換器を介して Digital Signal Processor(DSP) に入力される。入力された加速度を元に DSP 内で制御信号を計算し、D/A 変換器を介して出力する。この信号は増幅器を介してアクチュエータであるボイスコイルモータに入力され、座面を動作する。

アクティブシートサスペンションは乗員や運転者の座席の下に搭載することを想定しているため、従来のシャシーサスペンションと比べて乗り心地と運動性能を分けた設計が可能となる。そのため、4 輪それぞれに対するアクティブサスペンションよりも低コストかつ小型で装着も可能であると期待され、汎用性が高いと考えられる。また、座席部分にシステムを搭載し座席ごとに制御が可能になるため、シートに座る乗員それぞれに最適な制御が可能になり、より高度な乗り心地制御の実現が期待出来る。

また将来的には、心電図や脳血流といった乗員の生体情報を取得し、リアルタイムに乗り心地を評価し制御を反映させることも可能になる。

2.2 路面からの振動に対するマスキング

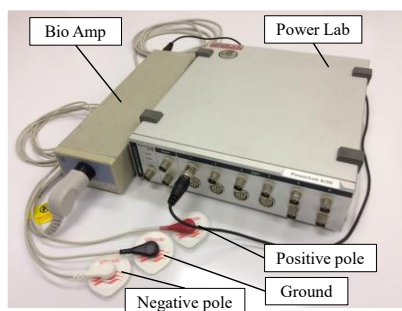


Fig. 5 Electrocardiogram-based measurement

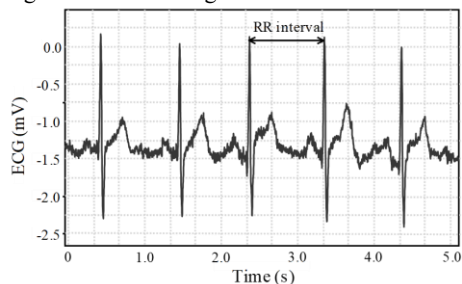


Fig. 6 RR Interval

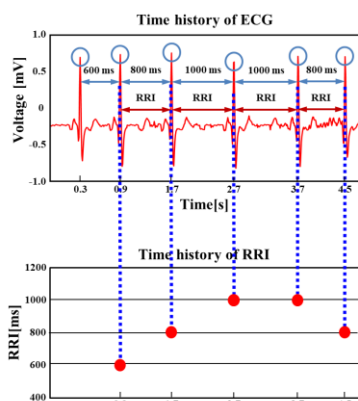


Fig. 7 How to draw the time history of RRI

マスキングとは地面から伝わる不快な振動に対して、アクティブシートサスペンションを通して異なる周波数振動を積極的に入力することで、乗員にとって不快な振動を相対的に低減させる手法である。Fig. 4は実験車両にて対して行ったマスキングの概略図である。同図のように路面の凹凸により、Fig. 4 下部に示すような振動が車体に入力される。この振動をシステムが検知し、Fig. 4 中部に示すようなマスキャーを VCM で発生させる。乗員には、乗り心地を悪化させる路面からのマスキャーに VCM により発生したマスキャーを重畳した、Fig. 4 上部に示すような振動が入力される。

3. 生体情報を用いた乗員の乗り心地評価

3.1 心拍変動の取得方法と評価方法

乗員の乗り心地を評価する際には乗車後にご感じたかを主観的に回答するような、アンケートを記入させる質問紙法が多く用いられる。しかしながら、評価基準が実験協力者によって異なることから、実験協力者間の評価が難しい。加えてリアルタイムに結果を収集することが困難なため、乗り心地に影響を与えたイベントがいつ

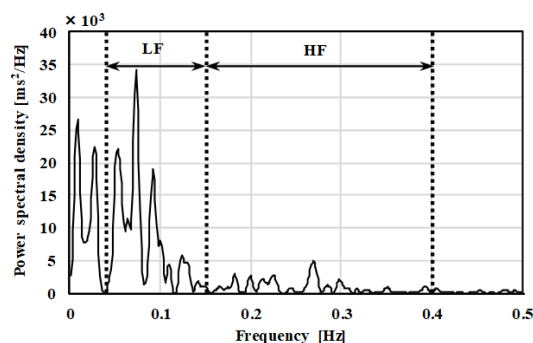


Fig. 8 HRV spectrum

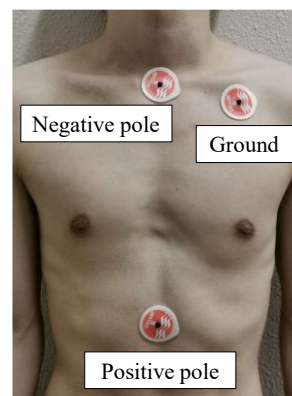


Fig. 9 Installation position of electrode

発生したのか検出することは不可能である。

そこで心理状態を評価方法として心電図と脳血流データを取得した。Fig. 5 に心電図計測器、Fig. 6 に測定中に取得した心電図波形の一例を示す。Fig. 6 において、周期的に現れるプラス方向のピークは R 波と呼ばれる。R 波は心拍ごとに発生し、左心室の収縮を反映している。R 波から次の R 波までの時間を R-R 間隔 (RRI) という。RRI は心拍の変動を示す重要な指標であり、これを時系列データとして整理すると、Fig. 7 のような RRI の変動パターンが得られる。さらに、RRI の時系列データに高速フーリエ変換 (FFT) を適用することで、Fig. 8 に示すようなパワースペクトル密度 (PSD) を算出する。このパワースペクトルにおいて、0.04~0.15 Hz の周波数成分を低周波 (LF)、0.15~0.4 Hz の周波数成分を高周波 (HF) と定義する。LF と HF は自律神経系、交感神経系、副交感神経系の活動の指標として広く用いられており、特に LF は交感神経の活動、HF は副交感神経の活動に関連する。交感神経系は闘争、防御、逃避などの行動を開始する前に緊張状態になる。これは様々な行動を円滑に行えるよう覚醒状態を作り出し、それに伴い血圧の上昇、活動器官への血液量増加による心拍数の上昇など、身体の活動レベル・運動能力を高めるように働く。他にも現代社会での人間関係などによっても精神的ストレスが要因にもなり、身体的活動に対する緊張が必要ない状態にも関わらず、同様の反応が起こる¹²⁾。本研究では実験協力者の自律神経系のバランスを示す指標として LF/HF を用いた。この LF/HF は、交感神経と副交感神経の相対的な活動状態を示し、その変動を解析することで心理的ストレスやリラックス状態の評価が可能となる。LF/HF が高い場合は交感神経の活動が優位であり、ストレ状態を示

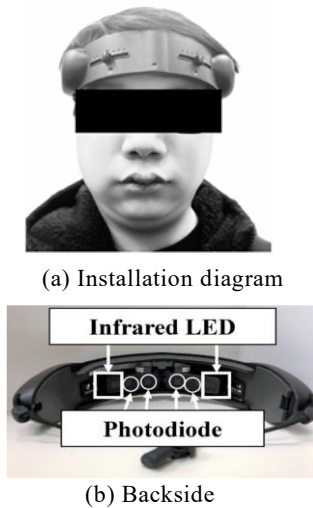


Fig. 10 Cerebral blood flow measuring device

す。一方、LF/HF が低い場合は副交感神経の活動が優位であり、リラックス状態であると判断できる。心電図測定には、日本光電株式会社の Power Lab ML825 2/25 を用い、解析システムは同社の Heart Rate Variability を用いた。心電図は心臓の電気活動を表し、Fig. 9 のように胸部に直接取り付けられた電極を介して心拍数の電位差を測定し、心筋活動を評価する。心筋活動以外の活動電位の影響を受けにくく、R 波を安定して測定できる NASA 誘導法を採用した。

3.2 脳血流の測定方法と評価方法

脳血流測定には携帯型脳活動測定装置 HOT-1000（株式会社 NeU）を使用した。Fig. 10 に示すように、本装置は額部に装着する形状をしており、リアルタイムでの測定が可能である。HOT-1000 は波長 810 nm の近赤外光（NIR: Near Infrared Radiation）を照射する LED と、それを受光する 2 つのフォトダイオード（PD）で構成されている。この装置は近赤外分光法（NIRS）の原理を用いており、LED から発せられた近赤外光が頭皮・頭蓋骨を透過し、大脳皮質の前頭前野に到達する。その後、脳組織内で散乱・吸収された光の一部が再び頭皮表面へ戻り、フォトダイオードで検出される。脳の活動が活発になると局所的な酸素消費量が増加し、それに伴い血液供給が増える。この結果、酸素化ヘモグロビン（Oxy-Hb）や脱酸素化ヘモグロビン（Deoxy-Hb）の濃度が変化する。ヘモグロビンは特定の波長の光を吸収する性質があり、血流量が増加するとフォトダイオードで検出される光量は減少する。したがって、受光強度の変化を解析することで、脳の血流量を推定することが可能である。¹³⁾ 本研究では、測定された脳血流データをもとに左右の脳血流量比（LIR）を算出した¹⁴⁾。LIR の計算には、右側の脳血流量を R_t 、左側の脳血流量を L_t 、測定区間における右脳活動の最小値を R_{min} 、左脳活動の最小値を L_{min} として式(1)を用いて算出した。

$$LIR = \frac{\Sigma[(R_t - R_{min}) - (L_t - L_{min})]}{\Sigma[(R_t - R_{min}) + (L_t - L_{min})]} \quad (1)$$

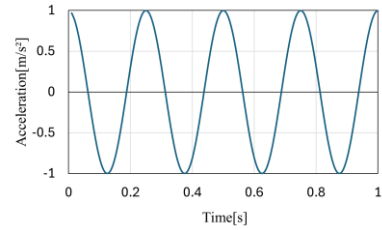


Fig. 11 Time histories of operated acceleration as maskee

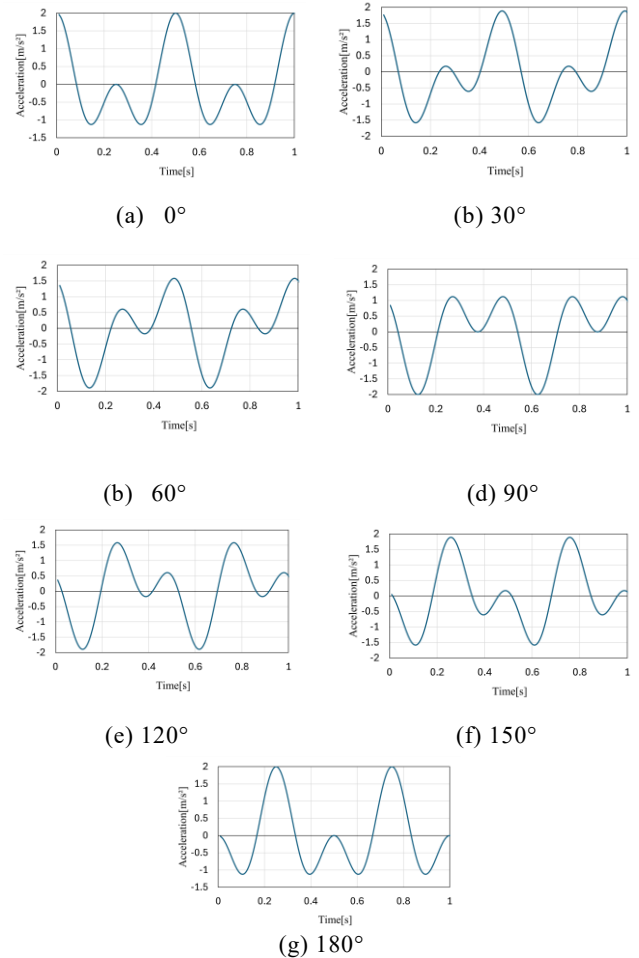


Fig. 12 Time histories of operated vibration under masking (Maskee : 4 Hz, Masker : 2 Hz)

LIR の数値が増加した場合、右脳の血流量が増加しストレス状態と判断し、減少した場合は左脳の血流量が増加しリラックス状態であると判断する。

4. アクティブシートサスペンションを用いたマスキングによる乗員の加振実験

4.1 実験条件

実験は車両を屋内にて走行させない状態で実験を行った。実験協力者は健康な大学生 9 名とした。また、生体情報は加振時間の 3 分間取得し、外乱振動とマスキング振動のストレス値を比べることで評価する。実験協力者に対して Fig. 14 のような実際に車両を運転している際と同様な運転姿勢を取るよう指示した。

加振実験を開始する前に実験協力者の心理状態を

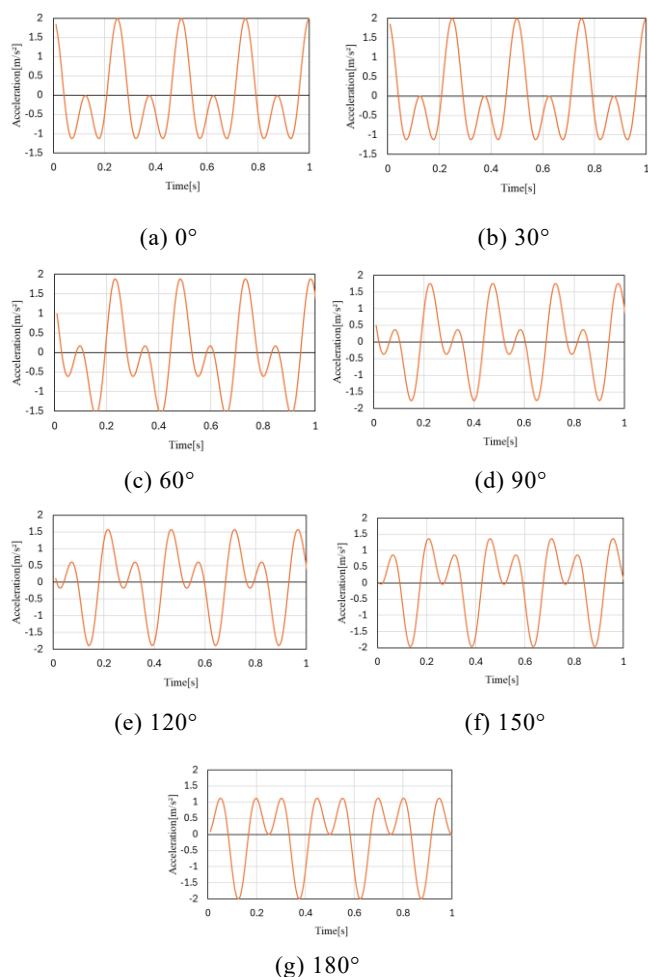


Fig. 13 Time histories of operated vibration under masking (Maskee : 4 Hz, Masker : 8 Hz)

一定に保つため、実験協力者に 1 分間目を閉じた状態で安静にするよう教示した。次に路面からの振動を想定した Fig. 11 に示すような 4Hz の正弦波で加振した。そして 4Hz の振動にマスキートとなる振動を重ねた振動で 1 分間加振した。マスキートの周波数は、ISO2631¹⁵⁾ や Janeway¹⁶⁾等によって人が不快に感じる周波数帯域は 4～8 Hz と報告されており、そこから 4 Hz とした。周波数の感覚は武井ら¹⁷⁾によって 0.2～3 Hz はふわふわ感、8～20 Hz はばたつき感と報告されている。中でも整数比である 2Hz と 8Hz は周期的な位相の干渉が規則的に生じることから、位相差による乗り心地の影響が大きくなると考えられる。また、それぞれ主観的な振動感覚がフワフワ感、バタバタ感と異なることから、マスキートの周波数は 2 Hz, 8 Hz とした。また、Fig. 12, Fig. 13 に示すような加振波形の最大値や最小値を取る時点が変化が確認出来る位相差 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°の 7 種類とした。マスキートとマスキートの加速度振幅(RMS)は 1.0m/s²とした。なお、アクティブシートサスペンションの加振によって乗員に伝わる振動が減衰せず直接伝わるようにするため、シート素材にはアクリル板を設置し、ボイスコイルモータの出力が直接伝わるようにした。また、車体の固有振動数による共振を防ぐため、車体はジャッキアップさせた状態で実験を行った。

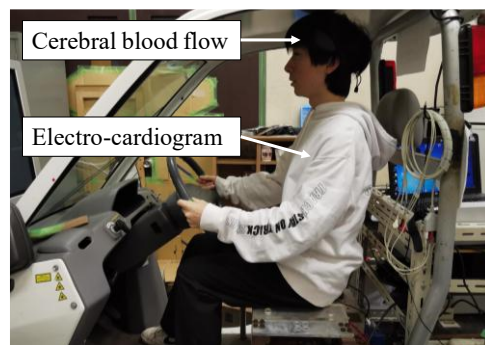


Fig. 14 Cerebral blood flow measuring device

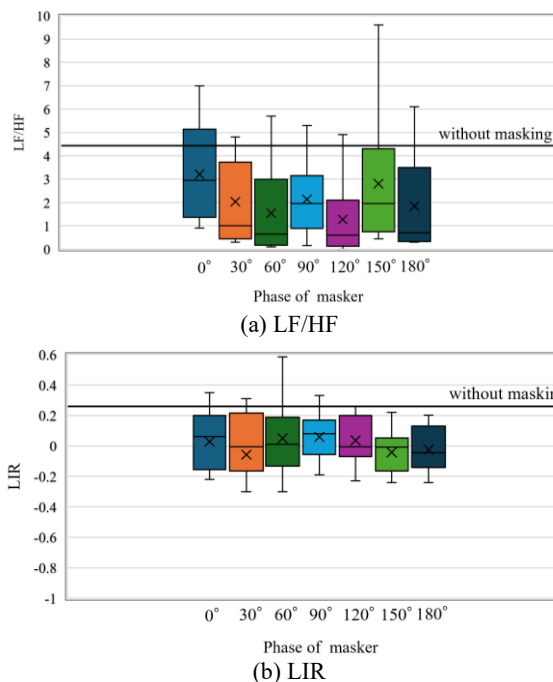


Fig. 15 Experimental results in masker with 2 Hz

4.2 実験結果

4 Hz のマスキートに対して重畳するマスキートの位相を変化させた加振実験を行った。9 人の実験協力者に対して行った 2 Hz のマスキートを使用した際の結果を Fig. 15 に、8 Hz の結果を Fig. 16 に示す。Fig. 15, Fig. 16 の (a) は心電図の計測データから算出した LF/HF, Fig. 15, Fig. 16 の (b) は脳血流量から算出された LIR と位相の関係を示している。LF/HF と LIR はどちらも低下すると実験協力者のストレスが低下していると判断できる。図中の×のプロットは実験協力者全員の平均値を示している。なお、図中の実線はマスキートを重畳しない状態、つまり 4 Hz のみ含まれる加速度の振動波形で実験協力者を加振した際の結果であり、この線より下の領域の結果が得られたとき、マスキングにより乗り心地が改善すると評価することができる。今回の結果では、すべての条件に置いて生体情報の数値の平均を示す×のプロットは、実線を下回っておりマスキングによる乗り心地改善が得られた。

次に Fig. 15 の 2 Hz の結果に着目すると、Fig. 15(a)の LF/HF の結果からは、120°の条件で LF/HF の平均値が最も低い結果が得られた。また Fig. 15 (b)の LIR から 30°

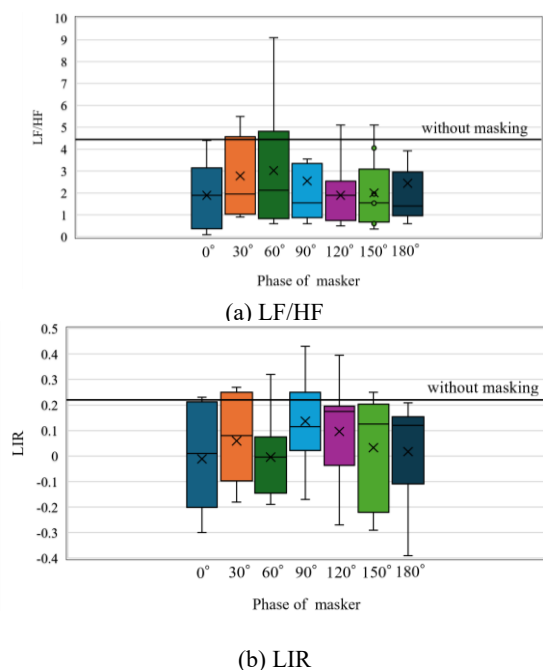


Fig. 16 Experimental results in masker with 8 Hz

の条件で LIR の平均値が他の位相と比べて最も低い結果が得られ、乗り心地の改善が確認できた。

最後に Fig. 16 の 8 Hz の結果に着目すると、Fig. 16(a) の結果からは、120°の条件で LF/HF の平均値が他の位相と比べて最も低い結果が得られた。また Fig. 16(b) の LIR からは 60°の条件で LIR の平均値が他の位相と比べて最も低い結果が得られ、乗り心地の改善が確認できた。

5. まとめ

本論文は、マスキング手法による振動制御システムの構築を目的とし、生体情報を用いた位相差によるマスキング手法による乗り心地改善の有効性の検討を行った。実験結果より、4 Hz が含まれる振動をストレスと感じる実験協力者において、2 Hz、8 Hz のマスキングを重量することで乗り心地が改善できたことを確認した。さらに、特に乗り心地が改善する位相条件を得ることができた。

参考文献

- 1) Urban Affairs Bureau and Automobile Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Guidelines for the Introduction of Ultra-compact Mobility: Toward the Realization of New Social Lifestyles through the Development and Use of New Mobility (2012).
- 2) 国土交通省: 国土交通省における超小型モビリティの取組について, pp. 10 (2020).
- 3) 押野谷康雄, 石橋 一久, 新井創: 能動型シートサスペンションによる小型電気自動車の乗り心地改善に関する基礎的検討, 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 4 pp. 209-205 (2003).
- 4) 押野谷康雄, 新井創, 石橋一久: ボイスコイルモータを用いた小型車両用シート制御（一自由度モデルに対するスライディングモード制御を用いた実験的検討）日本応用磁気学会誌, Vol. 28, pp. 140-144 (2011).
- 5) 荒川敬, 椎野弦士, 長谷川真也, 押野谷康雄, 石橋一久: 小型車両用アクティブシートサスペンション(μ-新センサを用いた実験的検討)日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, No. 08-1 (2008).
- 6) 生藤大典, 辻川美沙貴, 中山雅人, 西浦敬信: 聴覚マスキングに基づく室内騒音の不快感低減手法, 電子情報通信学会論文 A, 基礎・境界 Vol. J96-A, No. 8, pp. 551-519 (2013).
- 7) 内田和宏, 西野隆典, 伊藤克亘, 武田一哉, 板倉文忠: 聴覚マスキングを用いた頭外音像定位の評価法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 103, No. 501, pp. 15-20. (2003).
- 8) Keigo Ikeda, Ayato Endo, Ryosuke Minowa, Takayoshi Narita and Hideaki Kato: Ride Comfort Control System Considering Physiological and Psychological Characteristics: Effect of Masking on Vertical Vibration on Passengers, MDPI Actuators Vol.7, No.42, (2018).
- 9) Ayato Endo, Keigo Ikeda, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato and Takayoshi Narita: Evaluation of Ride Comfort and Vertical Vibration of Ultra-Compact Mobility Vehicles Using Brain Blood Flow, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol. 43 pp. 17-23 (2018).
- 10) 加藤英晃, 長谷川 真也, 押野谷 康雄: 超小型車両用アクティブシートサスペンションの乗り心地評価（振動加速度が心拍変動に与える影響）, 東海大学紀要工学部, Vol. 52, No. 2, pp. 263-270(2012).
- 11) Takahiro Ohta, Keigo Ikeda, Ayato Endo, Hideaki Kato, and Takayoshi Narita: Ride Comfort Estimation Method Using Biological Information and Subjective Evaluation: A Fundamental Consideration Focusing in Jerk of Vertical Vibration, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol. 45. pp. 51-57(2020).
- 12) 後藤幸生「心身自律神経バランス学」真興交易(株)医学出版部 pp10-17.
- 13) 坂谷薫「NIRS-基礎と臨床-」新興医学出版 pp3.
- 14) W. Ishikawa, M. Sato, Y. Fukuda, T. Matsumoto, N. Takemura and K. Sakatani, Correlation between asymmetry of spontaneous oscillations of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: A near-infrared spectroscopy study, J. Biomed. Opt., 19 No. 2 027005 (2014).
- 15) I.S.O.: Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, No. ISO-2631 (1978).
- 16) Janeway, R.N.: Human Vibration Tolerance Criteria and Application to Ride Evaluation : SAE Tech. Pap. Ser. No. 750166, pp. 24. (1975).
- 17) 武井一剛, 石黒陸雄, 乗員の官能評価にもとづく乗り心地評価, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 30, No. 3, pp. 47-56. (1995).