

東海大学大学院 令和3年度 博士論文

生体情報を用いた超小型モビリティの
乗り心地感覚推定に関する研究

指導 加藤 英晃 講師

東海大学大学院 総合理工学研究科
総合理工学専攻

池 田 圭 吾

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	2
1.1.1 超小型モビリティの乗り心地	2
1.1.2 アクティブシートサスペンション	4
1.1.3 上下方向の振動に対する乗り心地	3
1.1.3.1 振動の加速度の周波数について	6
1.1.3.2 振動の躍度について	6
1.1.4 アクティブシートサスペンションによる制振制御	8
1.1.5 生体情報を用いた乗り心地評価	9
1.2 本論文の目的	12
1.2.1 乗員に合わせた乗り心地制御の提案	12
1.2.2 提案したシステムを構成するための課題	14
1.2.3 入力した様々な振動の状態が乗員の乗り心地に与える影響	15
1.2.3.1 躍度	15
1.2.3.2 マスキング	17
1.2.4 生体情報から乗員の乗り心地感覚の推定	19
1.3 従来の研究	20
1.3.1 振動による人体の影響	20
1.3.2 主観評価を用いた乗り心地評価	21
1.4 論文の構成および概要	23
第2章 加速度および躍度が乗員の乗り心地感覚に与える影響	25
2.1 はじめに	26
2.2 心電図を用いた乗員の心理状態の推定方法	27

2.3	実験方法	29
2.4	躍度が乗り心地に与える影響	34
2.4.1	実験条件	34
2.4.2	実験結果	38
2.5	乗り心地に対する躍度と周波数の関係	42
2.5.1	実験条件	42
2.5.2	実験結果	43
2.6	まとめ	45
第3章	振動のマスキングを用いた乗り心地改善に関する検討	46
3.1	はじめに	47
3.2	実験条件	48
3.3	実験方法	50
3.4	加速度振幅一定における単一周波数の加振実験	53
3.4.1	加振条件	53
3.4.2	実験結果	54
3.5	重ね合わせ振動に関する基礎検討	56
3.5.1	加振条件	56
3.5.2	実験結果	59
3.6	マスキングによる乗り心地向上効果の検討	61
3.6.1	加振条件	61
3.6.2	実験結果	62
3.7	まとめ	66
第4章	生体情報を用いた乗員の乗り心地感覚推定に関する検討	67
4.1	はじめに	68
4.2	脳血流量の計測と測定方法	69
4.3	主観評価を用いた乗り心地評価	72

4.4	加振条件	74
4.5	重回帰分析	77
4.6	質問紙により得られた主観評価と生体情報により推定した主観評価 の関係	80
4.7	まとめ	83
第5章	結論	84
	謝辞	88
	付録	89
	参考文献	90

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 超小型モビリティの乗り心地

近年、図 1-1 に示すような一定地域内での比較的短距離の移動に利用される超小型モビリティが、いくつかの自動車メーカーから販売されている。今後、超小型モビリティに対する需要がますます増大することが予想される。また、超小型モビリティは、全長 2.5 m 以下、車幅 1.3 m 以下、高さ 2.0 m 以下と、路地や未舗装路への乗り入れが容易である。また、市場調査によれば、超小型モビリティは、主に郊外や農村部、山間部における利用者が多いことが明らかとなっている。さらにこれらの車両は、観光地などでの周遊にとって望ましい移動具として利用が期待される。である。このことから、従来車両よりも超小型モビリティは、段差や凹凸の多い道を頻繁に走行すると予想される。また、超小型モビリティは車体が非常に軽量であることから、これまでの一般的な乗用車と比較して路面の起伏や段差による振動が伝わりやすいという懸念がある。このため、超小型モビリティには、安全・快適に走行するためのシステム構築は不可欠であるが、車体が非常に小さいことから、振動による乗り心地の劣化に対して講じることのできる対策もこれまでの乗用車に比べて非常に限られてしまうことも大きな課題である。また、超小型モビリティは従来車両とは大きく異なり、路地における未舗装路などのように整備が不十分な環境を走行する機会も多くなっている。そこで座面下部にリニアアクチュエータを設置することで限られた空間においても搭載可能かつ乗り心地改善が可能なアクティブシートサスペンションが提案されている[1-1].



図 1-1 超小型モビリティ

1.1.2 アクティブシートサスペンション

従来の乗用車では車輪と車体の間に設置されるサスペンションにより上下方向の振動を低減している。しかしながらこのような従来のサスペンションの性能は車両運動性能にも大きく影響を与える。例えば、乗り心地に重みを置いたシャシサスペンションの設定ではバネを柔らかくする必要があるが、バネを柔らかくすることで車両運動性能は低下してしまう。また、車両運動性能を向上させるためにはサスペンションのバネをある程度硬いものを設置する必要があるが、乗員に入力される振動も大きくなり乗り心地は劣化する。このように乗り心地と車両運動性能にはトレードオフの関係にある。また、車種によっても乗り心地と車両運動性能の重み付けは異なる。一部の車両では乗り心地と運動性能を両立するためサスペンションにアクチュエータを搭載したアクティブサスペンションが用いられている場合もあった[1-2]～[1-5]。しかし、超小型車両においてシャシサスペンションをアクティブに制御する装置を4輪それぞれに設置することは、決して容易ではなく、車体重量の増加を招き、航続距離の減少にもつながってしまうことが懸念される。

上記のような、シャシサスペンションにより乗り心地の改善が難しい車両での振動制御装置として、図1-2に示すアクティブシートサスペンション提案されている[1-6]。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能動制御装置である。そのため、従来のシャシサスペンションと比べ、乗り心地と運動性能を分けて設計が可能となる。また、座席ごとに制御ができるため、乗員ごとに制御が可能になりより高度な乗り心地制御が可能となる。現在は、車体のサスペンションで乗り心地を改善することが困難な農業用トラクタ[1-7]や、乗員へ伝わる振動が大きく乗り心地の劣化が問題となっている重機や大型トラック[1-8]でも実用化されている。

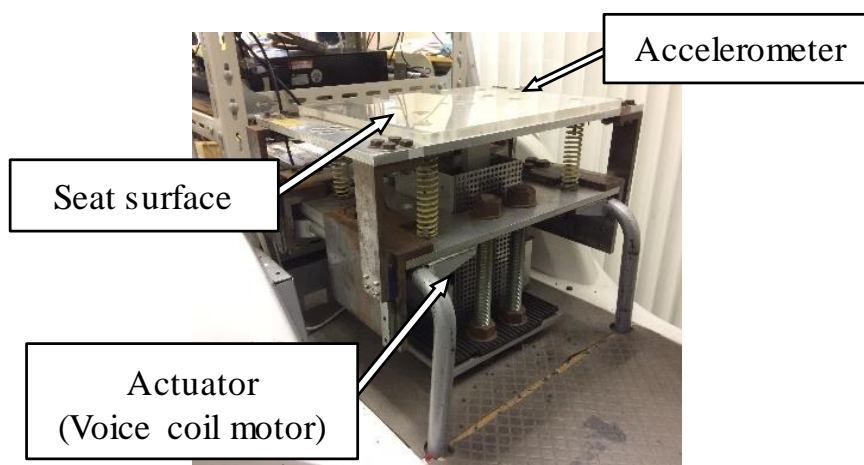


図 1-2 アクティブシートサスペンション

1.1.3 上下方向の振動に対する乗り心地

自動車、鉄道、航空機などの輸送機械における製品設計の要求はますます高度化しているため、快適性や乗り心地など乗客の心理的な観点から品質を向上させることがより強く求められる。輸送機械における乗り心地の劣化は振動や騒音、車室内温度などの様々な要因が複合的に影響するが、鉄道では特に振動が快適性に影響を与えるという調査結果もある[1-9]~[1-22]。

1.1.3.1 振動の加速度の周波数について

自動車の乗り心地評価にて重視する振動特性として上下方向の振動がある[1-23]。また、0.5~80 Hz の周波数帯域で上下方向の加速度の周波数にて全身振動が人体に与える影響として ISO2631 の等感覚曲線[1-24]や Janeway の乗り心地限界曲線[1-25]等では 4~8 Hz の上下方向の加速度の周波数において人間が振動を敏感に感じるため不快な振動であるとされている。図 1-1 に示す ISO2631 の乗り心地曲線では暴露時間において周波数毎に同じ大きさと感じる加速度の実効値を示している。図中の 4~8 Hz で加速度振幅の実効値が下がっており、この帯域が人体にとって不快と感じやすい。また、加速度振幅の実効値を増加させると暴露時間が短くなる傾向にある。

1.1.3.2 振動の躍度について

躍度は加加速度やジャークとも呼ばれ、加速度の時間変化率を示す指標である。すなわち、加速度の時刻歴波形の傾きが大きいほど躍度は大きくなり、加速度が一定の場合は躍度が 0 となる。上下方向の躍度は乗り心地感覚に影響を与える物理量の一つと考えられている。例えば、エレベータの制御システムでは、最大加速度が 0.9 m/s^2 以下、最大躍度が 1.3 m/s^2 以下を目標値としているなど、乗り心地の観点から躍度を一定値以内に収めるように設計されている [1-26]~[1-29]。自動車においては、前後方向の躍度の制御システムを検討している例があり、加減速時の前後輪のトルク配分を変更することで実現している[1-30]。

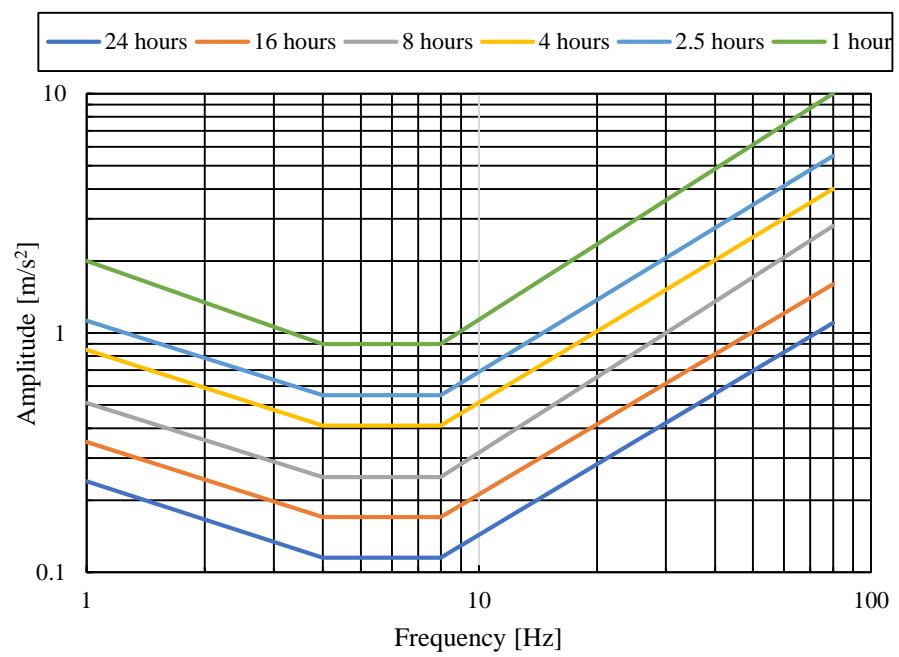


図 1-3 ISO2361 に規定されている乗り心地曲線

1.1.4 アクティブシートサスペンションによる制振制御

これまでにアクティブシートサスペンションを用いて乗員に入力される振動に対して振動を制振する制御として制振制御を提案している。制振制御による乗り心地評価として、生体情報を用いて乗り心地の評価を行ってきた。この結果から首の筋電位からは肉体的負担が軽減した[1-31]。しかしながら心理状態を反映する心拍変動からは乗員によって乗り心地は異なる傾向を示した。この結果は長時間外部からの刺激がなく乗員にとって飽きや眠気を我慢することによるストレスが原因だと考えられる。このことから振動を制振するだけでは必ずしも乗り心地改善とならないことを確認している。そこで、制振ではなく乗り心地感覚を変える切替え制御システムを提案している。これは、乗員の生体情報がストレス傾向を示した場合のみ制御を切り替え乗り心地感覚の異なる振動をアクティブシートサスペンションに入力し乗り心地感覚を変えるシステムの提案をしている[1-32]。

1.1.5 生体情報を用いた乗り心地評価

振動に対する乗り心地を評価する研究は、これまでも多く行われており、アンケートを用いた主観評価が一般的であった。しかしながら、アンケートではリアルタイムに心理状態を評価することが難しく、制御にフィードバックすることが困難である。近年、乗員の心理的な状態を計測・推定する手法として、生体情報を用いた心理状態の評価が提案されている[1-33]。生体情報による乗り心地の評価は連続的に計測することができる上、乗員が意識することなく心理状態を計測できるため、正確性も高いという特徴がある。

乗り心地感覚の評価が可能な生体情報として、中枢神経では脳波、脳血流がある。また、自律神経では心拍変動、皮膚電気反応、唾液アミラーゼがある。表 1-1 は各生体情報の得失について乗り心地評価の観点から整理したものである。同表より、各生体情報での乗り心地評価に用いた際の特徴について以下に述べる。

- ・ 脳波は、脳内にある神経細胞と神経細胞の間で化学物質によって情報を伝達した際に発生する電気信号を電極で測定する。中枢神経活動を反映する生体情報とされており、得られた脳波を周波数解析することで心理状態を評価することが可能である[1-34]～[1-36]。リアルタイムに計測でき生体情報の応答性は高いが、信号が微弱なため、体動や振動による耐ノイズ性が低い。
- ・ 脳血流量は脳内の酸素を運ぶヘモグロビンの増減を近赤外光が透過する光量で計測する手法である。ヘモグロビンには、吸光性がり、血流量が増加すれば吸光量が増加するため、検出される光量が減少する[1-37]。脳血流量は中枢神経系活動反映する生体情報とされておりリアルタイムに計測ができ、生体情報の応答性も高く振動による耐ノイズ性が高い。
- ・ 心拍変動は、心臓の鼓動の間隔を心電図などによって測定することで算出できる。自律神経活動を反映する生体情報であるとされており、心理状態の評価に用いられている[1-38]。リアルタイムに計測でき生体情報の応答性も高く振動による耐ノイズ性が高い。
- ・ 皮膚電気反応は、人の手掌部に 2 つの電極を貼り付け、2 つの電極の電位差を計測し皮膚抵抗活動を計測する[1-39]。自律神経活動を反映する生体情報とされており、心理状態に対する生体情報の応答性は高いが、リアルタイムに計測や振動による耐ノイズ性が低い特徴がある。
- ・ 唾液アミラーゼは唾液の中に含まれるアミラーゼの量を測定する。唾液アミ

ラーゼ活性は、不快な刺激で上昇、自律神経活動を反映する生体情報とされる[1-40]. 唾液アミラーゼは簡易に測定でき評価できるが、連続して取得がでず、心理状態に対する応答性が低い特徴がある.

以上のことから、本論文では脳血流量と心拍変動を用いることとした.

表 1-1 乗り心地感覚を評価することが可能な生体情報の特徴

乗り心地感覚の評価が可能な生体情報		リアルタイムかつ連続的な心理評価が可能か？	心理状態に対する生体情報の応答性の高さ	デバイス装着時の負担度の低さ	振動や体動に対する耐ノイズ性
脳血流	中枢神経	◎	◎	○	○
心電図 (心拍変動)	自律神経	◎	○	○	○
脳波	中枢神経	◎	○	○	×
皮膚電気反応	自律神経	△	◎	×	△
唾液アミラーゼ	自律神経	△	×	×	—

1.2 本論文の目的

1.2.1 乗員に合わせた乗り心地制御の提案

近年、自動車業界では乗員一人ひとりに合せた乗り心地の提案が重要視されている。振動による乗り心地感覚はこのように規格化された振動の感覚に対する制御技術の向上だけでは、振動に対する乗り心地への課題が無くなったとは言いきれない。なぜならば、振動による心理的影響は個々人で異なり、乗員が変われば振動の感じ方も変わるためである。加えて、乗員の振動の感じ方は外的な要因や乗員の心理状態など様々な要因によって時間的に変化すると考えられる。すなわち車両が走行しているときは振動の状況や乗員の心理状態が時々刻々と変化するため、全ての乗員において常に快適な乗り心地を実現することは難しい。そこで、さらに乗り心地を向上させるためには、乗員それぞれの心理状態を評価して、アクティブシートサスペンションによる振動制御へフィードバックする図 1-4 に示すようなアクティブ制御システムを実現することが必要である。

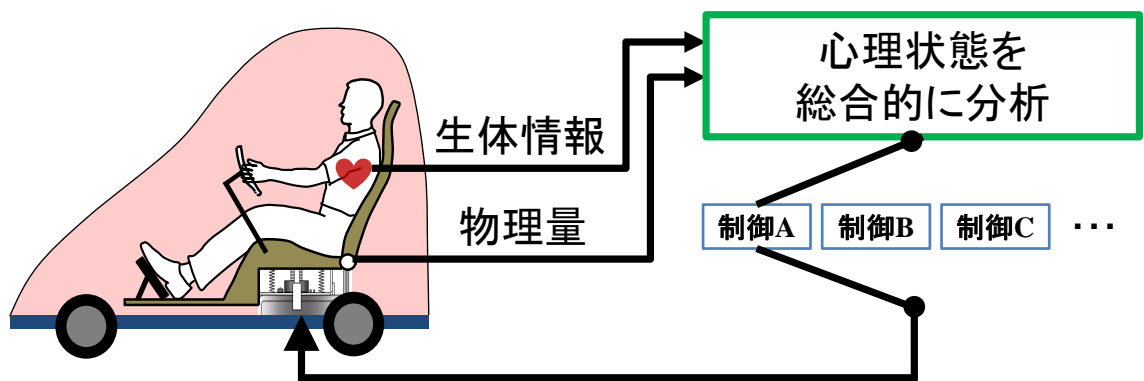


図 1-4 切り替え制御システム

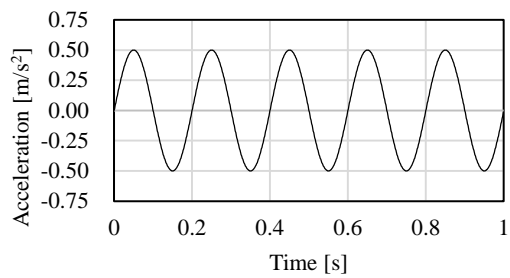
1.2.2 提案したシステムを構成するための課題

1.2.1 項で述べた乗員に入力される振動に対して生体情報の反応から乗員の心理特性を推定するシステムでは、まず乗員に入力される振動に対する乗員の生体情報の反応を確認する必要がある。乗員に入力される振動と入力された振動に対する生体情報から乗員の心理状態に合わせてアクティブシートサスペンションを用いて制御するシステムとなる。このシステムでは乗員にとって最適な運転環境を維持することが可能になる。乗員に入力される振動に対して乗員の生体情報の反応を明確にする必要がある。さらに乗員に入力される振動に対して生体情報の反応をセンシングし、乗員の振動に対する心理状態を評価する必要がある。乗員にとって最適な乗り心地となるようにアクティブシートサスペンションを制御する。そのために生体情報から乗員に入力される振動に対して心理状態を評価することが可能なのか検討する必要がある。乗員にとって最適な運転環境を維持することが可能である。

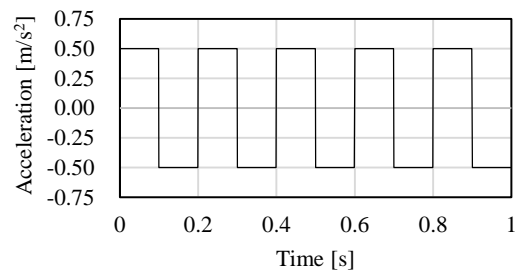
1.2.3 入力した様々な振動の状態が乗員の乗り心地に与える影響

1.2.3.1 躍度

1.1.3.2 で説明したように上下方向の躍度が乗り心地に影響があると言われて
いる。また、同じ周期かつ同じ振幅の加速度が入力される場合においても乗員が
感じる乗り心地は異なる場合がある。例えば図 1-5 (a)は 5 Hz の正弦波の時刻歴、
(b)は 5 Hz の矩形波の時刻歴を示す。この 2 つの加速度波形は振幅値、周期は同
じである。図 1-6 (a)は 5 Hz の正弦波の躍度の時刻歴、(b)は 5 Hz の矩形波の躍
度の時刻歴を示す。正弦波の場合の躍度は位相が 90° 遅れた正弦波状の波形と
なる。また振幅は加速度の角振動数に比例して増加する。一方矩形波の場合は加
速度波形が立ち上がる時と立ち下がる時にインパルス状の非常に高い躍度
が発生する。このように同じ周波数、同じ振幅であっても加速度波形が違ふこと
で、躍度の大きさは異なり乗り心地感覚に与える影響も大きいと考えられる。

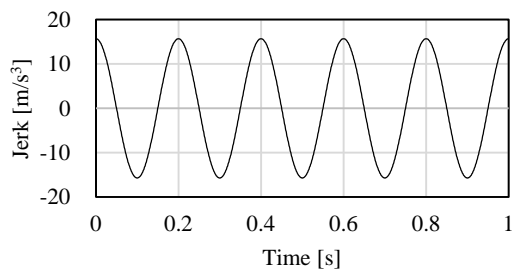


(a) 正弦波

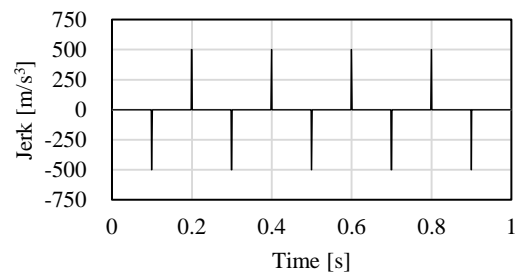


(b) 矩形波

図 1-5 5 Hz の加速度の時刻歴



(a) 加速度波形が正弦波の場合



(b) 加速度波形が矩形波の場合

図 1-6 5 Hz の正弦波および矩形波の加速度に対する躍度の時刻歴

1.2.3.2 マスキング

超小型モビリティの乗り心地改善としてアクティブシートサスペンションを用いて乗り心地改善を提案する。しかし超小型モビリティのように空間的に制約がある車両にアクチュエータを搭載する場合、アクチュエータは路面から入力される振動を十分に制振する推力を発揮できない場合がある。加えて、乗員の振動に対する特性を利用して制御を行うことで、少ない消費エネルギーで乗り心地を改善できることも期待される。そこで、乗員の心理特性と振動周波数に着目した制御としてマスキング手法を提案する。マスキングとは外乱に対して異なる周波数振動を積極的に入力することで、乗員にとって好ましくない振動の感度を相対的に低減させる手法になる。図 1-7 にマスキングの概念図を示す。同図から外乱として、車両に入力され振動をアクティブシートサスペンションにて重ね合わせ振動を作成する。乗員には、外乱とアクティブシートサスペンションにて作成した重ね合わせ振動が入力され、外乱の感度を相対的に低減させる。マスキングは音響分野で盛んに研究が行われている[1-41] [1-42]。

山川高史[1-43]はマスキング効率の高いマスキング音、もしくは不快感や違和感の少ないマスキング音を生成する技術を提案している。しかし車体に入力された振動に対するマスキングを実施した前例はない。

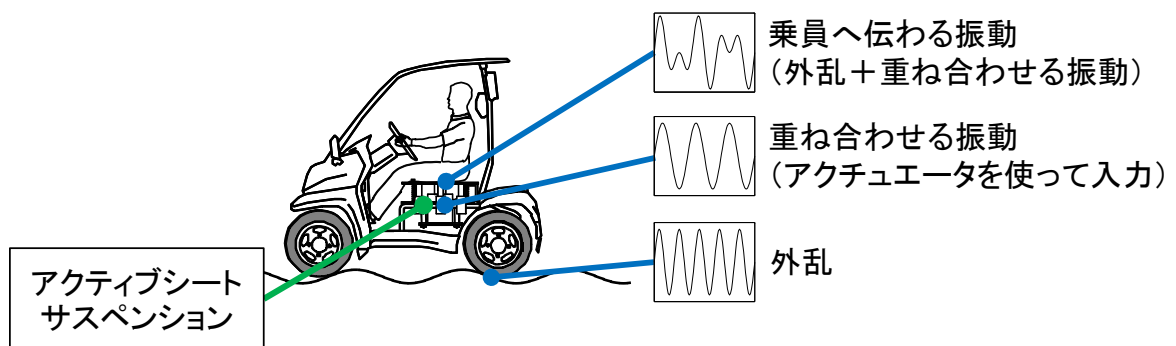


図 1-7 マスキングの概念図

1.2.4 生体情報から乗員の乗り心地感覚の推定

一般的に心理状態は主観評価を用いて評価することが一般的であるが、運転中やリアルタイムに主観評価を取得することは難しい。そこで本論文で提案する乗り心地制御システムでは、リアルタイムに取得可能な乗員の生体情報を用いて乗員に入力される振動に対する乗員の心理状態を把握する。

1.3 従来の研究

1.3.1 振動による人体の影響

上下方向の振動が乗員の健康被害，不快感の増加につながる要因であることは 1.1.3 項で述べた．ここでは具体的な研究事例について以下に述べる．

- ・ 前田ら[1-44]は乗り物により生じる全身振動による人間への健康，快適性，を中心に振動の計測・評価基準について述べている．
- ・ 荒川ら [1-45] はエレベーターの構造系設計パラメータである質量，ばね定数，減衰係数を最適化する設計方法を用いて最適なパラメータによるエレベーター構造を決定し上下振動の低減構造について述べている．
- ・ Daofei Li ら[1-46]は自動車の加速度と躍度に着目し乗り物酔いを低減するアルゴリズムを提案している．
- ・ Osborne ら[1-47]は様々な周波数の振動を対象に主観的に感じる振動の大きさを評価した上で，主観評価にて心地よさも評価し，その関連性を考察している．
- ・ 鈴木ら[1-48]は水平方向の振動に人体がさらされた場合の心理的な影響について検討を行っている．特に正弦波振動については研究が多く行われているが，ランダム振動の心理的影響は明らかになっていないことから，主観評価を用いて心理量を評価している．
- ・ 内久根ら[1-49]は ISO などと言及されていない 0.6 Hz 以下の極めて低周波な前後方向の振動に着目し，その乗り心地を心理学的評価から検討を行っている．

上記の様に振動に対する人体の影響に関する検討事例は多いが上下方向の躍度に対する乗り心地評価は著者の知る限り行われていない．

1.3.2 主観評価を用いた乗り心地評価

従来、車両の乗り心地評価には熟練者による官能評価が用いられていた。また、加速度や周波数といった振動の物理量による主観評価の定量化も行われてきた [1-50]～[1-51]。

- Zhongliang ら[1-52]は乗り心地に影響がる物理的要因による主観的な快適性指数を得るため、乗り心地に影響がある要素から快適性アルゴリズムを提案し、主観的な乗り心地評価を行うソフトウェアを開発している。
- 能登 ら[1-53]は、女性介助者に車いすの段差乗り上げ介助操作させ、介助者の操作姿勢、車いす前輪・後輪の走行軌跡および主観的乗り心地・介助負担との関係について分析している。また、介助者の操作姿勢による快適性を考慮した段差乗り上げ操作指標を提案している。
- 遠藤 ら[1-54]は、列車内の温熱環境と乗客の温熱快適性の関係を考慮した空調の設計が重要であると述べ、通勤列車利用時に体感する温湿度変動と乗客の温熱快適性に関する基礎データの取得し、温湿度変動が快適性に及ぼす影響について主観評価を用いて検討している。

しかしながら、乗員ごとに感覚の個人差があるため、振動の物理量によって乗り心地を定量的に評価することは困難である。そこで、個人差を踏まえて客観的に乗り心地を評価する指標として生体情報が提案されてきた (1.2.1 項)。中川らは[1-55]鉄道運転時における運転者の心理状態を脳波によって評価できることを示した。

- 清水ら[1-56]は脳血流からドライバーの運転操作負担を評価する手法を提案した。多くの研究では自動車や鉄道の乗り心地を生体情報を用いて評価する試みがなされている。
- Nicole ら[1-57]は車線変更時や加速度と躍度の加減速から主観評価を用いて乗員の快適性を明らかにしている。
- Jennifer ら[1-58]は実際の市街地を走行し運転者の筋電位、心電図、脳波、呼吸、皮膚コンダクタンスの生理学データおよび車載カメラのデータを収集し運転者の相対的なストレスレベルを判断する方法を紹介している。

- Masakazu ら[1-59]は上下左右方向の船体運動を計測し乗客の乗り心地の主管評価をアンケートから得ている。また人間の心理的反応を取得し、上下左右の船体運動と組み合わせ、乗客の乗り心地推定を行う検討している。
- Yasue ら[1-60]はタイヤの違いによるのち心地評価として、主観評価により評価を行っているが、乗員にとって乗り心地基準が異なる、また乗り心地の好みは異なるため、乗員心理的变化に着目し評価を行っている。そこで脳波および主観評価相関関係について検討している。
- 富山 ら[1-61]はアンケートによる乗り心地評価の課題として、自己申告であることによる客観性の低さについて述べている。そこで主観評価アンケートに加え生体情報の心拍変動を用いた乗り心地評価について検討している。
- 小田原ら [1-62]はヒトが視覚から受ける照明光色の心理的影響、また体温温度への影響があるが、家庭生活における快適さを向上させる照明光色は明らかになっていない。そこで、感じ方が異なる照明光色が人間に及ぼす影響について主観評価、心拍数、体温の変化に着目し検討している。
- 山下ら[1-63]は（点滅周期および色光の変化による生理的・心理的影響）ヒトの視覚の果たす役割は大きく、形状、大きさ、色、輝度、と言った様々な要素を組合すことでそれを観察する人間に対して快・不快や情動などといった心的活動を生じさせることが可能であると述べる。また、色や色光が心理的に与える影響は大きく、赤色には交感神経の活性作用、緑色には感情的反応の鎮静作用、青色には自律神経のバランスを保つことが明らかになっている。またロウソクの炎やホタルの暖炉といった自然界の動きである $1/f$ が我々に安らぎや心地よさを感じさせている。そこで、光の周期的な点灯光やゆらぎに着目し、色光や点滅周期を変化させ、心理的影響について主観評価と心拍変動の関係について検討している。

上記に述べた通り、生体情報の反応を相対的な評価は行われているものの、乗員の感じている乗り心地と一致しているかは確認されていない。

1.4 論文の構成および概要

本論文は「生体情報を用いた超小型モビリティの乗り心地感覚推定に関する研究」と題し、全5章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章は序論であり、本研究の背景と各章の目的について説明している。従来までの研究について述べ、乗員にとって最適な運転環境を維持する乗り心地制御システムの必要性和独自性を明らかにしている。さらに本論文の構成および概要について述べている。

第2章では加速度および躍度が乗員の乗り心地感覚に与える影響について検討を行っている。

まず、乗り心地感覚に影響がある加速度や躍度について説明し、乗り心地評価に用いた生体情報の評価方法について述べている。

本研究では乗り心地感覚に影響がある加速度の周波数や躍度に着目し、乗り心地感覚が異なる物理量に対する生体情報の反応について明確にしている。初めに、躍度が乗り心地に与える影響を確認するため、正弦波の加速度の周波数の加速度波形を矩形波に変更し躍度に変化を持たせ加振実験を行い、乗員の生体情報を用いて乗り心地評価を行っている。次に、加速度の周波数を変更し躍度と加速度の周波数に変化を持たせ加速度の周波数と躍度が乗り心地に与える影響について加振実験から明らかにしている。

第3章では超小型モビリティのアクティブシートサスペンションに適した乗り心地制御の検討を行っている。

まず、振動を重ね合わせる手法であるマスキングについて説明し、外乱振動および重ね合わせ振動の選定について述べている。次に振動に対するマスキングの効果について加振実験を行い乗員の生体情報から評価した。

第4章では生体情報を用いた乗り心地感覚の推定に関する検討を行っている。

まず、主観評価を用いた心理状態の評価方法について説明し、重回帰分析について述べている。乗り心地感覚に影響がある躍度にて加振実験から得られた乗員の生体情報を重回帰分析し主観評価を予測している。また、周波数にて加振実験を行い実験から得た生体情報を重回帰分析を行い主観評価の予測値を算出し、乗員から得た主観評価の実測値と比較している。

第 5 章では本論文の結論を述べている。第 2 章，第 3 章，第 4 章で得られた本研究の成果を総合して述べるとともに，将来の展望についてまとめた。

また，本研究で参考にした参考文献は本論文の巻末に記載している。

第2章

加速度および躍度が乗員の乗り心地感覚に
与える影響

2.1 はじめに

乗員一人ひとりに合わせた乗り心地の提供が可能な切り替え制御システムの構築を目的とし、本章では、乗り心地の異なる振動が入力された際の乗員の生体情報に着目した。このとき、乗り心地に影響があるとされる、上下方向の加速度の周波数と上下方向の躍度の関係性について明確にし、その双方が超小型モビリティの乗り心地に与える影響について加振実験から検討した[2-1]。

まず、乗り心地の評価において、リアルタイムに計測できリアルタイムに評価できることや、乗員の個人間での評価のばらつきが少ないと言った要素が求められる。そこで、乗り心地評価の要素を満たす心拍変動について述べ、心拍変動から乗員の心理状態を評価する手法について説明した。また、本章ではアクティブシートサスペンションを用いて加振実験を行い実験協力者の心理状態について検討した[2-2]。さらにアクティブシートサスペンションの特徴やスペックについて述べた[2-3]～[2-5]。

次に、上下方向の躍度が乗り心地に与える影響について明確にするため、加振実験を行った。同じ周期で入力した加速度波形を変更して躍度の異なる振動を乗員に入力した。用いた加速度波形は躍度が小さい正弦波、躍度が大きい矩形波の2種類とした。躍度がそれぞれの加速度波形を用いて加振実験を行い、実験協力者の心理状態から乗り心地に与える影響について検討した[2-6]。

最後に、上下方向の加速度の周波数と躍度が乗り心地に与える影響について検討した。まず、加速度の周波数と躍度の関係性について述べた。次に、加速度の周波数を変えることで躍度と加速度の周波数に変化させ、加振実験を行った。乗り心地に与える影響が大きいとされる周波数帯域と、乗り心地に与える影響が少ないが躍度が大きい周波数帯域で加振実験を行い、実験協力者の生体情報を用いて乗り心地の評価を行った。

2.2 心電図を用いた乗員の心理状態の推定方法[2-1]

生理学的応答を用いて人の心理状態を推定するには、一般に自律神経系の生理反応が用いられる [2-7]. その測定が容易であるため、心拍変動が一般的に使用される. そこで本論文では、心理状態を推定するための生理反応として心拍変動を用いた. 自律神経系は交感神経と副交感神経からなり、これらの神経の活動状態から人の心理状態を推定することが可能である. 心拍変動は、交感神経および副交感神経によって制御されている. したがって、これらの神経系活動を反映する周期性が心拍変動に現れる. 心拍変動の頻度分析は、神経系の活動を評価するために行われる. 図 2-1 は、心拍変動の頻度分析の結果の例を示す. 図中の 0.04~0.15Hz の範囲の積分値を LF, 0.15~0.4Hz の積分値を HF と定義される[2-8]. 両者の比率 LF/HF は、交感神経活動や副交感神経活動を反映する値であり、人の心理状態を推定するために使用されることが多い. 本章では、LF/HF を用いて実験中の心理状態を評価した. LF/HF が何らかの事象によって増加すると、測定対象がストレスを感じていると評価し、減少すると対象がリラックスをしていると評価する.

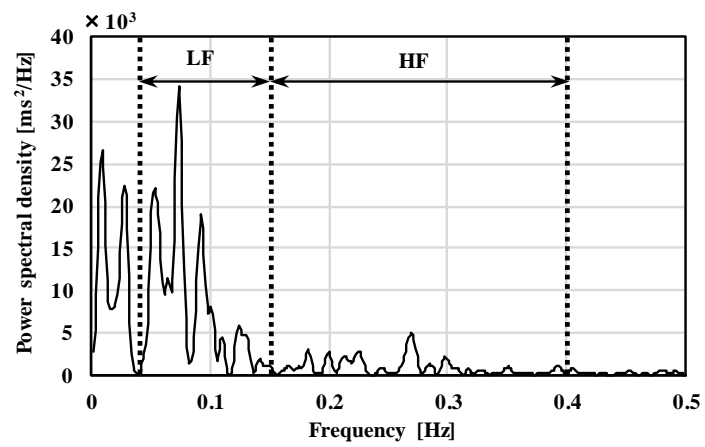


図 2-1 RRI 時刻歴のパワースペクトル密度 [2-1]

2.3 実験方法 [2-1]

振動が乗り心地および人の心理状態に及ぼす影響を確認するために加振実験を行った。加振実験は、実験協力者を所定の振動に曝す実験である。まず加振実験に用いた機器について説明する。加振実験は、アクティブシートサスペンションを備えた超小型モビリティを用いて行った。これまでの人体の振動特性に関する研究では、姿勢の変化がこれらの特性に影響を与えることが示されている [2-9]。そこで、姿勢の変化による影響を少なくするため、実験協力者が実際の乗車姿勢をとるように実験条件を設定した。図 2-2 は実験で用いた超小型モビリティを示し、図 2-3 は車両に搭載したアクティブシートサスペンションを示す。アクティブシートサスペンションは、中央に取り付けられたボイスコイルモータ（図 2-4）によって駆動される。表 2-1 にボイスコイルモータの仕様を示す。アクティブシートサスペンションの動作方向は、周囲に取り付けられた 4 つのスライダによって垂直方向に制限されている。さらに、座面は 4 つのコイル、ばねによって支持されており、図 2-3 に示す加速度計は座面に取り付けた。加速度計は、AS-5GB（協和電子計測（株）製）を用いた。心電図（ECG: Electrocardiogram）の測定には、PowerLab 8/35 PL 3508, BioAmp ML 132, MLA 2340, MLA 2503（ADInstruments 社製）を使用し、電極は体動によるノイズが少ない NASA 誘導法に従って実験協力者に貼り付けた。これらの装置は ECG のデータを分析用 PC に送信する。送信された ECG から LabChart と LabChart アドオン HRV を使用した（図 2-6）。

本実験に関しては東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会にて承認を得ており、実験協力者に対しては実験内容の事前説明を行った。実験への協力に関して同意する実験協力者は同委員会にて承認を得た同意書に署名捺印をした。



図 2-2 実験車両とした超小型モビリティ (トヨタ車体制株式会社. COMS)
[2-1]

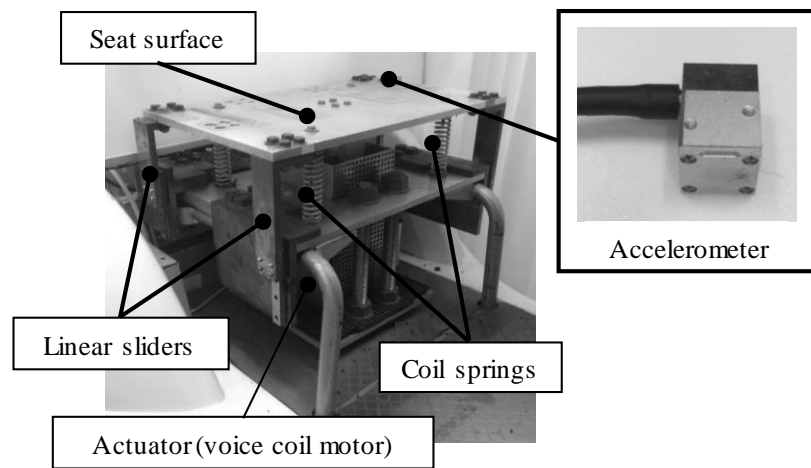


図 2-3 実験車両に搭載したアクティブシートサスペンション [2-1]

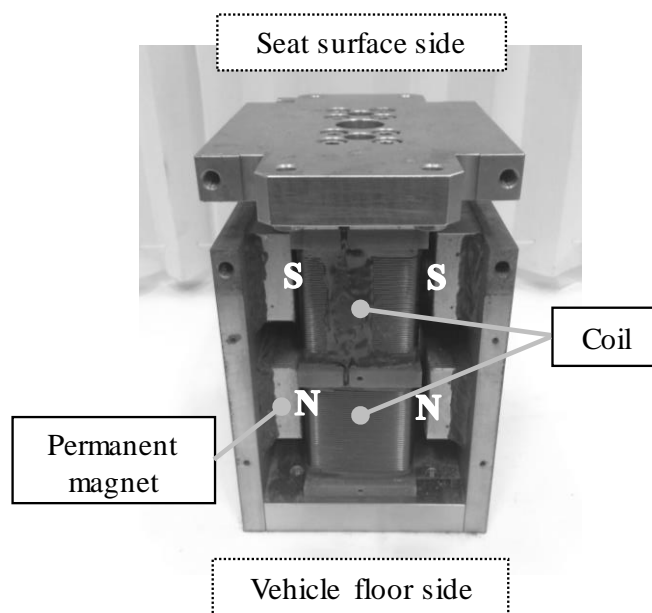


図 2-4 アクティブシートサスペンションのアクチュエータに使用した
ボイスコイルモータ [2-1]

表 2-1 ボイスコイルモータの性能 [2-1]

Manufacturer	Aoyama Special Steel Co., Ltd.
Effective stroke	20 mm
Thrust constant	110 N/A
Nominal thrust	160 N
Maximum thrust	320 N or more
Rated current	1.46 A

2.4 躍度が乗り心地に与える影響 [2-1]

2.4.1 実験条件

乗員の心理的状态に対する躍度の影響を確認するため、実験協力者を実験車両に乗車させ、アクティブシートサスペンションにより上下方向の振動を入力する加振実験を行った。実験では、実験協力者の ECG を測定した。この実験では、アクティブシートサスペンションのアクチュエータが出力する加速度波形を変化させることによって、異なる躍度を有する加振条件を作成した。これにより、振動周波数を変更することなく躍度を変更することが可能になる。この実験では、加速度波形に正弦波と矩形波を用いて加振実験を行った。両方の条件において、入力振動は実験協力者が十分に体感できる振動である必要がある。Matsumoto らは座位の人間の共振点は 5 Hz であり、最も振動を感じやすいとしている[2-10]。そのため、加振周波数は加振条件においても 5 Hz とした。周波数 5 Hz の振動は座位時に最も敏感に感知しやすい振動であるとされていることから、この周波数に設定した。また、加速度振幅は $1.0 \text{ m/s}^2_{\text{p-p}}$ に設定した。図 2-5 に実験の流れを示す。加振時間は 180 秒とし ECG は、実験中常時測定した。加振時間の前に 60 秒の暗算時間を設けた。実験協力者は、この間にいくつかの簡単な計算を暗算で解くように教示した。このプロセスは、実験前に実験協力者の心理状態を調整することを目的としている。図 2-6 に示すように、暗算の問題は、実験車両の前で設定されたモニタに表示され、実験協力者は実験車両に乗り込み、運転姿勢をとった状態で暗算を行った。この実験では、8 人の実験協力者にて実験した。身長、体重および年齢を表 2-2 に示す。実験協力者の加振は車両に搭載されたアクティブシートサスペンションによって行われ、車両サスペンションによる共振を防ぐため、図 2-6 に示すように、車両はジャッキアップした。

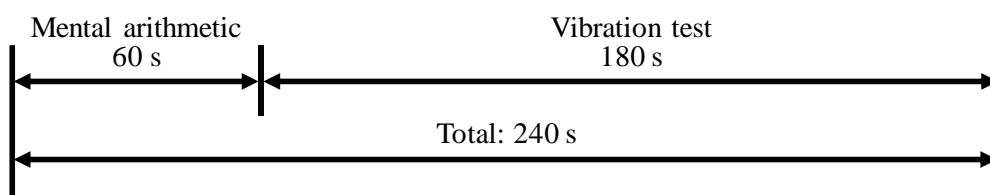


図 2-5 加振実験のフローチャート [2-1]

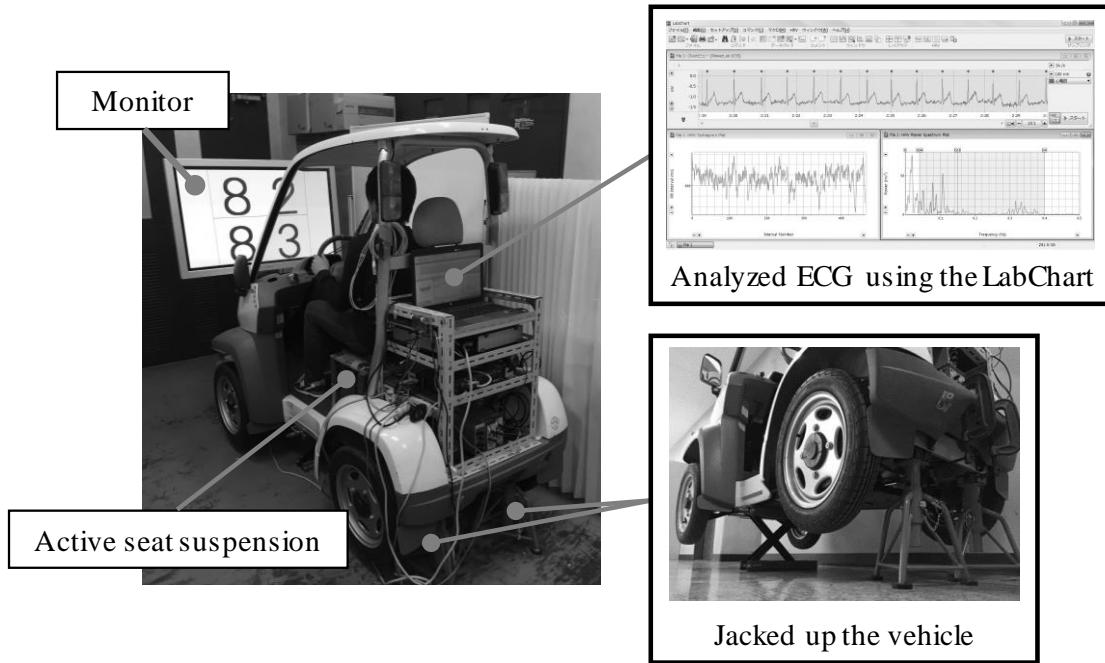


図 2-6 実験風景 [2-1]

表 2-2 実験協力者の情報 [2-1]

Participants	Wight [kg]	Hight [cm]	Age
A	62	169	21
B	56	168	24
C	55	170	21
D	60	171	21
E	62	175	21
F	60	175	21
G	62	178	22
H	63	174	21

2.4.2 実験結果

表 2-3 に各加振条件における躍度の標準偏差の平均値を示す。矩形波の方が正弦波よりも躍度の標準偏差が 40%以上大きくなった。図 2-7 は、各実験協力者のそれぞれの加振条件における LF/HF を示す。すべての実験協力者にて、正弦波よりも躍度の標準偏差が大きい矩形波で LF/HF が高くストレスを示した。この結果から、躍度の大きさが実験協力者の心理状態に影響があることを確認した。図 2-8 は、各加振条件における心拍変動の実験協力者 B のパワースペクトル密度のサンプルを示す。特に矩形波と正弦波を比較して、LF の範囲にあるスペクトルが矩形波の場合卓越しており、LF/HF が高くなったと考えられる。

表 2-3 各加速度波形における躍度の標準偏差 [2-1]

Waveform	Standard deviation of jerk [m/s ³]
Sine	7.69
Square	11.15

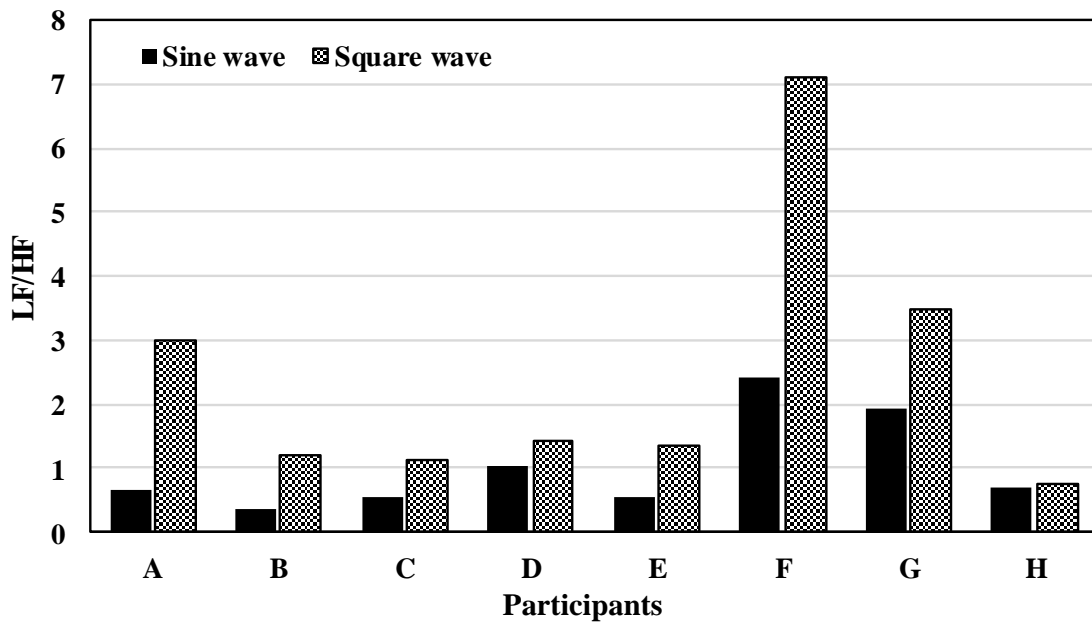
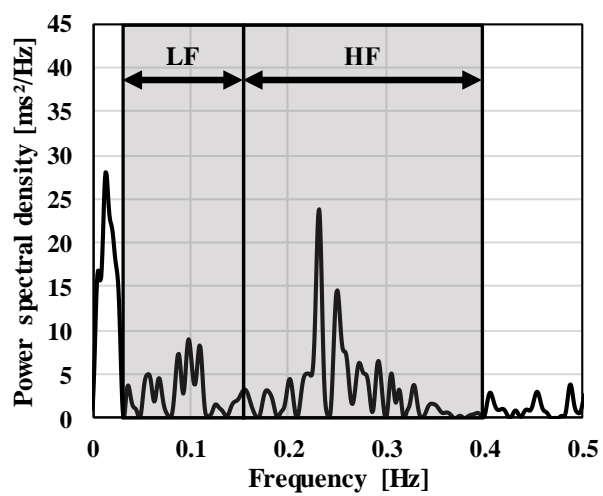
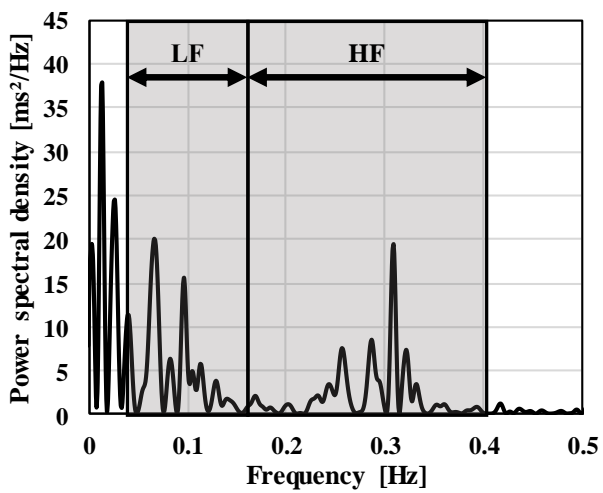


図 2-7 各実験協力者の LF/HF [2-1]



(a) 正弦波



(b) 矩形波

図 2-8 実験協力者 B の RRI 時刻歴のパワースペクトル密度 [2-1]

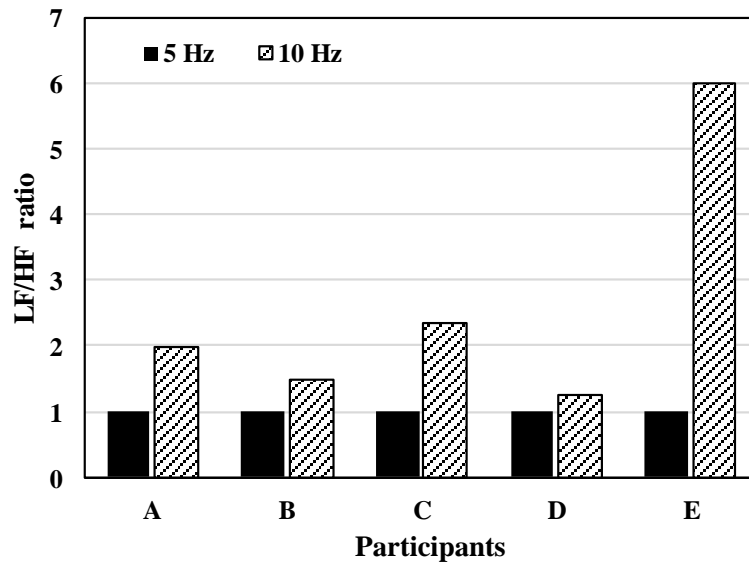
2.5 乗り心地に対する躍度と周波数の関係 [2-1]

2.5.1 実験条件

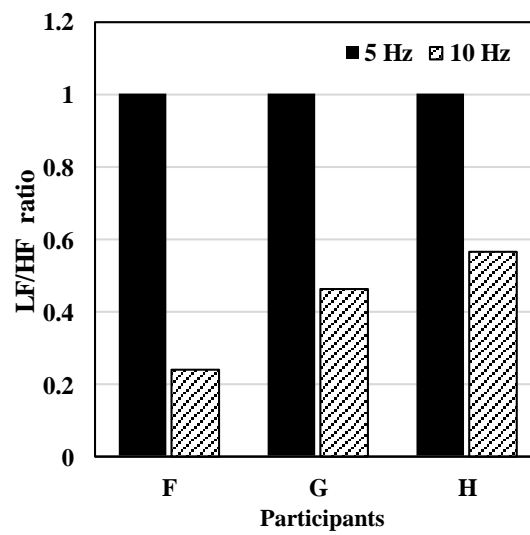
前節では、加振周波数を 5 Hz に設定して加振実験を行った。しかし、一般に 4~8 Hz の周波数帯域の振動は、人体の振動特性を考慮すると容易にストレスを引き起こすことが確認されている [2-11][2-12]。したがって、躍度・周波数の心理的特性の関係を考慮する必要がある。そこで、周波数によって躍度に変化する振動条件を用いて加振実験を行った。この実験では、加速度の振幅を $1.0\text{m/s}^2_{\text{p}}$ に設定し、周波数は 5 Hz と 10 Hz の 2 種類に設定した。また、5 Hz に比べて 10 Hz で加振すると躍度が大きくなる。加振条件以外の実験条件、実験協力者は、前節と同様とした。

2.5.2 実験結果

図 2-9 は、各加振条件の LF/HF 値を示す。図 2-9 (a) は、LF/HF が 10 Hz で増加することを示している。すなわち躍度が増加するにつれて、実験協力者はストレスを感じると推測することができる。この結果から、前節で示した結果と同様の傾向を示す。一方、図 2-9 (b) に示す実験協力者は、5 Hz の加振周波数でより高い LF/HF 値を示しており、前節で説明したように、5 Hz は人が不快に感じる周波数帯域であり、ストレスを感じやすい周波数である。したがって、図 2-9 (b) に示す実験協力者は、躍度よりも周波数の影響を受けたと考えられる。



(a) 躍度の影響を受けストレスを感じている実験協力者



(b) 周波数の影響を受けストレスを感じている実験協力者

図 2-9 各実験協力者の LF/HF 値 [2-1]

2.6 まとめ

本章では、乗り心地制御システムを構築するため、乗員の心理特性による躍度の影響を確認することを目的とした。以下の結果が得られた。

- 周波数の影響を受けていない実験協力者では、躍度が増すにつれて心理状態が悪化した。
- 躍度の影響を受けやすい実験協力者群と周波数の影響を受けやすい実験協力者群とを区別することが可能であった。

以上の結果から、躍度と周波数は心理的特性と乗り心地に及ぼす影響が異なることを確認した。

第3章

振動のマスキングを用いた乗り心地改善に関する検討

3.1 はじめに

本章では、超小型モビリティのアクティブシートサスペンションに適した乗り心地制御手法の検討を行う[3-1]。超小型モビリティは車内に空間的な余裕が少なく、大型で大推力のアクチュエータを設置することは難しい。加えて大推力のアクチュエータは消費電力も大きいため、バッテリー容量の点からも課題がある。そこで、乗員の振動に対する特性を積極的に利用して乗り心地を改善する制御手法について検討した。本研究では、入力された外乱とは別の周波数帯域の振動を積極的に重ね合わせるにより、乗り心地を変化させる手法としてマスキング手法を提案した。この手法を確立することができれば、小型で低推力なアクチュエータを搭載でき少ない消費エネルギーで振動の抑制し、乗り心地の改善が期待できる。

これまでに、周波数特性を持つ複数の振動を重ね合わせた複合振動に関して身体的特性や官能評価による快適性の評価は行われているものの[3-2]、生理計測に基づく心理特性の評価は行われておらず、実験的に検証を行う必要がある。そこで、マスキングに関する基礎的な検討として、マスキングを適用した振動環境を模擬した加振実験からその効果に関して検証を行った。

まず単一の周波数成分を持つ正弦波での加振実験を行い、マスキングで用いる振動について検討を行った[3-3]。

次にこの実験によって選ばれた周波数を用いてマスキングされた状況を模擬し、複数の実験協力者にて加振実験を実施した。なおこの際、外乱に対する重ね合わせる振動の相対的な加速度振幅についても検討を行った[3-4]。

最後に、上記の乗り心地の改善が確認された条件を用いて、さらに実験協力者数を増やして実証実験を行った。

これらの検討から鉛直振動におけるマスキングが乗員の乗り心地に与える影響を明らかにし、新たな乗り心地制御システムの設計について展望を述べる。

3.2 実験条件 [3-1]

マスクングによる乗り心地の変化を確認するために前章と同様にアクティブシートサスペンションが設置されている超小型モビリティを実験車両として用いて加振実験を行った。アクティブシートサスペンションは、着座部にアルミ板を使用し、非駆動時には4本のコイルスプリングによって座面を支持する。シートの運動方向は周囲に設置された4本のリニアスライダにより上下方向に拘束している。制御用アクチュエータには高い応答性と推力を確保できるリニアモータの一種であるボイスコイルモータを採用した。

アクティブシートサスペンションを用いて加振実験を行うため、車両が着地した状態では目的とは異なる振動が入力される可能性がある。そのため本実験では車両をジャッキアップした状態で実験を行った(図 3-1)。さらに振動以外の影響によって心理状態が変化することを防ぐために屋内にて停車した状態で実施した。

実験協力者は実験車両のシートに着座し、座席部のみをアクティブシートサスペンションで加振することで実験協力者に振動を負荷するものとした。負荷した振動はマスクングの効果を検証するために周波数特性の異なるいくつかの振動を設定した。また、実験協力者の姿勢を実際の運転環境に近づけるため、ステアリングを握り、運転姿勢を取ることにした。これは Mansfield ら[3-5]によって振動にさらされる際の姿勢によって人体の振動特性が変化することが明らかにされているためである。

また、評価方法は2章と同様に心電図を測定し、LF/HFを算出した。

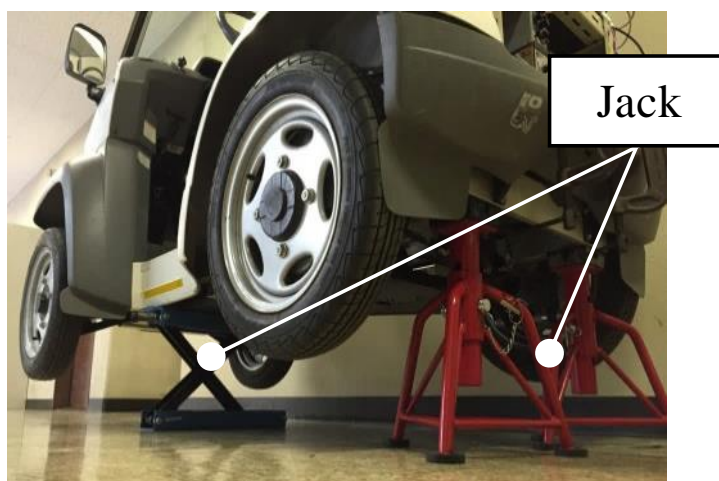


図 3-1 ジャッキアップした実験車両 [3-1]

3.3 実験方法 [3-1]

図 3-4 に各加振実験のフローを示す。加振実験ではまず実験協力者に暗算タスクを 1 分間与えた後、3 分間加振車両に乗車させた。心電図は全 4 分間取得した。暗算タスクは実験前に一定のストレスを実験協力者に負荷することによって実験毎の心理状態を一致させることを目的として行った。実験協力者には車両前方に設置したモニターから 5 秒間ずつ断続的に表示される 2 種類の数値 (2 桁) を加算するように教示した。なおこのときも発話による心拍変動への影響が懸念されることから計算の回答は発言しないよう指示した。

加振実験では実際の走行状態を再現するため、実験車両に乗車した実験協力者へ運転姿勢のまま進行方向のモニターを見るよう教示した (図 3-5)。加振実験による実験協力者への疲労や身体的・心理的負担を考慮し、各車両における実験の間には十分な休憩時間を設けた。なお、各車両における実験開始前には血圧や心拍数を計測し、ほぼ一定の値になっていることを確認し、加振実験前での実験協力者の心理状態が同程度となるよう配慮した。

本実験に関しては東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会にて承認を得ており、実験協力者に対しては実験内容の事前説明を行った。実験への協力に関して同意する実験協力者は同委員会にて承認を得た同意書に署名捺印をした。

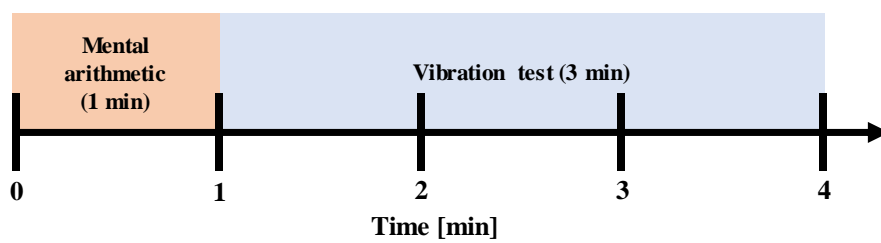


図 3-2 実験フロー [3-1]

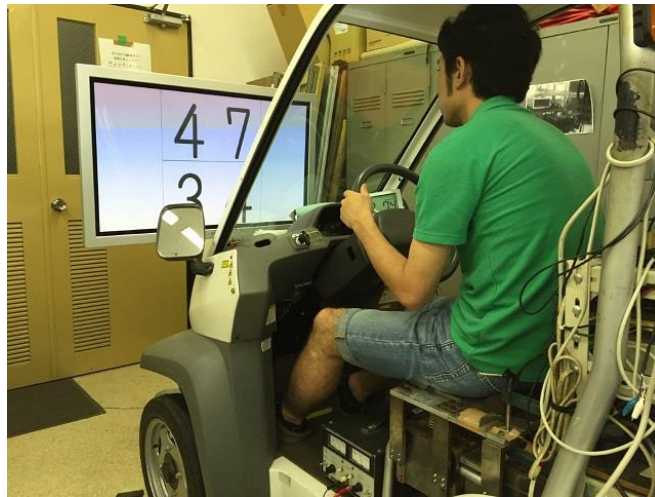


図 3-3 実験風景 [3-1]

3.4 加速度振幅一定における単一周波数の加振実験 [3-1]

3.4.1 加振条件

本章では複数の周波数の振動を重ね合わせる振動制御であるマスキングに適用する振動周波数を検討するために、基礎的な実験として正弦波の加速度波形による加振実験を行った。なお変位振幅一定の場合は周波数に応じて LF/HF に変化が生じることを既に報告されているが、振動に対する乗り心地評価では一般に加速度が多く用いられるため加速度振幅一定の加振条件にて実験協力者の心理状態を把握することとした。ISO2631 の等感覚曲線[3-6]や Janeway の乗り心地限界曲線[3-7]等では 4~8 Hz の振動周波数において人間が振動を敏感に感じるため不快な振動であるとされている。また武井ら[3-8]によって定常的な振動が入力される場合、0.2~3 Hz をふわふわ感、8~20 Hz をばたつき感として振動に対する感覚を表すことができると示している。そこで不快に感じる振動周波数 4~8 Hz を中心に振動に対する感覚が異なる 3 Hz, 9 Hz, 10 Hz を加え、3~10 Hz の単一周波数で加振することにより検討を行った。なお加速度の振幅は走行中に定常入力されると想定される最悪な振動入力とアクチュエータの性能を勘案してすべての条件において 1.5 m/s^2 と設定した。以下、本章における振幅という表記は片振幅値を示している。なお、本章では心理状態の変化を LF/HF により把握することが目的であることから実験協力者は男子大学生 1 名（年齢 22 歳）とした。

3.4.2 実験結果

図3-6に各加振周波数における加振時間中の心電図データから算出したLF/HFを示す。同図より周波数によりストレス指標であるLF/HFに変化が現れていることが確認できる。なお前述の通りLF/HFは値が高くなるほどストレス状態であると評価することができる。今回の実験協力者では7Hzで最もストレスを感じていることが確認できる。最もLF/HFが低い3Hzに比べて、最も高い7Hzでは約2倍の差があることが確認できた。なお、乗り心地の改善が必要とされる4～8Hz加振時と比較して、ふわふわ感と定義される3Hzとばたつき感と定義される10HzにおいてLF/HFが低くなり、リラックス状態となっていることが確認できた。

本章で得られた結果から上下方向の振動周波数による心理状態の変化をLF/HFによって把握することができ、この結果に基づき次節では複数の振動周波数を組み合わせるマスキングが心理状態へ与える影響に関して検討を行っていく。

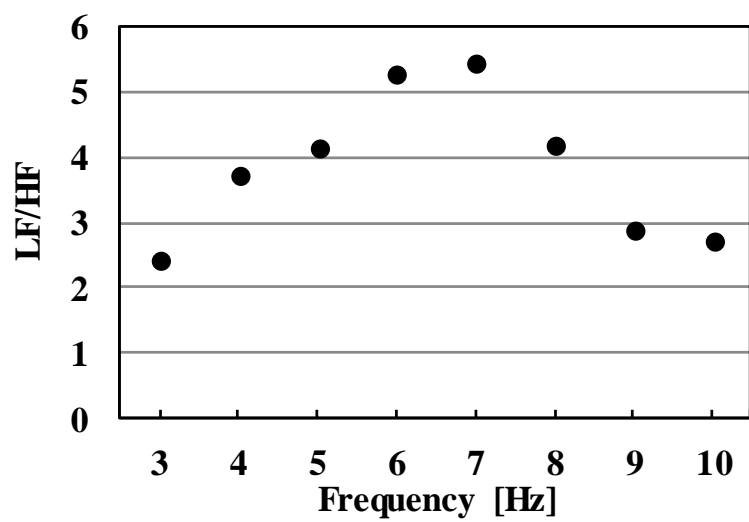


図 3-4 各周波数における LF/HF 値(振幅: 1.5 m/s²) [3-1]

3.5 重ね合わせ振動に関する基礎検討 [3-1]

3.5.1 加振条件

前節における結果を踏まえ、異なる周波数特性を持つ振動を重ね合わせることで乗員にどのような心理的变化をもたらすか確認を行った。

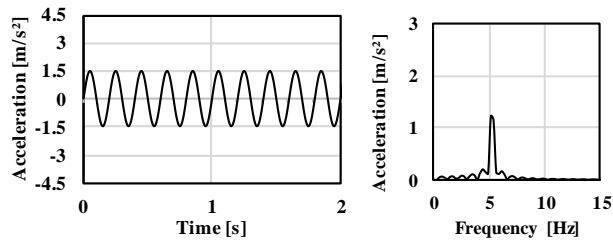
実路走行時にマスキング制御を適用する場合、路面から入力される振動とアクチュエータが発生させる振動との間には周波数、位相、振幅などさまざまなパターンが生じる。また周波数特性も単一周波数をもつ振動が入力される走行環境は少なく、乗車時には周波数帯域を持つ振動が入力される場合がほとんどである。そこで、本実験ではこれまでに振動の重ね合わせによる心理状態への影響についての報告がほとんどないことから、その基礎データの取得としてマスキングが乗り心地向上に良好な影響を与えるのかを確認することを目的に走行環境を模した簡単な加振実験を行った。また、人体の振動特性にとって最悪な走行環境を想定した単一周波数振動を外乱として想定し、その振動に対して単一周波数振動でマスキングした際の心理状態の変化を確認した。本実験で用いた外乱として車両に入力する振動に 5 Hz の正弦波を設定した。これは松本ら[3-9]によって座位における人体の固有振動数が 5 Hz であると報告されており、走行時に最も感度を低減させるべき振動と考えられるためである。外乱に重ね合わせる振動は人体に影響を与えない上、外乱とは異なる感覚が得られる振動を設定する必要がある。

本実験では 3.4 節で説明しているように感覚が異なる 2 種類の振動周波数帯域のうち、単一周波数による加振実験において乗り心地への影響が小さかった 3, 10 Hz の 2 種類の正弦波振動をマスキングで用いる振動として設定した。また、マスキングに用いる振動は外乱に対する相対的な加速度振幅によって振動感覚に影響を与えると考えられることから、それぞれの加振周波数において片振幅 1.5, 3.0 m/s² の 2 種類の加速度振幅条件を設定した。

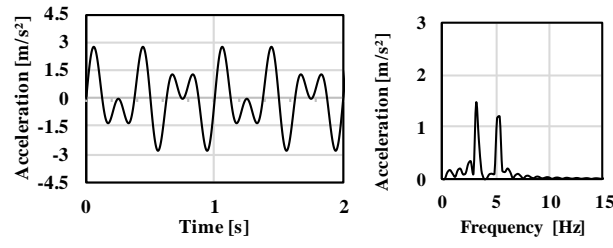
本実験で設定した加振条件を表 3-1 に示す。また、それぞれの実験条件における加速度応答と周波数特性を図 3-7 に示す。なお位相については予備的にいくつかのパターンを用意して数名の実験協力者にて実験を行った際にマスキングによって最も乗り心地感覚が変化すると回答が得られた条件を使用している。

表 3-1 本実験で用いた加振条件 [3-1]

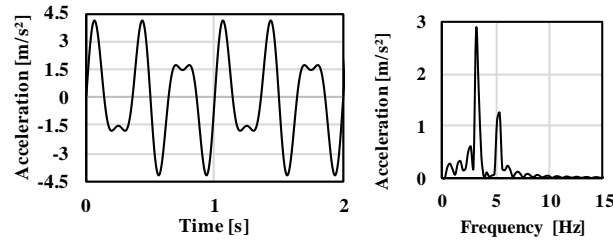
Case	Vibration 1 (disturbance)		Vibration 2 (masker)	
	Frequency [Hz]	Amplitude [m/s ²]	Frequency [Hz]	Amplitude [m/s ²]
I			—	—
II				1.5
III	5	1.5	3	3.0
IV				1.5
V			10	3.0



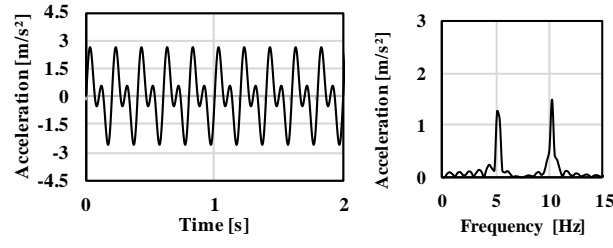
(a) 5 Hz (amplitude: 1.5 m/s²) (case I)



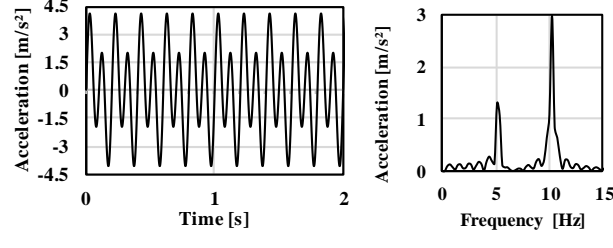
(b) 5 Hz (1.5 m/s²) + 3 Hz (1.5 m/s²) (case II)



(c) 5 Hz (1.5 m/s²) + 3 Hz (3 m/s²) (case III)



(d) 5 Hz (1.5 m/s²) + 10 Hz (1.5 m/s²) (case IV)



(e) 5 Hz (1.5 m/s²) + 10 Hz (3 m/s²) (case V)

図 3-5 各加振条件における加速度応答と周波数特性 [3-1]

3.5.2 実験結果

基準となる 5 Hz 加振時の LF/HF を 1 とした際の各加振条件での LF/HF を図 3-8 に示す。なお 3.4 節で行った実験の実験協力者は同図の実験協力者 C である。

重ね合わせる振動の振幅が 1.5 m/s^2 である時は、実験協力者 A を除き、外乱のみよりも LF/HF が高い値となった。これより外乱と同じ振幅でマスキングを行うとストレスになることを確認した。

一方、マスキングに用いた振動の加速度振幅が外乱の 2 倍とした時は、3 名の実験協力者共に外乱のみで加振した際と比較して LF/HF が低い値となり、リラックス状態を示した。従来 ISO などで示されている乗り心地評価では振幅が大きくなるほど快適性は損なわれるはずであるが、周波数などを考慮しマスキングをすることで不快な振動を感じにくくすることが可能となることが分かった。本結果をもとに次節では実験協力者数を増やし、この詳細な検証を行う。

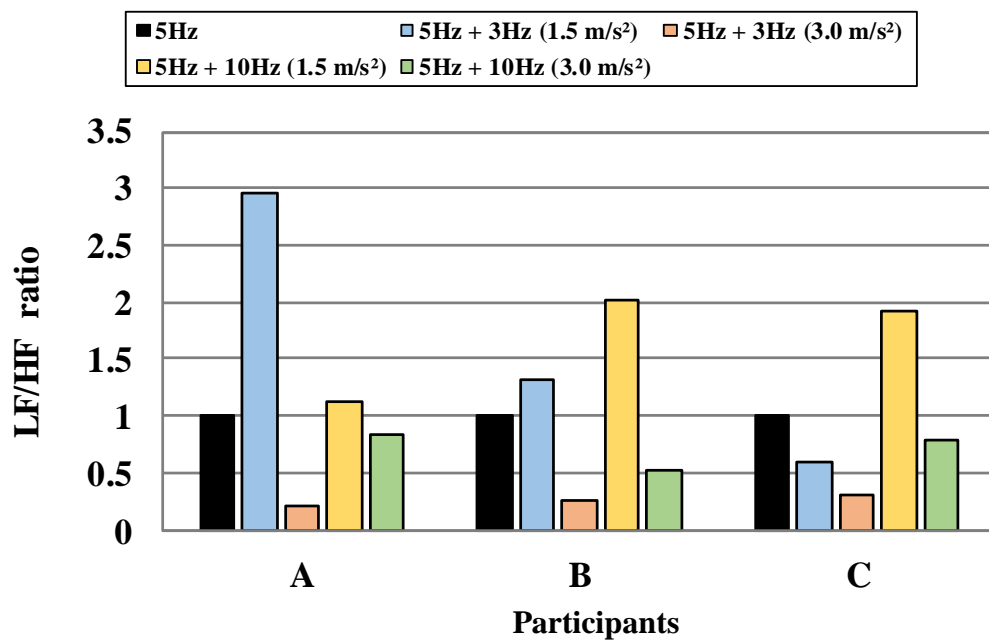


図 3-6 各実験協力者の加振条件における LF/HF 値 [3-1]

3.6 マスキングによる乗り心地向上効果の検討 [3-1]

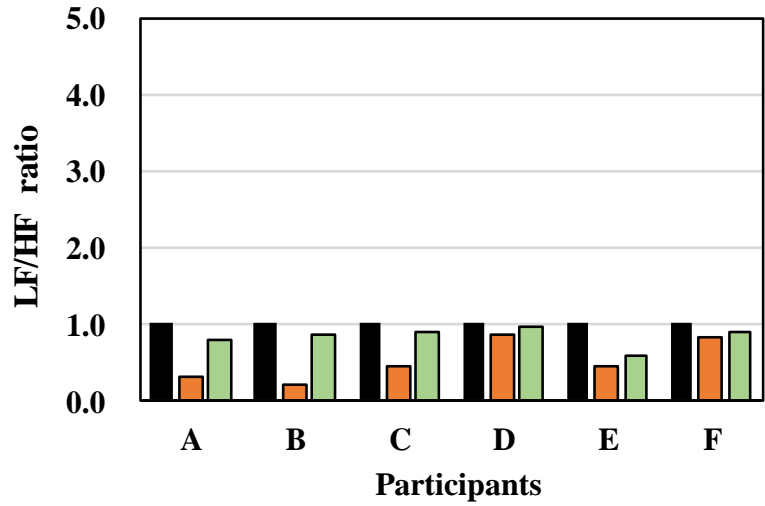
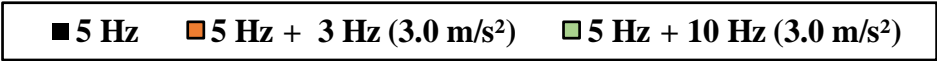
3.6.1 加振条件

3.5 節では入力される 5 Hz の外乱に対して周波数が 3 Hz, 10 Hz で振幅が 2 倍の 3.0 m/s^2 の振動でマスキングすることでリラックス状態になることを 3 名の実験協力者で確認した。そこで前節にて 3 名の実験協力者から効果の得られた 5 Hz の外乱に対して 3 Hz と 10 Hz の周波数にて 2 倍の振幅を重ね合わせるマスキングのみの条件による効果と要因を検証するために 12 名の実験協力者（男性平均年齢 22.1 歳）にて実験を行った。

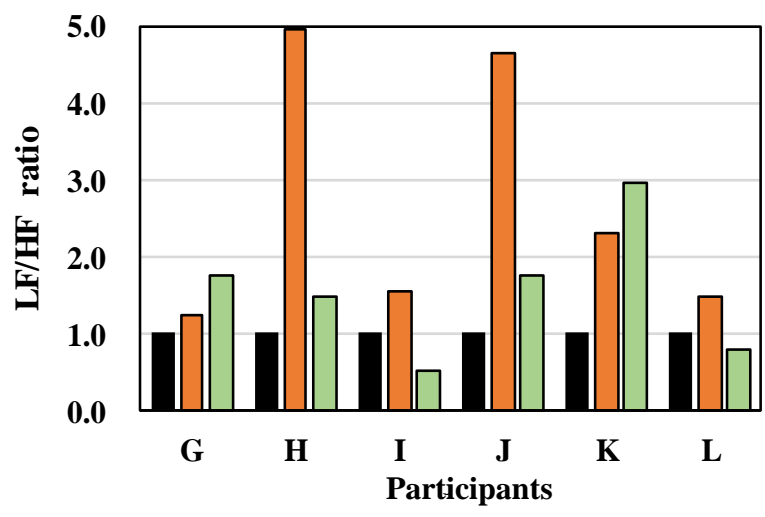
3.6.2 実験結果

図 3-9 に 5 Hz 加振時の LF/HF を 1 とし、各加振条件における LF/HF の比を示す。同図(a)はマスクングによってリラックスになった実験協力者、(b)はマスクングによってストレスとなった実験協力者に分類している。なお、マスクングでストレスとなった実験協力者 I と L は周波数が 10 Hz の振動を重ね合わせた時だけリラックス状態となった。これらのことからマスクングによって乗り心地改善が図れる場合もあるが、乗員によっては乗り心地が異なる劣化傾向を示す場合もあり、人によってリラックスと感じる乗り心地は異なることを確認した。また加速度振幅が一定の場合、10 Hz よりも 3 Hz の方が変位振幅は大きくなる。今回の実験においてマスクングでリラックスになった実験協力者群は全て 3 Hz の方がリラックスになっていることから変位振幅が乗り心地に影響を与える可能性もあると考えられる。そこで実験協力者による振動感覚の違いについてさらに追及するべく、人体各部への振動伝達率を計測し、振動感覚が実験協力者によって異なる原因が振動の伝わり方にあるか評価を行った。また、アクティブシートサスペンションを用いて座面をホワイトノイズで加振し、その時に計測した座面加速度と人体各部の加速度から伝達関数を算出した。なお人体の加速度測定は頭部、肩部、腕部、腰部、大腿部の 5 箇所とした。図 3-10 に加速度の計測位置を示している。計測の際には各所皮膚に直接加速度ピックアップを貼り付けて固定した。

実験協力者は前節の実験においてマスクングでリラックスとなった実験協力者 A とマスクングでストレスとなった実験協力者 G の 2 名とした。本実験で得られた人体各部の伝達関数が最も高い値となった周波数と振動伝達率を表 3-2 に示す。同表から人体各部において伝達関数が最も高い値となった振動周波数にはほとんど差がないことが確認できる。これより生体情報で評価できた乗り心地感覚の差は実験協力者それぞれの人体の物理的な振動特性ではなく、心理状態などによる要因が大きいと考えられる。



(a) マスキングでリラックスとなった実験協力者



(b) マスキングでストレスとなった実験協力者

図 3-7 5 Hz 加振時の LF/HF を 1 として, 各加振条件における LF/HF の比 [3-1]

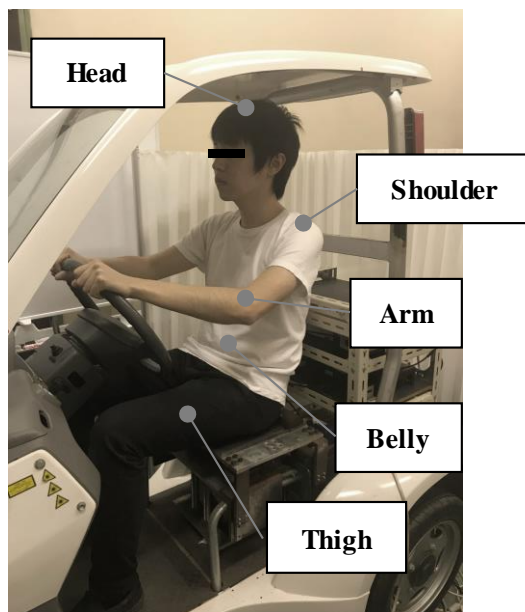


図 3-8 加速度の計測位置 [3-1]

表 3-2 本実験で得られた人体各部の伝達関数が最も高い値となった周波数と振動伝達率 [3-1]

Participants		Measurement points				
		Head	Shoulder	Arm	Belly	Thigh
A	Frequency [Hz]	3.0	6.0	5.5	5.5	12.5
	Transmissibility [(m/s ²)/(m/s ²)]	2.1	4.2	3.1	2.2	2.2
G	Frequency [Hz]	3.0	5.0	5.5	5.5	13.0
	Transmissibility [(m/s ²)/(m/s ²)]	2.0	5.4	3.0	3.6	1.7

3.7 まとめ

本章では、心理的に不快と感じる振動が車両に入力された際にその振動の感度を低減させて乗り心地の向上を図るマスキングに着目し、生理・心理特性を考慮した乗り心地制御システムの設計を目的に検討を行った。

乗員にとって振動の加速度と周波数が感覚へ大きく関与していると考えられるため、マスキングによる乗り心地改善の効果について基礎的な加振実験を行った。さらに乗り心地の改善が見られたマスキングの制御条件を基に実験協力者を増やし、実証実験を行った。本論文では以下のことを明らかとした。

- 少数の実験協力者ではあるが、5 Hz の正弦波振動に対してその 2 倍の加速度振幅を持つ 3, 10 Hz の正弦波振動を重ね合わせてマスキングを行うことによって、乗り心地が劣化しやすい 5 Hz の正弦波振動のみで加振した場合よりもリラックスになることを心電図から得られた心理状態評価指標 LF/HF から確認した。
- 上記知見に基づき、12 名の実験協力者にて 2 倍の加速度振幅を持つ 3, 10 Hz の正弦波振動によるマスキングの効果を加振実験から評価したところ、実験協力者によってマスキングの効果が異なることを確認した。
- マスキングによる乗り心地の向上効果が異なる実験協力者間の身体的な違いを確認するために人体各部の振動伝達率を加振実験から評価したが、明確な差は確認されなかった。

上記の検討で得られた結果は限られた条件の中ではあるが、マスキングによる乗り心地の向上効果を確認することができた。しかしながら、身体的特性がほとんどない実験協力者間においても心理的観点から効果に差が現れることが明らかとなった。そのためマスキングによる振動制御を行うためには乗員の振動に対する心理的特性を十分に考慮した振動の選択が必要となる。

一方、外乱としてはさまざまな加速度振幅、周波数帯域を持った振動が想定される。また重ね合わせる振動も加速度振幅、変位振幅、位相、周波数特性などの条件が想定される。さらに心理状態は時々刻々と変化するものであり、心理状態によっては同じ振動制御を適用した場合にもその効果が変わることが想定される。そのため、今後は乗員の心理特性とマスキング制御による心理的応答を体系的にまとめ、乗員の状態に合うマスキング制御を適用できるようなシステムの構築を目指していく。

第4章

生体情報を用いた乗員の乗り心地感覚推定 に関する検討

4.1 はじめに

本章では、乗員の主観的な乗り心地感覚を生体情報から推定する方法を構築する。従来、車両の乗り心地評価には熟練者による官能評価が用いられていた。また、加速度や周波数といった振動の物理量による主観評価の定量化も行われてきた。しかしながら、乗員ごとに感覚の個人差があるため、振動の物理量によって乗り心地を定量的に評価することは困難である。そこで、個人差を踏まえて客観的に乗り心地を評価する指標として生体情報が提案されてきた。本論文の2, 3章においても生体情報を用いて乗り心地評価が可能なことを確認している。しかし、生体情報を用いた乗り心地評価だけでは、指標となる数値の増減による相対的な評価でしか行われていない。そのため、生体情報による指標が他の条件と比べて良好な場合でも、乗員の感じている主観的な乗り心地評価スケールにおいても良好な乗り心地感覚にあるのかは確認されていない。そこで生体情報と主観的な乗り心地評価の関係性を明確にすることで、これまでは主観評価しか得られなかった主観的な乗り心地を客観的に評価することが可能となる。

まず、本章で用いた生体情報について述べた。次に、2章で示した乗り心地に影響がある振動の躍度に対する主観的な乗り心地と生体情報の関係性を検討する。具体的に、乗り心地への影響が懸念される躍度の振動が入力された際の主観的な乗り心地の変化を検討するため、実験協力者による加振実験を行った。この実験では加振されている実験協力者の生体情報を測定し、ビジュアルアナログスケール (VAS) を使用して実験協力者の主観的な乗り心地を評価した。VASの結果を数値化し、乗り心地を定量的に評価した。

最後に、乗員の生体情報と VAS 値との関係を重回帰分析を用いてモデル化し、モデルから乗員の乗り心地の推定関数を確立した。最後にそのモデルを用いて実験協力者の生体情報から得られた予測 VAS 値を、実験協力者が主観的に評価した VAS 値と比較した。これにより、そのモデルによって主観的な乗り心地を客観的に評価することが可能であるか検討した[4-1]。

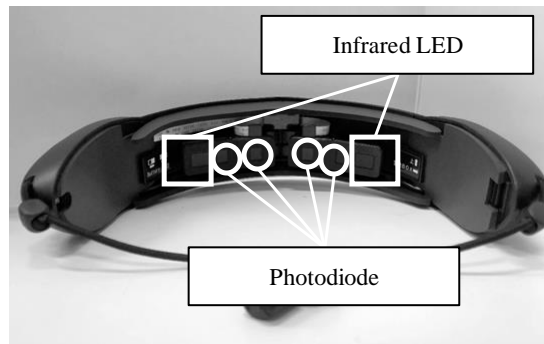
4.2 脳血流量の計測と評価方法 [4-1]

本章では、乗り心地を推定するための生体情報として以前の研究で振動との関係性が明らかにされている、脳血流量ならびに心拍変動を使用した[4-2][4-3]. 中枢神経系活動を反映する脳血流量は、乗員がストレスを感じている場合は右脳の活動が活発になり、リラックスしている場合は左脳の活動が活発になると報告されている[4-4]. そのため、本実験では右脳血流量の上昇量を評価指標として用いており、加振直後の 30 秒間と加振終了直前の 30 秒間の脳血流の差を用いて評価した. それに加え脳全体の関係を示すストレス脳指標 (LIR) を中枢神経活動の評価指標として評価した[4-5]. LIR は式(1)のように定義されている.

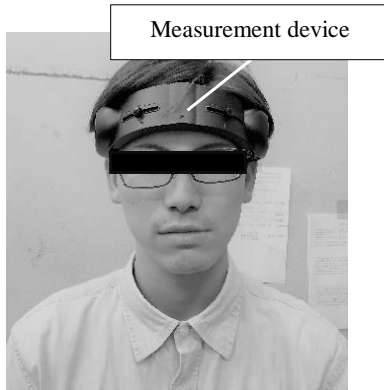
$$LIR = \frac{\Sigma[(R_t - R_{\min}) - (L_t - L_{\min})]}{\Sigma[(R_t - R_{\min}) + (L_t - L_{\min})]} \quad (1)$$

ただし計測区間における右脳活動量を R_t , 計測区間における左脳活動量を L_t , 計測区間における右脳活動量の最小値を R_{\min} , 計測区間における左脳活動量の最小値を L_{\min} である. 脳血流計は図 4-1(a)のように近赤外線 LED ならびにフォトダイオードで構成されており、同図(b)のように前頭部に装着した.

2,3 章と同様に心電図を測定し、LF/HF を算出した.



(a) 脳血流計 Hot-1000 (NeU 社製) [4-1]



(b) 脳血流計装着時

図 4-1 脳血流計 [4-1]

4.3 主観評価を用いた乗り心地評価 [4-1]

本論文では乗り心地を定量的に評価できる主観評価手法として VAS を用いた [4-7]. 図 4-2 に使用した VAS の例を示す. VAS では 1 つの質問に対して 10 cm の直線を用意する. 直線の両端には質問に対する答えが記載されており, 左端はネガティブな回答, 右端はポジティブな回答を示す実験協力者には質問の答えとしてその時の状態を示す位置に自由に交線を引くよう教示する. その後左端から交線までの距離を計測し, その値を主観評価の点数として考える. この点数は大きいほど質問に対してネガティブな反応, 小さいほど質問に対してポジティブな反応であると考えることが可能となる. 本実験では「実験前の状態と比較し現在の乗り心地を示せ」という質問を設定し, 左端を乗り心地が良い, 右端を乗り心地が悪いという回答を設定した. また, 直線の中央では実験前の状態と変化しないことを示すと実験協力者に教示した.

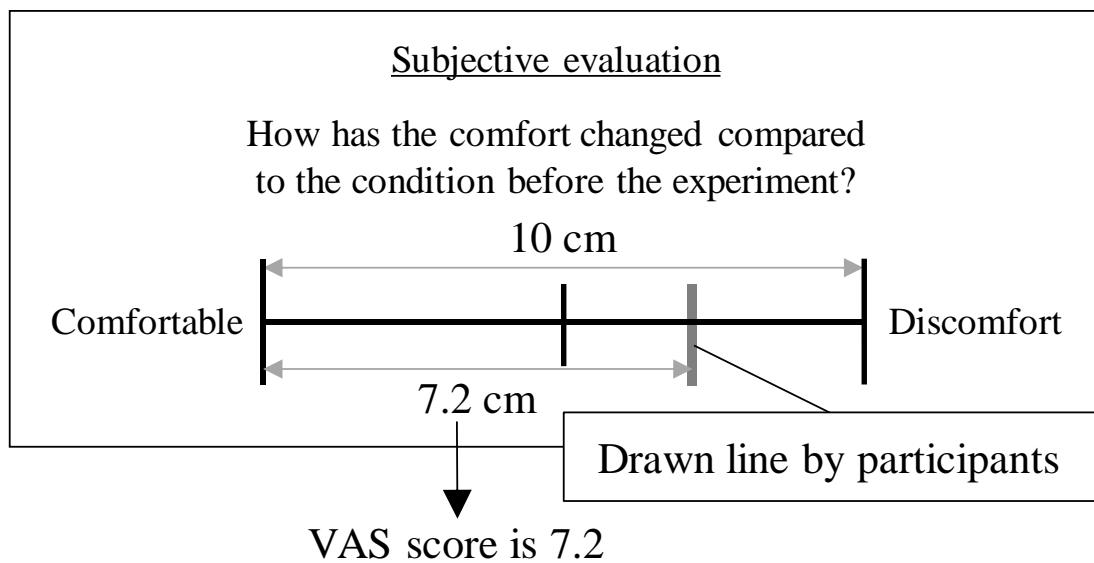
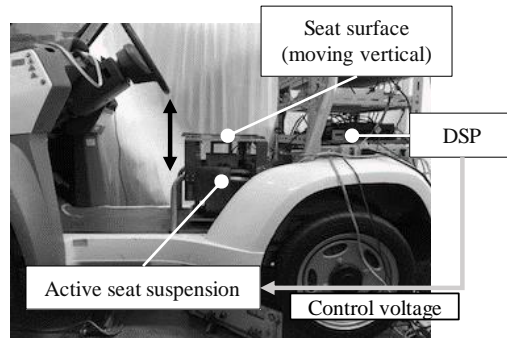


図 4-2 VAS 法による主観評価の一例 [4-1]

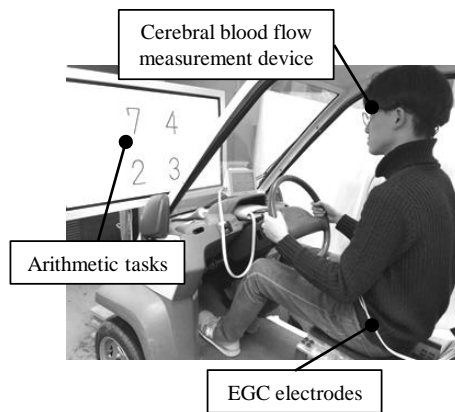
4.4 加振条件 [4-1]

生体情報と VAS 値を用いて振動に対する乗り心地の評価を行い，重回帰分析によって関係性を明らかにする．そこで加振実験を行い，その際の主観評価と生体情報を計測した．生体情報と主観評価の取得方法は 4.2 節に示した通りである．本節では加振実験の方法について記述する．本実験では図 4-3 (a)に示す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を用いた．実験中はアクティブシートサスペンションによって振動を発生させる．実験中は図 4-3 (b)に示すように，脳血流計，心電図を測定する電極を装着した状態の実験協力者を超小型モビリティに乗車させ，運転姿勢を再現させることとした．実験は図 4-3 (c)に示した流れに沿って行われる．初めに 1 分間の暗算時間，その後 3 分間の加振時間を行い，最後に主観評価を行う．暗算時間には実験車両の前に設置されたモニタに図 4-3 (b) のような画面を表示し，実験協力者は 1 分間暗算を行う．これにより，加振時間の前に実験協力者の心理状態の条件を一致させた．

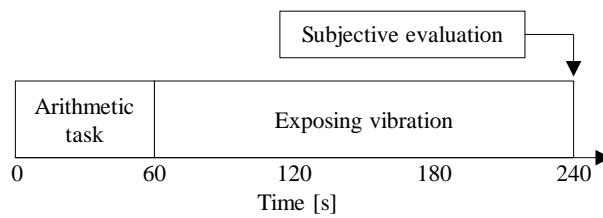
本実験では躍度の変化が主観的な乗り心地および生体情報に与える影響を確認する必要がある．そのため，躍度が異なる 2 つの加振条件を設定した．第 2 章で説明したように，躍度は波形形状か周波数によって調整させられる．周波数は躍度とは関係なく，乗り心地に影響する要因の一つである．そこで，実験では図 4-4 に示すように，5 Hz の正弦波ならびに矩形波状の加速度をアクティブシートサスペンションで発生させた．本実験では躍度が小さい正弦波と躍度が大きい矩形波の 2 種類の加振条件を設定した．なお，入力振動は実験協力者が十分に体感できる振動である必要がある．2.4.1 節と同様の人間の共振点は 5 Hz であり加振周波数は全加振条件において 5 Hz とした[4-8]．振動周波数 5 Hz は座位時に最も敏感に感知しやすい振動であるとされていることから，この周波数に設定している．また実験車両はジャッキアップし，設定した周波数条件以外の振動が入力されないようにした．実験は一人ずつ，男性 15 名（年齢 22 歳）を対象に行った．本実験に関しては東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会にて承認を得ており，実験協力者に対しては実験内容の事前説明を行った．実験への協力に関して同意する実験協力者は同委員会にて承認を得た同意書に署名捺印をした．



(a) アクティブシートサスペンション

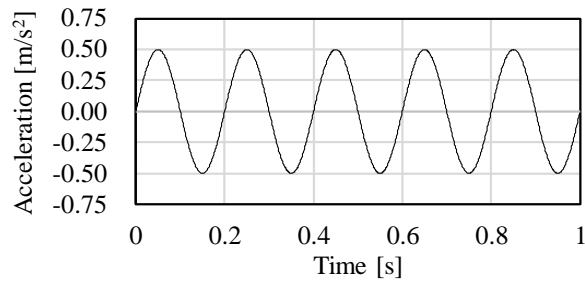


(b) 実験風景

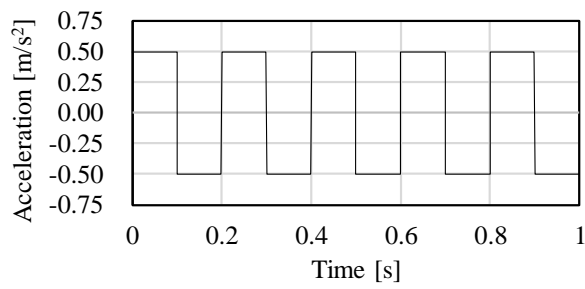


(c) 実験の流れ

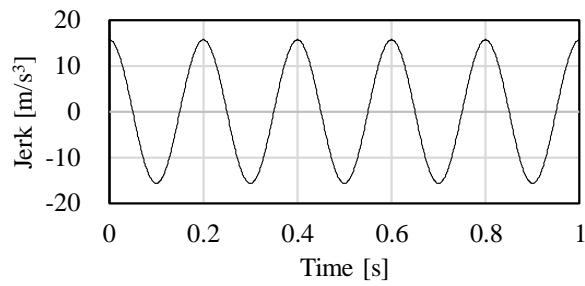
図 4-3 加振実験 [4-1]



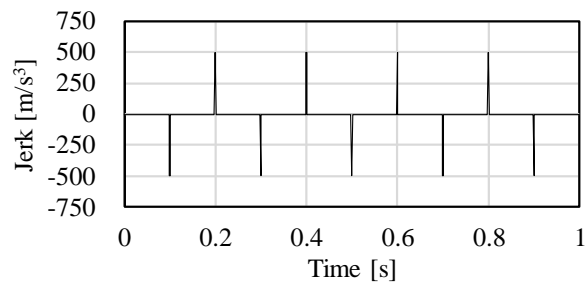
(a) 5 Hz 正弦波の加速度の時刻歴



(b) 5 Hz 矩形波の加速度の時刻歴



(c) 正弦波の躍度の時刻歴



(d) 矩形波の躍度の時刻歴

図 4-4 座面シートの加速度および躍度の時刻歴 [4-1]

4.5 重回帰分析 [4-1]

実験で得られた複数の生体情報の評価指標を総合的に分析して、生体情報とVAS値の関係性を明らかにする。統計学では、多くの要因が関わる分析を行う場合、各変数の相関関係を求める重回帰分析がよく利用される[4-9]。よって本研究では、生体情報と主観評価の関係性を確認することを目的とし、重回帰分析を行った。重回帰分析とは、2つ以上の説明変数 x を用いて、1つの目的変数 y を予測しようとする手法である。本分析では4.2節で述べた生体情報を用いて乗心地の評価に使用した。生体情報は実験開始時における実験協力者の状態に影響させるため、正規化された生体情報を用いた。実験前の生体情報は毎回同じ値に統一することが望ましい。しかし生体情報は時々刻々と変化し、基準となる任意の数値に設定することは困難である。そこで、振動実験前の実験協力者の状態から得られた2つの基準値で測定した生体情報を正規化した。1つは、振動実験の前にすべての実験協力者が座ってリラックスして目を閉じていたとき（安静閉眼時）に測定された生体情報、もう1つは、振動実験直前の演算タスクの生体情報から得た。これらの標準値に対する測定された生体情報の測定値の比率を重回帰分析の説明変数に用いた。式(2)に重回帰式を示す。

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_ix_i \quad (2)$$

式(2)に用いた説明変数は以下のとおりである。 x_1 ：実験中に測定したLIR、 x_2 ：実験中に測定したLF/HF、 x_3 ：実験中に測定した右脳血流量の増加量、 x_4 ：安静時の目を閉じた状態で正規化したLIR、 x_5 ：安静閉眼時の値で正規化したLF/HF、 x_6 ：暗算時の値で正規化したLIR、 x_7 ：暗算の値で正規化したLF/HF、 x_8 ：安静閉眼時のLIR、 x_9 ：安静閉眼時のLF/HF。

正弦波および矩形波の振動の各実験結果に対して行った重回帰分析により、各説明変数 x_i の変動に対する勾配を示す係数 b_i が得られた。正弦波ならびに矩形波の振動における各実験結果に対して重回帰分析が行われ、各説明変数 x_i に対する変動の勾配を示す係数 b_i を算出した。本章では、生体情報を用いて乗員の心理状態を示すVAS値を推定することを目的としている。そのため、目的変数 y は乗心地に関するVAS値とした。正弦波の条件で得られた b_i が矩形波の値よりも大きい場合、その b_i に対応する説明変数 x_i が乗心地をより反映していることを意味する。一方、係数 b_i がゼロの場合、 b_i に対応する説明変数 x_i は乗心地とは関係ないことを示す。表4-1に正弦波、矩形波それぞれの重回帰分析

で得られた係数 b_i を示す。また、正弦波ならびに矩形波で得られた予測式を式(3)、式(4)にそれぞれ示す。

$$y = 2.75 - 0.261x_2 + 0.384x_3 + 4.13x_4 + 1.16x_5 + 2.10x_6 + 0.888x_7 + 0.588x_8 + 0.037x_9 \quad (3)$$

$$y = 8.14 - 0.316x_1 - 0.006x_2 + 3.73x_3 - 2.26x_4 + 0.160x_5 - 0.656x_7 + 1.98x_8 + 0.815x_9 \quad (4)$$

説明変数によって乗り心地への影響度がそれぞれ異なることが得られた。矩形波では係数の絶対値が大きく乗り心地の推定に影響しているのは b_4 安静時の目を閉じた状態で正規化した LIR や b_3 実験中に測定した右脳血流量の増加量右脳上昇量といった脳血流量から算出された指標が大きくなる傾向が得られた。それに加え、正弦波では b_5, b_7 のように心拍変動から得られる指標に対する係数も高い値を示している。このことから躍度が増加すると乗り心地の予測式のパラメータが大きく変化することが得られた。

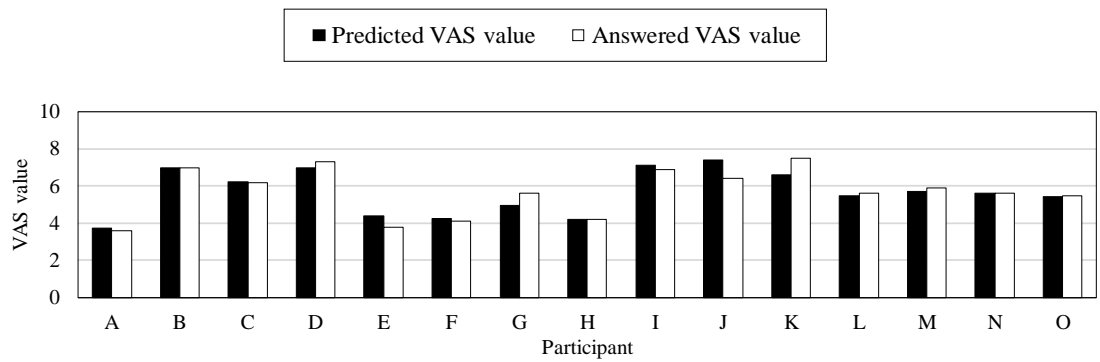
表 4-1 重回帰分析で得られた係数 [4-1]

i	Variable x_i	coefficient b_i	
		Sine	Square
0	Constant	2.750	8.140
1	LIR	0.000	0.316
2	LF/HF	-0.262	-0.006
3	Right brain blood flow increases	0.384	-3.730
4	LIR normalized on eyes closed state at resting time	4.130	-2.260
5	LF/HF normalized on eyes closed state at resting time	1.160	0.160
6	LIR normalized on mental arithmetic time	2.100	0.000
7	LF/HF normalized on mental arithmetic time	0.888	-0.656
8	LIR with eyes closed time	0.588	1.980
9	LF/HF with eyes closed time	0.037	0.815

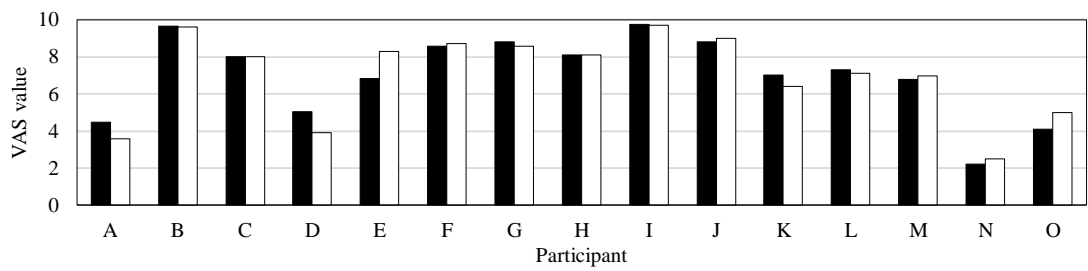
4.6 質問紙により得られた主観評価と生体情報により推定

した主観評価の関係 [4-1]

重回帰分析によって得られた式を用いて生体情報から客観的に VAS 値を推定可能か調査した。測定した生体情報を使い、式(3)、(4)から乗り心地の VAS 値を推定した。生体情報ならびに VAS 値は 4.3 節の条件で計測し、4.4 節の解析で用いたデータと同じである。実験で得られた実測の VAS 値と予測式で得られた推定された VAS 値を比較し、相関係数から提案した。乗り心地の推定の正確性を評価する。推定による VAS 予測値は重回帰分析で作成したモデル用いて推定した VAS を示す。また、実験で得られた VAS 値は実験協力者が実験で回答した VAS の値を示す。図 4-5 は各加振条件における実測した VAS 値と推定された VAS 値の関係を示す。図 4-5 (a)は正弦波、(b)は矩形波での結果を示す。また、図 4-6(a)に示すように予測値と推定値の相関 r は正弦波で 0.935、図 4-6(b)に示す矩形波で 0.960 となっており、強い相関があることを確認した。相関 r が 1 に近ければ、生体情報によって算出され、実験協力者の感情を正しく推定できたことを意味する。そのため、躍度の大きさによって重回帰分析を用いて乗り心地をモデル化することで、乗り心地の推定を行うことが可能であることを示した。

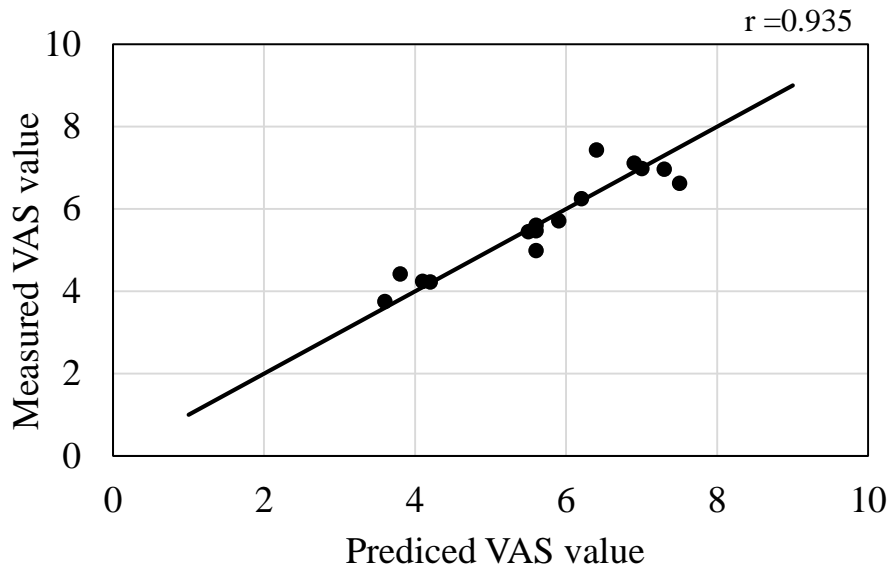


(a) 正弦波

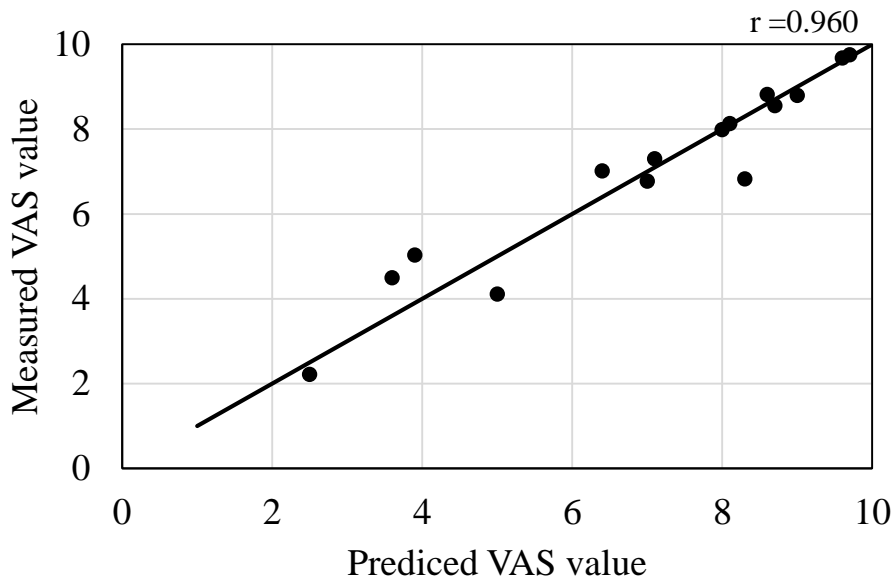


(b) 矩形波

図 4-5 各加振条件における実測した VAS 値と推定された VAS 値の関係 [4-1]



(a)正弦波



(a)矩形波

図 4-6 各加振実験における実測した VAS 値と推定した VAS 値の相関図 [4-1]

4.7 まとめ

本章では，加振実験によって生体情報の計測ならびに VAS による乗り心地の定量的評価を行った．さらに，重回帰分析によって客観的に VAS 値を推定する式を確立した．また，躍度を対象とした限定的な条件ではあるが，客観的かつ定量的に評価することを可能とした．

今後は本論文の内容を基に，異なる振動の条件において同様な客観的かつ定量的な乗り心地の評価を行い，さらなる乗り心地向上に向けた乗員の感覚推定手法の確立を目指す．

第 5 章

結論

本論文では、アクティブシートサスペンションによる乗員一人ひとりに合わせた乗り心地の提供が可能な切り替え制御システムの構築を目的とし、2章では上下方向の振動が乗り心地に与える影響について研究し、3章では超小型モビリティのアクティブシートサスペンションに適した乗り心地制御について研究した。最後に4章では乗員の主観的な乗り心地感覚を生体情報から推定する手法を確立した。

以下に各章において得られた研究成果について述べる。

第1章 序論

本章では、本論文の研究背景について明らかにした。まず超小型モビリティの乗り心地の問題について明らかにした。また、乗り心地感覚は乗員によって感じ方は異なり、乗員一人ひとりに合わせた制御の必要性について述べた。そこで、乗員にとって最適な運転環境を維持できる切り替え制御システムについて述べた。そこで、乗員の心理状態評価できる生体情報について説明し、乗り心地制御に用いる際に適した生体情報について述べた。最後に、このシステムを構築するにあたり必要となる検討事項について関連研究、先行研究を基に述べた。

第2章 加速度および躍度が乗員の乗り心地感覚に与える影響

本章では、乗員一人ひとりに合わせた乗り心地の提供が可能な切り替え制御システムの構築を目的とし、加速度および躍度が乗員の乗り心地感覚に与える影響について検討した。そこで、アクティブシートサスペンションにて上下方向の躍度を乗員に入力し乗員の生体情報を用いて乗り心地の評価を行った。この際、加速度の周波数の影響を考慮し、周波数を一定で加速度波形を変更し躍度に変化を持たせた。次に加速度の周波数と躍度の関係について述べ、その双方が乗り心地に与える影響について明らかにするため、加速度の周波数を変更し周波数と躍度に変化を持たせ、乗員の生体情報から評価した。これらの加振実験によって得られた研究成果は以下の通りである。

- 振動の加速度波形を変更し躍度が小さい正弦波より躍度が大きい矩形波にてストレスを確認することができ、躍度が心理状態に与える影響を確認することができた。

本論文では、アクティブシートサスペンションによる乗員一人ひとりに合わせた乗り心地の提供が可能な切り替え制御システムの構築を目的とし、2章では上下方向の振動が乗り心地に与える影響について研究し、3章では超小型モビリティのアクティブシートサスペンションに適した乗り心地制御について研究した。最後に4章では乗員の主観的な乗り心地感覚を生体情報から推定する手法を確立した。

以下に各章において得られた研究成果について述べる。

第1章 序論

本章では、本論文の研究背景について明らかにした。まず超小型モビリティの乗り心地の問題について明らかにした。また、乗り心地感覚は乗員によって感じ方は異なり、乗員一人ひとりに合わせた制御の必要性について述べた。そこで、乗員にとって最適な運転環境を維持できる切り替え制御システムについて述べた。そこで、乗員の心理状態評価できる生体情報について説明し、乗り心地制御に用いる際に適した生体情報について述べた。最後に、このシステムを構築するにあたり必要となる検討事項について関連研究、先行研究を基に述べた。

第2章 加速度および躍度が乗員の乗り心地感覚に与える影響

本章では、乗員一人ひとりに合わせた乗り心地の提供が可能な切り替え制御システムの構築を目的とし、加速度および躍度が乗員の乗り心地感覚に与える影響について検討した。そこで、アクティブシートサスペンションにて上下方向の躍度を乗員に入力し乗員の生体情報を用いて乗り心地の評価を行った。この際、加速度の周波数の影響を考慮し、周波数を一定で加速度波形を変更し躍度に変化を持たせた。次に加速度の周波数と躍度の関係について述べ、その双方が乗り心地に与える影響について明らかにするため、加速度の周波数を変更し周波数と躍度に変化を持たせ、乗員の生体情報から評価した。これらの加振実験によって得られた研究成果は以下の通りである。

- 振動の加速度波形を変更し躍度が小さい正弦波より躍度が大きい矩形波にてストレスを確認することができ、躍度が心理状態に与える影響を確認することができた。

- 乗り心地劣化を引き起こす周波数 (5 Hz)と躍度が大きい周波数 (10 Hz)にて、乗り心地劣化の影響を受けていない実験協力者では、躍度が増すにつれて心理状態が悪化することが確認できた。
- 躍度の影響を受けやすい実験協力者群と周波数の影響を受けやすい実験協力者群と区別することができた。

上記の結果から、躍度と周波数は乗り心地に及ぼす影響が異なることを確認した。

第3章 振動のマスキングを用いた乗り心地改善に関する検討

本章では、超小型モビリティのアクティブシートサスペンションに適した乗り心地制御手法の検討を行った。そこで、入力された外乱とは別の周波数帯域の振動を積極的に重ね合わせることにより、乗り心地を変化させる手法としてマスキング手法について提案した。マスキングに関する基礎的な検討として、重ね合わせる振動の選定および外乱の振動の選定について 2 Hz ~ 10 Hz の単一周波数にて加振実験を行い実験協力者の生体情報からリラックスを示す振動を重ね合わせる振動、またストレスを示した振動を外乱と選定した。次に実験協力者から得られたリラックスを示す振動を外乱に重ね合わせてマスキングによる効果を複数の実験協力者にて加振実験を実施した。なおこの際、外乱に対する重ね合わせる振動の相対的な加速度振幅についても検討を行った。これらの実験による得られた研究成果は以下の通りである。

- 少数の実験協力者ではあるが、5 Hz の正弦波振動に対してその 2 倍の加速度振幅を持つ 3, 10 Hz の正弦波振動を重ね合わせてマスキングを行うことによって、乗り心地が劣化しやすい 5 Hz の正弦波振動のみで加振した場合よりもリラックスになることを心電図から得られた心理状態評価指標 LF/HF から確認した。
- 上記知見に基づき、12 名の実験協力者にて 2 倍の加速度振幅を持つ 3, 10 Hz の正弦波振動によるマスキングの効果を加振実験から評価したところ、実験協力者によってマスキングの効果が異なることを確認した。
- マスキングによる乗り心地の向上効果が異なる実験協力者間の身体的な違いを確認するために人体各部の振動伝達率を加振実験から評価したが、

明確な差は確認されなかった。

上記の結果から、マスクングによる乗り心地の向上効果を確認することができた。

第4章 生体情報を用いた乗員の乗り心地感覚推定に関する検討

本章では、乗員の主観的な乗り心地感覚を生体情報から推定する手法について検討した。はじめに、乗り心地感覚が異なる躍度にて実験協力者の生体情報および主観評価の関係を明らかにするため加振実験を行った。次に乗り心地に影響がある生体情報を確認するため、重回帰分析を行い躍度の影響を受けてた生体情報を検討した。また、加振実験から得られた実験協力者の生体情報を用いて重回帰分析を行いVASを推定するモデルを構築した。最後にそのモデルを用いて実験協力者の生体情報から得られた予測VAS値を、実験協力者が主観的に評価したVAS値と比較した。これらの実験による得られた研究成果は以下の通りである

- 加振実験によって生体情報の計測ならびにVASによる乗り心地の定量的評価を行い重回帰分析によって客観的にVAS値を推定する式を確立した。
- 躍度を対象とした限定的な条件ではあるが、客観的かつ定量的に評価することを可能とした。
- 乗り心地感覚が異なる躍度にて乗員の生体情報を用いることで、乗員の心理状態を推定できることを確認した。

以上の結果から躍度の大きさによって重回帰分析を用いて乗り心地をモデル化することで、乗り心地の推定を行うことが可能であることを示した。

謝辞

本研究を行うにあたり多大なるご指導，ご鞭撻ならびにお尽力を賜りました本学 工学部動力機械工学科 加藤英晃 講師ならびに成田正敬 講師に心からお礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたっては本学 工学部原子力工学科 松村義人 特任教授，工学部動力機械工学科 森山裕幸 教授，工学部精密工学科 奥山淳 教授に細部にわたってご査読，ご叱正をいただきました。ここに紙面を借りて深謝いたします。

最後に本学の諸先生，諸先輩，同僚，大学院生ならびに加藤・成田研究室の諸氏に感謝いたします。

令和4年1月

池田 圭吾

付録 本論文に記載された内容の引用元

本論文は参考文献[2-1], [3-1], [4-1]に掲載された内容を基に構成されている。International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics に掲載された内容[2-1]は第2章 2.2～2.5節, actuators に掲載された内容 [3-1]は第3章 3.2～3.6節, Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E に掲載された内容[4-1]は第4章 4.2～4.6節を構成している。

なお, 本論文で引用された International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics の論文[2-1]の最終版については <https://doi.org/10.3233/JAE-209471>, で公開されている (The final publication [2-1], that used in this doctoral thesis is available at IOS Press through “<https://doi.org/10.3233/JAE-209471>”).

参考文献

第 1 章 序論

- [1-1] 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 (2003), No. 4, pp. 209-215.
- [1-2] 鈴木卓馬, 高橋正樹, 車速による車両ダイナミクスの変化を考慮した自動車用アクティブサスペンションの制御系設計, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78 (2012), No. 786, pp. 446-461.
- [1-3] 川元康裕, 須田義大, 井上博文, 近藤卓宏, 自動車用電磁サスペンションの省エネルギー・アクティブ制御に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 39 (2008), No. 3, pp. 3_35-3_40.
- [1-4] K. Huang, F. Yu and Y. Zhang, Active controller design for an electromagnetic energy-regenerative suspension, International Journal of Automotive Technology, Vol. 12 (2011), No. 6, pp. 877-885.
- [1-5] Y. Kawakita and S. Kotake, Active sampled-data controlled suspension in automobile with vibration manipulation functions - Intermittent desired elongation control of actuator, International Journal of Automotive Engineering Vol. 7 (2016), No. 2, pp. 77-84.
- [1-6] 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乗り心地改善 (小型電気自動車を用いた基礎的考察), 日本 AEM 学会誌, Vol. 11 (2003), No. 4, pp. 175-176.
- [1-7] Parker LORD 社製トラクタ用セミアクティブサスペンション, <https://www.lord.com/emea/industries/industrial-equipment/agricultural/semi-active-seat-suspension>.
- [1-8] Jurgen Maas, Simon Kern, Hans-Christian Pflug, Helmut Porod, Active seat suspension, dSPACE NEWS (2006), pp. 12-13.
- [1-9] M.J.Griffin: Handbook of Human Vibration, Academic Press (1996).
- [1-10] Miyuki Morioka, Michael J. Griffin, Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 298 (2006), No. 3, pp. 755-772.
- [1-11] 中川千鶴, 島宗亮平, 高見創, 渡邊健, 横山義彦, 高周波振動を考慮した乗り心地評価法, 鉄道総研報告, Vol. 26 (2012), No. 1, pp. 33-38.

- [1-12] 松本泰尚, Michael J. Griffin, 鉛直振動曝露時の人体動的応答特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 703/I-59 (2002), pp. 185-201.
- [1-13] G.S. Paddan and M.J. Griffin, Evaluation of whole-body vibration in vehicles, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 253 (2002), No. 1, pp. 195–213.
- [1-14] J.L. Coyte, D. Stirling, H. Du and M. Ros, Seated whole-body vibration analysis, technologies, and modeling: A survey, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 46 (2016), No. 6, pp. 725–739.
- [1-15] 北崎智之, 自動車の振動評価, 日本音響学会誌, Vol. 53 (1997), No. 1, pp39-43.
- [1-16] 山崎和秀, 乗り心地の評価, 日本音響学会誌, Vol. 46 (1990), No. 2, pp. 157-162.
- [1-17] 前田節雄, ISO2631 に基づいた乗り物振動評価の動向, Vol. 53 (1997), No. 1, pp33-38.
- [1-18] 山崎和秀, 移動車両内空間の快適性, 繊維製品消費科学, Vol. 31 (1990), No. 4, pp. 168-171.
- [1-19] 鈴木浩明, 車両の乗り心地と快適性, 日本船舶機関学会誌, Vol. 33(2000), No. 6, pp. 352-360.
- [1-20] 大野央人, 鉄道振動の乗り心地, 騒音制御, Vol. 21(1997), No. 1, pp. 17-20.
- [1-21] Pollard, M. G, Passenger to tolerance of high-speed curving, *Railway Gazette international*, Vol. 140(1985), No. 11, pp. 870-873.
- [1-22] 鈴木浩明, 乗り物の快適性評価に影響する諸要因, 心理学評論, Vol. 42(1999), No. 1, pp. 63-85.
- [1-23] 鈴木浩明, 乗り物の振動と乗り心地の評価, 日本音響学会誌, Vol. 60 (2004), No. 9, pp. 543-548.
- [1-24] International Organization of Standardization ISO 2631: Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration (1974).
- [1-25] R. N. Janeway: Human vibration tolerance criteria and application to ride evaluation, SAE Technical Paper Series, 750166 (1975), pp. 1-24.
- [1-26] Jurgen Maas, Simon Kern, Hans-Christian Pflug, Helmut Porod, Active seat suspension, *dSPACE NEWS* (2006), pp. 12-13.

- [1-27] 大須賀美恵子, ドライバ状態評価のための生理心理計測—自律神経指標を中心に—, 自動車技術会心地よい音をはかる技術・つくる技術シンポジウム資料 (2013), pp. 40-45.
- [1-28] 高岡慧, 満倉靖恵, 渡井宏和, 田代勝巳, 村上和明, 橋本隆次, 脳波を用いた自動車の乗り心地評価の検討, 電気学会産業計測制御研究会資料, Vol. IIC-11(2011), No. 72-94, pp. 73-76.
- [1-29] 岡村昌浩, 小泉孝之, 辻内伸好, 脳波の計測に基づく乗り心地評価, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2003.
- [1-30] 渡辺洋史, 田中健治, 藤岡陽一, 國分弘規, 山口俊行, 新型デミオのパーフォーマンスフィールド, マツダ技法, No.32, (2015).
- [1-31] 加藤英晃, 増野将大, 石田勝樹, 長谷川真也, 押野谷康雄, 超小型電気自動車用アクティブシートサスペンション (筋電位を用いた乗り心地評価に関する基礎的検討), 日本 AEM 学会誌, Vol.23 (2015), No. 1, pp. 74-79.
- [1-32] 加藤英晃, 石田勝樹, 増野将大, 成田正敬, 乗員の心理状態推定による乗り心地制御システムの提案, 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015), No. 832, pp. 15_00356.
- [1-33] 大須賀美恵子, ドライバ状態評価のための生理心理計測—自律神経指標を中心に—, 自動車技術会心地よい音をはかる技術・つくる技術シンポジウム資料 (2013), pp. 40-45.
- [1-34] 高岡慧, 満倉靖恵, 渡井宏和, 田代勝巳, 村上和明, 橋本隆次, 脳波を用いた自動車の乗り心地評価の検討, 電気学会産業計測制御研究会資料, Vol. IIC-11(2011), No. 72-94, pp. 73-76.
- [1-35] 岡村昌浩, 小泉孝之, 辻内伸好, 脳波の計測に基づく乗り心地評価, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2003.
- [1-36] 芝崎智貴, 吉原健太, 鋤柄あかね, 倉橋貴彦, 池田富士雄, 脳波の測定結果を用いた自動車の乗り心地評価, 長岡工業高等専門学校研究紀要, Vol. 55 (2019), pp. 11-16.
- [1-37] 田中倫子, 白木直樹, 長谷川晋一, 高橋拓史, 長谷川清, 吉田慎治, NIRS を活用した鉄道車両車内照明および客室空間色彩の快適性評価, 日本機械学会論文集, Vol. 85 (2019), No. 880, pp.19-00119.

- [1-38] 加藤英晃, 石田勝樹, 増野将大, 成田正敬, 乗員の心理状態汐碇による乗り心地制御システムの提案, 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015), No. 832, pp. 15_00356.
- [1-39] 西村千秋, 小坂明生, 常光和子, 吉沢修治, 南雲仁一, 皮膚電位水準による自動車運転時の覚醒水準評価の試みI(路上運転時の皮膚電位変化), 人間工学, Vol. 23 (1987), No. 2, pp. 103-110.
- [1-40] 佐々木誠, 嶋倉知希, 大日方五郎, 山口昌樹, 身体的・精神的ストレスに着目した車いすの適合性評価, 日本機械学会生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集.
- [1-41] 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 (2013), No.8, pp. 551-519.
- [1-42] 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 (2003), No501, pp. 15-20.
- [1-43] 山川高史, マスキング音データ生成装置およびプログラム.
- [1-44] 前田節雄, ISO 2361 に基づいた乗り物振動評価の動向, 日本音響学会誌, Vol. 53 (1997), No. 1, pp. 33-38.
- [1-45] 荒川淳, 宮田弘市, 乗り心地向上のためのエレベーター低振動化法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 66 (2000), No. 651, pp. 3547-3553
- [1-46] Daofei Li, Jiankan Hu, Mitigating Motion Sickness in Automated Vehicles With Frequency-Shaping Approach to Motion Planning, IEEE robotics and automation letters, Vol. 6 (2021), No. 4, pp.7714-7720.
- [1-47] D.J. Osborne, M.J. Clarke, The Determination of Equal Comfort Zones for Whole-body Vibration, Ergonomics, Vol. 17 (1974), No. 6, pp. 769-782.
- [1-48] 鈴木千尋, 石川孝重, 不安感・不快感からみたランダム水平振動に対する心理評価に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 79 (2014), No. 704, pp. 841-848.
- [1-49] 内久根聖志, 吉田義之, 低周波全身前後振動の生理学的影響と心理学的評価について, 人間工学, Vol. 27, 特別号 (1991), pp. 144-145.
- [1-50] 上條芳武, 岩田宜之, 高田一, エレベーターの乗り心地に影響するパラメータの推定, 日本機械学会, Vol. 86 (2020), No.881, pp19-00407.

- [1-51] 小美濃幸司, 永田久雄, 大野央人, 加速度刺激の方向に対する人間の転倒方向について, 人間工学会, Vol. 34 (1998), No. 3, pp. 117-127.
- [1-52] Zhongliang Yang, Yumiao Chen, Zhichuan Tang, Nan Zhang, A Subjective Evaluation System for High-Speed Trains Ride Comfort, 2013 Sixth International Symposium on Computational Intelligence and Design, pp.88-91.
- [1-53] 能登裕子, 木村里志, 介助負担と乗り心地を考慮した車いす段差乗り上げ介助操作の姿勢指標, 日本看護技術学会誌, Vol. 15 (2015), No. 2, pp.135-145.
- [1-54] 遠藤広晴, 村越暁子, 伊積康彦, 内田好徳, 林伸明, 夏季の通勤列車利用時の温湿度変動が温熱快適性に及ぼす影響, 人間生活工学, Vol. 15 (2014), No. 2, pp.39-49.
- [1-55] 中川千鶴, 秋保直弘, 吉江幸子, 小島崇, 渡部貴浩, 鈴木綾子, 生理指標を活用した運転士状態推定の基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol. 33 (2019), No. 1, pp. 5-10.
- [1-56] 清水俊行, 南部起可, 機能的近赤外分光法による実車運転時の脳活動の測定, 自動車技術会論文集, Vol. 41 (2010), No. 6, pp. 1263-1268.
- [1-57] Nicole Dillen, Marko Ilievski, Edith Law, Lennart E. Nacke, Krzysztof Czarnecki, Oliver Schneider, Keep Clam and Ride Along: Passenger Comfort and Anxiety as Physiological Responses to Autonomous Driving Styles, Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-13.
- [1-58] Jennifer A. Healey, Rosalind W. Picard, Detecting Stress During Real-World Driving Tasks Using Physiological Sensors, IEEE transactions on intelligent transportation systems, Vol. 6 (2005), No. 2, pp. 156-166.
- [1-59] Masakazu Arima, Yuuki Tamura, and Masaaki Yoshihira, Evaluation of Ride Comfort of Passenger Craft, 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 802-807.
- [1-60] Yasue Mitsukura, Hironobu Fujai, Satoru Suzuki, Yohei Tomita, Hirokazu Watai, Katsumi Tashiro, Kazutomo Murakami, The Extraction of Riding Condition System using the EEG, 2009 ICCAS-SICE, pp. 4442-4445.
- [1-61] 富山和也, 川村彰, 高橋清, 石田樹, 生体情報を利用した路面乗り心地

に基づく舗装の健全度モニタリング, 土木学会論文集 F3(土木情報学),
Vol. 67 (2011), No. 2, pp. I_125-I_132.

- [1-62] 小田原健雄, 三栖貴行, 渡部智樹, 一色正男, 照明光色がヒトに及ぼす
影響の検討, 日本色彩学会誌, Vol. 41 (2017), No. +3, pp.145-148.
- [1-63] 山下真裕子, 山田逸成, 安田昌司, 点滅周期および色光の変化による生
理的・心理的影響, 知能と情報 (日本知能情報フレンジ学会誌), Vol. 27
(2015), No.2, pp. 599-607.

第2章 躍度による乗り心地の関係

- [2-1] Keigo Ikeda, Ayato Endo, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, A basic study on influence of jerk on riding comfort using active seat suspension for ultra-compact mobility
- [2-2] Ayato Endo, Keigo Ikeda, Masahiro Mashino, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Hiroyuki Moriyama, Ride comfort control system using driver's psychological state: experimental consideration on heart rate variability, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 59 (2019), No. 3, pp. 977-984, The final publication is available at IOS Press through: <http://dx.doi.org/10.3233/JAE-171120>.
- [2-3] Ayato Endo, Keigo Ikeda, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Hiroyuki Moriyama, Design of Voice Coil Motor for Active Seat Suspension: Investigation Using Magnetic Field Analysis, *The 14th International Conference on Motion and Vibration Control* (2018), pp.523-523
- [2-4] 遠藤文人, 池田圭吾, 三野輪良祐, 加藤英晃, 成田正敬, 超小型モビリティの乗員振動制御用アクチュエータの設計 (振動抑制効果に関する基礎検討), *設計工学*, Vol. 55 (2020), No. 8, pp. 22-23.
- [2-5] 遠藤文人, 池田圭吾, 三野輪良祐, 加藤英晃, 成田正敬, 超小型モビリティの乗員振動制御用ボイスコイルモータ (コイルの影響に関する基礎解析), *日本機械学会関東支部第 25 期総会・講演会講演論文集* (2019), 19F05.
- [2-6] 池田圭吾, 遠藤文人, 増野将大, 加藤英晃, 成田正敬, 森山裕幸, 超小型モビリティ用アクティブシートサスペンション—加速度の時間変化率に対する快適性の基礎検討—, *電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集* (2017)
- [2-7] C. C. Smith, D. Y. McGehee and A. J. Healey, The prediction of passenger riding comfort from acceleration data, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 100 (1978), No. 1, pp. 34-41
- [2-8] M. Malik, J. T. Bigger, A. J. Camm, R. E. Kleiger, A. Malliani, A. J. Moss and P. J. Schwartz, Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, *European Heart Journal*, Vol. 17 (1996), No. 3,

pp. 354–381.

- [2-9] N. J. Mansfield and M. J. Griffin: Effect of posture and vibration magnitude on apparent mass and pelvis rotation during exposure to whole-body vertical vibration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 253 (2002), No. 1, pp. 93-107.
- [2-10] Y. Matsumoto and M. J. Griffin, A study of the dynamic response of the human body to vertical whole-body vibration, *Doboku Gakkai Ronbunshuu*, 703 (2002) 185.
- [2-11] R. N. Janeway: Human vibration tolerance criteria and application to ride evaluation, *SAE Technical Paper Series*, 750166 (1975), 1-24.
- [2-12] International Organization of Standardization ISO 2631: Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration (1974).

第3章 による乗り心地の関係

- [3-1] Keigo Ikeda, Ayato Endo, Ryosuke Minowa, Takayoshi Narita, Hideaki Kato, Ride Comfort Control System Considering Physiological and Psychological Characteristics: Effect of Masking on Vertical Vibration on Passengers, actuators, Vol. 7 (2018), No. 44.
- [3-2] Kobori, T.; Kajikawa, Y. Ergonomic Evaluation Methods for Bridge Vibrations, The Editorial Committee on J. of Jpn Soci of Civil Eng, 1974, 230, pp. 23-31.
- [3-3] 池田圭吾, 大田貴弘, 遠藤文人, 加藤英晃, 成田正敬, マスキング手法を応用した超小型モビリティの乗り心地改善 (生体情報を用いた乗り心地評価に関する実験的検討), 第32回「電磁力関連のダイナミクス」講演論文 (2020).
- [3-4] 池田圭吾, 三野輪良祐, 遠藤文人, 加藤英晃, 成田正敬, 超小型モビリティの乗り心地制御システムの開発ー, 人間工学, 2019年55巻 Supplement 号 p. 1D1-5.
- [3-5] Mansfield, N. J., Griffin, M. J.: Effect of posture and vibration magnitude on apparent mass and pelvis rotation during exposure to whole-body vertical vibration, J. of Sound and Vibration, Vol. 253 (2002), Issue 253, pp. 93-107.
- [3-6] ISO: Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, 2631 (1978).
- [3-7] Janeway, R.N.: Human Vibration Tolerance Criteria and Application to Ride Evaluation, SAE Technical Paper Seri, 1975, 750166.
- [3-8] 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 (1995), No. 3, pp. 47-56.
- [3-9] Matumoto Yasunao, Griffin M. J., Non-Linear Characteristics in the Dynamic Responses of Seated Subjects Exposed to Vertical Whole-Body Vibration, J Biomech Eng, Vol. 124 (2002), No. 5, pp. 527-532.

第4章 重回帰分析による乗り心地予測

- [4-1] Takahiro OHTA, Keigo IKEDA, Ayato ENDO, Hideaki KATO, Takayoshi NARITA, Ride Comfort Estimation Method Using Biological Information and Subjective Evaluation: A Fundamental Consideration Focusing on Jerk of Vertical Vibration, Proceedings of the School of Engineering Tokai University, Series E, Vol. 45 (2020), pp. 51-57.
- [4-2] Keigo Ikeda, Ayato Endo, Ryosuke Minowa, Takayoshi Narita, Hideaki Kato, Ride Comfort Control System Considering Physiological and Psychological Characteristics: Effect of Masking on Vertical Vibration on Passengers, actuators, Vol. 7 (2018), No. 44.
- [4-3] Keigo Ikeda, Ayato Endo, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Ride Comfort Control System Considering Physiological, Psychological, and Psychological Characteristics: Experimental Study of LIR, Proc. 2019 12th ASCC, (2019) 1228.
- [4-4] M. Tanida, M. Katsuyama, and K. Sakatani, Effects of fragranceadministration on stress-induced prefrontal cortex activity and sebumsecretion in the facial skin, Neurosci. Lett., 432 (2008) 157.
- [4-5] W. Ishikawa, M. Sato, Y. Fukuda, T. Matsumoto, N. Takemura and K. Sakatani, Correlation between asymmetry of spontaneous oscillation of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: A near-infrared spectroscopy study, J. Biomed. Opt, 19 (2014) No. 2, 027005.
- [4-6] Hideaki Kato, Masaki Ishida, Masahiro Mashino, Takayoshi Narita, Proposal of ride comfort control system by psychological state estimation of the driver, Trans. JSME, Vol. 81 (2015) No. 832, pp. 15-00356.
- [4-7] V. SL. Williams, R. J. Morlock and D. Feltner, Psychometric evaluation of a visual analog scale for the assessment of anxiety, Hlth. Qlty. Life Outcomes, 8 (2010) 57.
- [4-8] Y. Matsumoto and M. J. Griffin, A study of the dynamic response of the human body to vertical whole-body vibration, Doboku Gakkai Ronbunshuu, 703 (2002) 185.
- [4-9] K. Yokoyama and I. Takahashi, Feasibility study on estimating subjective fatigue from heart rate time series, IEICE Trans. Jpn., J96 (2013) 756.