

東海大学大学院令和2年度博士論文

ボイスコイルモータを用いたアクティブシート
サスペンションに関する研究

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

遠藤 文人

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景および目的	2
1.1.1 超小型車両とその乗り心地の課題	2
1.1.2 アクティブシートサスペンションとその課題	2
1.1.3 超小型車両用アクティブシートサスペンションの構築	3
1.1.4 車両の乗り心地改善の動向	4
1.1.5 乗員の心理状態に応じた乗り心地制御システムの構築	5
1.2 従来の研究	8
1.2.1 アクティブシートサスペンションとアクチュエータ	8
1.2.2 生体情報を用いた心理状態の評価やその応用	10
1.2.3 自動車の乗り心地評価	11
1.3 論文の構成および概要	15
第2章 アクティブシートサスペンション用 ボイスコイルモータの設計	17
2.1 はじめに	18
2.2 アクティブシートサスペンション	19
2.3 アクティブシートサスペンション用 VCM の開発	21
2.4 アクティブシートサスペンションのモデル化	25
2.4.1 運動モデル	25
2.4.2 制御モデル	26
2.5 電磁界解析による VCM の特性評価	29
2.5.1 VCM モデルのパラメータと解析手法	29
2.5.2 導線径に対する VCM の諸特性	29
2.6 アクティブシートサスペンションモデルを用いた解析	35

2.6.1	解析条件	35
2.6.2	最も制御性能を得られる重み係数の探索	35
2.6.3	実際の使用環境を想定した解析	36
2.7	ギャップが制御性能へ与える影響	46
2.7.1	ギャップと制御性能の関係性	46
2.7.2	電磁界解析によるギャップと VCM 特性変化の関係性評価	46
2.7.3	運動解析を用いたギャップと制御性能の関係性評価	47
2.8	アクティブシートサスペンション用 VCM の製作	52
第 3 章	心理状態をフィードバックする振動制御	54
3.1	はじめに	55
3.2	心拍変動による乗り心地の評価	56
3.3	乗り心地制御システム	61
3.4	心理状態の評価指標による乗り心地改善への影響評価	64
3.5	脳血流量による乗り心地感覚の評価	71
3.5.1	NIRS と乗り心地感覚の関係性	71
3.5.2	脳血流量の計測と評価方法	71
3.5.3	主観評価の取得方法	72
3.5.4	加振実験の方法	73
3.5.5	加振実験による脳血流量への影響	74
第 4 章	結論	84
謝辞		88
付録		89
参考文献		90

本論文で用いたおもな記号

c	: リニアスライダの摩擦等を含めた見かけの減衰係数 [Ns/m]
d	: VCM で用いられるコイルの導線径 [mm]
F_d	: 変位, 速度および VCM への制御電流に関するフィードバックゲイン f_1, f_2, f_3 を要素とするフィードバック行列
i	: 制御電流 [A]
J_d	: 最適制御理論における 2 次形評価関数
k	: 4 本のコイルスプリングを合計したばね定数 (4 本の合計値)
K	: VCM の推力定数 [N/A]
L	: VCM のコイルインダクタンス [H]
m	: 乗員 (着座時の脚部等の影響を除いたシートに加わる質量) とシートの質量の合計値 [kg]
Q_d	: 変位, 速度および VCM への入力電流に関する重み係数 q_1, q_2, q_3 を要素とする重み行列
R	: コイル抵抗 [Ω]
r_d	: 制御電圧に関する重み係数
t_s	: 整定時間 [s]
v	: 制御電圧 [V]
y	: シートの絶対変位 [m]
\dot{y}	: シートの絶対速度 [m/s]
\ddot{y}	: シートの絶対加速度 [m/s ²]
\ddot{y}_∞	: 加速度の定常値 [m/s ²]

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景および目的

1.1.1 超小型車両とその乗り心地の課題

公共交通機関の整備が不十分である地域の交通問題の解決や、公共交通機関利用後から目的地までの移動手段、観光地を自由に周遊するための交通手段として図 1-1 のような超小型車両の需要が年々拡大している[1-1]. 超小型車両は 1~2 人乗りの非常にコンパクトな車両であることから、公共交通機関が通行できない狭い路地へも容易に乗り入れることが可能であるため、上記のような環境で利用されている. 特に観光や日常利用を想定したレンタル、カーシェアリングサービスで導入されることが多く、観光地の周遊を目的として実際に導入が進められている県もある[1-2].

このように、超小型車両は従来とは大きく異なり、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. また、超小型車両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. これに加えて、超小型車両は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. たとえば、従来の乗用車の振動制御では、シャシ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[1-3]~[1-6]. 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. 以上のような社会的背景から、超小型車両のような従来よりも振動にさらされやすく、極めて小さな車体においても、容易に搭載することが可能な乗り心地改善用の振動制御装置の構築は極めて重要になってくると考えられる.

1.1.2 アクティブシートサスペンションとその課題

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、アクティブシートサスペンションがこれまで提案されている[1-7]。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。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[1-8]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[1-9]でも実用化されている。農業用トラクタや大型トラックでは車室内が比較的広く、このようなアクティブシートサスペンションを容易に搭載することが可能である。しかしながら、前述の通り、本研究で取り扱うような超小型車両は図 1-2 に示すように車室内空間が非常に狭いという特徴がある。さらに、アクティブシートサスペンションを制御するための電力供給用バッテリーの搭載に関しても重量や出力の面で制約がある。

1.1.3 超小型車両用アクティブシートサスペンションの構築

前項で挙げた問題点を解決するため、本研究ではアクティブシートサスペンションで用いられるアクチュエータに着目し、その性能の追求を目的とした。従来の大型車両において、アクティブシートサスペンションのアクチュエータは油圧や空気圧のアクチュエータが用いられることが多かった。しかしながら、これらのアクチュエータはポンプの搭載や配管による機構の複雑化や重量増加、さらには定期的にメンテナンスが必要となる。そこで、超小型車両用のアクティブシートサスペンションのアクチュエータとして考えられるのは、リニアモータの一種であるボイスコイルモータ（以下、VCM と称する）である。VCM はアクティブシートサスペンション用のアクチュエータとして用いられている事例はないことから、本研究では、小型・軽量で高い制御性能を実現する VCM を構築することを目的とした。

従来の研究や開発において、モータを設計する際には電磁界解析を用いて推力特性や応答性を評価することが一般的である。しかしながら、このような電磁界解析のみを用いた開発方法では、搭載可能な電源容量や使用環境に応じて必要となる制御性能の分析が行われておらず、小型・軽量で高い制御性能を実現することは困難になる。本研究において対象とした超小型車両の乗り心地制御においても、アクチュエータの小型化が要求されるため、実際の走行環境で必要とされる推力や応答性をあらかじめ運動解析などによって明らかにする必要がある。

る。また、超小型車両では空間的な制約からバッテリー搭載量にも制限があるため、制御電力を抑えられるような制御手法を適用することを踏まえた設計が求められる。このような背景から、本研究では電磁界解析と運動解析、制御手法を統合した解析を構築することで、超小型車両用アクティブシートサスペンションで用いられるアクチュエータを設計することを目的とした。

1.1.4 車両の乗り心地改善の動向

自動車用語辞典では、「乗り心地」は「移動する乗り物の中にいる人に心理的影響を与えると想定される要因の及ぼす効果」と定義されている[1-10]。自動車の場合、心理的に影響を与える要因は、振動、車内の音環境、空気の流れ、温度や湿度、におい、視覚、運転時には操作感覚などが想定される。特に振動は心理状態に与える影響が大きく、乗り物の進歩とともに、その制御についても発展してきた。路面の振動がキャビンに直接伝わる「未制御」から、ばねとダンパを備えた「パッシブ制御」、さらにパッシブ制御にアクチュエータを備え、振動の状態をフィードバックする「アクティブ制御」へと変遷し、乗員へ伝わる振動を抑制する技術として進歩を遂げてきた。これらの制御は人間の振動に対する感度をあらかじめ実験により踏まえ、標準化あるいは規格化した上で、より多くの人々の感度の高いと考えられる振動を抑制するよう設計されている。

しかし、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切れない。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。

1.1.5 乗員の心理状態に応じた乗り心地制御システムの構築

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[1-11]。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。心理状態に応じてアクティブに振動を制御するためには、乗車中という状況を踏まえ、振動による体動などで計測信号にノイズが乗らず、計測すること自体が心理的に負担とならないような生体情報によって評価することが必要となる。乗り心地の評価には様々な生体情報が用いられているが、自律神経系の活動を推定するために広く利用されている心拍変動は非接触計測や簡易計測が可能で、ノイズによる影響も受けにくく、連続して計測可能な生体情報である。そのため本研究では、心理状態を評価する手法として心拍変動に着目し、個々人の心理状態をフィードバックする振動制御システムを構築することを目的とした。



图 1-1 超小型車両



図 1-2 超小型車両に乗車した様子[1-12]

1.2 従来の研究

本研究で提案するアクティブシートサスペンション用 VCM ならびに生体情報をフィードバックする乗り心地制御システムの特徴を明確にするため、従来行われてきた先行研究について本節で述べる。特に、アクティブシートサスペンションやそのアクチュエータ、乗り心地を改善するための振動制御、生体情報を用いた心理状態の評価やその応用に関する先行研究を対象とした。

1.2.1 アクティブシートサスペンションとアクチュエータ

輸送機械や重機などにおいて乗り心地の問題を解決するための手段としてアクティブシートサスペンションが利用されている。特に車両用アクティブシートサスペンションでは、これまで乗り心地と運動性能をシャシサスペンションのみで設計しなければならなかったところを乗り心地と運動性能で分けて構築できるようになる。そのため乗り心地が問題となる車両に搭載されることが多く、対象とする振動を考慮してアクティブシートサスペンションの設計や開発が行われている[1-13]～[1-18]。以下には様々な分野で提案されているアクティブシートサスペンションについて述べる。

- Yu ら[1-19]は農業用トラクタに関する研究を行っている。農業用トラクタでは1～7Hzの低周波振動が問題となることが多く、主にこれを対象とした制御を検討している。このような車両ではパッシブ制御によって低周波振動を抑制することは難しいことから、アクティブシートサスペンションの適用を提案している。農業用車両は油圧システムが多く導入されていることからアクティブシートサスペンションの駆動に油圧アクチュエータを用いている。
- Ning ら[1-20]は乗用車用のアクティブシートサスペンションについて検討している。特に座席部分へ伝達される高周波振動はアクティブシートサスペンションのパッシブ要素で制御し、その要素で対応できない低周波振動をアクティブシートサスペンションで制御するシステムを提案している。
- Maciejewski ら[1-21]は空気圧アクチュエータを用いたアクティブシートサスペンションを提案している。乗り心地を向上させるため様々な乗員に適用

可能なシステムであることが求められるため、乗員の質量が変化した場合に関する制御性能の変化を実験的に検討している。

- 川村, 笹尾ら[1-22]~[1-25]も農業用車両に搭載するアクティブシートサスペンションについて検討している。農業用車両のシートサスペンションは固有振動数が 1 Hz 以下となるような設計が求められるが, パッシブ制御では構造上実現することが難しい。そこで, 電気・油圧サーボ機構によるアクティブシートサスペンションと準油圧式アクティブシートサスペンションについて検討している。
- 下郷ら[1-26], [1-27]は大形トラックにアクティブシートサスペンション適用して乗り心地を改善する手法を構築している。大型トラックでは 2~3 Hz の低周波振動の抑制が乗り心地の課題となっていることから, この振動を対象とし, フィードバックおよびフィードフォワード制御を併用したアクティブシートサスペンションシステムを提案している。

このように様々な車両を想定し, それぞれの車両で乗り心地向上に対して課題となっている振動を制御できるようなアクティブシートサスペンションに関する研究が多く行われている。また, 様々な路面環境や乗員を想定してロバスト性のある振動制御手法や実車への搭載を考慮した多自由度振動の制御といったようにアクティブシートサスペンションへ適用する制御手法についても研究がなされている。以下にその事例を列記する。

- Sun ら[1-28]はアクティブシートサスペンションの制御をより正確なものとするため, 人体の振動モデルを考慮した振動制御手法を提案している。この研究では人体の周波数特性に合わせた有限周波数領域での H_{∞} 制御について検討しており, 解析的に設計した制御系の性能を評価している。
- Ning ら[1-29]は制御を行う上で問題となる様々な外乱の入力が考えられる大型トラック用アクティブシートサスペンションに適用する制御手法について検討を行っている。この研究では外乱補償を行う Takagi-Sugeno ファジィ制御の適用について検討している。
- Kieneke ら[1-30]は様々な車両に搭載可能なアクティブシートサスペンションの制御システムを構築するため, 2 自由度のアクティブシートサスペンシ

ョンにスカイフックならびにグランドフックを併用した制御手法を提案している。

以上のようにアクティブシートサスペンションについて様々な車両に搭載することを考慮した構造設計や制御系の設計が行われている。また、表 1-1 にアクティブシートサスペンションで用いられているアクチュエータの特性をまとめている。同表に示すように、油圧や空気圧を用いたアクチュエータは高い推力を発揮できるものの、ポンプやタンクを必要とし、重量やサイズが非常に大きくなる。また応答性も低いことが課題となる。サーボモータは応答性が高くなるものの、回転運動を行うアクチュエータを直線運動に変換する機構を要することから、大型化が懸念される。上記で述べたアクティブシートサスペンションを搭載した車両は乗用車以上の大きさの車両を対象としており、超小型車両のような限られた空間の中で搭載しなければならないようなものは検討されていない。さらに上記で述べた研究事例においては空間的な制約があまりないことからアクチュエータの選定が比較的自由に行えるため、詳細なアクチュエータの設計に関しては言及されていない。

1.2.2 生体情報を用いた心理状態の評価やその応用

近年では、様々な製品やサービスの開発において生理心理学を考慮した生体情報による心理状態の評価が用いられるようになってきている。生体情報の計測によって心理状態を推定する手法には客観的、連続的、定量的に計測が行えること、余計な作業負担をかけないこと、本人が意図しない変化を捉えられることなど、アンケートなどによる主観評価では得られない利点が多い[1-31]。対象とするストレスに応じて生体情報を選択する必要がある、様々な生体情報が用いられている[1-32]～[1-34]。特に心拍は簡易計測が可能であり、心理状態の推定に用いられることが多い。以下では心拍から推定される心理状態を応用した研究事例を示す。

- 渡辺ら[1-35]は自転車利用時の精神的負荷について心拍間隔を使ったストレス解析手法によって検討した。この研究では RRI に関するいくつか指標を

求め、実験的に自転車利用時のストレスを評価している。

- 西川ら[1-36]は室内の温熱環境が心理状態へ与える影響について心拍変動から検討している。心拍間隔とその分散，スペクトル解析，変動波形と温度や湿度といった温熱環境の関係性を明らかにしている。

また，生体情報による心理状態の評価をフィードバックして，心理状態を改善する制御へ応用する試みもなされている。

- 佐久間ら[1-37]は長時間の座位状態による心理状態の悪化や健康被害を抑制するため，心拍変動からストレス状態を解析し，ストレス状態をユーザに提示し，改善を促すシステムを構築している。
- 板橋ら[1-38]は精神患者のメンタルヘルスケアに行われる回想法に関する研究を行っている。心拍変動からユーザのストレス状態を推定し，その情報を自伝的記憶のモデルに反映させる手法を提案している。
- 藤原ら[1-39]は利用者が感じている気持ちよさをフィードバックするマッサージチェアについて研究を行っている。気持ちよさは皮膚電気反応，脈拍，末梢皮膚温を分析して推定する手法を提案している。

以上のように生体情報を応用した制御が発展してきている。しかしながら自動車の振動制御で生体情報を使った制御を行っている事例は著者の知る限りでは提案されていない。

1.2.3 自動車の乗り心地評価

自動車の乗り心地についてはさまざまな検討がなされており，特に振動周波数が乗り心地に与える影響が大きいことが知られている。ISOでは人間の振動感覚を考慮して，人体振動を評価する際の周波数重み付けに関する規格を制定している[1-40]。さらに，ISOの規格以外にも，振動感覚の評価が求められる環境に特化して，人体振動の応答を研究している事例もある[1-41]～[1-45]。従来の振動による乗り心地の評価には，上記のような研究で得られた知見を基に自動車の乗り心地を評価する手法が提案されている[1-46]～[1-49]。

また、ISO の規格では振動の大きさに着目した重み付けであるため、乗り心地の感覚というところまでは評価することができない。乗り心地の感覚は乗員によって異なることも考えられるため、主観評価を基本として評価する手法も提案されている。

- Osborne ら[1-50]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[1-51]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[1-52]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。

これらの研究では周波数特性の変化しない定常的な振動の乗り心地を評価している。そのため実験前後で実施される主観評価で評価することができる。しかしながら、実際の運転環境では路面から伝わる振動の周波数特性は時々刻々と変化する。また乗員が振動にさらされている間も心理状態は変化する。そのためリアルタイムに心理状態を評価可能な手法が求められる。王らは連続的に評価できるデバイスを構築し、乗車中に心理状態の変化を簡易的に評価する手法を提案しているが[1-53]、連続的な主観評価が負担となるため振動による心理状態の変化を正確に捉えることが難しい。そこで生体情報による心理状態の評価が用いられるようになっていく。脳波や心拍変動といった生体情報は連続して計測することが容易であり、心理状態に応じた反応が無意識に現れるため、連続的かつ正確に心理状態を評価できる手法として用いられる[1-54][1-55]。以下では生体情報を用いて、自動車の乗り心地や振動が心理状態へ与える影響を評価している研究について列記する。

- 今村ら[1-56]は運転環境が心理状態へ与える影響を推定するため、運転状

況データと心拍変動について重回帰分析からその関係性を明らかにしている。

- 原田ら[1-57]は道路の舗装マネジメントのため、舗装状態による乗り心地への影響について脈波を使って評価している。この研究ではカオス解析によって得られたリアプノフ指数を使い乗り心地の差別化を行い、乗り心地評価指標の算出方法を提案している。
- 楓ら[1-58]～[1-60]は水平振動の体感が心理的に及ぼす影響を明らかにするため、振動に曝された際の脳活動を近赤外分光脳機能イメージング装置によって計測している。この脳活動から驚きという感情と結び付けて検討を行っている。
- 北堂ら[1-61]は電車という環境下ではあるものの、低加速度全身振動が入眠に及ぼす影響について検討を行っており、心拍変動や筋活動から評価を行っている。
- 小西ら[1-62]は漫然運転やヒューマンエラーによる事故防止を図り、座面で振動を提示することでドライバへ注意喚起するシステムを提案しており、その基礎的検討として、振動による生体反応について検討を行っている。

以上のように生体情報を用いてあらゆる振動に対する乗り心地や心理状態を評価する研究が多く行われている。しかしながら、評価までにとどまっており、生体情報のリアルタイム性を活かし、自動車における乗り心地制御へ応用しようとする試みはなされていないのが現状である。

表 1-1 アクティブシートサスペンションで用いられるアクチュエータの特徴

	VCM	サーボ	油圧	空気圧
応答性	○	○	×	△
重量	○	△	× タンク重量が 大きい	△
消費エネルギー	△	△	○	○
出力	△	△	○	△
大きさ	○	△ 機構の複雑化	× ポンプやタンク を要する	× ポンプやタンク を要する
メンテナンス性	○ 接触部が無い	△ ベアリングの 劣化	× オイル、シーリ ングの劣化	× シーリングの 劣化

1.3 論文の構成および概要

本論文は「ボイスコイルモータを用いたアクティブシートサスペンションに関する研究」と題し、4章で構成されている。以下に各章における概要を示す。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について説明している。次に従来までの研究について述べ、VCMを用いたアクティブシートサスペンションならびに乗り心地制御の必要性と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章では超小型車両に搭載するアクティブシートサスペンション用VCMの設計方針について解析を用いて検討を行っている。

まずは超小型車両用アクティブシートサスペンションの構造とVCMの構造ならびにその特性について説明し、アクティブシートサスペンション用VCMが求められる設計の要件や制約について述べている。次に解析の構築に向けてアクティブシートサスペンション、VCM、制御システムのモデル化について説明している。

本研究では制御性能にとって重要な応答性と推力の両パラメータに影響を及ぼすコイルの導線径に着目し、コイルの導線径と制御性能の関係性を解析的に明らかにしている。ここではまず、電磁界解析を用いて応答性を示すインダクタンスならびに推力を導線径ごとに評価している。このとき、応答性と推力を定量的に評価できるが、制御性能への影響は評価することができない。そこで電磁界解析で得られた結果を用いてモデルを再度作成し、導線径ごとの特性を反映した運動解析を行った。運動解析では超小型車両に搭載可能な電源容量や適用する振動制御手法も考慮しており、実際の環境を考慮した解析が行われている。これより明らかになった導線径と制御性能の関係性を用いて実際にVCMを製作し、制御性能を確認している。

第3章では振動の乗り心地感覚が人によって多種多様であるということ考虑し、生体情報から推定する乗り心地感覚をフィードバックする乗り心地制御システムを提案している。

まず、心理状態を評価する上で使用する生体情報を心拍変動とし、心理状態の

計測ならびに解析手法について説明している。さらに生体情報によって振動を制御する乗り心地制御システムについて述べ、本研究の実験で用いた簡易的な乗り心地制御システムの構成について説明している。本研究では特に乗り心地制御で用いる指標について検討しており、LF/HF ならびに RRI を乗り心地制御システムへフィードバックした際の心理状態を比較した。

次に、さらに正確な乗り心地推定に向けて脳血流量で乗り心地を評価する方法について検討を行う。そのため脳血流量と主観評価ならびに振動の関係性について分析した。まずは脳血流量を計測する装置、計測原理、解析方法について述べている。次にアンケートによる主観評価の取得方法について解説している。本研究では加振実験による評価を行うため加振実験の方法や条件についても開設した。その後取得された脳血流量、主観評価と振動周波数を総合して分析し、その関係性について考察している。

第 4 章では本論文の結論を述べている。第 2 章、第 3 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

アクティブシートサスペンション用ボイス コイルモータの設計

2.1 はじめに

本章では超小型車両に搭載するアクティブシートサスペンション用のアクチュエータとして VCM を採用し，電磁界解析と運動解析，制御手法を統合してその設計指針を構築することを目的とした．

まず，超小型車両用アクティブシートサスペンションと VCM の構造ならびにその特性について整理した．ここではアクティブシートサスペンション用 VCM が求められる設計の要件や制約について述べ，統合的な解析による設計の必要性を明らかにしている．また，VCM は限られた大きさで推力を発揮できる設計が求められる．そこで，電磁界解析を用いてコイルを通過する磁束の量を求め，磁気回路を考慮した磁石配置について検討を行った[2-1]．

次に，応答性と推力の2つのモータ性能に関わる導線径を，電磁界解析[2-2]，[2-3]や運動解析および実際の走行環境や適用する振動制御手法を統合して解析を行った[2-1]．はじめに，解析の構築に向けてアクティブシートサスペンション，VCM，制御システムをモデル化について整理した．解析では電磁界解析によって応答性，推力変動の検討を行った[2-1]，[2-4]，[2-5]．次に，実際の走行環境や電源容量を想定した解析条件や考慮した振動制御手法について述べた[2-1]．これにより VCM の導線径ごとの制御性能を求め，超小型車両用アクティブシートサスペンションのアクチュエータとして用いられる VCM に適切な導線径について検討を行った[2-1]，[2-6]，[2-7]．また，VCM の特性に影響を与えるコイルと永久磁石間の空隙距離（ギャップ）と制御性能の関係性についても，解析を組み合わせることで検討した[2-8]．

最後に解析で得られた設計指針を基にアクティブシートサスペンション用 VCM を製作し，その制御性能に関して検討を行った．

2.2 アクティブシートサスペンション[2-1]

本研究で検討する超小型車両用アクティブシートサスペンションを図 2-1 に示す[2-9]. アクティブシートサスペンションは主に座面, コイルスプリング, リニアスライダ, アクチュエータによって構成されている. 座面はコイルスプリングが取り付けられており, 乗員が着座した際に座面に加わる重量はコイルスプリングが発生する反発力によって支持する. また, リニアスライダも座面に取り付けられており, 座面の運動方向を鉛直に制限する. そのためアクチュエータは 1 軸方向に力を発揮できるモータを用いる. なお, 車内空間に厳しい制約のあ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することを考慮すると可能な限りシンプルな構造であることが求められる. また超小型車両はホイールベースならびにトレッドが短く, ローリングやピッチングによる振動の影響を受けにくい. また, 吉田ら[2-10]によって鉛直方向の振動が心理的負荷に与える影響が大きいことが示されている. そのため, 本研究では鉛直方向の振動のみを抑制することとした.

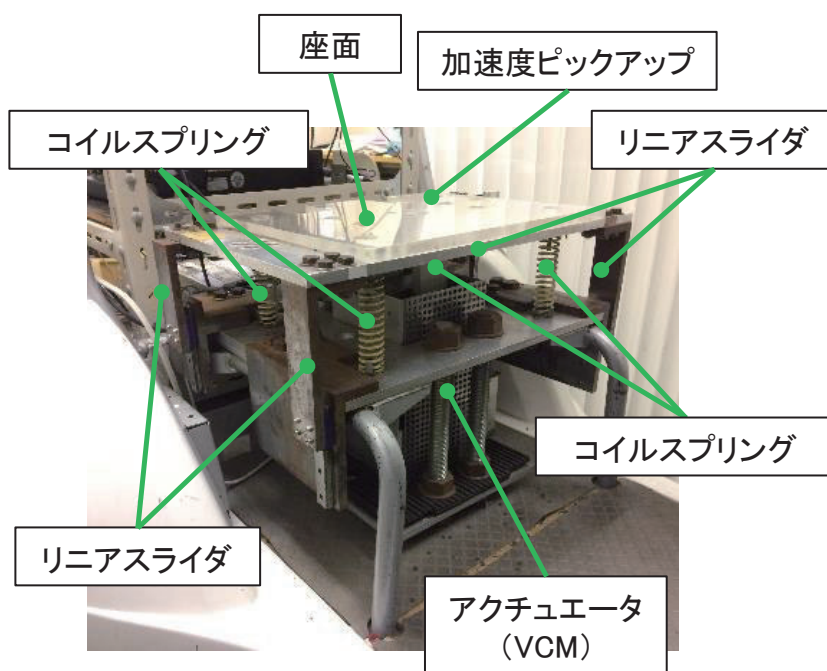


図 2-1 アクティブシートサスペンション[2-1]

2.3 アクティブシートサスペンション用 VCM の開発 [2-1], [2-7]

超小型車両用アクティブシートサスペンションにおいて振動制御を実現できるアクチュエータとして VCM が挙げられる。VCM はダイレクトドライブであり、高出力・高応答性・メンテナンスフリーといった特徴を持つ。また構造も非常に単純であることから、超小型車両用アクティブシートサスペンションに搭載する上で小型・高効率という要件を満たしやすいモータである[2-11], [2-12]。

本研究では図 2-2 に示す VCM のモデルを用いて検討を行った。超小型車両は車室内空間が非常に狭く、例えば、身長 170 cm の乗員が乗車した場合、座面下ならびに頭上の空間は合計して 40 cm 程度である。その空間に搭載可能なサイズを考慮して設計を行い、ストロークは合計 60 mm とした。

図 2-2 に示すように VCM は永久磁石とヨークで構成された固定部と 2 つのコイルが取り付けられている可動部で構成されている。永久磁石はコイルを挟むように配置されている。コイルの永久磁石に面する部分において、コイルの導線を通る電流の方向は、永久磁石が発生する磁界の方向と直交している。この時コイルには電流、磁界それぞれに直交する方向にローレンツ力が発生し、これが VCM の推力となる。またローレンツ力は電流と磁界の大きさに比例し、電流が流れる方向と磁界の方向が逆になることでローレンツ力の方向は反転する。このため VCM ではコイルを通過する磁束の量とコイルにおける導線の巻き方が推力に影響を及ぼす。

可動部は直接シート座面に取り付けられるため、座面に対して VCM の駆動力を伝達することが可能となる。VCM は内部にコイルの移動を支える機構を持たないため、高効率でメンテナンスフリーとなるメリットがある。なお永久磁石は残留磁束密度 1.2 T の NEOMAX-46BH、永久磁石が取り付けられているヨークは SS400、永久磁石とコイル間の空隙は 3 mm とした。

超小型車両が走行する環境において最も大きな振動が入力される状況の 1 つとして歩車道境界の段差が想定される。歩車道境界は一般的に 25 mm 程度の段差となっていることから、その環境を想定したストロークを持つ VCM を設計する必要がある。そのため本論文では 60 mm の可動領域を持った VCM を想定し、上下 30 mm の段差に対応可能なものとしている。

超小型車両用アクティブシートサスペンションは空間的な制約が大きいこと

から限られた大きさで推力を発揮できる設計が求められる。前述したようにコイルを通過する磁束の量は推力へ大きな影響を及ぼす。ここで、上下の永久磁石の磁化方向が同じ方向を向いていた場合、上下コイルの中間で磁界が反発してコイルを通過する磁束の量は低下し、推力が低下する。そのため本研究の VCM では上下の永久磁石の磁化方向を反転させて、磁気回路を考慮した磁石配置を行った。図 2-3 に本研究で設計した VCM における磁束密度分布を示している。永久磁石の磁化方向を逆向きとすることで閉じた磁気回路を形成し、コイルへ均等に磁束が通過することが可能となる。なお、永久磁石の極方向を変更したことから、導線を巻く方向は上下のコイルで反対方向とした。

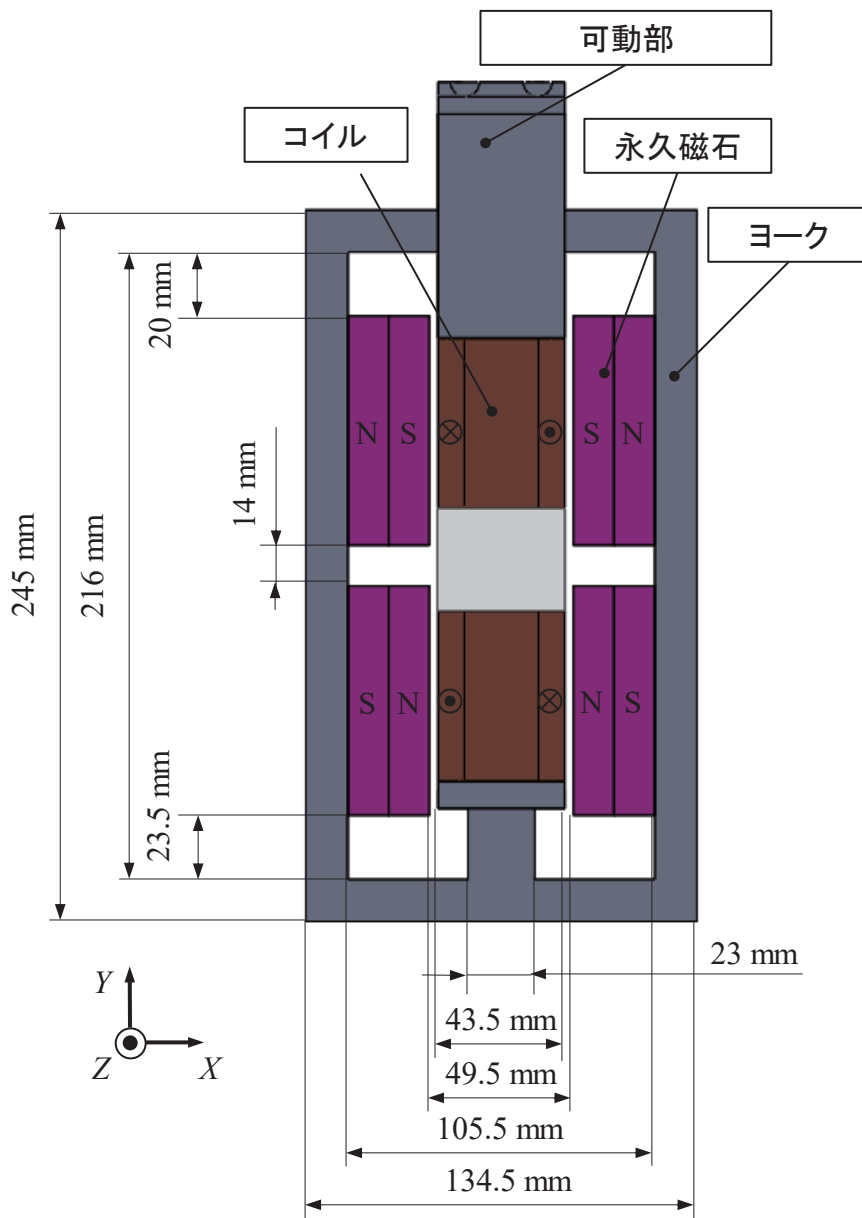


図 2-2 VCM の構造[2-1]

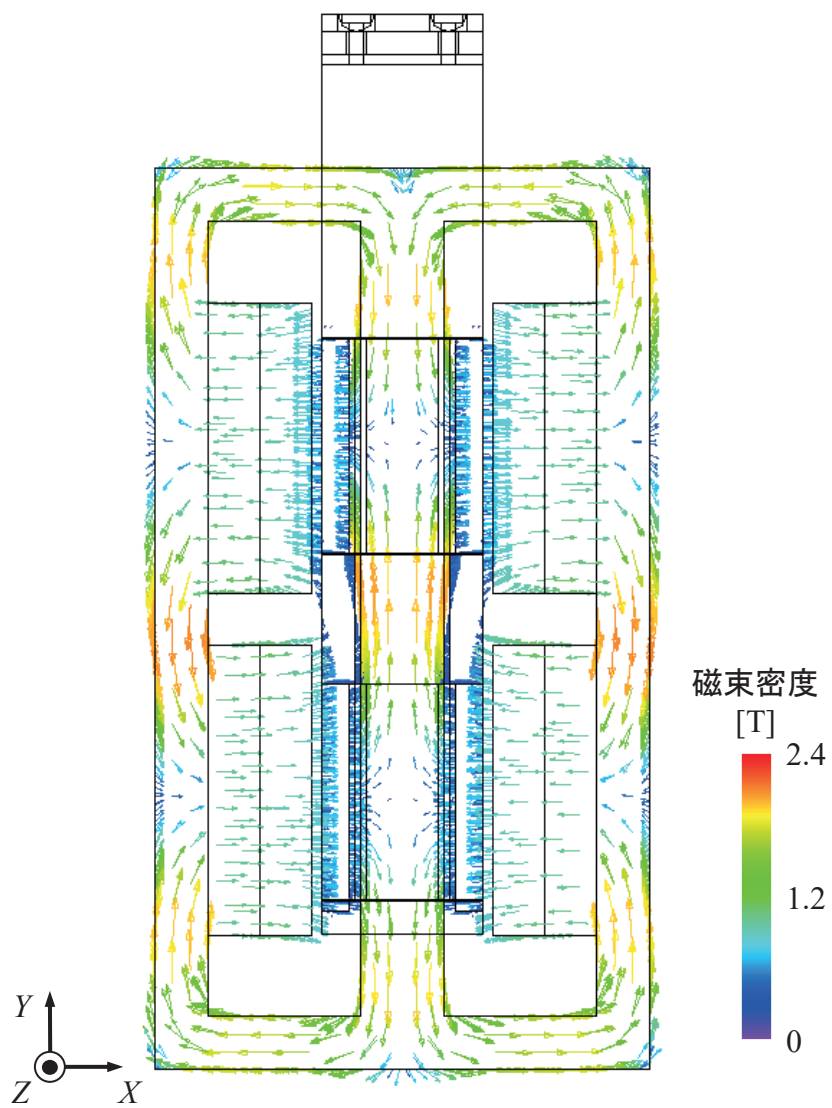


図 2-3 VCM の磁束密度分布

2.4 アクティブシートサスペンションのモデル化[2-1]

2.4.1 運動モデル

アクティブシートサスペンションは機械的な運動特性、VCM の電気的特性、適用した振動制御手法によって制御性能に影響する。そのため制御性能を考慮した VCM に関する検討を行うためには、それぞれの要素をモデル化し、解析する必要がある。本研究で対象としたアクティブシートサスペンションのモデルはシートサスペンションの振動モデルと VCM の回路モデルで構成される、アクティブシートサスペンションのモデルについて述べる。

まず、シートサスペンションの振動モデルについて述べる。本研究では座面の振動が直接乗員へ伝達され、乗員とシートが一体として運動すると仮定した。そのため、床から上部を制御対象とした図 2-4 に示すような 1 自由度振動系としてモデル化を行った。運動方程式は次式のようになる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = Ki \quad (1)$$

ここで m : 乗員 (着座時の脚部等の影響を除いたシートに加わる質量) とシートの質量の合計値 [kg], c : リニアスライダの摩擦等を含めた見かけの減衰係数 [Ns/m], k : ばね定数 (4 本の合計値) [N/m], K : VCM の推力定数 [N/A], y : シートの絶対変位 [m], i : 制御電流 [A] である。

次に、VCM の回路方程式は次式のようになる。

$$L\dot{i} + Ri + Ky = v \quad (2)$$

ここで L : VCM のコイルインダクタンス [H], R : コイル抵抗 [Ω], v : 制御電圧 [V] である。

式(1), (2)を整理し、状態方程式化すると次式のようになる。

$$\dot{\mathbf{y}}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{y}_s + \mathbf{B}_s v \quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{y}_s = [y \quad \dot{y} \quad i]^T$$

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} & \frac{K}{m} \\ 0 & -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}^T$$

である。

2.4.2 制御モデル

本研究ではアクティブ振動制御で一般的に用いられており，制御特性の調整が容易な最適制御理論に基づいて制御パラメータを設計するとして運動解析を行った．以下では運動解析を行うことから離散時間系制御理論について述べる．最適制御理論は下記の2次形評価関数 J_d を最小とする制御電圧 v_d を求める．なお添え字 d は離散化を表している．

$$v_d = -\mathbf{F}_d \mathbf{y}_d \tag{4}$$

$$J_d = \sum_{j=0}^{\infty} [\mathbf{y}_d(j)^T \mathbf{Q}_d \mathbf{y}_d(j) + r_d v_d(j)^2] \tag{5}$$

$$\mathbf{Q}_d = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathbf{F}_d = [f_1 \quad f_2 \quad f_3] \tag{7}$$

ここで \mathbf{F}_d : 変位，速度および VCM への制御電流に関するフィードバックゲイン f_1, f_2, f_3 を要素とするフィードバック行列， \mathbf{Q}_d : 変位，速度および VCM への制御電流に関する重み係数 q_1, q_2, q_3 を要素とする重み行列， r_d : 制御電圧に関する重み係数である．なお最適制御理論では重み係数によって制御系の特性が大きく変化することから，制御性能へ大きな影響を及ぼす．したがって本解析では最も制御性能が高い重み係数を探索し，その重み係数を解析で使用するこ

とした．重み係数の決定法については後述する．

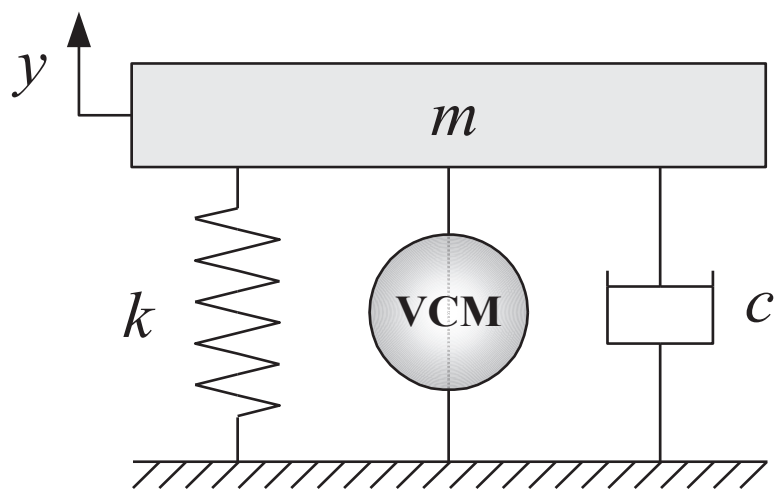


図 2-4 アクティブシートサスペンションの運動モデル[2-1]

2.5 電磁界解析による VCM の特性評価 [2-1]

2.5.1 VCM モデルのパラメータと解析手法

一般的な VCM ではストローク時においてもコイルに均一な磁界を加えるため、可動部の移動領域を十分に補える程度の長さを持つ永久磁石を設置する。これは磁場の変化によって推力の変動が発生しないようにするためである。しかしながらアクティブシートサスペンションに適用することを考慮すると小型かつ軽量の VCM が求められるため、永久磁石長も可能な限り小さくすることが求められる。また、小型化した場合、小さいストローク内で振動を制御することが求められるため、より推力を発揮できるようにしなければならない。推力を向上させる手段としてはコイルの導線径を細くし、巻数を増やすことが考えられる。しかしながら巻数を増やした場合、コイルの巻線長が長くなることからコイルの抵抗ならびにインダクタンスが上昇し、応答性が悪化することが考えられる。そのため、導線径を変化させた際におけるモータの特性を明らかにする必要がある。VCM の特性を電磁界解析から評価する試みもある[2-13]。そこで本節では本研究で対象とした VCM のモデルにおいて導線径を変化させた際のストロークによる推力の変動を電磁界解析から明らかにする。

電磁界解析では図 2-2 に示した寸法で作成したモデルを使用した。表 2-1 に VCM の諸特性を示す。解析では VCM の可動部を 5 mm ずつ変化させて電磁界解析を行い、それぞれのストローク量に対する推力を算出した。なおコイルの電流は全ての条件において 1 A とした。VCM ではコイルにかかる磁束密度が一定である場合、電流と推力は比例関係となることから、本解析によって得られる推力はそれぞれのストロークにおける推力定数となる。これに加えて、各モデルにおける VCM の特性を明らかにするために、抵抗値ならびにインダクタンスも算出した。

2.5.2 導線径に対する VCM の諸特性

本解析で得られた各導線径 d における抵抗ならびにインダクタンスを表 2-2 に示す。この結果から太い導線径を用いて巻数を少なくすることによって、イン

ダクタンスならびに抵抗値が減少し、応答性が向上していることが確認できた。

図 2-5 に各導線径 d におけるストローク量に対する推力定数を示す。同図におけるストローク量 0 mm 時に着目すると、導線径 d が小さくなるに従い、磁界中の導線長が長くなることで、推力定数が上昇していることが確認できる。一方、全ての導線径 d においてストロークすることで推力定数が低下することが確認できる。なお、いずれの導線径 d においてもストロークの上下で非対称な推力特性を示した。これは図 2-2 に示すように固定部の形状が上下で対称でないためである。

ここで、一例として導線径 $d = 0.6 \text{ mm}$ での磁束密度分布を図 2-6 に示す。同図 (a) はストロークが +30 mm, (b) は 0 mm 時である。なお、Z 軸方向の厚さ中央で VCM モデルを切断した断面図として示した。同図よりコイルを通過する磁束密度に着目すると +30 mm に対して 0 mm ではコイルのより多くの範囲において磁束密度が高くなっていることが確認できる。また他の導線径 d においても同様な傾向を確認することができた。なお、図 2-6 の最大推力定数に対するストロークによる推力定数の低下量の割合は約 41% と全ての導線径 d において等しくなった。また、ストローク 0 mm において永久磁石から 5.34 mWb の磁束が発生しており、コイル領域には約 33.5% となる 1.79 mWb の磁束が通過し、推力の発生に寄与している。

表 2-1 VCM の諸特性[2-1]

永久磁石	NEOMAX-46BH
永久磁石の数	4
永久磁石の残留磁束密度	1.2 T
ストローク	60 mm
コイルの数	2
永久磁石とコイル間の距離	3 mm
ヨークの材質	SS400

表 2-2 各導線径 d でのインダクタンスならびに抵抗[2-1]

導線径 d [mm]	インダクタンス L [H]	抵抗 R [Ω]
0.2	29.87	1744
0.4	1.905	108.8
0.6	0.3450	19.82
0.8	0.1150	6.460
1.0	0.0465	2.640

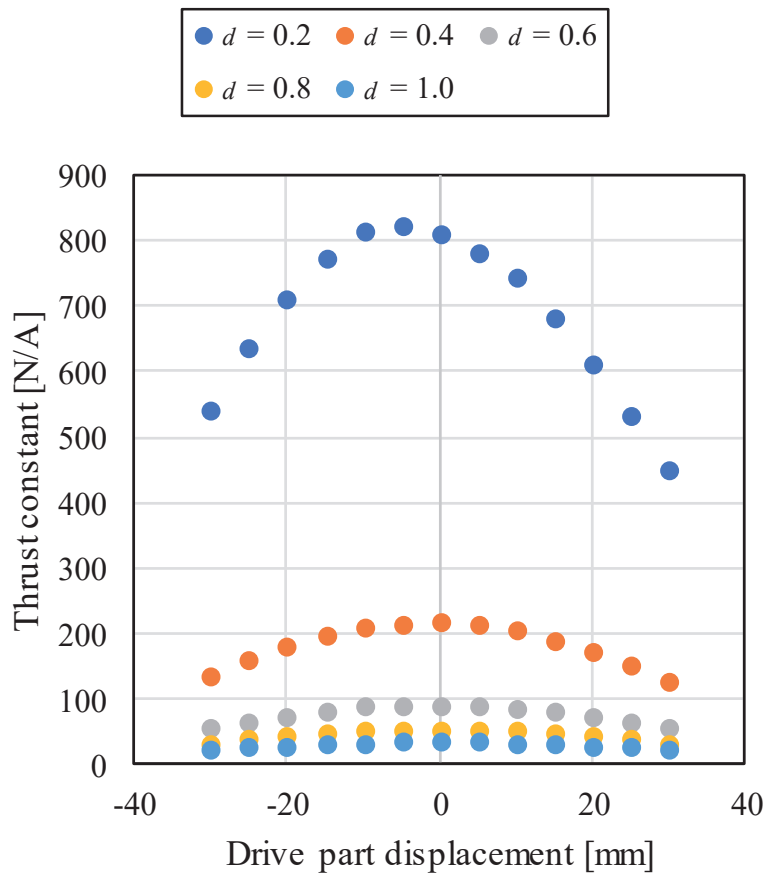


図 2-5 各導線径 d におけるストローク量に対する推力定数[2-1]

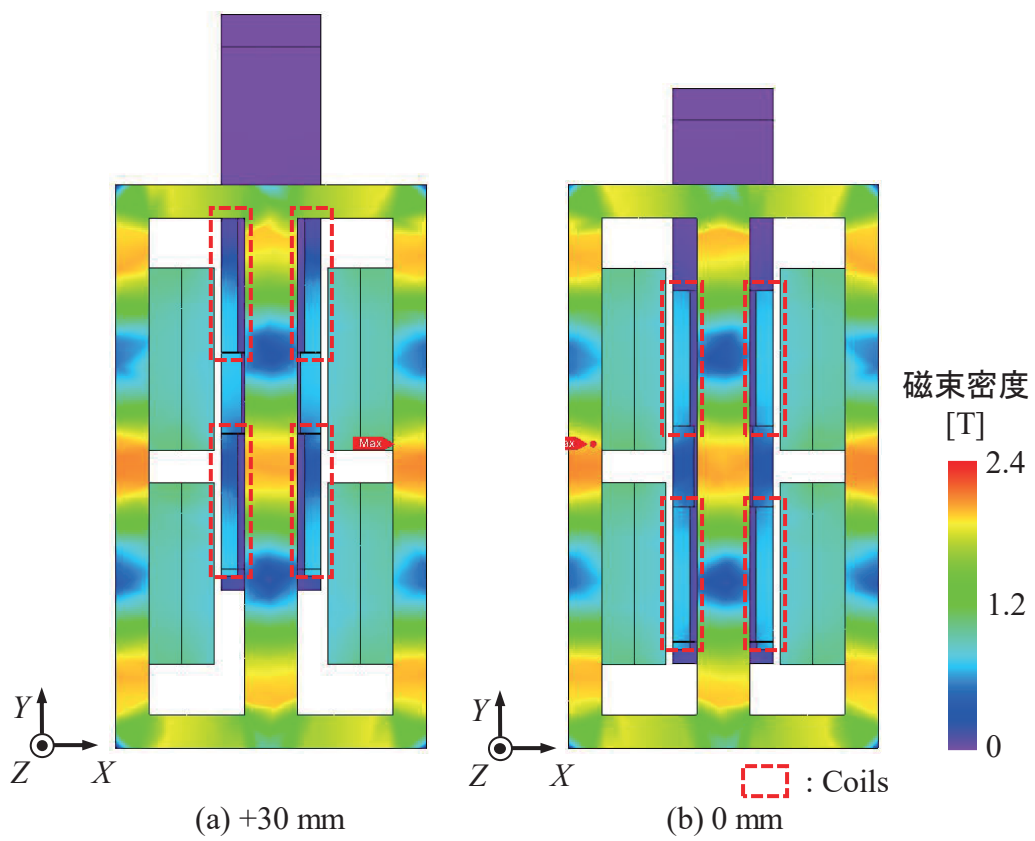


図 2-6 VCM 内部の磁束密度 ($d = 0.6 \text{ mm}$) [2-1]

2.6 アクティブシートサスペンションモデルを用いた解析 [2-1]

2.6.1 解析条件

前節の電磁界解析の結果を用いて実際に振動を制御した際の振動低減効果を運動解析により確認する。制振制御を行うにあたり、VCMの応答性およびストローク量、推力が最も要求される条件として車両が段差を降下する状況を想定した。車両が段差を降下する際、車両床面と座面の相対変位がステップ状に増加するものとし、アクティブシートサスペンションのモデルを用いて初期変位を与えた際の応答を確認した。なお段差の高さを表す初期変位は一般的な歩車道境界を想定し、25 mmとした。前節で示したように推力定数は可動部のストロークによって変化する。本章の運動解析では図 2-6 の結果のように運動モデル内の推力定数 K が変化するよう設定した。また制御理論は 2.4.2 項で前述した最適制御理論を用いており、重み係数に関しては次項にて述べる。本解析で用いた VCM では可動範囲を ± 30 mm と設定している。実際に振動制御を行う際に可動領域を超えようとした場合にはコイルと固定部が接触し、モータが破損する危険性がある。そのため、解析では上記の可動範囲を超えずに振動を抑制できた結果を示す。

2.6.2 最も制御性能を得られる重み係数の探索

本解析では導線径の変更によってモータ特性が大きく変化するため、同一のフィードバックゲインでは導線径の振動低減効果を評価することができない。そこでそれぞれの導線径 d に対して最も高い振動低減効果を発揮するフィードバックゲインを探索する必要がある。そのため各導線径 d において重み係数 q_1 , q_2 , q_3 , r_d をそれぞれ 10^0 から 10^{10} まで変化させた全ての組み合わせで制御性能を評価した。

本解析では制御性能の評価に整定時間 t_s を用いた。ここで $d = 0.6$ mm において運動解析によって得られた加速度の時刻歴の一例を図 2-7 に示す。同図に示すように整定時間 t_s は加速度の定常値 \dot{y}_∞ の $\pm 5\%$ の範囲に加速度が収束するまでの

時間を指す。人間の振動知覚はその加速度に大きな影響を受けるとされており、振動の加速度を低減させることにより乗り心地の向上に繋がる。そのため、本研究では振動の大きさと継続時間を定量的に評価可能な t_s を制御性能の評価指標として使用している。

なお、実際に制御を行う際にはコイルの発熱を考慮しなければならない。使用環境を空冷と想定した場合、電流密度が 10 A/mm^2 以下となる必要がある。ここで各導線径 d における電流密度を考慮した許容電流値を表 2-3 に示す。評価では制御電流が同表の値を超えていない結果のみを採用した。

全ての重み係数の組み合わせで評価して得られた、各導線径 d における重み係数と加速度振幅の整定時間 t_s の関係を図 2-8 に示す。同図から導線径 d によって整定時間 t_s が最も短くなる重み係数が異なることが分かる。ここで各導線径 d において整定時間 t_s が最も短くなった重み係数 Q_d , r_d ならびにフィードバックゲイン F_d を表 2-4 に示す。この重み係数ならびにフィードバックゲインで解析を行った際の整定時間 t_s を図 2-9 に示す。なお、破線は振動制御適用しない場合を示している。同図から全ての導線径において同程度の振動低減効果を確認することができた。

2.6.3 実際の使用環境を想定した解析

アクティブシートサスペンションを実際に車載する場合には制御で使用可能な電源電圧の制約がある。特に超小型車両のようなコンパクトな車両では搭載可能なバッテリー数に限りがあるため、できるだけ小さな電源電圧で制振制御を行うことが求められる。前項では全ての導線径において同程度の振動低減効果を確認したが、電源の制限によって制御性能が劣化することが想定される。そのため前項にて探索されたフィードバックゲインを用いて、発揮可能な電源電圧による振動低減効果への影響を運動解析から確認する。

本解析では一般的な車載用バッテリー 1 つあたりの電源電圧を 12 V とし、そのバッテリーを 1~3 個を直列に接続して ($12\sim 36 \text{ V}$) アクティブシートサスペンションの制振制御にて使用すると仮定した。なお、電圧以外の解析条件は前項と同様のものとしている。解析の結果を図 2-11 に示す。電圧の制限が制御性能に及ぼす影響を明らかにするため、同図にそれぞれの電源電圧の条件における整定時間を、前項で得られた各導線径 d での最高性能における整定時間に対する比

(Settling time ratio) としてプロットした。したがって、整定時間の比が1の場合(破線部)は最高性能と同等の振動低減効果を発揮できていることになる。同図より導線径 d が小さい条件ほど整定時間の比が上昇する傾向となり、最高性能ほどの振動低減効果が得られなくなっていることが確認できる。さらに電源電圧が低下するほど、整定時間の比が上昇し、振動低減効果が悪化することを確認した。また、導線径 $d = 0.8, 1.0$ mm では本解析における全ての電源電圧の条件において最高性能と同じ振動低減効果が得られた。2.5.2 項で述べたように導線径 d が太いほど推力定数は低下するが、抵抗値とインダクタンスは減少するため応答性が良くなり、電源電圧が制限された条件でも高い制御性能を発揮することができた。さまざまな路面環境において高い制御性能を発揮するためには可能な限り高い推力を必要とする。そのため 12 V では $d = 0.8$ mm, 24, 36 V では $d = 0.6$ mm のモータを搭載することで高い制御性能を発揮することができる。

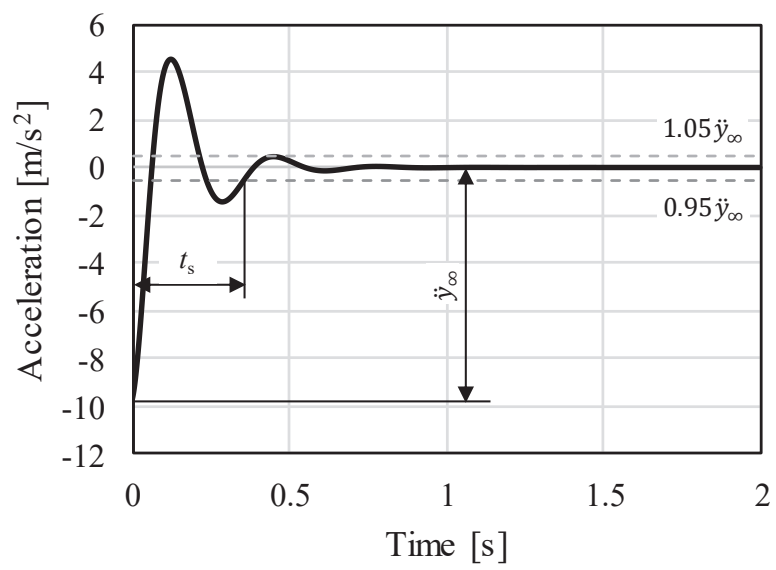
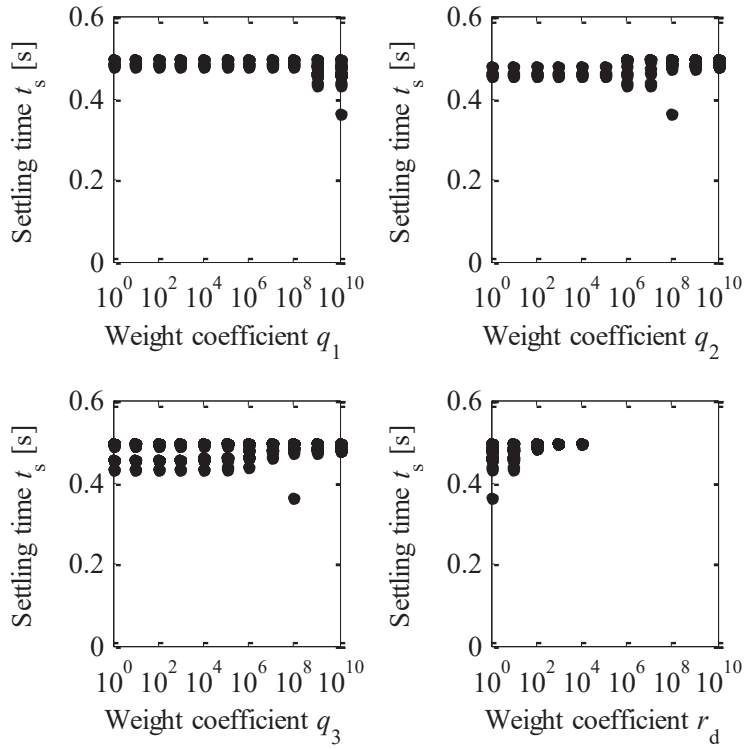


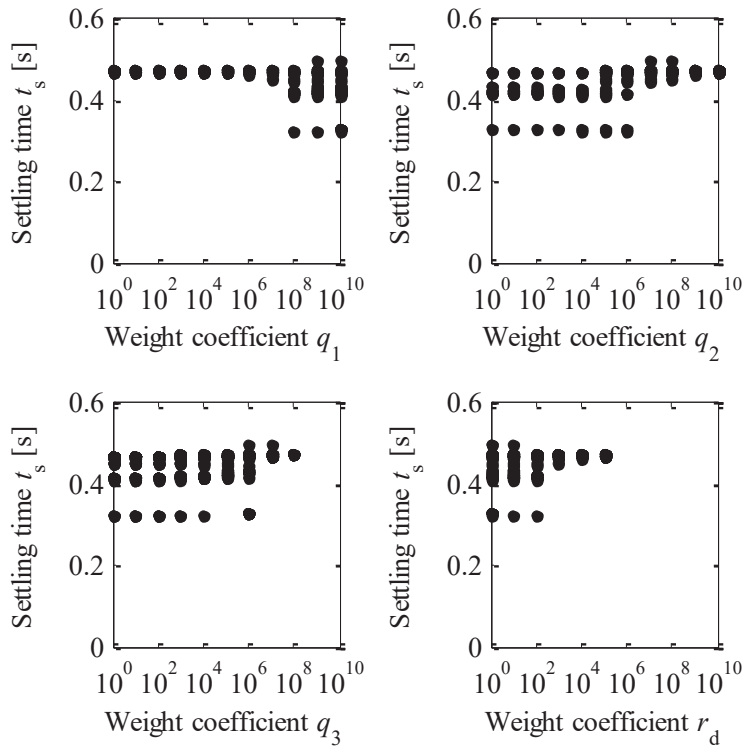
図 2-7 解析で得られた加速度の時刻歴の一例 ($d = 0.6 \text{ mm}$) [2-1]

表 2-3 各導線径 d の電流密度から求めた許容電流[2-1]

導線径 d [mm]	許容電流 [A]
0.2	0.31
0.4	1.26
0.6	2.83
0.8	5.03
1.0	7.85

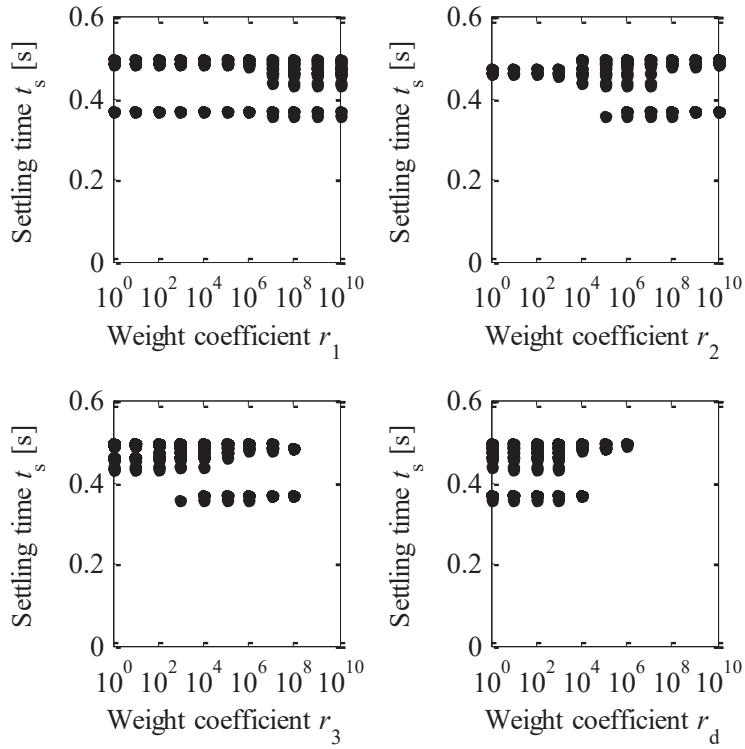


(a) $d = 0.2$ mm

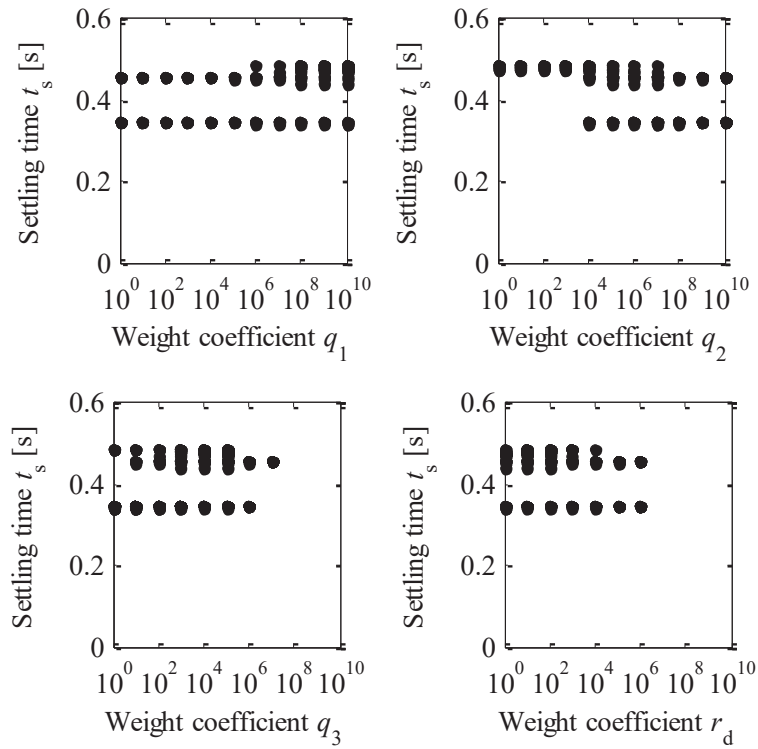


(b) $d = 0.4$ mm

図 2-8 重み係数 Q_d , r_d と整定時間の関係[2-1]

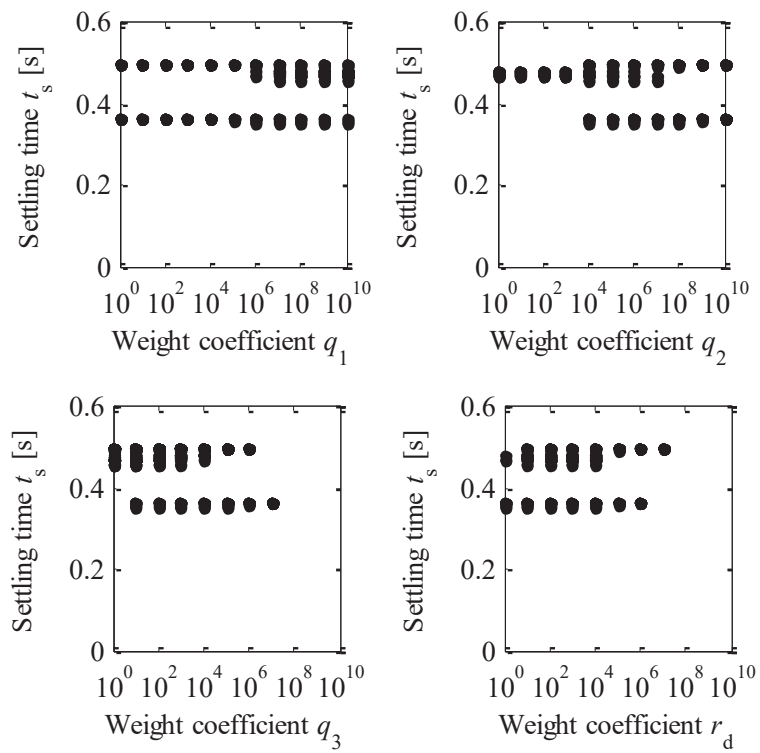


(c) $d = 0.6$ mm



(d) $d = 0.8$ mm

図 2-8 重み係数 Q_d , r_d と整定時間の関係[2-1]



(e) $d = 1.0$ mm

図 2-8 重み係数 Q_d , r_d と整定時間の関係[2-1]

表 2-4 各導線径 d において解析で用いた重み係数と
フィードバックゲイン[2-1]

導線径 d [mm]	重み係数 \mathbf{Q}_d , r_d ならびに フィードバックゲイン f_1, f_2, f_3
0.2	$\mathbf{Q}_d = \text{diag}(10^{10}, 10^8, 10^8), r_d = 10^0$
	$f_1 = 3.73 \times 10^3, f_2 = 7.36 \times 10^3, f_3 = 7.42 \times 10^3$
0.4	$\mathbf{Q}_d = \text{diag}(10^8, 10^4, 10^0), r_d = 10^0$
	$f_1 = 1.60 \times 10^3, f_2 = 285.09, f_3 = 15.60$
0.6	$\mathbf{Q}_d = \text{diag}(10^7, 10^5, 10^3), r_d = 10^0$
	$f_1 = -322.97, f_2 = 209.45, f_3 = 19.21$
0.8	$\mathbf{Q}_d = \text{diag}(10^8, 10^6, 10^0), r_d = 10^2$
	$f_1 = -233.48, f_2 = 57.49, f_3 = 0.78$
1.0	$\mathbf{Q}_d = \text{diag}(10^6, 10^4, 10^1), r_d = 10^0$
	$f_1 = -135.96, f_2 = 64.93, f_3 = 1.78$

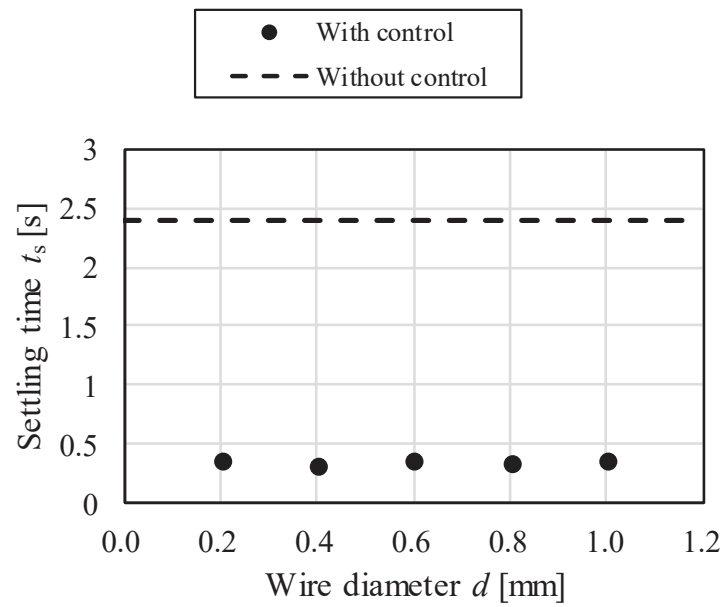


図 2-9 各導線径 d において最も制御性能の高いゲインを用いた場合における
 加速度の整定時間[2-1]

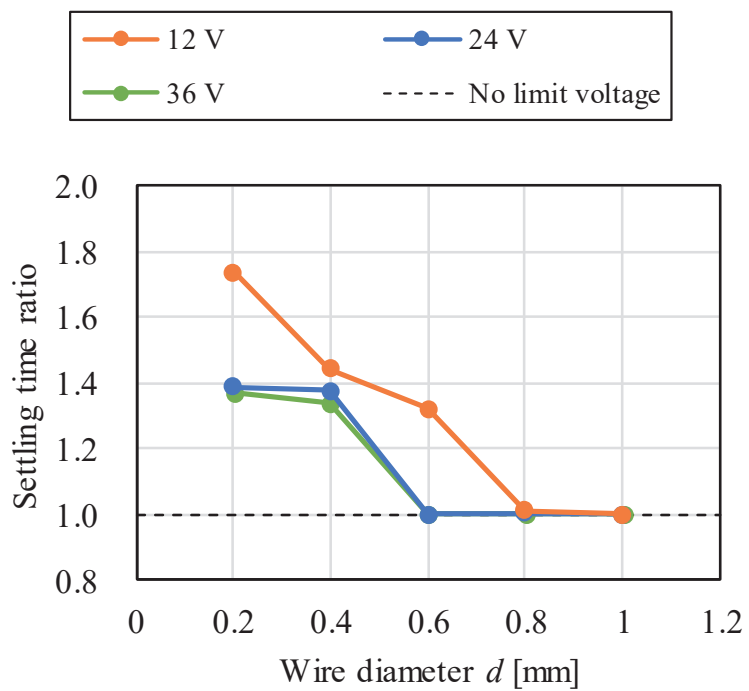


図 2-10 電源容量の制限を考慮した各導線径 d の VCM モデルによる制御性能の比較[2-1]

2.7 ギャップが制御性能へ与える影響 [2-8]

2.7.1 ギャップと制御性能の関係性

超小型車両は車内が非常に狭いため、小型なアクティブシートサスペンションが求められている。そのため、VCMにも短いストロークで振動を抑制可能な高推力が求められる。VCMをより高出力化する手段の1つとして永久磁石とコイルの間隔であるギャップを狭め、コイルにかかる磁束密度を増加させ、推力を向上させる手法が挙げられる。しかしながらギャップを狭めることはVCMの推力変動の増大に繋がると考えられる。一般的なVCMでは推力定数を一定と考えてモデル化し、制御則を適用する。そのため、推力変動が大きくなるほど実際のアクティブシートサスペンションと制御モデルの間で誤差が大きくなり、複雑なかつ大きな振動が入力された際に、十分制御できなくなることが懸念される。そこで本論文ではVCMのギャップと推力特性の関係を磁場解析から明らかにした。さらに推力変動が振動制御へ与える影響について運動解析を用いて明らかにした[2-8], [2-14]。

2.7.2 電磁界解析によるギャップとVCM特性変化の関係性評価

電磁界解析によってギャップによるVCMの特性の変化を明らかにする。解析は2.5節で用いたものと同様であり、推力特性とインダクタンスならびに抵抗を算出、運動解析へ応用した。

ギャップ1.5, 3.0, 6.0, 9.0 mmにおける平均推力と推力のピーク・トゥ・ピーク値を図2-11に示す。ギャップが最も長い9.0 mmでは最も推力が小さいものの、ギャップ1.5 mmと比較して、推力の変動がも低下していることが確認できる。各ギャップにおけるVCMの磁束密度を図2-12に示している。コイル中の磁束密度に着目すると、ギャップ1.5 mmではコイルでの磁束密度がギャップ9.0 mmよりも高い。しかしながら、変位した際の磁束密度の変化はギャップ9.0 mmの方がギャップ1.5 mmよりも低い。以上のことから、ギャップが広がることで変位した際の磁束密度変化が小さくなり、推力変動の減少に影響することが確認できた。

このように駆動部の移動によって推力定数に変動することを確認できたが、実際に振動を制御する際には最大値を推力定数としてモデル化する場合が多い。超小型車両で走行する際に、非常に大きな外乱が入力されるとこの推力変動が制御性能に影響を与える可能性が考えられる。そのため次項は本解析結果を用いて実際の走行環境を想定した運動解析を行った。

2.7.3 運動解析を用いたギャップと制御性能の関係性評価

2.6節のアクティブシートサスペンションモデルに前項で得られたVCMの特性を反映させて実験を行った。特に路面の凹凸による衝撃力のような振動が制御のモデル化誤差に影響を与え、制御性能の劣化が予想される。そのため、路面に存在する段差でもより過酷な条件として100 mmの初期変位を与えた際の制御挙動を算出した。なお、VCM以外のパラメータ、制御手法は2.4節と同様とした。フィードバックゲインについても2.5節のようにそれぞれのギャップモデルにおいて最も制御性能が高かったものを用いた。本解析で用いたフィードバックゲインを表2-5に示す。

各ギャップにおける変位の最大振幅を図2-13に示す。本解析では衝撃力による性能劣化の評価を目的としていることから変位の最大振幅で評価した。解析からギャップが最も小さい1.5 mmで最大振幅が最も小さくなり、振動が抑制されていることを確認した。そのため、アクティブシートサスペンションにおいてVCMを搭載する際には利用環境と構造を考慮し、可能な限り小さいギャップにて構築することで制御性能が向上できることを示した。

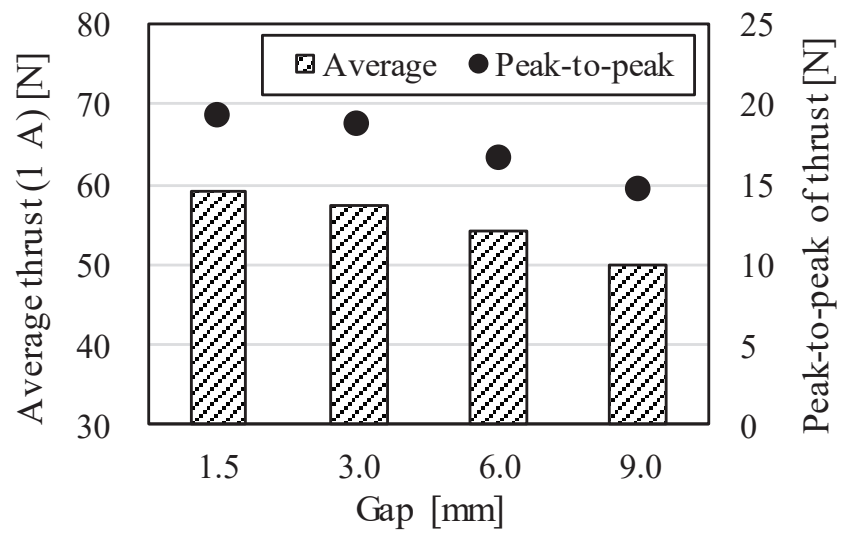


図 2-11 各ギャップにおける推力の最大値ならびに平均値[2-7]

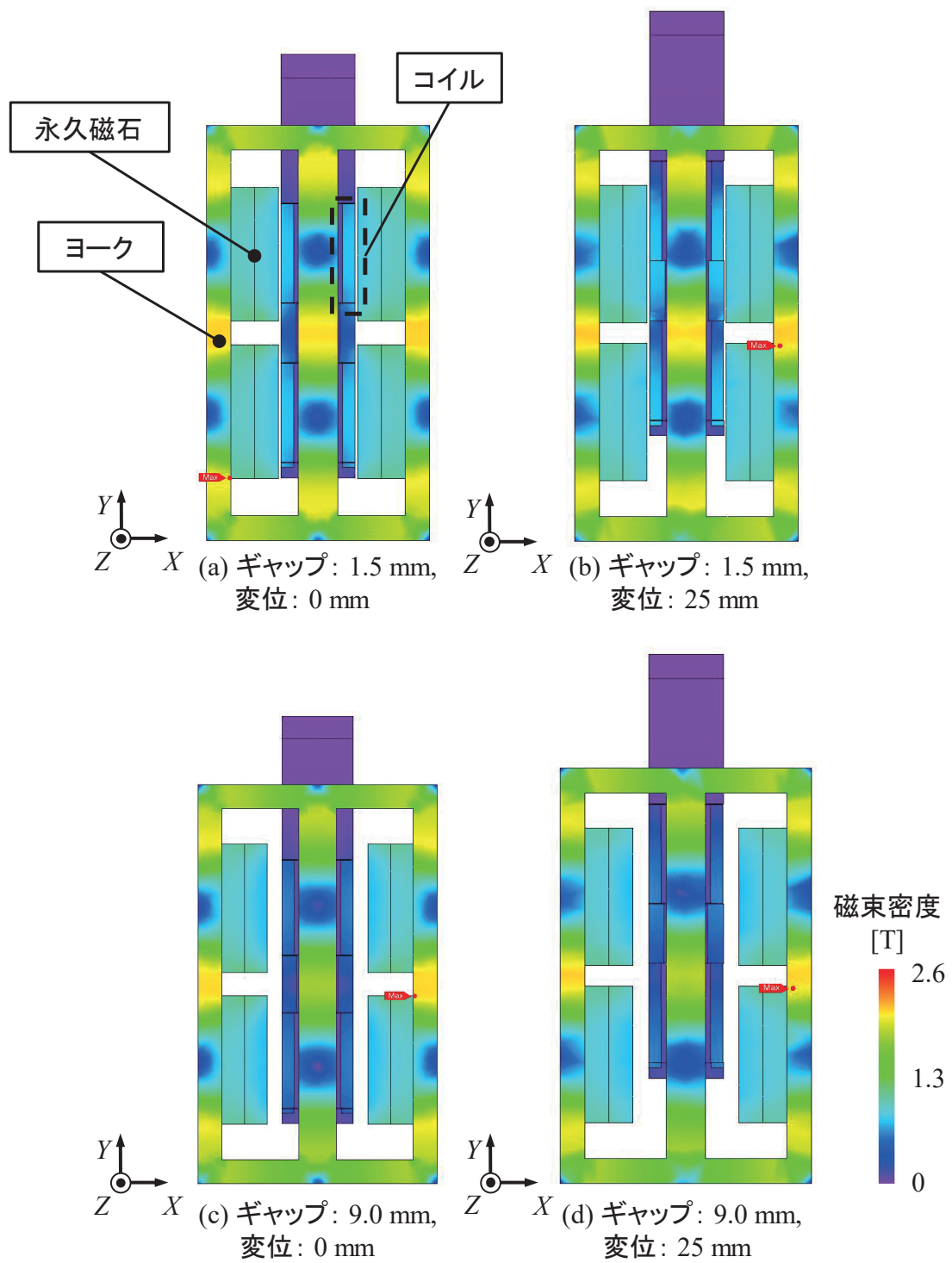


図 2-12 各ギャップにおける VCM の磁束密度分布[2-7]

表 2-5 本解析で用いた各ギャップでのフィードバックゲイン[2-7]

ギャップ [mm]	f_1	f_2	f_3
1.5	4514.9	310.0	10.7
3.0	4433.0	313.6	10.7
6.0	4218.4	325.4	11.0
9.0	3929.8	336.3	11.1

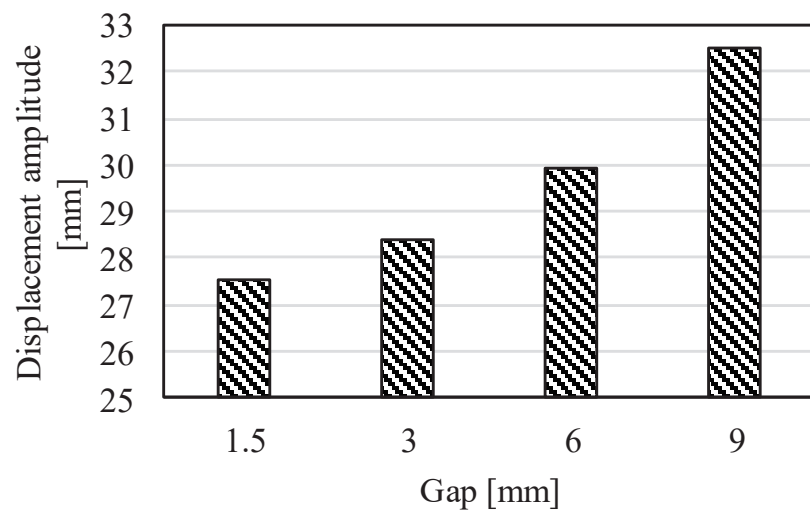


図 2-13 各ギャップにおける最大変位振幅[2-7]

2.8 アクティブシートサスペンション用 VCM の製作

以上の結果を踏まえ超小型車両用アクティブシートサスペンションに搭載可能な VCM を製作した。製作したアクティブシートサスペンション用 VCM を図 2-14 に示す。設計上、モータを搭載したアクティブシートサスペンションは約 20 kg であることを確認した。そのため、30 kg という超小型車両の搭載可能重量を考慮し、24 V の制御用電源を搭載することとした。図 2-10 より 24 V では導線径 d を 0.6 mm 以上にする事で高い制御性能が得られる。さらにこの条件で最も高い推力が得られるよう導線径 d は 0.6 mm とした。なお、制御用 24 V リチウムイオンバッテリーは約 4 kg であった。また、ギャップについてはコイルと永久磁石の接触も考慮し、3 mm とした。製作した VCM は抵抗値が 8 Ω 、インダクタンスが 0.3 H であり、解析モデルとも近く、解析の有用性を確認することができた。また、製作した VCM による振動制御実験を行い、振動の抑制が可能であることを確認した。

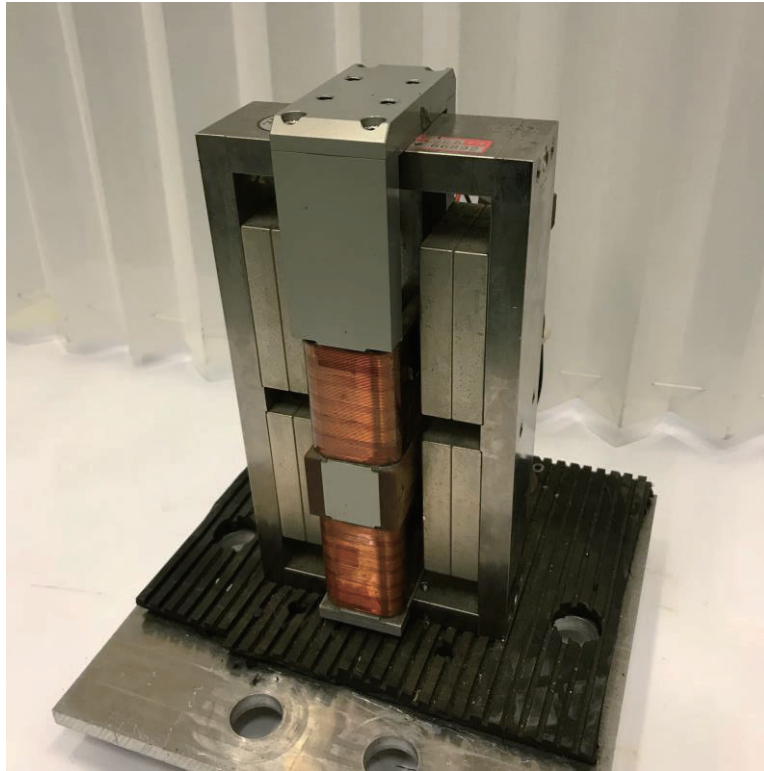


図 2-14 製作した VCM

第3章

生体情報をフィードバックする振動制御

3.1 はじめに

本章では心理状態を評価する手法として心拍変動に着目し、個々人の心理状態をフィードバックする振動制御システムを構築することを目的とした。

まず、心理状態を反映する生体情報として自律神経系の支配を受ける生体情報について述べ、その中でも心拍変動を用いた心理状態の計測ならびに解析手法について整理した。次に生体情報をフィードバックして振動を制御する乗り心地制御システムについて述べた。さらに本研究にて用いた心拍変動をフィードバックする簡易的な乗り心地制御システムの構成について述べた。これにより心拍変動をフィードバックする乗り心地制御を用いて、その有用性について実験的に検討を行った。また、乗り心地制御で用いる心理状態の評価指標について検討するため、評価指標の違いによる心理状態への影響についても検討を行った[3-1]～[3-3]。

次に、さらに正確な乗り心地推定に向けて脳血流量で乗り心地を評価する手法について検討を行う。そのため脳血流量と主観評価ならびに振動の関係性について分析した。まずは脳血流量を計測する装置、計測原理、解析方法について述べた。次にアンケートによる主観評価の取得方法について述べた。また加振実験による評価を行うため、加振実験の方法や条件について述べ、実験的に検討を行った。その後取得された脳血流量、主観評価と振動周波数を総合して分析し、その関係性について考察した[3-4]。

3.2 心拍変動による乗り心地の評価[3-1]

本研究では乗員の心理状態を評価するための生体情報として、簡易測定が可能かつ連続してデータ取得することができる心拍変動を用いた。心拍変動は自律神経系活動を反映する生体情報の1つである。自律神経系が影響を受ける要因の1つとして心理状態が挙げられており[3-5]、心理状態を評価する際に用いられることが多い[3-6]~[3-8]。自律神経系は交感神経系と副交感神経系から成り立っており、これらの神経系の拮抗・活性状態によって心理状態を推定することができる。本論文では交感神経系の活動が活発になるとストレス、副交感神経系の活動が活発になるとリラックスと判断した[3-9]。

心拍変動を計測する手法は非侵襲かつ簡易的な手法が多く提案されている[3-10]~[3-12]。中には非接触に計測する手法も提案されているが[3-13]~[3-15]、振動によって体動が発生する環境下では正確な計測が困難である。そこで本研究では体動が発生する環境においても正確に心拍変動を計測することが可能な心電図を用いた。ここで心電図を用いた心理状態の評価手法について説明する。図3-1に心電図の測定結果の例を示す。まず心臓の拍動によって周期的に現れるピークを検出し、その間隔時間を計測する。このピークをR波と呼び、ピーク間の時間間隔をR-R間隔（以下、RRIと称する）と呼ぶ。RRIを時刻歴とすることで図3-2に示すように継続的に変化する運転者の心理状態を評価することが可能となる。RRIの減少は心拍数の増加を示す。これは交感神経系が支配的となり、心理的にストレス状態であると評価することができる。またRRIの増加は副交感神経系が支配的になっていることを示しており、リラックス状態であると評価できる[3-16]。

RRI時刻歴のパワースペクトル密度から算出されるLF/HFも心電図を用いた自律神経系活動評価に広く用いられている。図3-3にRRI時刻歴から算出されたパワースペクトル密度を示している。RRI時刻歴のパワースペクトル密度において0.04~0.15 Hzの範囲における積分値をLow frequency（以下、LFと称する）、0.15~0.4 Hzの範囲における積分値をHigh frequency（以下、HFと称する）と一般的に定義されている。このLFとHFの比をLF/HFと定義する[3-17]。LFは交感神経系と副交感神経系の両方の活動を反映し、HFは副交感神経系の活動のみ反映する。したがって、LF/HFを用いることで交感神経系の活動状態を推定することが可能となる。LF/HFが高い場合、交感神経系が支配的でストレス状態

であると評価でき, LF/HF が低い場合, 副交感神経系が支配的でリラックス状態であると評価できる. 本論文では運転者の心理状態を評価するために RRI と LF/HF を用いた.

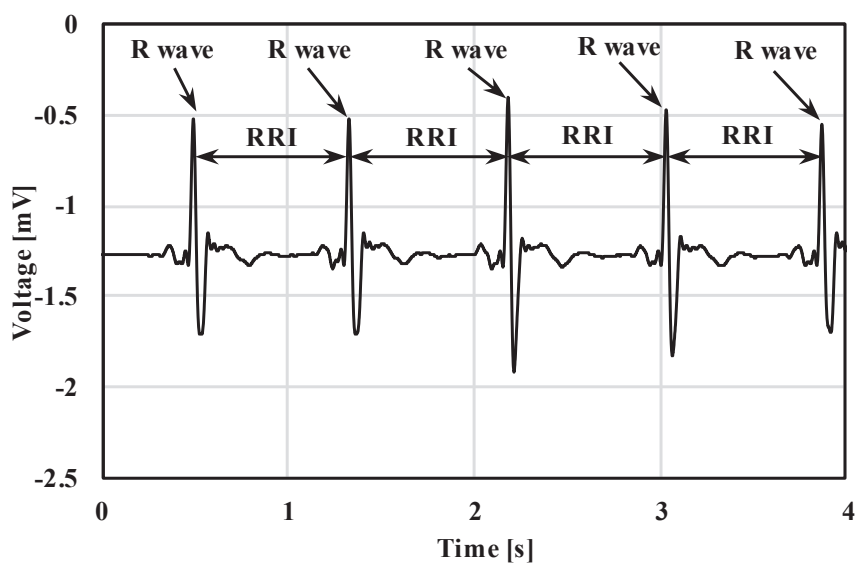


図 3-1 心電図の時刻歴[3-1]

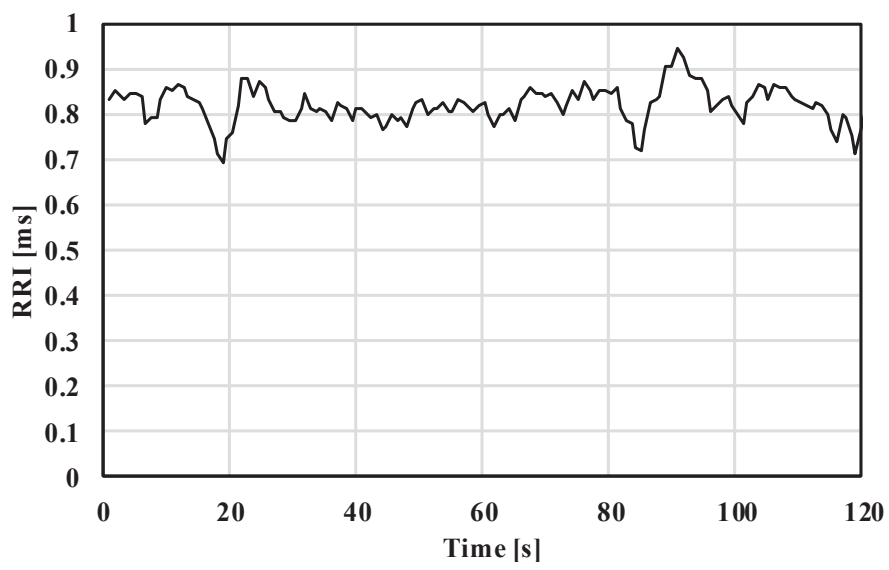


図 3-2 RRI の時刻歴[3-1]

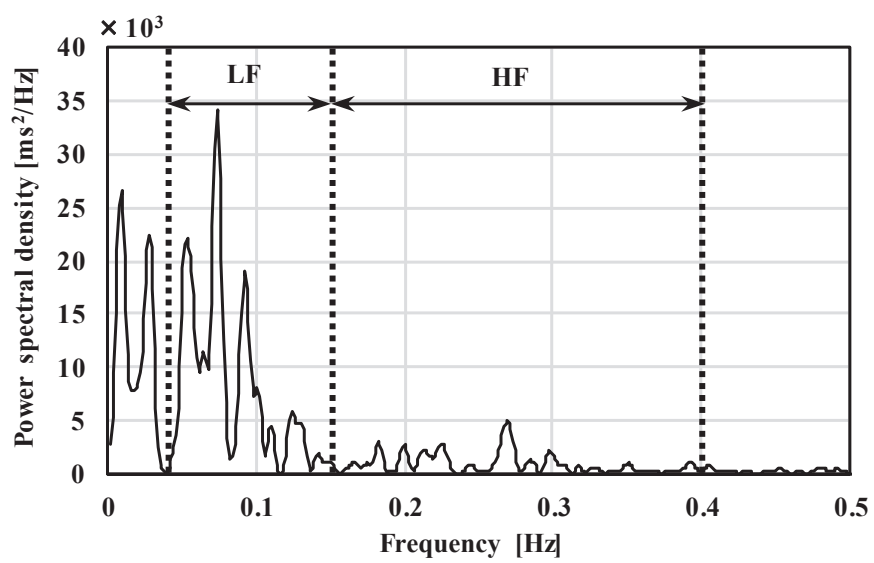


図 3-3 RRI のパワースペクトル密度[3-1]

3.3 乗り心地制御システム[3-1]

本研究で構築する乗り心地制御システムは運転者の心理状態のフィードバックに基づいて乗員それぞれにとって適切な乗り心地を提供するシステムである。図 3-4 にシステムの概略図を示す。このシステムは事前に設定された複数の振動制御を切り替えることで乗り心地を変化させる。システムは運転者がストレスを感じたと生体計測によって判断されたときに別の振動制御に切り替える。この時、振動制御は運転者の心理状態と運転環境を考慮して選択される。本研究では基礎検討として 2 つの乗り心地が異なる振動制御（3 Hz と 10 Hz の正弦波振動 [3-18]）を選択し、実験を行った。

次に心電図を用いて運転者の心理状態を推定した。ある区間における RRI の平均値と LF/HF の 2 つの切り替え基準を使用して実験を行い、それらの結果を比較した。3.2 節で示したように LF/HF を算出するためには LF 成分の最低周波数である 0.04 Hz を 2 周期以上測定する必要があるため 50 秒以上の心拍変動のデータが必要となる。そのためこのシステムでは 50 秒毎に RRI 平均値と LF/HF を算出し、前の区間の値と比較し、振動制御を切り替えるかどうか判断する。今回使用した制御システムのフローチャートを図 3-5 に示す。RRI の変動は安静時でも起こるため[3-19]、本論文では RRI は前の区間と比較して 20 ms 以上減少した時に運転者がストレスを感じていると判断することとした。

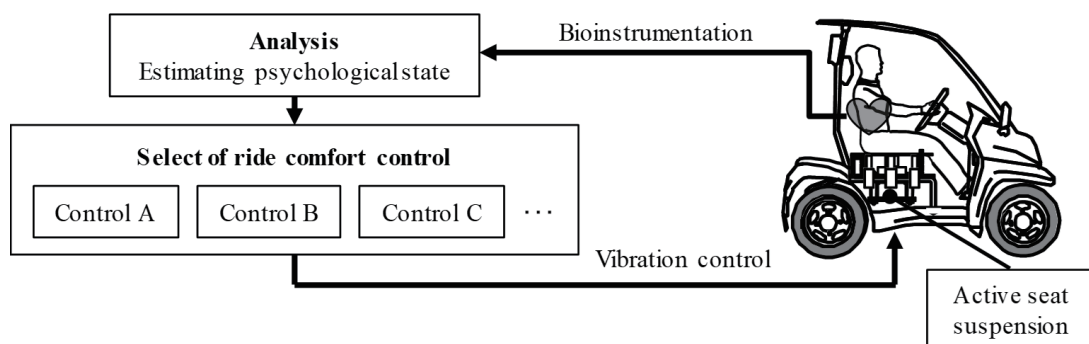
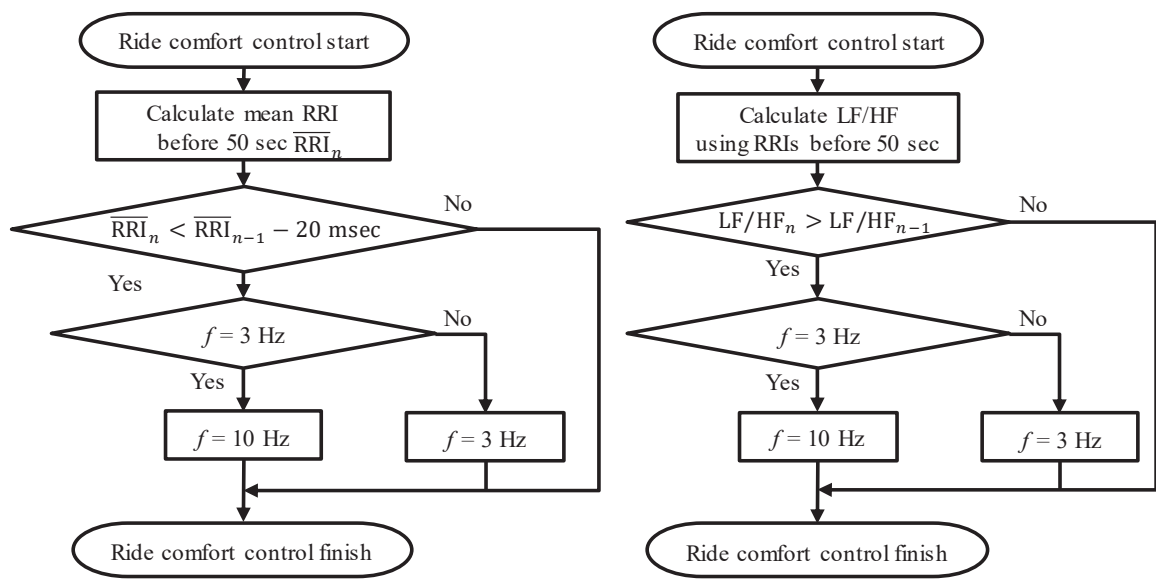


図 3-4 生体情報をフィードバックする乗り心地制御システム[3-1]



(a) RRI による切り替え

(b) LF/HF による切り替え

図 3-5 実験でを使用した乗り心地制御システムのフローチャート[3-1]

3.4 心理状態の評価指標による乗り心地改善への影響評価 [3-1]

RRI を制御の切り替えを判断する指標に用いた場合と LF/HF を用いた場合で乗り心地向上の効果を確認するために、実験協力者を車両に乗車させ、加振実験を行った。なお、本実験は東海大学「人を対象とした研究」に関する倫理委員会により承認されている（承認番号：17009）。実験前に、実験協力者には研究内容など研究について説明し、参加に同意した実験協力者は委員会によって承認された同意書に署名した。

実験車両は前章で構築した VCM を使ったアクティブシートサスペンションを超小型車両に搭載したものを使用した。加振実験では車両をジャッキアップした。これにより加振によって車体が揺れ、目的の周波数特性以外の振動が乗員へ入力されないようにした。実験のフローチャートを図 3-6 に示す。加振実験を始める前に実験協力者の心理状態を実験事に一致させるため 1 分間の暗算タスクを設けた。心電図の計測には図 3-7 に示す ADInstruments 社製 Power Lab ML825 2125, Bio Amp ML132, and MLA2503 シールド線を用いた。また心電図の解析には同社の HRV 2.0.3 を用いた。電極は図 3-8 に示すように実験協力者の体動によるノイズが発生しにくい NASA 誘導に従って実験協力者の体に貼付した。本研究では未加振、RRI 平均値を切り替え基準とした車両、LF/HF を切り替え基準とした車両の 3 条件で加振実験を行った。なお未加振の条件は従来のような振動を抑制する制御を適用した車両を想定している。上述したように乗り心地制御システムでは 3 Hz と 10 Hz の振動を切り替えることで乗り心地に変化を与えた。また、全ての条件でシート座面での最大加速度振幅を 1 m/s^2 になるよう設定した。

図 3-9 に各切り替え基準において運転者の心理状態を変化させるために振動周波数切り替えた結果の一例を示す。RRI を切り替え基準とした場合は RRI が前区間よりも 20 ms 低下した時に振動周波数を切り替え、LF/HF を切り替え基準とした場合は前区間よりも増加した時に振動周波数を切り替えた。同図(a)では 10 Hz で加振している 60~110 秒の区間に比べて、110~160 秒の区間で RRI が約 60 ms 減少したことから実験協力者はストレスを感じていると判断し、160 秒から加振周波数を 3 Hz に切り替えている。同図(b)では 10 Hz で加振している 60~110 秒の区間に比べて、110~160 秒の区間で LF/HF が約 1.0 上昇したこと

から実験協力者はストレスを感じていると判断し、160 秒から加振周波数を 3 Hz に切り替えている。

加振実験における実験協力者 11 名の LF/HF 平均値を図 3-10 に示す。切り替え基準に依らず、未加振と比較して乗り心地制御を行った方が LF/HF が低下しており、リラックス状態になっていた。また LF/HF を切り替え基準として制御した場合、LF/HF 平均値が最も低くなり、実験協力者が最もリラックス状態になっていることを確認した。以上の結果から LF/HF に応じて乗り心地を切り替えることで運転者が最もリラックスになることを確認した。

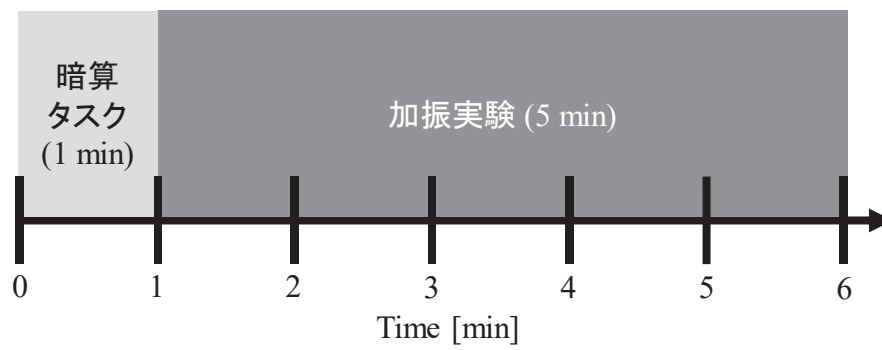


図 3-6 実験の流れ[3-1]

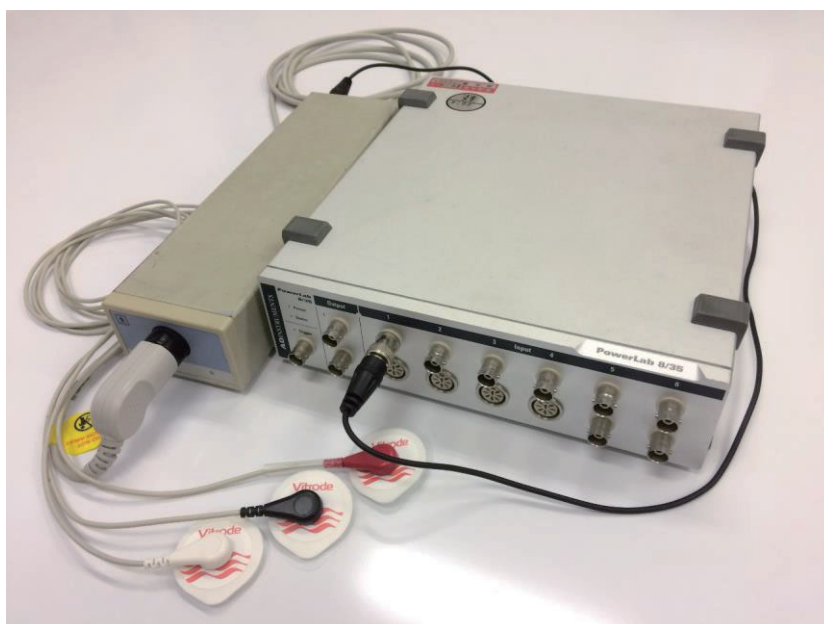


図 3-7 心電図計測装置と電極[3-1]

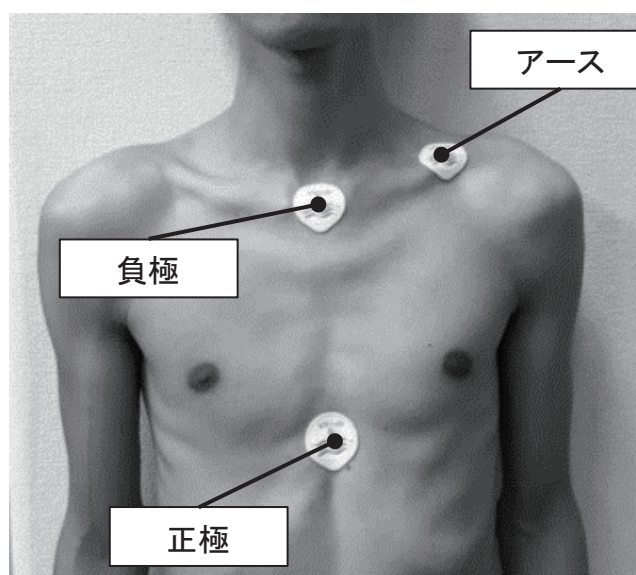
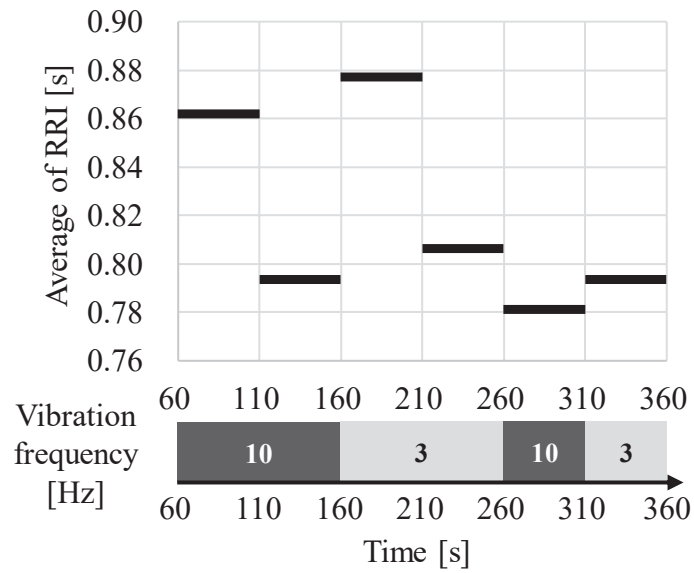
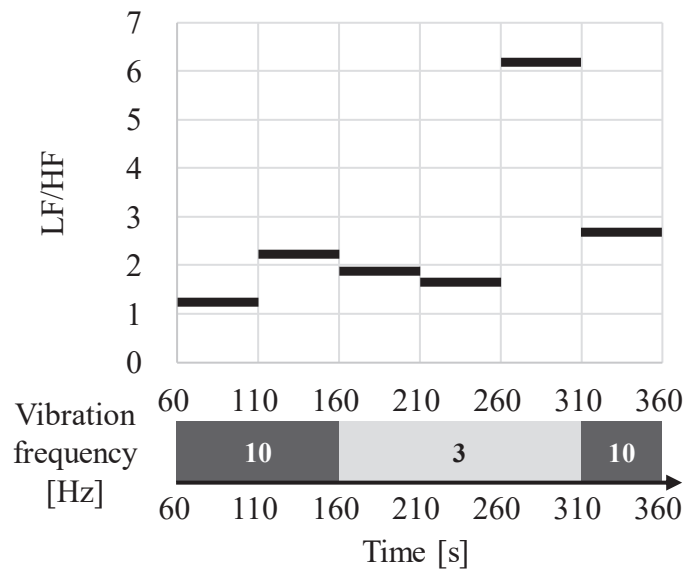


図 3-8 NASA 誘導に従った電極の貼り付け位置[3-1]



(a) RRI による切り替え



(b) LF/HF による切り替え

図 3-9 心理状態の評価指標と適用した乗り心地の時刻歴[3-1]

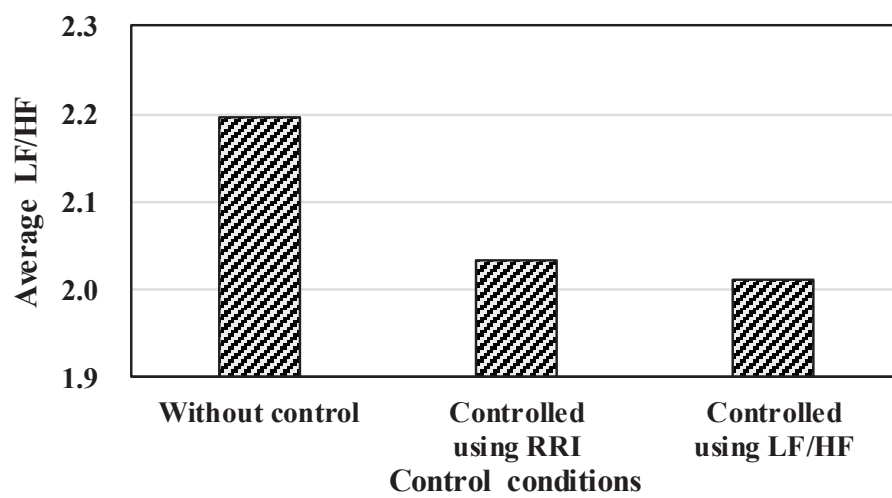


図 3-10 制御手法による乗り心地[3-1]

3.5 脳血流量による乗り心地感覚の評価[3-4]

3.5.1 NIRS と乗り心地感覚の関係性

前節までは自律神経系の生体情報を用いて心理状態を推定したが、本節では近赤外分光脳イメージング装置（以下、NIRS と称する）を使った脳機能計測による乗り心地感覚の評価について述べる。

近年、NIRS といった脳機能計測装置の発展により、脳機能計測による心理状態評価が用いられるようになってきた。振動に対する心理的な感覚を推定する研究も行われており、平山ら[3-20]は振動に対する主観的評価と NIRS で計測された脳機能を分析し、乗り心地感覚と脳活動の関係について研究を行っている。しかしながら乗り心地へ影響を与えると考えられている鉛直振動が乗員の脳血流量に与える影響について研究がなされていない。吉田ら[3-21]によって報告されているように、鉛直振動は乗り心地感覚に影響を与えることが明らかになっている。そこで本節では乗車時の環境を模擬した環境で加振実験を行い、鉛直振動が脳血流に与える影響を明らかにした。また、アンケートによる主観評価も行い、鉛直振動に対する乗員の乗り心地感覚と脳血流の関係性を明らかにした。

3.5.2 脳血流量の計測と評価方法

本研究では脳血流量の計測に NIRS を用いた。本研究で用いた NIRS（HOT-1000, 株式会社 NeU 社製）を図 3-11 に示す。この装置は波長 810 nm の近赤外光を放射する発光ダイオード（以下、LED と称する）と 2 つのフォトダイオードで構成される計測ユニットが 2 つ取り付けられている。脳血流量を計測するため、LED から大脳皮質の前頭前野に近赤外光を照射する。照射された近赤外光は散乱して大脳皮質で反射し、再び頭皮側へ光が戻ってくる。この戻ってきた反射した近赤外光の光量をフォトダイオードで測定する。この計測手法は血液に含まれるヘモグロビンが光を吸収するという性質に基づいている。脳の活動が活発になると、脳血流量が増加し、計測点でのヘモグロビン量が増加する。ヘモグロビンは、前述のように光を吸収する特性があり、脳血流量が増

えるとフォトダイオードで検出される光の量が減少する。このヘモグロビンの特性を利用し、光量から脳血流量を推定することを可能としている。

実験では実験協力者が生体情報の計測によって心理的負担を感じないようにする必要がある。そのため、脳血流測定でよく用いられる 10-20 電極配置法において前頭前野である Fp1 ならびに Fp2 での脳血流量の計測に限定した。前頭前野を計測するため NIRS を装着した実験協力者を図 3-12 に示す。脳血流量と心理状態の関係性についてはいくつかの先行研究で報告されている。Buijs ら [3-22] は、ストレスによって右側の前頭前野の活動が活発になることを示している。さらに、Tanida ら [3-23], [3-24] もストレスを受けている実験協力者は右脳でより多くの活動が現れていることを示している。さらに田中ら [3-25] は鉄道の振動と脳血流との間に相関関係があることを示している。そこで本研究では、右側の前頭前野における脳血流量を測定し、実験協力者のストレス指標として評価した。

3.5.3 主観評価の取得方法

本研究では、実験協力者が感じる乗り心地感覚と生体計測から推定される乗り心地感覚の間に相関関係があるかどうかを明らかにすることを目的としている。そこで、Visual Analog Scale (以下、VAS と称する) を用いて主観評価を行い、実験協力者が感じる乗り心地感覚を評価した。

本実験で使用した VAS によるアンケートの一例を図 3-13 に示す。VAS では 1 つの質問に対して 10 cm の直線を用いる。質問の回答は直線の両端に記載され、左端は否定的な回答、右端は肯定的な回答を記載する。実験協力者はその質問に対する主観的な回答として、そのときの状態を示す位置に交線を自由に引く。各質問において、直線の中心は質問に関する心理状態が実験前の状態と比較して変化を感じられない状態を示す。右端は実験協力者が最良の状態であることを示しており、左端では最悪の状態であることを示す。交線を記入後、左端から交線までの距離を VAS スコアとし、主観評価による乗り心地感覚の値として評価した。したがって VAS スコアが大きい場合は質問に対する反応は肯定的であり、VAS スコアが小さい場合は質問に対する反応は否定的であることを示す。VAS スコアが 5 点であるときは、実験協力者が実験の前後で乗り

心地感覚が変化しなかったと感じていることを示す。また、本実験では乗り心地感覚を評価するため、「実験前の状態と比較し、現在の快適感を示す位置に線を引いてください。」という質問を設定した。実験協力者が快適であると感じていれば中央より右側に交線を引き、VAS スコアは 5 以上となる。一方、不快であると感じていれば中央より左側に交線を引き、VAS スコアは 5 未満となる。

3.5.4 加振実験の方法

本研究ではアクティブシートサスペンションを搭載した超小型車両を用いて振動周波数が乗り心地感覚に与える影響を確認するため加振実験を行った。実験では図 3-14 に示すように NIRS を装着した実験協力者を乗車させ、運転姿勢を再現するよう教示し、図 3-15 に示す手順で行った。単一周波数の振動で実験協力者を 3 分間加振し、その際の脳血流量を計測した。加振時間の直前 1 分間は実験車両の前にあるモニターに計算タスクを表示し、発話せずに暗算を行うことを教示した。なお、本実験は東海大学「人を対象とした研究」に関する倫理委員会により承認されている（承認番号：17009）。実験に参加する前に、実験協力者には研究内容など研究について説明し、参加に同意した実験協力者は委員会によって承認された同意書に署名した。本実験の実験協力者数は 21～22 歳の男性 5 名とした。

この実験では乗り心地感覚が変化するような加振条件を設定する必要がある。乗り心地感覚が変化する振動の要素として周波数が挙げられる[3-26]，[3-27]。特に武井ら[3-18]は振動周波数によって乗り心地感覚が異なることを示しており、0.2～3 Hz ではふわふわ感 3～8 Hz ではごつごつ感、8～20 Hz ではばたつき感を感じると報告している。さらに、Janeway[3-28]および ISO[3-29]は、4～8 Hz の振動は振幅を大きく感じやすい振動であると示している。このため、本実験では乗り心地感覚の異なる 3, 5, 8, 10 Hz の 4 種類の正弦波振動を設定した。なお振動の大きさは全ての周波数においてシート座面における加速度両振幅を 1.0 m/s^2 とした。また加振実験では車両をジャッキアップすることで加振周波数以外の振動が実験協力者に入力されないようにした。

3.5.5 加振実験による脳血流量への影響

加振実験中に計測された右脳血流量変化の時刻歴の一例を図 3-16 に示す。同図はそれぞれ各周波数で加振を開始した 0 秒における脳活動量からの変化量を示している。図 3-16 (a)が示すように、加振周波数 3 Hz では脳血流量は徐々に減少している。一方、加振周波数 5 Hz と 8 Hz では、図 3-16 (b), (c)に示すように脳血流量が上昇し、右脳の活動が活性化していることが確認できた。また基礎実験から、3 分間安静とした状態では脳血流量の変化は約 $0.020 \text{ mM} \cdot \text{mm}$ 、3 分間暗算を行って精神的負荷を与えた際には $0.30 \text{ mM} \cdot \text{mm}$ 以上増加することを確認している。そのため加振周波数が 5 Hz と 8 Hz の場合では脳血流量が大幅に増加していると判断できる。また、図 3-16 (d)に示すように加振周波数 10 Hz では脳血流量の減少が見られたが、徐々に増加し、240 秒前後で加振開始時に近い値となった。

ここで加振開始直後の 30 秒間 (60~90 秒) と加振時間終了前 30 秒間 (210~240 秒) における脳血流量の平均値を算出し、その平均値を図 3-17 に示す。同図から、加振周波数が 3 Hz と 10 Hz では脳血流量が減少していることが確認できた。これに対して、5 Hz と 8 Hz では脳血流量が増加していることから、脳活動が活性化していることが確認できた。

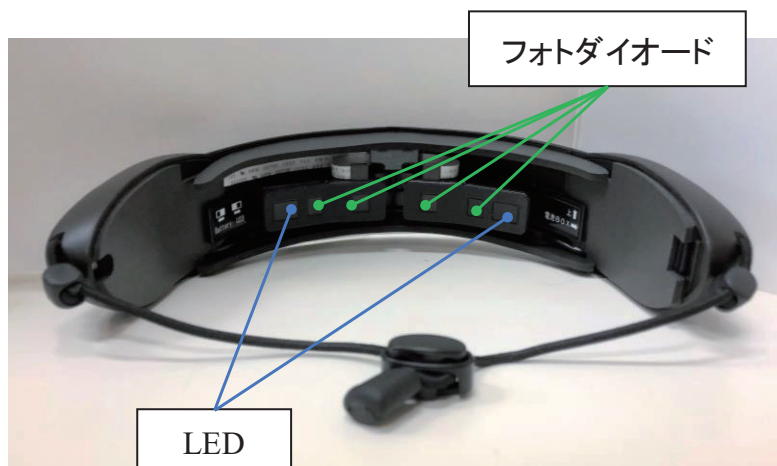
本実験で得られた VAS スコアを図 3-18 に示す。加振周波数が 3 Hz と 10 Hz の場合では VAS スコアが 5 未満であり、実験協力者は入力された振動を快適と感じていた。しかしながら、加振周波数が 5 Hz と 8 Hz の場合では VAS スコアは 5 より大きく、不快と感じていた。

本実験で得られた結果から脳血流量の変化と主観評価とを比較すると、3Hz と 10Hz の振動では右脳の活動が不活化し、主観評価では快適であったと示された。一方、5, 8Hz の振動では右脳の活動が活発化し、主観評価では不快であると示された。このことから、脳の活動状態によるストレス指標と上下振動の周波数に対する主観的な心理状態評価との間に関係があることが確認された。

ISO では、4~8 Hz の振動の振幅を大きく感じやすいと規定している。また、松本ら[3-30]は、座位での人体の固有振動数は約 5 Hz であると報告している。したがって、本実験での結果を踏まえると乗り心地を劣化する周波数の振動の入力によって右脳が活性化されることが考えられる。これらの結果から脳血流量を測定することにより、ストレスを評価することが可能であることを示した。



(a) 装置前面



(b) 装置後面とセンサユニット

図 3-11 脳血流計測装置 (NIRS) [3-4]

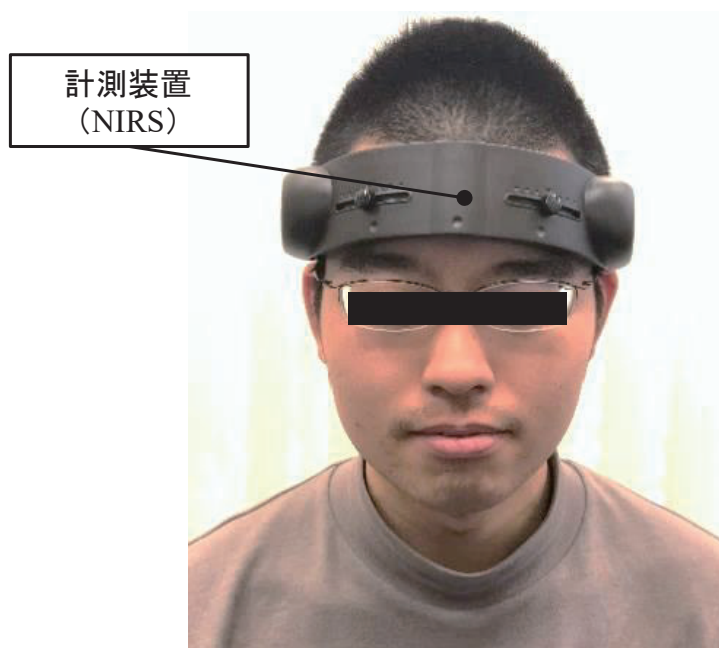


図 3-12 NIRS を装着した様子[3-4]

Date: _____.

実験に関するアンケート

実験前の状態と比較し、現在の快適感を示す位置に
線を引いてください。

快適 不快

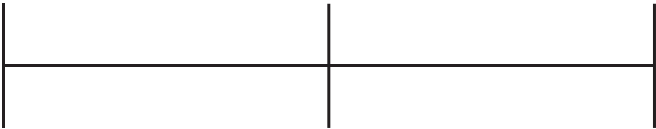


図 3-13 主観評価で用いたアンケート[3-4]



図 3-14 加振実験の実験環境[3-4]

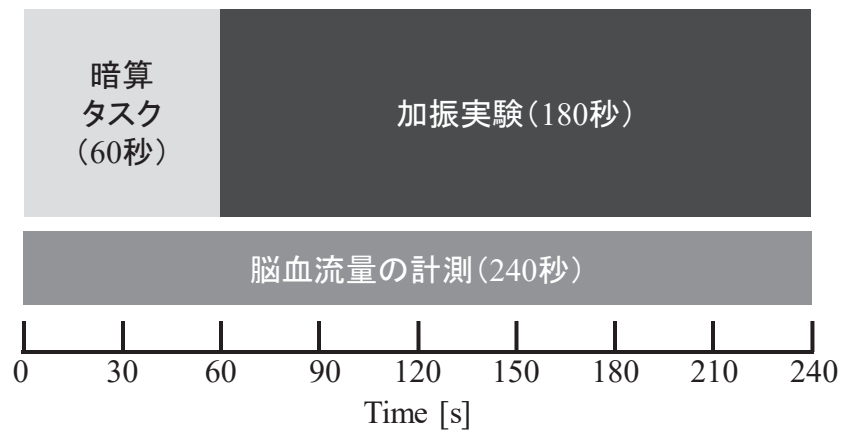
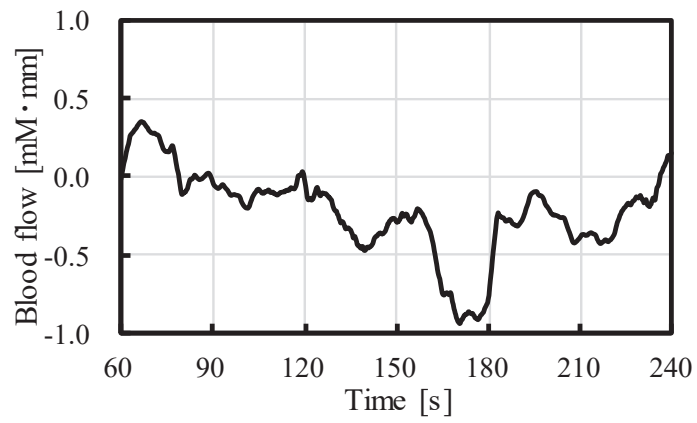
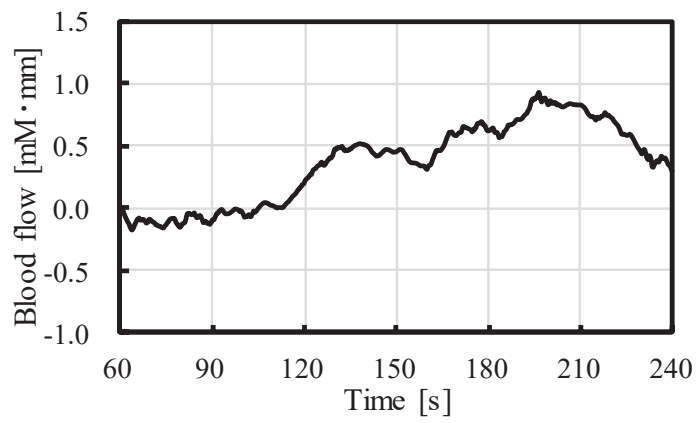


図 3-15 加振実験の流れ[3-4]

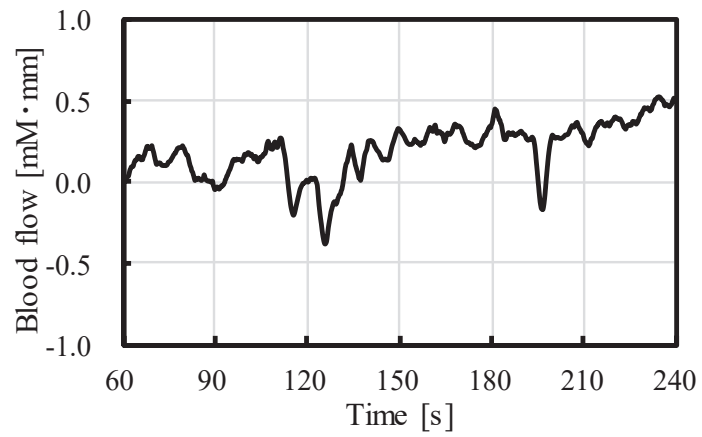


(a) 3 Hz

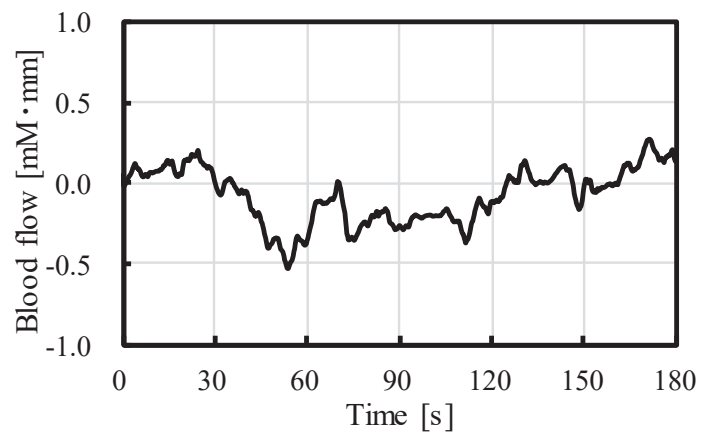


(b) 5 Hz

図 3-16 加振中における右脳血流量の変化[3-4]



(c) 8 Hz



(d) 10 Hz

図 3-16 加振中における右脳血流量の変化[3-4]

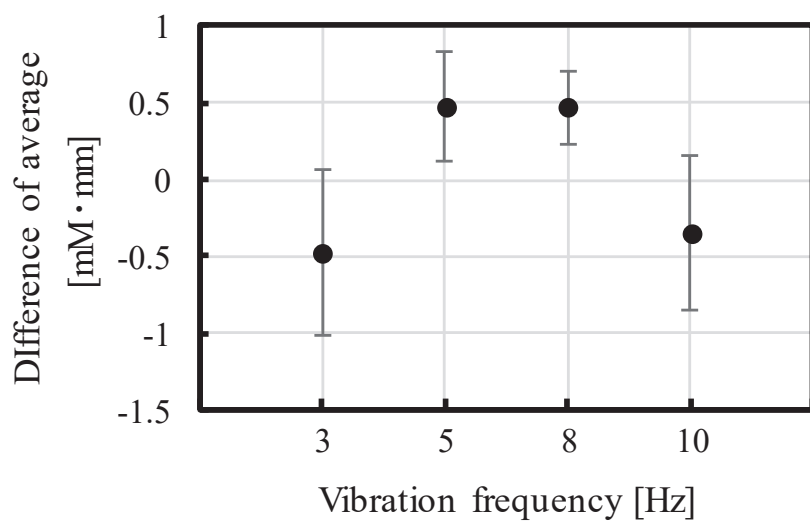


図 3-17 各加振周波数における右脳血流変化量の平均値[3-4]

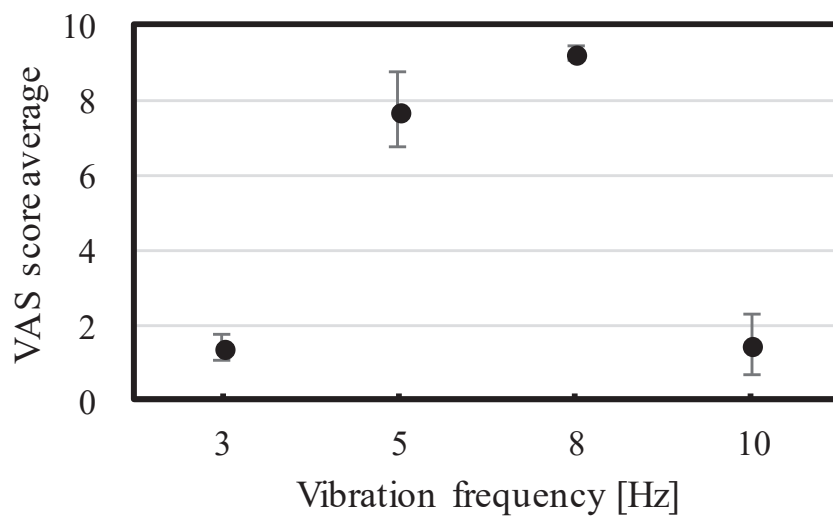


図 3-18 各加振周波数における VAS スコアの平均値[3-4]

第 4 章

結論

本研究では超小型車両の乗り心地改善を目的としたアクティブシートサスペンションに着目し、超小型車両に搭載可能なアクチュエータである VCM について研究を行った。さらにアクティブシートサスペンションに適用可能な生体情報を応用した乗り心地制御システムについて研究を行った。

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

本章では本論文にて行った研究の背景となる超小型車両の利用状況や応用事例、その乗り心地の問題について明らかにした。その解決方法として提案されているアクティブシートサスペンションの活用事例や超小型車両で利用する際の問題点も明らかにし、VCM の有用性について関連研究を基に述べた。さらに、振動の乗り心地について従来の制御手法と評価手法を明らかにしたうえで、生体情報を応用した乗り心地制御システムの有用性について述べた。

第2章 アクティブシートサスペンション用ボイスコイルモータの設計

本章では超小型車両用アクティブシートサスペンションの構造について述べ、その特徴から超小型車両に搭載可能な VCM のモデルについて検討した。VCM の形状は車両サイズの制約から寸法を決定し、応答性や推力に影響を与えるパラメータを決定するための手法を構築した。アクティブシートサスペンションを含む車両を1自由度振動系として力学的モデルを構築し、VCM の非線形な推力特性は電磁界解析より求めた。また、アクティブシートサスペンションの制御特性と VCM の推力特性を考慮した運動モデルを構築し、VCM のコイルの導線径とコイルと永久磁石間のギャップが制御性能に与える影響を明らかにした。これらの解析によって得られた研究成果は以下の通りである。

- (1) 電源電圧の制約が無い環境では、車両が段差を通過する走行環境においては導線径による制御性能の差が現れないことを解析から明らかにした。しかしながら、実際の環境では搭載可能な電源容量による電源電圧の制約を受けるため、その制約を考慮した解析を行い、電源電圧によって適切な導線径があ

ることを明らかにした。

- (2) 実際に超小型車両へアクティブシートサスペンションを搭載するため、電源電圧を決定し、解析により得られた最適な永久磁石とコイル間のギャップならびにコイルの導線径で VCM を製作した。製作した VCM を含むアクティブシートサスペンションは超小型車両の搭載可能重量以下で構築することができた。また、VCM の電気的特性や推力特性も解析結果とよく一致したことから、構築した解析手法の有用性を明らかにした。

第3章 生体情報をフィードバックする振動制御

本章では超小型車両用アクティブシートサスペンションを使った新しい振動制御手法として、生体情報から推定される乗り心地感覚をフィードバックするシステムを提案した。はじめに乗り心地の評価や乗り心地を向上させるための振動制御に関する近年の動向を述べた後、制御システムで使用する心理状態の評価手法を説明した。ここでは心電図から心拍変動を計測し、自律神経系を反映する指標を算出する方法について述べた。次に本研究で提案する乗り心地制御システムの概略と本研究で用いたシステムについて説明した。この制御システムについて従来の振動制御と比較や、心理状態の評価指標の違いが心理状態へ与える影響について実験的に明らかにした。

さらに情動を司る脳活動の観点からも振動に対する乗り心地を評価する手法として脳血流量に着目した。本章では脳血流量による心理状態の評価に関する関連研究について説明した。さらに乗り心地との関連性が高い振動周波数と心理状態の関係性について主観評価と脳血流量の双方から評価した。

以上のように、乗り心地制御システムの検討と脳血流による乗り心地評価に関する検討を実施した。これらの検討から得られた研究成果は以下の通りである。

- (1) 乗り心地制御システムによって心理状態を考慮した乗り心地の切り替えを行うことによって振動を抑制するよりも良い心理状態になることを明らかにした。また、限定的な環境であるものの心理状態の評価指標によって制御

性能が異なることも明らかにした。

- (2) 脳血流量による心理指標と主観評価から得られた快適性評価は振動周波数に対して一致することを明らかにした。特に脳血流量は右脳の血流上昇量が周波数と一致する傾向になることを明らかにした。

以上の研究成果により，超小型車両の乗り心地を改善するアクティブシートサスペンションのアクチュエータとして VCM を提案し，電磁界解析ならびに運動解析を用いてモータ構造ならびに制御性能を解析的に評価する手法が，VCM の設計に有用であることを明らかにした。また運転中の乗員の心理状態を生体情報によって評価し，その情報をリアルタイムにフィードバックする振動制御システムを提案し，その有用性を明らかにした。さらに，脳血流量を用いた振動快適性の評価手法を提案し，振動周波数に対する乗り心地を評価する上で有用性があることを明らかにした。

本研究の今後の展望として様々な利用環境を想定した VCM の設計を行うことが可能になると考えている。今回示した解析手法はさまざまな制御手法・運動モデル・モータ特性への応用も可能であることから，振動環境や搭載上の制約に応じた振動制御用 VCM の設計へ応用できると考えられる。また，心理状態を応用した乗り心地制御の有用性を示したことで，より乗り心地を向上させるシステムの構築が行われると考えらる。特に脳血流量や呼吸といった異なる生体情報と振動の関係性を十分に検討し，本論文で提案したシステムに応用することでより乗員一人ひとりに最適な乗り心地を提供できるような高性能な乗り心地制御の実現が期待できる。

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 教授，工学部動力機械工学科 森山裕幸 教授，工学部機械工学科 落合成行 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3年1月

遠藤 文人

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], [2-3], [2-7], [3-1], [3-4]に掲載された内容を基に構成されている。日本磁気学会論文特集号に掲載された内容[2-1]は第 2 章 2.2～2.6 節, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* に掲載された内容[2-3], [3-1]は第 2 章 2.1 節ならびに第 3 章 3.2～3.4 節, *Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E* に掲載された内容[2-7], [3-4]は第 2 章 2.7 節ならびに第 3 章 3.5 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[2-3], [3-1]の最終版については <http://dx.doi.org/10.3233/JAE-209369>, <http://dx.doi.org/10.3233/JAE-171120> で公開されている (The final publication [2-3], [3-1] that used in this doctoral thesis is available at IOS Press through “<http://dx.doi.org/10.3233/JAE-209369>” and “<http://dx.doi.org/10.3233/JAE-171120>”).

参考文献

第1章 序論

- [1-1] 国土交通省自動車局, 地域から始める超小型モビリティ導入ガイドブック (2014).
- [1-2] 姫路エコツーリズム推進協議会, 離島観光における取組と今後について, 超小型モビリティシンポジウム講演資料 (2016).
- [1-3] 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, No. 786 (2012), pp. 446-461.
- [1-4] 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, No. 3 (2008), pp. 3_35-3_40.
- [1-5] K. Huang, F. Yu and Y. Zhang, Active controller design for an electromagnetic energy-regenerative suspension, International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 6 (2011), pp. 877-885.
- [1-6] 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, No. 2 (2016), pp. 77-84.
- [1-7] 阿部義弘, 新井創, 押野谷康雄, 石橋一久, 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), 日本機械学会次大会講演会論文集, Vol. 7 (2002), pp.175-176.
- [1-8] 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>
- [1-9] Jurgen Maas, Simon Kern, Hans-Christian Pflug, Helmut Porod, Active seat suspension, dSPACE NEWS (2006), pp. 12-13.
- [1-10] 新日英中自動車用語辞典, 公益社団法人自動車技術会.
- [1-11] 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.
- [1-12] Ayato ENDO, Keigo IKEDA, Ryosuke MINOWA, Hideaki KATO and

- Takayoshi NARITA, A Study of Active Seat Suspension Using Voice Coil Motor: Fundamental Consideration on Change of Thrust, Proceedings of the school of Engineering Tokai University, Series E, Vol. 44 (2019), pp. 15-20.
- [1-13] M. Gohari, R.A. Rahman, M. Tahmasebi and P. Nejat, Off-road Vehicle Seat Suspension Optimisation, Part I: Derivation of an Artificial Neural Network Model to Predict Seated Human Spine Acceleration in Vertical Vibration, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 33, No. 4 (2014), pp. 429-442.
- [1-14] J.E.D. Ekoru, O.T.C. Nyandoro, T. Chingozha, An Udwadia-Kalaba Equation based active seat suspension controller for mining dump trucks, IFAC-PapersOnLine, Vol. 49, No. 20 (2016), pp. 184-189.
- [1-15] M. Bouazara, M.J. Richard, S. Rakheja, Safety and comfort analysis of a 3-D vehicle model with optimal non-linear active seat suspension, Journal of Terramechanics, Vol. 43 (2006), pp. 97–118.
- [1-16] Mohammed Al-Ashmori and Xu Wang, A Systematic Literature Review of Various Control Techniques for Active Seat Suspension Systems, applied sciences, Vol. 10, No. 3 (2020), 1148
- [1-17] Mohammad Gohari and Mona Tahmasebi, Active Off-Road Seat Suspension System Using Intelligent Active Force Control, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 34, No. 4 (2015), pp. 475-489.
- [1-18] I. Maciejewski, S. Glowinski, T. Krzyzynski, Active control of a seat suspension with the system adaptation to varying load mass, Mechatronics, Vol. 24, No. 8 (2014), pp. 1242-1253.
- [1-19] J.H. Yu, K.C. Lee, H.B. Park, Y.G. Chol, K.H. Ryu, Development of 2-DOF Active Seat Suspension System for Agricultural Tractor – Design of Mechanism and Controller, American Society of Agricultural and Biological Engineers (2013), 084057.
- [1-20] Donghong Ning, Shuaishuai Sun, Hongyi Li, Haiping Du, Weihua Li, Active control of an innovative seat suspension system with acceleration measurement based friction estimation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 384 (2016), pp. 28–44

- [1-21] I. Maciejewski, L. Meyer, T. Krzyzynski, The vibration damping effectiveness of an active seat suspension system and its robustness to varying mass loading, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329 (2010), pp. 3898–3914.
- [1-22] 川村登, 並河清, 藤浦建史, 浦元信, 笹尾彰, 農用車両シート加振機の試作, *農業機械学会関西支部報*, Vol. 43 (1978), pp. 43-46.
- [1-23] 川村登, 笹尾彰, 農用車両のアクティブ・シート・サスペンションに関する研究 (第1報) : 電気・油圧サーボ機構によるサスペンション, Vol. 42, No. 3 (1980), pp. 443-449.
- [1-24] 川村登, 藤浦建史, 田村正博, 笹尾彰, 農用車両のアクティブ・シート・サスペンションに関する研究, *農業機械学会誌*, Vol. 40 (1978), p. 20.
- [1-25] 川村登, 清水明彦, 純油圧式アクティブ・シート・サスペンションの研究, *農業機械学会誌*, Vol. 42 (1980), p. 16.
- [1-26] 下郷太郎, 押野谷康雄, 新庄弘之, トラックシートのアクティブサスペンション, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 62, No. 600 (1996), pp. 3132-3138.
- [1-27] Masaaki Kawana, Taro Shimogo, Active suspension of truck seat, *Shock and Vibration*, Vol. 5, No. 1 (1998), pp. 35-41.
- [1-28] Weichao Sun, Jinfu Li, Ye Zhao, Huijun Gao, Vibration control for active seat suspension systems via dynamic output feedback with limited frequency characteristic, *Mechatronics*, Vol. 21, No. 1 (2011), pp. 250-260.
- [1-29] Donghong Ning a, Shuaishuai Sun b, Fei Zhang c, Haiping Du a,↑, Weihua Li b, Bangji Zhang, Disturbance observer based Takagi-Sugeno fuzzy control for an active seat suspension, Vol. 93 (2017), pp. 515-530.
- [1-30] Rudiger Kieneke, Christian Graf and Jurgen Maas, Active seat suspension with two degrees of freedom for military vehicles, *Proceedings of 6th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, Vol. 46, No. 5 (2013), pp. 523-529.
- [1-31] 大須賀美恵子, 役に立つ生理心理工学を目指して, *人間工学*, Vol. 51, 特別号 (2015), pp. 56-57.
- [1-32] 曾我知絵, ストレス評価のための感情による生理反応に関する研究, 九州工業大学大学院博士学位論文 (2014).
- [1-33] 佐々木真彦, 中野真哉, 高梨宏之, 王鋒, 長南征二, 御室哲志, 脈拍に

- よるストレス評価に関する検討, 計測自動制御学会東北支部第 244 回研究集会資料 (2008), 244-1.
- [1-34] 藤原義久, 岡田志麻, 鈴木伸吾, 黒田征平, 松浦英文, 安田昌司, 飯田健夫, 牧川方昭, 寝床内温度フィードバック機能付きエアコン트롤ふとんの開発, 生体医工学, Vol. 42, No. 4 (2004), pp. 362-370.
- [1-35] 渡辺和憲, 金利昭, 心拍変動を用いた自転車利用者のストレス分析手法に関する考察, 土木計画学研究・講演集, Vol. 44 (2011), 92.
- [1-36] 西川向一, 平澤由美, 長町三生, 温熱環境が心拍変動に与える影響, 人間工学, Vol. 33, No. 2 (1997), pp. 105-112.
- [1-37] 佐久間大輝, 神田尚子, 吉見真聡, 吉永努, 入江英嗣, 座位状態での心拍測定を用いたリアルタイムなストレス緩和システム, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム講演集 (2013), pp. 1188-1195.
- [1-38] 板橋和希, 森田純哉, 平山高嗣, 間瀬健二, 山田和範, モデルベース回想法における心拍変動分析, HAI シンポジウム 2020 講演集 (2020), P-35.
- [1-39] 藤原義久, 冷水一也, 源野広和, 松浦英文, 安田昌司, 飯田健夫, 牧川方昭, マッサージチェア利用時における自律神経系生体情報を用いた人間感覚推定手法とマッサージ制御手法の開発, 生体医工学, Vol. 43, No. 1 (2005), pp. 162-171.
- [1-40] ISO, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, ISO 2631-1 (1997).
- [1-41] 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, No. 3 (2006), pp. 755-772.
- [1-42] 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, No. 1 (2012), pp. 33-38.
- [1-43] 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.
- [1-44] G.S. Paddan and M.J. Griffin, Evaluation of whole-body vibration in vehicles, Journal of Sound and Vibration, Vol. 253, No. 1 (2002), pp. 195–213.
- [1-45] 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, No. 6 (2016), pp. 725–739.
- [1-46] 北崎智之, 自動車の振動評価, 日本音響学会誌, Vol. 53, No. 1 (1997), pp39-43.
- [1-47] 山崎和秀, 乗り心地の評価, 日本音響学会誌, Vol. 46, No. 2 (1990), pp. 157-162.
- [1-48] 前田節雄, ISO2631 に基づいた乗り物振動評価の動向, Vol. 53, No. 1 (1997), pp33-38.
- [1-49] 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, No. 4 (1990), pp. 168-171.
- [1-50] D.J. Osborne, M.J. Clarke, The Determination of Equal Comfort Zones for Whole-body Vibration, Ergonomics, Vol. 17, No. 6 (1974), pp. 769-782.
- [1-51] 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, No. 704 (2014), pp. 841-848.
- [1-52] 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.
- [1-53] 王鋒, 佐川貢一, 猪岡光, 自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究, 人間工学, Vol. 36, No. 4 (2000), pp. 191-200.
- [1-54] R. Zheng, K. Nakano, Y. Okamoto, M. Ohori, S. Hori and Y. Suda, Evaluation of sternocleidomastoid muscle activity of a passenger in response to a car's lateral acceleration while slalom driving, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol. 43, No. 4 (2013), pp. 405–415.
- [1-55] S. Sato, K. Taoda, M. Kawamura, K. Wakari, Y. Fukuchi and K. Nishiyama, Heart rate variability during long truck driving work, Journal of Human Ergology Vol. 30, No. 1-2 (2001), pp. 235–240
- [1-56] 今村友弥, 坂本将吾, 鹿島茂, 心拍変動による自動車運転時の心理的負担の定量的評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 69, No. 5 (2013), pp. 857- 867.
- [1-57] 原田隆郎, 横山功一, 生体脈波を用いた道路の乗り心地評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 68, No. 1 (2012), pp. 40-51.

- [1-58] 楓和憲, 荒川雄太, 綿貫啓一, 振動体感の違いが脳賦活に与える影響を考慮した振動乗り心地の快適性評価, 設計工学, Vol. 54, No. 6 (2019), pp. 377-390.
- [1-59] 平山健太, 綿貫啓一, 楓和憲, NIRS を用いた水平振動時の脳賦活分析, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 826 (2015), 14-00326.
- [1-60] 平山健太, 綿貫啓一, 楓和憲, NIRS を用いた随意運動および他動運動の脳賦活分析, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 78, No. 795 (2012), pp. 3803-3811.
- [1-61] 北堂真子, 荒木和典, 高橋達也, 井邊浩行, 梁瀬度子, 低加速度全身振動が入眠に及ぼす影響—電車の固有振動と $1/f$ ゆらぎ特性を応用した振動による入眠促進効果, 人間工学, Vol. 35, No. 4 (1999), pp. 229-239.
- [1-62] 小西建斗, 萩原啓, 体感振動刺激が及ぼす生体反応と単調作業課題への影響, モバイル学会誌, Vol. 5, No. 2 (2015), pp. 49-55.

第 2 章 アクティブシートサスペンション用ボイスコイルモータの設計

- [2-1] 遠藤文人, 池田圭吾, 三野輪良祐, 加藤英晃, 成田正敬, ボイスコイルモータを用いた超小型モビリティのアクティブシート (振動制御を考慮したモータ設計に関する基礎的検討), 日本磁気学会論文特集号, Vol. 3, No. 2 (2019), pp. 120-125.
- [2-2] Rahul Banik, Dae-Gab Gweon, Design and optimization of voice coil motor for application in active vibration isolation, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 137, No. 2 (2007), pp. 236-243.
- [2-3] Yasuaki Ito, Yoshiho Oda, Taro Kato, Xiaojun Liu, Ayato Endo, Keigo Ikeda, Takayoshi Narita, Hideaki Kato, Basic study on effect of transport acceleration in electromagnetic levitation system for thin steel plate, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (2020), Pre-press, The final publication is available at IOS Press through <http://dx.doi.org/10.3233/JAE-209369>.
- [2-4] 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, Proceedings of 14th International Conference on Motion and Vibration (2018), pp. 523-523.
- [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, No. 8 (2020), pp. 22-23.
- [2-6] 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.
- [2-7] Ayato Endo, Keigo Ikeda, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato and Takayoshi Narita Voice Coil Motor to Control Passenger Vibration for Ultra Compact Mobility Fundamental Consideration on Road Bump, Proceedings of Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control, Vol. 6 (2019), pp. 66-69.
- [2-8] Ayato ENDO, Keigo IKEDA, Ryosuke MINOWA, Hideaki KATO and

- Takayoshi NARITA, A Study of Active Seat Suspension Using Voice Coil Motor: Fundamental Consideration on Change of Thrust, Proceedings of the school of Engineering Tokai University, Series E, Vol. 44 (2019), pp. 15-20.
- [2-9] Y. Oshinoya, H. Arai, K. Ishibashi, Experimental study on active seat suspension for a small vehicle, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 19, No. 1-4 (2004), pp. 437-443.
- [2-10] 吉田義之, 小磯章, 伊藤秀三郎, 振動感覚の一計測法, 人間工学, Vol. 9, No. 1 (1973), pp. 21-26.
- [2-11] 高橋保, 森山毅, 増村昭文, 亀沢康文, 赤間助広, ボイスコイルモータの設計, 昭和電線レビュー, Vol. 40, No. 2 (1990), pp. 42-49.
- [2-12] 高橋保, 長谷川志朗, 森山毅, 亀沢康文, 大推力高応答性ボイスコイルモータの開発, 昭和電線レビュー, Vol. 38, No. 2 (1988), pp. 191-195.
- [2-13] 中田高義, 河瀬順洋, 高林博文, 有限要素法によるボイスコイルモータの過渡磁界解析, 電気学会論文誌 B, Vol. 105, No. 5 (1985), pp. 483-488.
- [2-14] Ayato Endo, Keigo Ikeda, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Voice coil motor for active seat suspension: fundamental consideration on vibration control for ultra-compact mobility, Proceedings of 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 19 (2019), 181.

第3章 生体情報をフィードバックする振動制御

- [3-1] 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, No. 3 (2019), pp. 977-984, The final publication is available at IOS Press through: <http://dx.doi.org/10.3233/JAE-171120>.
- [3-2] 遠藤文人, 池田圭吾, 三野輪良祐, 加藤英晃, 成田正敬, 低速走行車両用乗り心地制御システムの開発 (心理状態評価の応用に関する実験的検討), *Dynamics and Design Conference 2019 講演論文集* (2019), 417.
- [3-3] 遠藤文人, 池田圭吾, 三野輪良祐, 加藤英晃, 成田正敬, 生理心理計測を応用した乗り心地の制御 (アクティブシートサスペンションによる実験的検討), *人間工学*, Vol.55, Supplement (2019), 1D1-4.
- [3-4] Ayato Endo, Keigo Ikeda, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Evaluation of Ride Comfort and Vertical Vibration of Ultra-Compact Mobility Vehicles Using Brain Blood Flow, *Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E*, Vol. 43 (2018), pp. 17-23.
- [3-5] 大須賀美恵子, 寺下裕美, 下野太海, 心臓血管系モデルを用いた自律神経指標の解釈, *BME*, Vol. 11, No. 1 (1997), pp. 75-85.
- [3-6] 黒子典彦, 藤井英二郎, 脳波・心拍反応及び主観評価からみた緑地の騒音ストレス回復効果に関する実験的研究, *ランドスケープ研究*, Vol. 65, No. 5 (2001), pp. 697-700.
- [3-7] 井川純一, 志和資朗, 中西大輔, 車地未帆, 菊本修, 井手下久登, 心拍変動を用いた不安の自律神経機能評価について, *バイオフィードバック研究*, Vol. 37, No. 2 (2010), pp. 97-103.
- [3-8] 山田絵理香, 萩原啓, 運動および睡眠状態の心拍変動の特徴を持つ音刺激の生理的影響, *バイオフィードバック研究*, Vol. 38, No. 1 (2011), pp. 35-41.
- [3-9] 竹宮隆, 下光輝一, *運動とストレス科学*, 杏林書院 (2003), pp. 85-100.
- [3-10] 安藤譲二, 山越憲一, 神谷瞭, 光電式脈波計測の応用, *BME*, Vol. 4, No. 4 (1990), pp 24-32.

- [3-11] 加川敏規, 中嶋信生, 体動によるノイズの影響を除去した高感度腕時計型脈波計測センサ, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J96-D, No. 3 (2013), pp. 743-752.
- [3-12] 宮西祐香子, 長濱澄, 森田裕介, 指尖容積脈波計測装置による学習活動時のストレス測定と主観評価の関連分析, 日本教育工学会論文誌, Vol. 41, Supplement (2017), pp.149-152.
- [3-13] 手塚忠則, 中村剛, カメラを用いた非接触バイタルセンシング技術とその応用, バイオフィードバック研究, Vol. 45, No. 1 (2018), pp.3-9.
- [3-14] 蜂屋弘之, 空中超音波による呼吸・心拍の非接触計測, 日本音響学会誌, Vol. 75, No. 10 (2019), pp. 568-573.
- [3-15] 猪又明大, 柳沼義典, 日常生活の中で意識せずに健康状態を把握するセンシング技術, FUJITSU, Vol. 64, No. 5 (2013), pp. 541-546.
- [3-16] 林博史, 心拍変動の臨床応用—生理的意義, 病態評価, 予後予測—, 医学書院 (1999), pp. 1-27.
- [3-17] 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, No. 3 (1996), pp. 354–381.
- [3-18] 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 (1995), pp. 47-56.
- [3-19] 宮田洋, 藤澤清, 柿木昇治, 山崎勝男, 新 生理心理学 1 巻 生理心理学の基礎, 北大路書房 (1998), pp. 158-171.
- [3-20] 平山健太, 綿貫啓一, 楓和憲, NIRS を用いた水平振動時の脳賦活分析, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 826 (2015), 14-00326.
- [3-21] 吉田 義之, 小磯 章, 伊藤 秀三郎, 振動感覚の一計測法, 人間工学, Vol. 9, No. 1 (1973), pp. 21-26.
- [3-22] R.M. Buijs and C.G. van Eden, The integration of stress by the hypothalamus, amygdale and prefrontal cortex: balance between the autonomic nervous system and the neuroendocrine system, Progress in Brain Research, Vol. 1184 (2000), pp. 117-132.
- [3-23] Masahiro Tanida, Masako Katsuyama and Kaoru Sakatani, Effects of fragrance

- administration on stress-induced prefrontal cortex activity and sebum secretion in the facial skin, *Neuroscience Letters*, Vol. 432 (2008), pp. 157-161.
- [3-24] Masahiro Tanida, Masako Katsuyama and Kaoru Sakatani, Relation between mental stress-induced prefrontal cortex activity and skin conditions: a near-infrared spectroscopy study, *Brain Research*, Vol. 1184, (2007), pp. 210-216.
- [3-25] 田中倫子, 大瀧紘介, 長谷川晋一, 島宗亮平, 桂卓成, 長谷川清, 吉村美奈, 敦森洋和, 光トポグラフィを活用した現車の乗り心地評価試験, *日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集*, Vol. 25 (2016), 3202.
- [3-26] 花井利通, 自動車振動の乗り心地, 騒音制御, Vol. 21, No. 1 (1997), pp. 13-16.
- [3-27] 中川千鶴, 鉄道分野の振動乗り心地評価研究とその活用, *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 41, No. 1 (2017), pp. 15-20.
- [3-28] R.N. Janeway, Human Vibration Tolerance Criteria and Application to Ride Evaluation, *SAE Technical Paper Series*, 750166, 24 (1975).
- [3-29] International Organization of Standardization ISO 2631: Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration (1974).
- [3-30] 松本泰尚, Michael J. GRIFFIN, 鉛直振動暴露時の人体動的応答特性に関する研究, *土木学会論文集*, Vol. 2002, No. 703, pp. 185-201.