

東海大学大学院平成 25 年度博士論文

アクティブシートサスペンションを用いた
超小型電気自動車の乗り心地改善に関する研究

指導 押野谷 康雄 教授

東海大学大学院総合理工学研究科
総合理工学専攻

加藤 英晃

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景および目的	2
1.2 従来の研究	7
1.2.1 超小型モビリティの運転操作や乗り心地に関する研究	7
1.2.2 アクティブな乗り心地制御に関する研究	7
1.2.3 心理・生体情報を用いた乗り心地などの評価に関する研究	10
1.3 論文の構成および概要	13
第2章 悪路走行時における振動低減効果	16
2.1 はじめに	17
2.2 アクティブシートサスペンションとモデリングおよび状態方程式	19
2.3 アクティブシートサスペンションに適用した制御理論	24
2.4 制御実験	27
2.4.1 実験装置諸元	27
2.4.2 実験方法	29
2.5 結果および考察	31
2.5.1 供給エネルギーに対する制振性能の検討	31
2.5.2 入力振動周波数の変動に対する制振性能の検討	36
2.5.3 運転者の体重が変化した場合に対する制振性能の検討	38
2.6 まとめ	41
第3章 段差降下時における衝撃低減効果	42
3.1 はじめに	43
3.2 実験方法	44
3.3 筋電位の計測	47
3.4 結果および考察	50
3.4.1 未制御車両と制御車両の比較	50
3.4.2 座面加速度低減に対する頭部の負担低減	54
3.5 まとめ	59

第4章 運転者の生体情報を用いた アクティブシートサスペンションの制御	60
4.1 はじめに	61
4.2 心拍変動による乗り心地の評価	62
4.2.1 心電図	62
4.2.2 自律神経系	64
4.2.3 RRI	65
4.3 振動加速度が心拍変動に与える影響	67
4.3.1 実験装置	67
4.3.2 走行実験の方法	67
4.3.2 結果および考察	73
4.4 心拍変動を用いた制御	76
4.4.1 RRI-SW 制御	76
4.4.2 走行実験の方法	81
4.4.3 結果および考察	83
4.5 まとめ	87
第5章 結論	88
謝辞	92
参考文献	93

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]
F_d	: 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	: ばね定数 (4 本の合計値) [N/m]
K	: 推力定数 [N/A]
L	: ボイスコイルモータのコイルインダクタンス [H]
m	: 人間 (着座時の脚部等の影響を除いたシートに加わる重さ) とシートの質量の合計値 [kg]
Q_d^{opt}	: 最適制御理論における変位 y , 速度 \dot{y} およびボイスコイルモータへの入力電流 i に関する重み係数を要素とする重み行列
Q_d^{smc}	: スライディングモード制御理論における変位 y , 速度 \dot{y} およびボイスコイルモータへの入力電流 i に関する重み係数を要素とする重み行列
R	: コイル抵抗 [Ω]
r_d^{opt}	: 最適制御理論における制御電圧に関する重み係数
r_d^{smc}	: スライディングモード制御理論における制御電圧に関する重み係数
S_d	: スライディングモード制御理論における切り替え関数を切り替え超平面
T_s	: サンプルング時間 [s]
v	: 制御電圧 [V]
v_{nl}	: スライディングモード制御理論における超平面の両側で制御入力を切り換え, 状態を超平面に拘束する非線形項
v_{eq}	: スライディングモード制御理論における超変面上の状態を原点まで滑らせる線形項
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]

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景および目的

近年、1人から2人乗り用の超小型電気自動車はいくつかの自動車メーカーから販売されており、一定地域内での移動に利用されている。また、コンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、地域の足となることが期待されている。さらに、2012年6月には国土交通省より超小型モビリティ導入に向けたガイドライン [1-1] が発表され、条件付きで公道を走れるよう規制を緩める方針を打ち出している。そのため各社の開発も加速しており、新たな車両の開発やコンセプトカーの発表などが盛んに行われている。今後の本格普及に向けては、交通の抜本的な省エネルギー化に資することが期待されている。さらに、これらの車両はエネルギー・環境上有益であることにとどまらず、たとえば、近所に買い物に行く場合の利用や配達事業者の近距離運搬および小口物流の効率化、旅行者による観光地での利用などが予想されている [1-2]。また、観光地にて積極的に利用される場合や所有形態として集合住宅などでのカーシェアリングでの利用意向も高く、多くの副次的便益があることが報告されている [1-1]。自動車メーカーと自治体により、超小型電気自動車の大規模なカーシェアリング実証実験が始まるなど、今後普及が拡大すると考えられる。さらに、これらの車両は特に高齢者にとって望ましい移動具であるという報告 [1-3] ~ [1-5] がされており、高齢化の進行とともに超小型電気自動車に対する需要がますます増大することが予想される。

一方、インホイールモータによってダイレクトドライブされ、かつシャシ構造がいわゆるスケートボード型を有する電気自動車が将来的に主流になることが予想されている。2001年に General Motors 社から発表されたコンセプトカー AUTOmomy では、電気自動車のモータ搭載位置の自由度を生かし、4輪のホイール内部にモータを内蔵し、バイワイヤシステムと組み合わせてエンジンルームを持たないスケートボード状の走行システムを提案している [1-6] , [1-7]。このような技術は車内スペースの確保がしやすくなるため、近距離移動をメインとする通勤の付加価値を向上させる事ができ、キャビンの造形に大きなインパクトをもたらすことが予想される。たとえば、図 1-1 に示すように座席の設置が自由になることや運転席を任意の場所に配置できることから、好みのカウルを自由に装着できる車両デザインが可能となる。現在、タケオカ自動車工芸から発売されている超小型電気自動車フレンドリーエコは上述したようなコンセプトに近い車両となっており、図 1-2 に示すように、車室内がフラットであることから電動車椅子に乗車したままで超小型電気自動車を運転することができる車両である [1-8]。また、本車両はアクセル、ブレーキはペダル式ではなく、レバーにより操作することが可能な日本初

の福祉型超小型電気自動車である。自動車利用の多様なニーズに応じることのできるニューモビリティの開発が今後増加することが期待される技術である。

超小型電気自動車は通常の乗用車とは異なり、路地や未舗装路への乗り入れが容易である。また、市場調査によればこれらの自動車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[1-1]。このことから、段差や凹凸の多い道でも安全・快適に走行するためのシステム構築は不可欠である。さらに、高齢者の超小型電気自動車に対する意識調査では乗り心地が悪いため利用したくないという意見もあると報告されている[1-9]。また、赤松[1-10]は特に高齢者の身体機能低下から見たニューモビリティ技術の課題として、乗り心地と快適性を挙げている。高齢者のためのニューモビリティは視野の安定性など高齢者の認知機能の面において、これまで以上に振動低減の必要があり、これに対応した車体構造やシート構造の必要性について言及している。

上述した問題の解決方法として本研究ではリニアモータの一種であるボイスコイルモータ用いたアクティブシートサスペンションを搭載し、乗り心地改善を行っていく。超小型電気自動車はその車両が非常にコンパクトであるために、あまり大掛かりな装置の改良を行うことができないという制約がある。また、電気自動車におけるバッテリー容量の制約上、車両の質量をすべて支えて4輪のサスペンションを制御する従来のアクティブサスペンションシステムよりも消費電力を削減することができ、超小型電気自動車の乗り心地向上技術における大きなメリットであるといえる。本研究では超小型電気自動車の有用性を考慮したアクティブシートサスペンションの制御について検討を行った。

一方、実用的な自動車が誕生してから100年ほどになるが交通にまつわる多くの発明がなされ、公共交通としての鉄道、パーソナルな乗り物としてオートバイ、自動車などと移動手段として多くの選択肢を持つようになった。また、2020年には国内メーカーが自動運転自動車を発売するという発表もされており[1-11]、[1-12]、自動車の高機能化は革新的なステージを迎えている。このように多様化する自動車関連技術の中において情報通信技術の発展と融合した新たなモビリティ技術を構築していくことが重要である。個人や個別の移動手段の詳細な情報を瞬時に収集し、大量のデータを分析して特徴量を抽出し、リアルタイムに情報提供をすることも可能となってきた。今後は情報提供のみならず人間の能力を補完し、制御することも現実的になりつつある[1-13]。

従来、乗り心地の向上をさせる制御においては、種々の使用条件を考慮して加速度の低減のみを目的とすることが多かった。しかしながら加速度の低減が必ずしも最良の乗り心地であるとは限らず、その人の乗り心地の好みや日々の

体調や気分あるいは運転条件などによるその時の心理状態など運転者、乗員に合わせた制御が必要となると考えられる。本研究ではアクティブシートサスペンションのシステムに運転者一人一人の乗り心地感覚やその時の心理状態を反映させることを目的として、走行中の生体情報をリアルタイムに取得し、それをフィードバックすることにより振動を制御することで乗り心地を向上させる手法に関して提案し、その有用性について検討を行った。まず、リアルタイムの生体情報から心理情報を推定し、運転座席の加速度などの物理情報と総合して乗り心地に関する評価を分析・整理を行った。さらに、超小型電気自動車における乗り心地改善を座席のアクティブ制御によって実現するために、制御系に生体情報をフィードバックすることで最適な運転環境を提供できる高付加価値・多機能シートの開発を試みた。

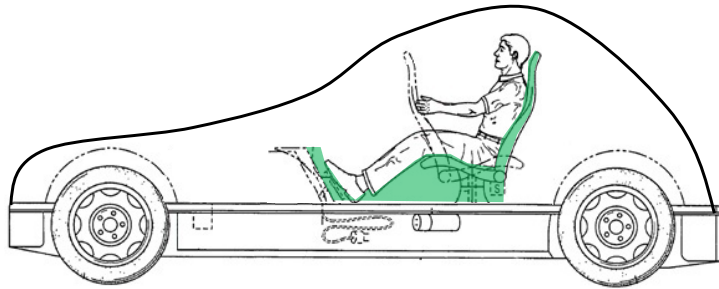
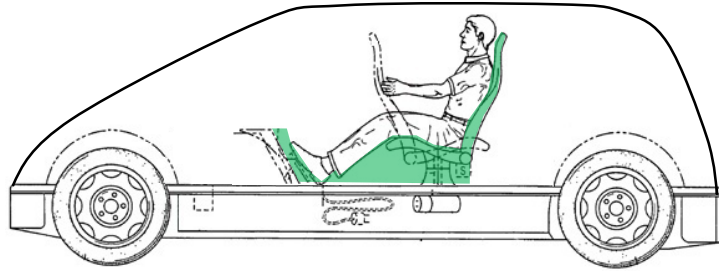
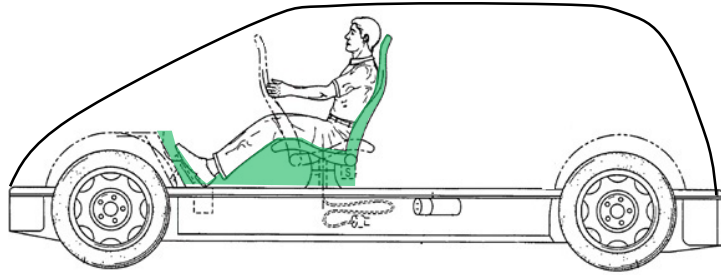


図 1-1 スケートボード型車両による車室内空間の自由度の増加



図 1-2 電動車椅子のまま乗車可能なタケオカ自動車製フレンドリーエコ

1.2 従来の研究

本研究にて提案する超小型電気自動車に対するアクティブシートサスペンションシステムの特徴を明確にするため、従来行われてきた研究に関して詳細に述べる。本研究に対する先行研究として超小型モビリティの運転操作や乗り心地に関する研究およびアクティブな乗り心地制御に関する研究、心理・生体情報を用いた乗り心地などの評価に関する研究についてその概要を述べる。

1.2.1 超小型モビリティの運転操作や乗り心地に関する研究

1.1 節にて述べた超小型モビリティの需要の増加という背景から、超小型モビリティの運転操作や乗り心地に関する研究が盛んになってきている。以下ではそれらの研究開発状況を理解するため、現在研究が行われている超小型モビリティの運転および乗り心地性能向上に関する研究について述べていく。

- ・ポンサトーンら [1-14] ～ [1-16] は超小型電気自動車を用いた自動運転システムの開発を行っている。超小型電気自動車が高齢者対応のモビリティ手段として注目されており、高齢ドライバーによる事故が増加しているという背景から、予防安全技術として低速域の自動運転システムの提案と実証実験を行っている。
- ・高木ら [1-17] は運転時の身体的・精神的負担の軽減に注目し、高齢者の生活、能力に適した車両構造を超小型電気自動車にて設計・開発しようと試みている。車内センサによる運転者の挙動観測から運転意図を推論すると同時に、外界情報とともに危険を予測し、車両の安全性を保証するための運転支援システム実現のためのコンセプトを提案している。
- ・荻野ら [1-18] はアクティブセーフティ技術としてスキッド制御の主要デバイスであるアンチロックブレーキシステムを超小型電気自動車に搭載する試みを行っている。

これらのように、超小型電気自動車の運転操作や乗り心地に関する研究は積極的におこなわれているが、入力される振動による乗り心地劣化への対策に関しては、行われていないのが現状である。

1.2.2 アクティブな乗り心地制御に関する研究

サスペンションに要求される性能は乗り心地および接地性の確保や車体姿勢の保持などがある。アクチュエータによる制御力が加わらないパッシブサスペ

ンションでは、ばねおよび減衰の特性を適切に設定することでそれに対応しているが、ばねと減衰から構成される要素の最適化だけでは性能向上に限界がある。たとえばばね特性を小さくすると乗り心地の改善が期待できる反面、車体のバウンス、ロール、ピッチなどの車体姿勢変化が増大する。また、同様にダンパの減衰力を小さくすると一般に乗り心地性能は改善されるが、動的な車体姿勢変化が大きくなり不安定になる。このようにパッシブサスペンションのばね・減衰特性の設定はトレードオフの中で適正な妥協点を見出している。これに対してアクティブ制御は車両の状態量から算出される制御量に基づき、外部のエネルギーを利用してサスペンションの変位、速度、反力を制御しようとするものである。以下では、サスペンションの研究開発状況としてアクティブサスペンションに適用されるアクティブ制御に関して述べ、さらに輸送機械に乗り心地制御を搭載したシステムの研究開発状況に関して述べる。

サスペンションに適用されるアクティブ制御

近年、国内外の経済状況や社会環境が大きく変化するに伴い、さまざまな制御技術の分野で一層の高性能化、知能化、高付加価値化を志向する動きがみられる。このため、すでに制御技術が適用されているシステムの場合は先端的かつインテリジェントな制御への試みが精力的になされており、制御技術が適用されていないシステムでは制御技術の導入による知能化、高機能化とコスト上昇のトレードオフや制御技術の導入のフィジビリティスタディが検討されている。以下ではアクティブサスペンションの研究開発状況を理解するため、現在研究が行われているアクティブな制御手法について記していく。サスペンション系が路面特性、乗員の体重の変動や生産過程で生じる特性のばらつきを避けられない。また、それらの変動やばらつきに対して一定の性能を保証するという意味でロバストな制御系が望まれている。

- ・野波ら [1-19] はアクティブ振動制御系への μ 設計理論の適用について述べ H_{∞} 制御や μ 設計理論の適用について述べ、 H_{∞} 制御に対する優位性についてシミュレーションで明らかにしている。
- ・谷藤ら [1-20], [1-21] は鉄道車両のアクティブ制振に H_{∞} 制御を適用し車体質量のパラメータ変動に対するロバスト安定性の改善を示しており、 μ 設計を用いることでさらにロバスト性を改善できることも示している。
- ・宇都宮ら [1-22] は乗客の乗り降りによるエレベータのかご質量が時变的に変動する場合や制御設計時のモデル化誤差を陽に扱うために、エレ

ベータ用アクティブ制振技術に対して μ 設計を適用している。

- ・鈴木ら [1-23] は車速の違いが路面外乱による車両挙動変化に及ぼす影響を考慮した制御系設計の構築を行っている。

さらに、Tamboliaら [1-24] や Hamidら [1-25] は自動車の振動特性は走行性能との関係もあることから、ばねとダンパによる受動的な振動抑制に加え、振動の状況に応じて積極的に振動抑制を加えるアクティブサスペンションを提案している。

輸送機械に乗り心地制御システムを搭載した研究開発事例

さらに、本研究にて検討を行ったアクティブシートサスペンションのように、特に自動車において車体すべてを制振するのではなく、乗員や搭載した積荷のみを制振する研究開発事例を列挙する。

- ・猪岡ら [1-26] , [1-27] は救急車の走行時に発生する振動による容体の悪化として、特に減速時に生じる患者の血圧変動を抑制するため、ベッドの傾斜や回転を制御することのできる救急車用アクティブ制御方式ベッドを提案している。
- ・大田ら [1-28] , [1-29] は自動車用のシート各部のクッション特性を能動制御するシステムを提案しており、車両床上から乗員頭部に伝達される振動の加速度を低減するための理論的検討を行っている。
- ・松岡ら [1-30] は車いす利用者の行動範囲を拡大する手段として、一般的に用いられている車いす用リフトや車いす固定装置を備えた車いす車載システム搭載車両における車いす利用者の乗り心地向上を目的とし、車いすおよび車両に追加する免振装置の提案を行っている。感性面と振動面の双方から低減すべき振動を特定し、磁気ばねと金属ばねから構成される免振装置を開発している。
- ・栗田ら [1-31] は防振ゴムで支持した荷台上に生じる共振をボイスコイルモータを用いてアクティブに抑制する方法について、積載量が変化した場合の制振性能などの検討を行っている。
- ・Weら [1-32] はシート下にアクティブサスペンションを追加し、理論解析および模型装置による実験を行い、一般的な乗用車を対象とし路面および内燃機関から受ける比較的小さな振動の低減を試みている。また、Hanら [1-33] , [1-34] とも同様の検討を電気粘性流体を用いたダンパによりシートを制御することを試みているが、十分な振動抑制効果は

得られていない。

以上、乗り心地制御に関する研究は世界中の研究機関、企業により技術開発、製品開発がなされており、その研究事例すべてを網羅することは困難であることから、数例を挙げるにとどめる。快適性向上の要求のため、乗り心地向上の研究が多数報告されているが、これらの研究の大多数はあくまで一般的な乗用車や長距離運転時の疲労低減が要求されるトラックなどの大型車を検討対象としており、その使用用途の範囲である舗装路における走行やエンジンなどによる比較的微小な振動を取り扱っている。超小型電気自動車は特に、ばね上質量が小さいため乗り心地に影響する振動特性が乗用車・大型車とはかなり異なるという違いがあるが、本研究のように超小型電気自動車に対して検討を行った事例は著者の知る限り極めて少ないように思われる。

1.2.3 心理・生体情報を用いた乗り心地などの評価に関する研究

自動車メーカーにおいては乗り心地の評価に習熟したテストドライバーによる官能評価が乗り心地評価として確立されてきた。特に車両の運動性能（操縦・安定性能、乗り心地性能、音振性能、制駆動性能）の評価は基本的にドライバーの感覚による官能評価に大きく依存しているのが現状である [1-35]。しかしながら、より客観的な評価手法が求められるようになり、計測物理量による官能評価値の定量化、単軸振動に暴露された時の振動感受性について多くの研究がなされ [1-36] ～ [1-38]、要求に対する研究開発が盛んに進められている。

また、テストドライバー一人の官能評価によって定性的に乗り心地の評価を行っている場合に対して車両の性能機能の評価に客観性を持たせるため、官能評価を生体信号などにより定量的に表現する研究も行われている [1-39]。

以下では乗り心地評価の研究開発状況を理解するため、現在研究が行われている官能評価ならびに乗り心地の定量化に関する研究について述べていく。

- ・王ら [1-40] は自動車進行方向の速度変動に関する乗り心地評価のために自動車の進行方向の加速度、ジャークおよび客観的な指標を定式化することを試みている。
- ・藤田 [1-41] は路面からの入力による励振の影響は、疲労、頭痛、肩こり、腰痛、視力の低下などといった症状に現れてくることを指摘し、シートの重要性を述べている。
- ・土居ら [1-42] が突起乗り越しのような過渡的な振動について実車走行実験により、計測物理量と人間の官能評価による乗り心地の定量評価を

試みている。フロアとシートの振動と耳元音圧を評価項目とした主成分分析を行い定量計測値と官能評価との関連を報告している。

- ・前田 [1-43] は ISO2631 において人間の健康，快適性，知覚，動揺病に対して各種振動の影響を定量化できていることから，今後は疫学的な情報などを蓄積する必要性を述べている。
- ・武井ら [1-44] は乗用車の振動乗り心地性能を向上させるために，主成分分析および重回帰分析法を用いて，計測物理量による評価因子の抽出と，その評価因子による運転者の主観的な官能評価を客観的に評価できる乗り心地評価式を報告している。

以上のように，快適性向上の要求のため，乗り心地評価の研究が多数報告されているが，その多くが乗用車・大型車を対象とした研究である。

一方，生体情報，心理情報を用いたリラクゼーション系の評価に関する研究などは多数の報告 [1-45] ～ [1-47] があり，その取扱いについては多くの事例が検証されてきた。また自動車をはじめとする輸送機械の分野においても多数報告されている [1-48] ～ [1-55]。生体信号などを用いた乗員の乗り心地などの評価手法に関してもいくつかの研究がおこなわれている。

- ・田口ら [1-56]， [1-57] は自動車運転におけるドライバの疲労について，疲労の主要因の一つの考えられる車両の上下方向の振動を対象として，蓄積的な影響の評価を尿中アドレナリンにより検討している。
- ・茂吉ら [1-58] は高速道路の整備に伴い増加している長距離，長時間運転における肉体的および精神的な生体負担度，疲労，覚醒度の低下に関して心電図の経時変化に関して検討を行っている。
- ・岡本ら [1-59]， [1-60] は胸鎖乳突筋の筋電位の測定により，車両の横方向の加速度が生じるときを対象に実車実験により乗り心地評価を行っている。
- ・有馬ら [1-61] ～ [1-63] は高速旅客船の乗り心地評価について心拍変動解析により求めた交感神経活動指標と副交感神経活動の変化や表情，質問紙による心理的情報などから乗り心地や乗り物酔い発症の推定・評価を行っている。
- ・水野 [1-64] は心電図から長時間運転におけるドライバの運転疲労について検討を行っている。
- ・三野ら [1-65] は脳波および心拍変動を用いて，自動車シートの構造と着座姿勢を変化させたときの生体評価を計測し，ドライバの心身状態評

価を行っている。

- ・柳平ら [1-66] , [1-67] は運転者の居眠りの予測と予防という観点から、眠気の兆候を検知する心拍センサの開発を行っている。しかしながら、眠気の兆候を検知する技術は確立しているが、その情報を制御システムなどにフィードバックするような試みは行われていない。

以上、長時間運転による疲労、眠気、車両進行方向および横方向の加速度に対する乗り心地、自動車シートの構造と着座姿勢に関する検討が行われているが、上下方向の振動加速度に継続的に曝された場合の乗り心地に対して、個人の好みおよび車両乗車時の心理状態を考慮した上で、生理学的指標を用い評価を行おうとしている事例は見当たらない。さらに、これらの生体情報を機械にフィードバックするようなシステムはロボティクスの分野においてはいくつかの報告例 [1-68] ~ [1-71] があるが、輸送機械関連分野における適用事例はないように思われる。

1.3 論文の構成および概要

本論文は「アクティブシートサスペンションを用いた超小型電気自動車の乗り心地改善に関する研究」と題し、5章によって構成されている。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、超小型電気自動車の乗り心地改善における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章は悪路走行時における振動低減効果について検討を行っている。

本章では、まず以降の議論に備えるためにアクティブシートサスペンションのシステムと実験装置の構成について説明している。次に制御対象であるアクティブシートサスペンションのモデル化および定式化を行っている。本章においては最適制御理論と様々な外乱に対してロバスト性を有するスライディングモード制御理論を用いており、最適制御理論とスライディングモード制御理論に関して説明している。

その後、座面加速度の低減効果および実用性の高い制御手法を検討することを目的として超小型電気自動車が容易に乗り入れることが予想される悪路を想定し、波状路と砂利路を用いて振動低減効果について明らかにしている。継続的な振動が車両に入力された際における検討として、まず、アクチュエータに供給するエネルギー量に対する両制御手法の振動低減効果の比較を行っている。次に、波状路を用いて入力される振動の卓越周波数を乗り心地に影響があるとされる4~8Hzの範囲で変化させ、両制御手法の振動低減効果の比較を行っている。さらに、前述の通り超小型電気自動車の利用の際、カーシェアリングが頻繁に行われることが想定されるが、その際に重要であると考えられる運転者体重が変化した場合のロバスト性に関する検討を行う。これらの路面振動の入力周波数変動および体重変動の各実験においても供給エネルギー量に対する各制御手法の振動低減効果について言及し、実用性および有用性に関して検討している。

第3章は段差通過時における制御性能について検討を行っている。

高齢者の身体機能低下から見た超小型電気自動車技術として車体振動の増加に伴う視野の安定性の欠如、頭部挙動の補償機能の低下などが課題として挙げ

られている通り、頭部に受ける衝撃の低減が必要であることから、振幅が比較的大きく過渡的な衝撃が入力されるような場合について検討を行っている。様々な場所に乗り入れることが容易な超小型電気自動車であるが、特に、自宅や商業施設の駐車スペースから車道に向かう際、歩道を通過して車道に降りることが頻繁にあると予想される。この歩車道境界の段差を降下するとき大きな衝撃が入力される。本章ではこのような場合を想定し、アクティブシートサスペンションにより、乗員の頭部に受ける衝撃の低減効果について言及している。なお、検討の方法として、前章までの加速度に加え、頭部が受ける負担度を頭部を支える筋肉である胸鎖乳突筋の筋電位から測定し、評価を行っている。そのため筋電位の測定方法およびデータ処理方法とその評価方法について述べている。また、測定した加速度と筋電位の相関についても言及し、さらに被験者の主観的な筋負担についても測定を行いこれにより検討を行っている。これにより、アクティブシートサスペンションが、頭部に受ける衝撃や負担度を低減させる効果があるのかについて明らかにしている。

第4章は運転者の心拍変動を用いた制御手法の提案を行っている。

前章では、超小型電気自動車走行時における肉体的な負担感を生体情報である筋電位を用いることにより定量化を行っているが、本章では走行時における運転者の気分や心理状態を、心電図を測定することにより得られる心拍変動から交感神経系および副交感神経系の活動を推定することで定量的に評価する方法について述べている。さらにその評価方法を基に運転者のリアルタイムの心理状態を制御系にフィードバックする「RRI-SW (RRI-Switching) 制御」の提案を行い、その有用性について述べている。

まず、自律神経系と心電図および心拍変動の関係に関して整理を行っている。次に、生理情報を用いた制御を行うための基礎的な検討として車両の振動が運転者の乗り心地に与える影響について心拍変動を用いることにより、リアルタイムに取得、評価する方法について検討している。この結果より運転中の交感神経系および副交感神経系の活動を心拍変動であるRRIから推定し、RRIを用いた乗り心地評価手法について述べている。さらに、これを基に加速度などの物理情報のみをフィードバックする従来の制御手法に加え、運転者の生体情報を測定し、日々の体調や運転条件などによる気分などの心理状態を制御に取り入れることを目指した。その初期段階として運転者の心拍変動をフィードバックすることにより、ゲインの切り替えを行うアクティブシートサスペンションの制御手法に関して提案をし、その有用性について述べている。

第 5 章では本論文の結論を述べている。第 2 章から第 4 章までに得られた本研究の成果を総合して述べると共に、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

悪路走行時における 振動低減効果

2.1 はじめに

本章では、まず検討で用いたアクティブシートサスペンションのシステムと実験装置の構成について説明する。次に、制御対象であるアクティブシートサスペンションのモデル化および定式化を行う。本研究ではアクティブ制御することにより乗り心地改善を実施しているため、制御システムに対して適用した制御理論について説明し、制御理論をアクティブシートサスペンションシステムに適用する意義を明らかにする。なお、本章においては最適制御理論と様々な外乱に対してロバスト性を有するスライディングモード制御理論を用いており、最適制御理論とスライディングモード制御理論に関して説明する。

乗り心地に影響する振動は上下方向に対して 4~8Hz の加速度が大きく作用するということが ISO2631 の等感覚曲線 [2-1] や Janeway の乗り心地限界曲線 [2-2] などによって提示されている。これに加えて、超小型電気自動車容易に乗り入れることが予想される悪路を想定して、波状路と砂利路を用いて振動低減効果について検討を行う。座面加速度の低減効果および実用性の高い制御手法を検討することを目的とし、定常的な振動が車両に入力された場合を想定して以下の検討を行う。

- (1) アクチュエータに供給するエネルギー量に対するそれぞれの制御手法の振動低減効果の比較を行う [2-3] ~ [2-8].
- (2) 入力される振動の卓越周波数を乗り心地に影響があるとされる 4~8Hz の範囲で変化させ、両制御手法の振動低減効果の比較を行う [2-3].
- (3) 前述の通り、超小型電気自動車の利用の際、カーシェアリングが頻繁に行われることが想定されるが、その際に重要であると考えられる運転者体重が変化した場合に対するロバスト性に関する検討を行う [2-3], [2-9] ~ [2-12].

なお、これらの路面振動の入力周波数変動および体重変動の各実験においても、供給エネルギー量に対する各制御手法の振動低減効果について言及し、実用性および有用性に関して検討する。

シートサスペンションに限らずアクティブ振動制御の分野においては、ファジィ推論 [2-13], H_{∞} 制御理論 [2-14], μ シンセシス [2-15], など様々な制御手法を用いて検討がなされており、それによる乗り心地改善に関しても言及されている。本章ではロバスト制御の中でも制御系が設計しやすいスライディングモード制御を用いた [2-16], [2-17]. システムに対して適用したスライディ

ングモード制御理論は状態を超平面上に拘束することにより、モデル化誤差、パラメータ変動、外乱などの影響を受けることが無くなり、状態は理論上完全に不変となることが最大の特徴として挙げられる。H_∞制御に代表される線形ロバスト制御理論では比例制御のために振動発生の初期段階において大きな制御力を加えることは困難である。しかしながら、非線形ロバスト制御理論であるスライディングモード制御理論においては機敏にかつ適切に対象に制御が働き、状態を超平面に拘束することによって応答が悪くなる前にすべて処置することが可能である。以上の様な特徴を有していることから、本研究ではアクティブシートサスペンションの制御システムに対してスライディングモード制御理論を用いることにした。また、現代制御において最も典型的な最適制御理論も用い、両制御手法による悪路走行時における振動加速度の低減効果について比較を行った。

2.2 アクティブシートサスペンションとモデリングおよび状態方程式

実験には1人乗り用の超小型電気自動車（トヨタ車体製 エブリデーコムスベーシック）を用いた。車両の外観を図 2-1 に示す。この車両は家庭用電源 AC100V にてコンセントから充電を行うことができる。また、実際に一般道を走行している実績がある。なお、本車両は後輪に搭載されたインホイールモータにて駆動する。

この車両の座席部に図 2-2 に示すアクティブシートサスペンションを搭載した。アクティブシートサスペンションの着座部はアルミ板を使用し、4本のコイルスプリングによって支え、8本のリニアスライダにより上下振動のみに拘束している。制御用アクチュエータには高精度・高速制御の得られやすいボイスコイルモータを採用した。ボイスコイルモータはリニアモータの一種であり、磁石を内蔵した磁気回路と実際に力を発生するコイル部の2つの部品から構成され、コイルの移動を支える直線軸受を持たない構造である。ボイスコイルモータの特徴は回転モータと比較して①直接的に直線運動が得られること、②制御対象の剛性を高くできること、③バックラッシュが無いこと、④①～③の結果として高精度・高速制御が得られやすいこと、⑤ダイレクトドライブによるシステムの簡略化、⑥摩擦部が無いことによりメンテナンスフリーとなるなどが挙げられる。実験で用いた超小型電気自動車およびボイスコイルモータの仕様を表 2-1 に示す。

アクティブシートサスペンションのフィードバック制御システムの概略図を図 2-3 に示す。図 2-2, 2-3 に示したコイルスプリングによって運転者質量を支持すれば静的平衡状態が存在する。そこからの変位を y 、その微分値を \dot{y} とするとき、制御に用いる y 、 \dot{y} は加速度ピックアップからの信号をコンピュータ内でデジタル積分することで検出している。さらにボイスコイルモータに流れる電流を検出し、これらの観測量を用いて制御電圧をコンピュータで計算し、ボイスコイルモータを駆動して制御力を発生させる。

屋外走行実験を行うため加速度ピックアップのチャージアンプ、DSPなどの周辺機器および周辺機器とボイスコイルモータ駆動用のバッテリーを車両後部に搭載した。なお、車両走行用のバッテリーとボイスコイルモータ駆動用を含む制御用のバッテリーは独立している。また、専用バッテリーなども含めたアクティブシートサスペンションシステムの全質量は約 24kg である。

前述のようにシートはコイルスプリング、リニアスライダ、これらに並列に設置したボイスコイルモータにより支持されている。また、クッションなどは

用いておらず座面の振動が直接運転者に伝達され、運転者とシートは一体に運動すると仮定し、床から上部を制御対象とした 1 自由度システムとしてモデル化を行った。運動方程式は次式のようなになる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = Ki \quad (2-1)$$

ここで各パラメータは以下の通りである。

m : 人間（着座時の脚部などの影響を除いたシートに加わる重さ）とシートの質量の合計値 [kg]

c : リニアスライダの摩擦など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 : 推力定数 [N/A]

y : シートの絶対変位 [m]

i : 制御電流 [A]

また、ボイスコイルモータの回路方程式は次式のようなになる。

$$L\dot{i} + Ri + K\dot{y} = v \quad (2-2)$$

ここで各パラメータは以下の通りである。

L : ボイスコイルモータ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]

式(2-1), (2-2)を整理し、状態方程式化すると次式のようなになる。

$$\dot{\mathbf{y}}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{y}_s + \mathbf{B}_s v \quad (2-3)$$

ただし、

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

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

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



図 2-1 超小型電気自動車（トヨタ車体制エブリデーコムスベーシック）

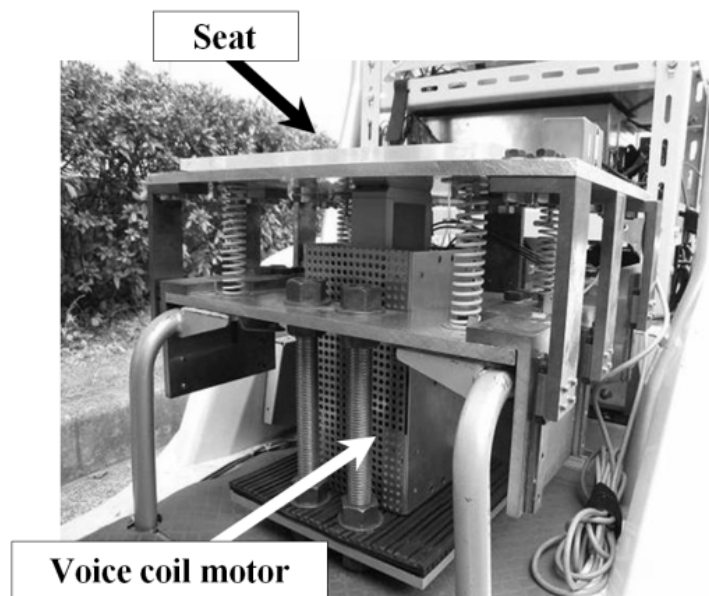


図 2-2 アクティブシートサスペンション

表 2-1 本実験で用いた超小型電気自動車とボイスコイルモータの仕様

Ultra-compact electric vehicle	EVERYDAY COMS BASIC (Toyota Auto Body Co.,Ltd)	
	Total weight of vehicle	325 kg
	Total length	1935 mm
	Whole width	955 mm
	Total height	1600 mm
	Wheelbase	1280 mm
	Tread	840 mm (Front wheel) 815 mm (Rear wheel)
Voice coil motor	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

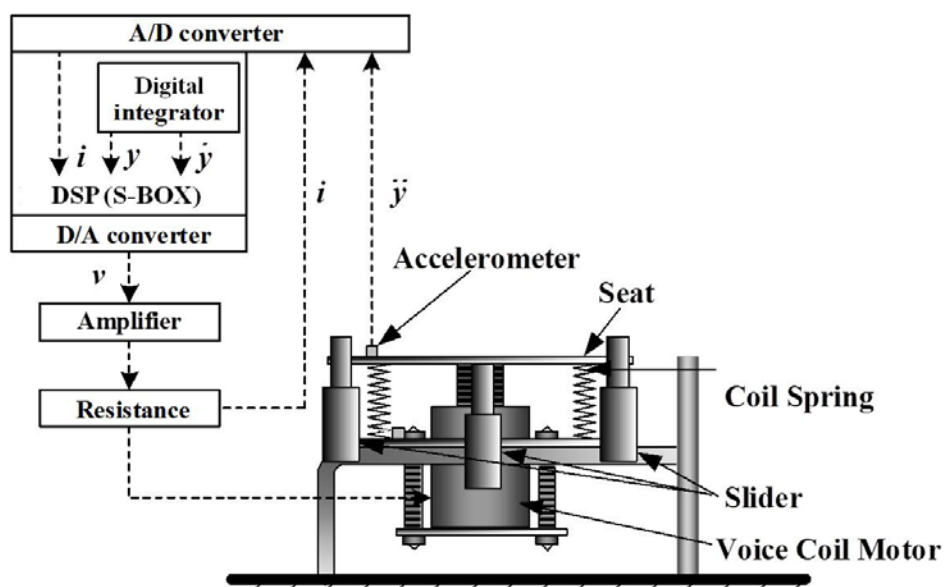


図 2-3 アクティブシートサスペンションの制御システム

2.3 アクティブシートサスペンションに適用した制御理論

制御手法は最適制御理論とスライディングモード制御理論の2通りを用いた。フィードバック制御を実施する際、アナログ制御を用いるとノイズに弱く、高度な制御が困難であることより、本研究ではデジタルシグナルプロセッサ (DSP) を用いたデジタル制御を行う。現在様々な工業製品においてフィードバック制御を実施する場合、制御システムは古典制御理論に基づく PID 制御 [2-18] により構築されることが多い。しかしながら PID 制御では技術者の経験、すなわち勘により制御器が設計されており汎用性がないことなどから本研究では現代制御理論である最適制御理論 [2-16], [2-19] ~ [2-21] を用いた。最適制御理論はある状態方程式のもとで初期点での状態を満たすような終端点に移す制御ベクトルが存在し、その中で微分方程式 (状態方程式) の解に沿って評価汎関数を最小にする制御ベクトルを求めることを目的とした理論である。この最適制御理論は制御系の構造を変化しない不変構造制御理論、すなわち線形制御理論に属し、線形制御理論は H_∞ などのロバスト制御を除くとモデルの不確かさ、パラメータ変動や外部からの外乱を積極的に取り扱えない理論となっている。

ここで本研究の制御対象であるアクティブシートサスペンションの質量は運転者が変更することが考えられるためコントローラ設計質量を一意に定めることが難しいとが考えられる。そのために最適制御理論では線形制御理論であることより質量変動に対してロバスト性は有していない。そこでアクティブシートサスペンションの制御システムに質量変動に対してロバストな制御系の適用が求められることになる。本章において質量変動に対してロバストなスライディングモード制御理論 [2-16], [2-17], [2-22], [2-23] を制御システムに適用している。このスライディングモード制御理論は制御系の構造を変える可変構造制御系 (Variable Structure Control System) に属し、「非線形制御」の性質と「応答制御」両方の性質を持ち合わせるという特徴を有する。さらにスライディングモード制御理論はマッチング条件を満たす場合、スライディングモード制御理論の微分方程式はモデル化誤差と外部からの外乱から完全に独立となる。このようにスライディングモード制御理論はモデル化誤差や外乱に対して不変であるといわれている。

以下では制御用コンピュータに実装することから離散時間系制御理論について述べる。

最適制御理論は以下に示す2次形評価関数 J_d を最小とする制御電圧 v_d^{opt} を求

める．なお添え字 \mathbf{d} は離散化を表している．

$$\mathbf{v}_d^{\text{opt}} = -\mathbf{F}_d \mathbf{y}_d \quad (2-4)$$

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [\mathbf{y}_d(j)^T \mathbf{Q}_d^{\text{opt}} \mathbf{y}_d(j) + r_d^{\text{opt}} v(j)^2] \quad (2-5)$$

ここで \mathbf{F}_d : フィードバック行列, $\mathbf{Q}_d^{\text{opt}}$: 変位 \mathbf{y} , 速度 $\dot{\mathbf{y}}$ およびボイスコイルモータへの入力電流 i に関する重み係数を要素とする重み行列, r_d^{opt} : 制御電圧に関する重み係数である．

本研究ではスライディングモード制御理論における切り替え関数を切り替え超平面である \mathbf{S}_d を用いて次式で表す．

$$\sigma(j) = \mathbf{S}_d \mathbf{y}_d(j) \quad (2-6)$$

\mathbf{S}_d の設計法としてシステムの零点を安定にする方法を用いる [2-16], [2-17]．なお, その際の重み行列を $\mathbf{Q}_d^{\text{smc}}$, 重み係数を r_d^{smc} とする．また, 制御系の設計には最終スライディングモード法を用いる．超平面の両側で制御入力を切り換え, 状態を超平面に拘束する非線形項 v_{nl} と超変面上の状態を原点まで滑らせる線形項 v_{eq} は次のように求める．

$$\left. \begin{aligned} v^{\text{smc}}(j) &= v_{\text{eq}}(j) + v_{\text{nl}}(j) \\ v_{\text{eq}}(j) &= -(\mathbf{S}_d \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{S}_d (\mathbf{\Phi} - \mathbf{I}) \mathbf{y}_d(j) \\ v_{\text{nl}}(j) &= -\eta \frac{\|\sigma(j)\|}{\|\mathbf{S}_d \mathbf{\Gamma}\|} \text{sgn}\{\sigma(j)\} \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

ただし,

$$\mathbf{\Phi} = \exp(\mathbf{A}_s T_s), \quad \mathbf{\Gamma} = \int_0^{T_s} [\exp(\mathbf{A}_s \tau)] d\tau \mathbf{B}_s$$

本システムではスライディングモード制御のマッチング条件 [2-17] が満たされていないことから、パラメータ K , m , c , k が変動した場合にはシステムのロバスト性は保証されない。しかしながら、2.2 節で述べたようにボイスコイルモータ制御電流のフィードバックを行うことで式(2-2)における電流の1次遅れや逆起電力の影響を小さくしているため、見かけ上マッチング条件を満たすようなモデリングとなっている [2-24]。

2.4 制御実験

2.4.1 実験装置諸元

本実験装置において、シート表面上に加わる運転者の体重は足がペダルなどに接触していることによってその約 80~90 %となる。本実験では体重 60 kg の運転者のシート表面上に加わる力を実測し、その質量 51.0 kg を用いた。また、リニアスライダの摩擦などを含めた見かけの減衰力、ボイスコイルモータの推力定数などを測定するためにシート単体（ボイスコイルモータ設置済み）に対して性能評価実験を行った。これらによって求めた実験装置の各パラメータ値を表 2-2 に示す。

また、本章で用いた最適制御およびスライディングモード制御の各重み係数も表 2-2 に示す。これらの重み係数はシミュレーションによって試行錯誤的に探索し、その中で実験において制御が安定かつ最も効果のある値を本システムに対する各制御手法の最高性能として採用した。なお、最高性能の制御器よりも大きな電圧を出力する制御器では安定した制御を行うことができない。

さらに、上述のパラメータによって構成される制御器の出力を基準とし、最適制御では Q_d^{opt} は一定とし、制御電圧に関する重み係数 r_d^{opt} を $10^{3.6}$, $10^{3.8}$, $10^{4.0}$, $10^{4.2}$ と大きく設定することで 5 種類の制御器を準備した。また、スライディングモード制御では制御電圧を 0.8, 0.6, 0.4 倍することによって 4 種類の制御器を準備した。

表 2-2 各パラメータと制御器の重み係数

Body and seat mass	$m = 51.0 \text{ kg} + 13.2 \text{ kg}$
Seat suspension	$k = 24911 \text{ N/m}$
	$c = 160 \text{ Ns/m}$
Voice coil motor	$L = 0.03 \text{ H}$
	$R = 8 \Omega$
	$K = 65 \text{ N/A}$
Sampling time	$T_s = 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$
Optimal control	$Q_d^{\text{opt}} = \text{diag}(10^{11.4}, 10^7, 10^{5.8})$
	$r_d^{\text{opt}} = 10^{3.4}$
Sliding mode control	$Q_d^{\text{smc}} = \text{diag}(10^{8.2}, 10^{7.2}, 10^5)$
	$r_d^{\text{smc}} = 10^{5.9}$
	$\eta = 1$

2.4.2 実験方法

走行実験は体重 60 kg のドライバーが乗車し、波状路と砂利路を走行することにより行った。波状路は図 2-4 に示すように硬質ゴム板(幅 30 mm, 高さ 6 mm, 長さ 150 mm)を車両の進行方向に設置した。本研究で用いているような超小型電気自動車は軽自動車など従来の小型車両と比較して軽量, 重心高であることから, 路地, 未舗装路など乗り心地の劣化が著しい悪路では安全性, 操縦性から比較的低速にて走行することが予想される。そのため, 供給エネルギーに対する制振性能および体重変動の検討に関しては走行速度を約 5 km/h とした。また, 入力外乱の卓越周波数がこの速度で直進走行した場合, 5 Hz となるよう硬質ゴム板を 320 mm 間隔で並べた。なお, この間隔は前後輪が硬質ゴム板を同時に乗り上げるように設定している。さらに, 周波数変動に関する検討では上記波状路を用いて 4~8 Hz の範囲でそれぞれ卓越するように車両の走行速度を変更して実験を行った。一方, 超小型車両の頻繁な乗り入れを想定した悪路の中でも最も乗り心地の悪化が予想される外乱として図 2-5 に示すような砂利路において各制御手法の有用性について検討を行った。なお, 砂利路の検討においても走行速度は約 5 km/h とした。また, タイヤの空気圧が常に規定値にて一定となるよう走行実験前に確認している。

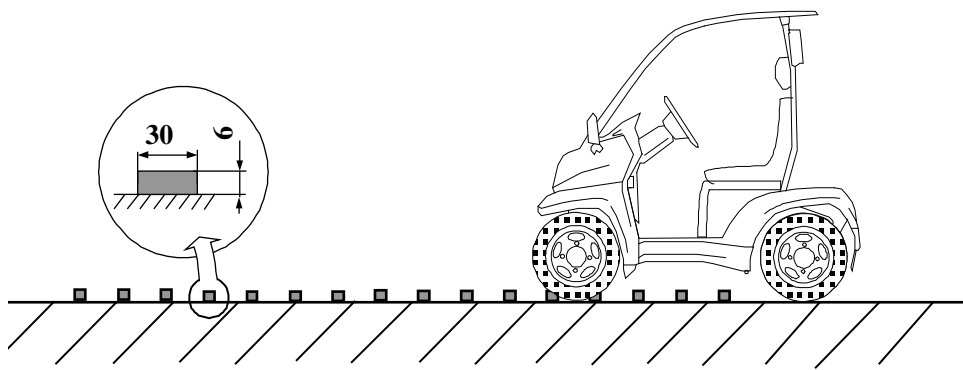


図 2-4 硬質ゴム板を用いた波状路



図 2-5 砂利路

2.5 結果および考察

2.5.1 供給エネルギーに対する制振性能の検討

各制御手法における供給電流に対する制振性能の比較を行う。本検討は波状路と砂利路において行った。両路面における応答は比較的不規則な性質を有していることから（後掲図 2-8, 2-9），それぞれの性能は加速度および制御電流の時刻歴の標準偏差にて評価を行った。各走行路走行時のシート座面絶対加速度の標準偏差と供給電流の標準偏差から作成したトレードオフ曲線を図 2-6（波状路）および図 2-7（砂利路）に示す。▲，●のプロットは走行実験における実測値 10 回の平均値である。また，図中の実線は各制御手法のプロットに対して最小二乗法による近似曲線を示した。比較のために座面と床面が同位相で動く場合（未制御時）の座面絶対加速度の標準偏差（実測値 10 回の平均値）を図中に■として示す。なお，平滑路を未制御にて走行した場合における加速度の標準偏差を測定したところ約 0.2m/s^2 である。図 2-6, 2-7 より各走行路において最適制御，スライディングモード制御適用時は電流が増加するにともない加速度が低減しており，アクティブシートサスペンションの有効性が確認できる。

図 2-8 に波状路走行における (a) 未制御時，(b) 最適制御適用時，(c) スライディングモード制御適用時のシート座面絶対加速度の時刻歴とパワースペクトル密度の一例を示す。同図は図 2-6 中の波線部分にて示した最も振動低減効果が高く，電流の標準偏差が同程度 (0.4 A) の結果である。未制御時のシート座面加速度の標準偏差を 100 % とすると，最適制御適用時は約 53 %，スライディングモード制御適用時は約 48 % であり，本条件においてはほぼ同等の振動低減効果があることを確認できた。また，この時のパワースペクトル密度に着目すると未制御時において路面から入力される振動周波数である 5 Hz にて高い値を示し，両制御手法ともに，それが同程度低減されていることが確認できる。

図 2-9 に砂利路走行時のシート座面絶対加速度とパワースペクトル密度の一例を示す。こちらも波状路と同様に図 2-7 中の波線部分にて示した最も振動低減効果が高かった場合の結果である。その際，電流の標準偏差は両制御手法ともに 0.8 A であった。未制御時のシート座面加速度の標準偏差を 100 % とすると，最適制御適用時は約 78 %，スライディングモード制御適用時は約 68 % であり，10 % 程度スライディングモード制御の振動低減効果が高いことが分かる。さらに，この時のパワースペクトル密度に着目すると未制御において車体の共振周波数である 3 Hz 付近が最も高くなっており，最適制御よりもスライディングモード制御の方が 3 Hz 付近の加速度が低減されていることが確認できる。

なお，図 2-6，2-7 における最も振動低減効果が高い結果以外の場合もその周波数特性は図 2-8，2-9 と同じ傾向を有していることを確認している．

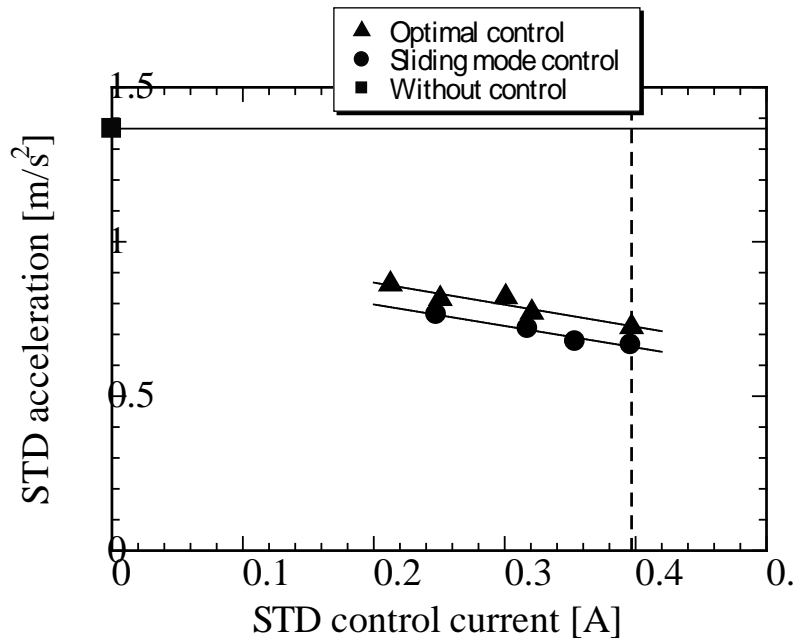


図 2-6 制御電流とシート加速度のトレードオフ線図（波状路）

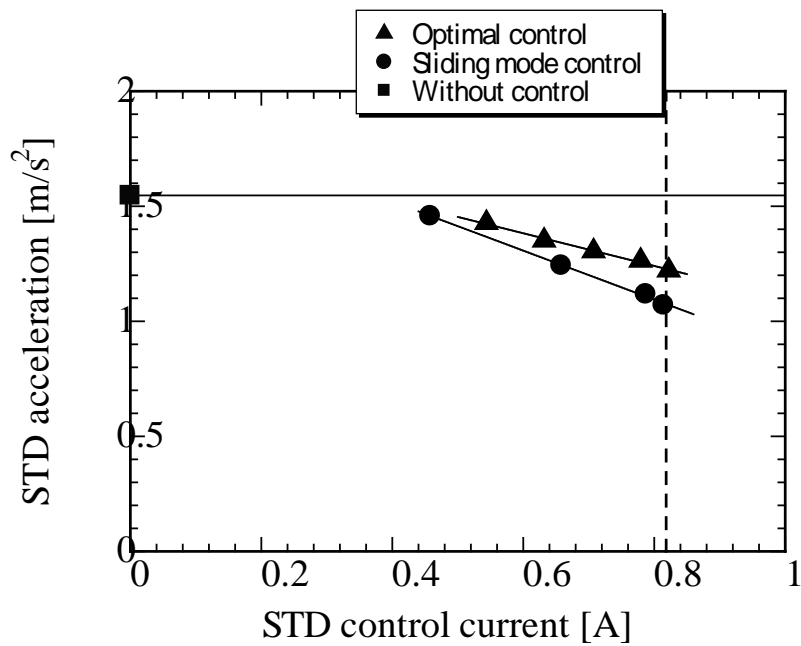
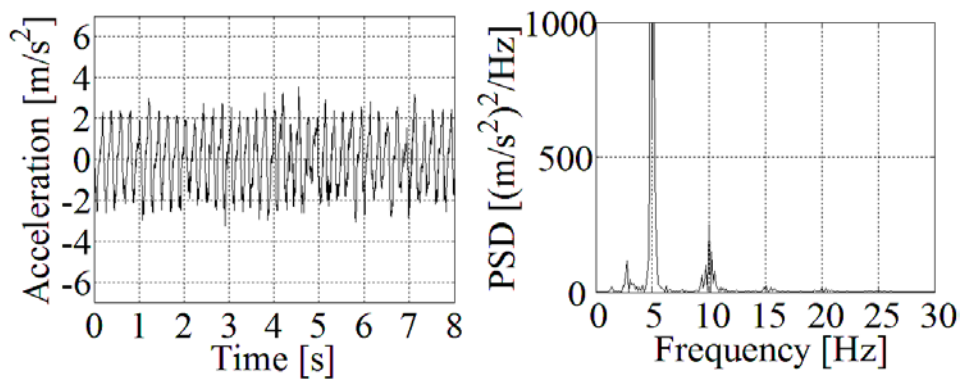
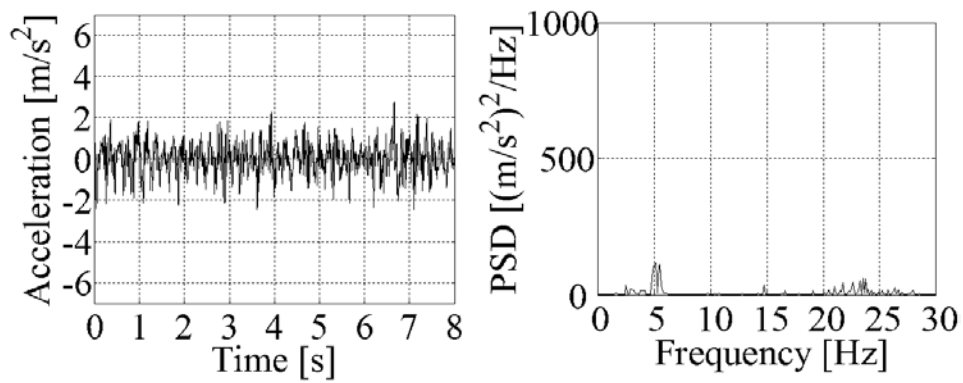


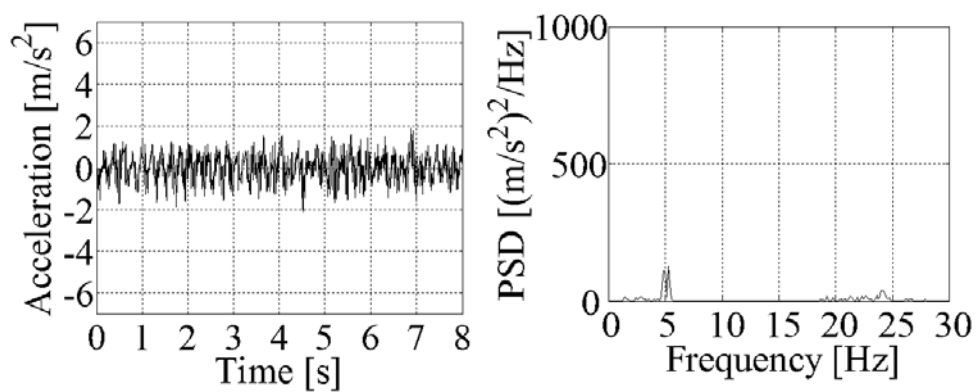
図 2-7 制御電流とシート加速度のトレードオフ線図（砂利路）



(a) 未制御

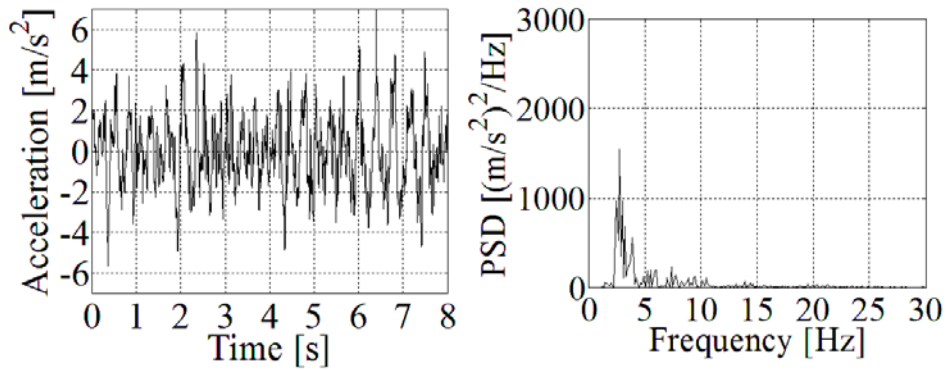


(b) 最適制御 (電流の標準偏差 = 0.4 A)

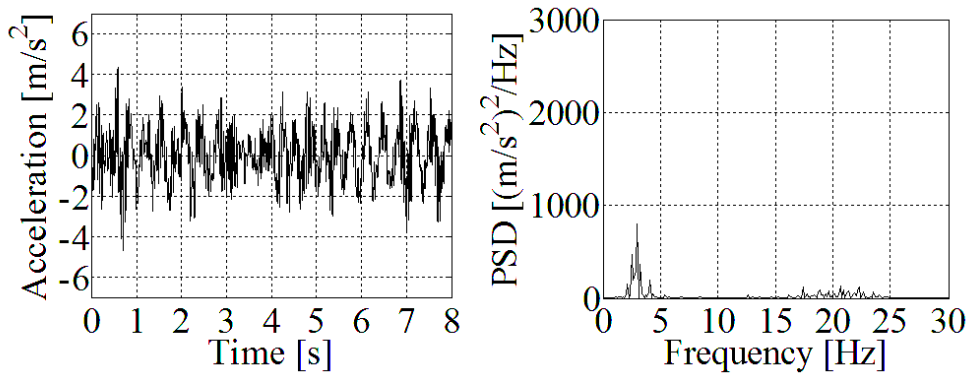


(c) スライディングモード制御 (電流の標準偏差 = 0.4 A)

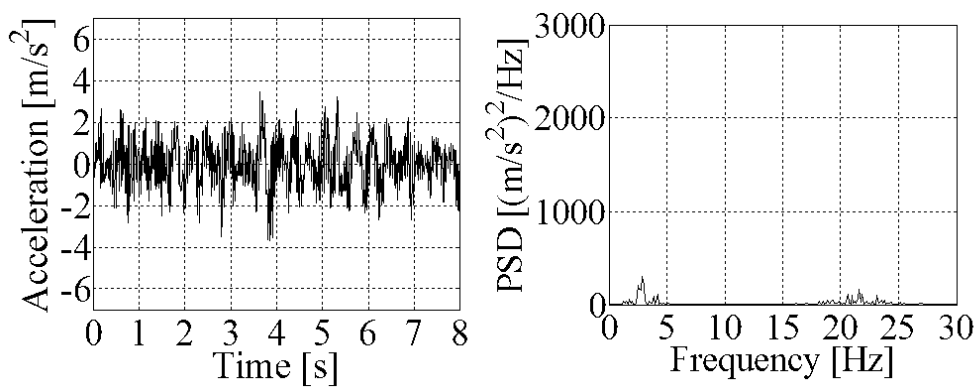
図2-8 加速度の時刻歴とパワースペクトル密度 (波状路)



(a) 未制御



(b) 最適制御 (電流の標準偏差 = 0.8 A)



(c) スライディングモード制御 (電流の標準偏差 = 0.8 A)

図2-9 加速度の時刻歴とパワースペクトル密度 (砂利路)

2.5.2 入力振動周波数の変動に対する制振性能の検討

本項では路面から入力される振動周波数が4～8 Hzの範囲において1 Hz間隔にて制振性能の検討を行う。なお、用いた制御器は2.4節にて示した本システムにおいて最高性能のものである。

図2-10に各入力周波数に対するシート座面の絶対加速度の標準偏差を示す。各プロットは実測値10回の平均値である。また、図2-11はその際の供給電流の標準偏差の平均値である。図2-12の未制御に着目を見ると周波数が高くなるにともなって加速度が上昇していることが分かる。次に、最適制御、スライディングモード制御に着目すると両手法ともに周波数が高くなるにともなって若干加速度は上昇するものの未制御と比較して十分な振動低減効果があることが確認できる。また、図2-13より周波数が高くなるにともなって電流値は上昇していることが分かる。

さらに、両制御手法を比較すると加速度の標準偏差はほぼ同じであるが、電流値はスライディングモード制御の方が平均して約9%低く推移している。これより、スライディングモード制御の有用性を確認することができた。

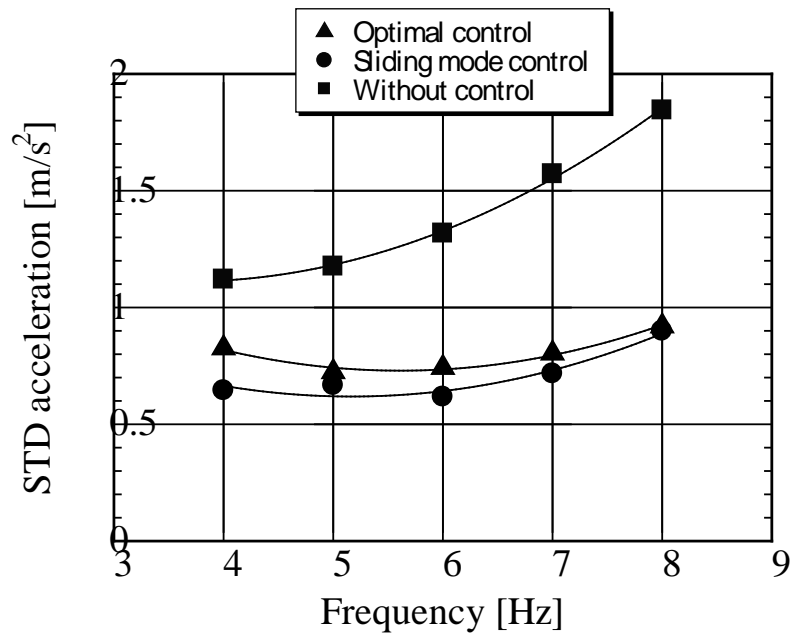


図 2-10 入力される周波数に対する加速度の標準偏差

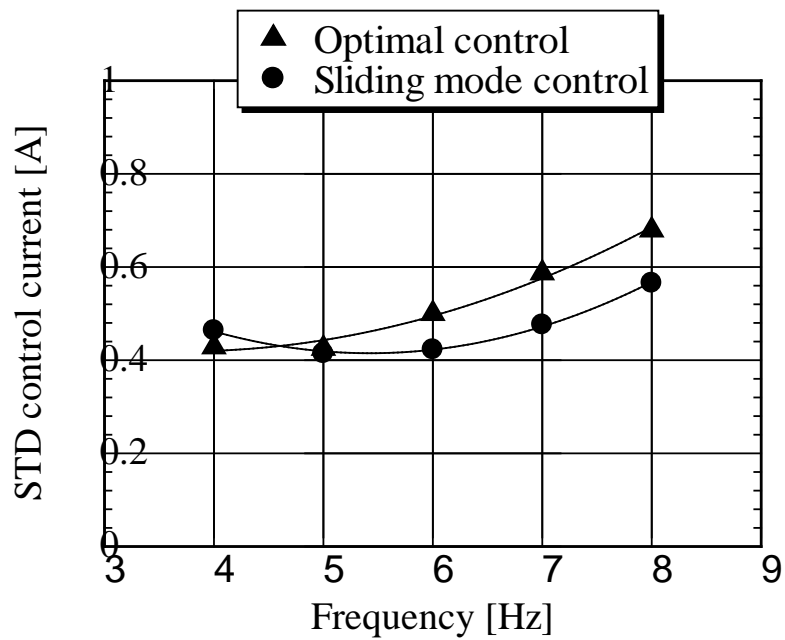


図 2-11 入力される周波数に対する制御電流の標準偏差

2.5.3 運転者の体重が変化した場合に対する制振性能の検討

カーシェアリングなどによりシートに加わる運転者の体重が変化した場合を想定し、振動低減効果とロバスト性について波状路および砂利路にて検討を行う。図 2-12 に示す専用のウェイトジャケットにより 1 個 5 kg の補正用質量を体重 60 kg の運転者の体に固定し、運転者体重を 60 kg～80 kg まで 5 kg 間隔で変化させ、走行実験を行った。なお、各条件において用いた制御器は 2.5.1 項にて示した運転者質量を 60 kg 一定として算出した本システムにおける最高性能のものである。

図 2-13 および図 2-14 に波状路、砂利路における実験結果を示す。縦軸はシート絶対加速度の標準偏差、横軸は運転者の体重である。各プロットは 10 回ずつ行った実験の平均値である。各体重の未制御時を 100 % とすると、波状路における最適制御適用時では全ての体重の平均において約 58 %、スライディングモード制御では約 44 % に低減した。同様に砂利路においては最適制御では約 79 %、スライディングモード制御では約 67 % となっており、両路面、全ての体重においてスライディングモード制御の振動低減効果が高かったことが確認できる。

スライディングモード制御は波状路および砂利路どちらの路面においても制御性能は安定しており、劣化が見られなかった。本システムにおける質量 m の変動は 2.3 節にて述べた通り、見かけ上マッチング条件を満たしていることからロバスト性を有していることが確認できた。

なお、図 2-13、図 2-14 の各プロットにおける制御電流の標準偏差を整理した結果、両路面および設定した全ての体重においてスライディングモード制御と最適制御のエネルギー供給量はほぼ等しかった。これより、スライディングモード制御を適用することでコントローラの設計に用いた質量のモデル化誤差の影響を受けにくい制御を実施することが可能となり、さらに供給エネルギーの面においてもその優位性を確認することができた。



図 2-12 ウェイトジャケット

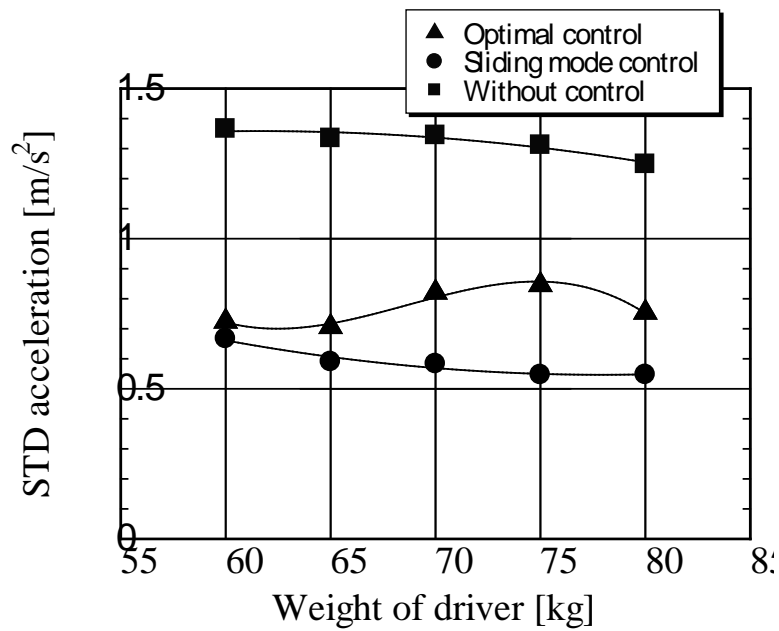


図 2-13 各運転者の体重に対するシート加速度の標準偏差（波状路）

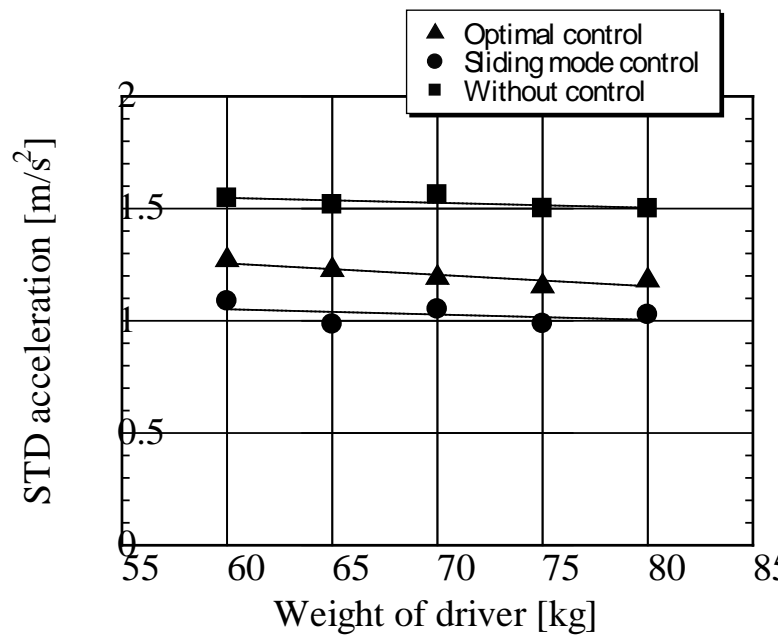


図 2-14 各運転者の体重に対するシート加速度の標準偏差（砂利路）

2.6 まとめ

超小型電気自動車に搭載したアクティブシートサスペンションシステムの有用性を明らかにするために超小型電気自動車が悪路に乗り入れた際に継続的に振動が入力された場合を想定し、波状路および砂利路にて走行実験を行った。最適制御理論とスライディングモード制御理論を適用し、各制御手法の振動低減効果の比較を行った。その結果得られた研究成果は以下の通りである。

- (1) ロバスト性を有するスライディングモード制御理論を適用することで、最適制御理論と比較して本アクティブシートサスペンションシステムに対する有用性を提示することができた。両手法の供給エネルギー量に着目してもスライディングモード制御は実用上、有効な制御システム設計が可能であることを明らかにした。
- (2) 超小型電気自動車におけるカーシェアリングを想定した運転者の体重変動実験においては波状路および砂利路にてスライディングモード制御適用時が最適制御適用時より全ての運転者質量に対して安定した制振性能が得られることが確認できた。さらに、供給エネルギー量もスライディングモード制御の方が低いことから、アクティブシートサスペンションへ適用する際の有用性が確認できた。

第3章

段差通過時における 衝撃低減効果

3.1 はじめに

前章における検討より路面から入力される振動が連続的な場合においては良好な制御性能が得られた。第1章にて述べた通り高齢者の身体機能低下から見た超小型電気自動車技術として車体振動の増加に伴う視野の安定性の欠如や頭部挙動の補償機能が低下することから乗り心地が課題として挙げられている。走行中に入力される比較的大きな振動において頭部の衝撃低減が必要である。

そこで、本章では振幅が比較的大きく過渡的な衝撃が入力されるような場合について検討を行う。様々な場所に乗り入れることが容易な超小型電気自動車であるが、特に歩道から車道へ降りる場合などの段差を通過するとき大きな衝撃が入力される。本章ではこのような場合を想定し、アクティブシートサスペンションによりシート加速度の低減と運転者頭部の衝撃低減効果について検討する [3-1], [3-2]。過渡的な振動が車体に入力された場合における運転者の肉体的な負担感の軽減に関してアクティブシートサスペンションにより座面の加速度を低減させることで、頭部に受ける衝撃や負担度を低減させる効果について明らかにすることを目的とする。なお、検討の方法として前章までの加速度に加え、頭部を支える頸部の筋肉である胸鎖乳突筋の表面筋電位により頭部が受ける負担を定量的に評価を行った。そのため、本章ではまず筋電位の測定方法とその評価方法について述べた。また、測定した加速度と筋電位の相関についても言及した。さらに被験者が頸部に負担を感じる程度の筋力が発揮された場合の筋電位についても測定を行い、この値を用いて段差降下時の負担度を評価した。

3.2 実験方法

本実験において実験車両およびアクティブシートサスペンション制御システムに関しては第2章にて述べたものと同じものを用いた。人体をモデル化し、頭部の衝撃を対象に制御を行う方法も考えられるが、人体のモデル化は個人差が大きくなる。これに加えて本システムでは頭部とシートの両方の衝撃を低減させることが目的であることからシートの制御により頭部の衝撃低減効果について検討を行った。

走行路は図3-1に示すように実験は歩車道境界の段差を想定した高さ50mmの硬質ゴム板を用いた。なお、車両が民地などに出入りするため、縁石の一部に対して切り下げを行っているような車両乗り入れ部における歩車道境界の段差は歩行者や自転車の安全な通行を考慮し、50mm以下が標準とされている[3-3]。

特に頭部の特性を把握するため運転者は健康な男子大学生および大学院生10名を被験者とした。本来であれば、高齢者を対象とした実験を行うべきであると考えられるが実験の安全上、健康な大学生・大学院生を対象とした。なお、10名の被験者の体重、身長、年齢の平均値および標準偏差は $60.2\pm 2.5\text{kg}$ 、 $171.0\pm 3.3\text{cm}$ 、 21.7 ± 0.9 歳であった。

実験においては運転者が予期せず外乱を受けた場合を想定し、急に段差を降下した際の状態となるよう被験者に降下するタイミングは教示しないものとした。本車両にはクリープ機能が搭載されており、被験者がブレーキおよびアクセルのどちらも踏んでいないクリープ状態にてストッパーにより車両を停止させておき、被験者に教示することなく実験者がストッパーを外すことで段差から降下させた。なお、前輪がストッパーを外した瞬間に段差から降下するよう実験開始前に車両を段差上に停車させている。

特に段差があるような環境においては安全性、操縦性からたとえば悪路を走行する以上に低速にて走行することが予想される。さらに本実験車両のクリープ状態における走行速度が約2km/hであることから、本実験では車両の速度を約2km/hとした。

段差降下時における頭部の影響を測定するために前章と同様にシート上下方向絶対加速度の測定に加え、頭部の上下方向の絶対加速度を測定した。また、被験者の胴体部分として鎖骨の前後方向加速度と頭部の前後方向加速度を測定し、鎖骨に対する頭部前後方向の相対加速度を算出し、被験者の頸部に受ける影響を確認した。各加速度の測定方法は頭部上下および前後方向は被験者の頸部分に、胴体の前後方向は被験者の鎖骨部分に加速度ピックを固定した(図3-2)。

さらに，運転者の負担を定量的に評価するために頭部を支えている筋肉である頸部の胸鎖乳突筋の表面筋電位を計測した．なお，胸鎖乳突筋は頭部の保持が不安定になるとき頭部の揺れを抑制するために筋活動する．計測の方法およびデータの解析の方法に関しては次節 3.3 にて述べる．

制御手法に関しては前章と同様に現代制御において最も典型的な制御手法である最適制御理論を用いた．本実験に関しては特に運転者体重変動の実験を行わないものとした．よって前章と同様に最適制御理論にて最も振動低減効果のある制御器を適用した．また，制御器の設計における運転者質量である 60kg 程度の被験者により実験を行っている．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（承認番号：13020），被験者に対しては研究参加への説明を行った．実験への協力に関して同意する被験者は同委員会にて承認を得た同意書に署印をした．

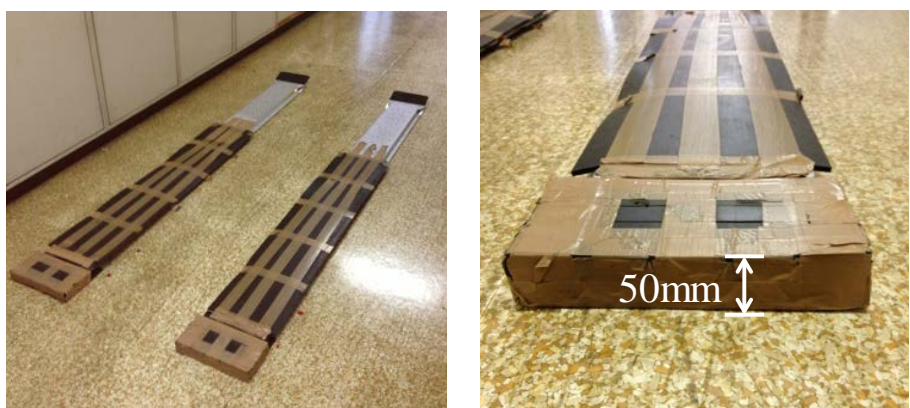
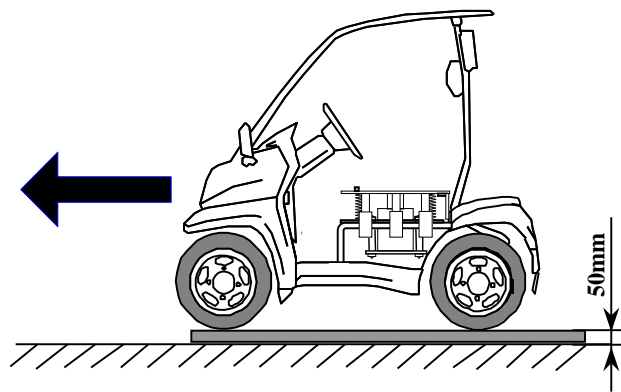


図 3-1 硬質ゴム板を用いた段差路



(※写真掲載に関しては本人より許諾済み)

図 3-2 加速度ピックアップ

3.3 筋電位の計測

本実験においては運転者頭部への負担度を定量的に評価するために頭部を支える筋肉である胸鎖乳突筋の表面筋電位を計測した [3-4], [3-5]. なお, 表面筋電位とは筋電位の中でも特に皮膚表面で計測する筋電位のことである. 筋内に針電極を刺入し計測する深部筋電位に対して表面筋電位は表面電極を用いることから非侵襲かつ容易に筋繊維の活動状態を測定できる手段である.

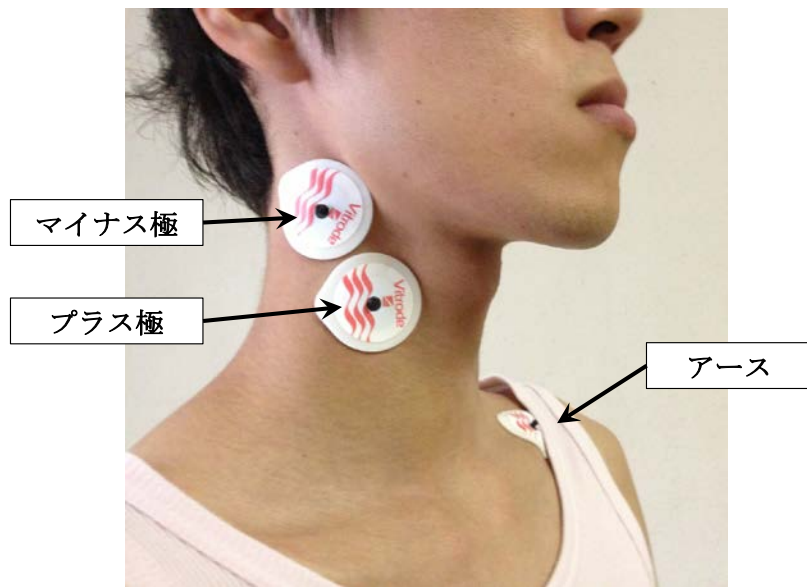
胸鎖乳突筋は胸骨柄の前面である胸骨頭と鎖骨内側 1/3 の上面である鎖骨頭から始まり, 2 つの筋頭が一緒になって乳様突起に停止する筋である. 首は骨格によって堅牢な形状を保つ頭部や胸郭部とは異なり, 椎骨の連なりを細い筋肉で支える脆弱な構造である [3-6]. 頭部の重心が首と胴体の付け根から前後にずれ, 頭部の保持が不安定になるとき, 頭部の揺れを抑制するために筋活動をする [3-7].

表面筋電位の計測は皮膚表面電極としてディスプレイ電極 J ビトロード (日本光電社製) を用いて胸鎖乳突筋の乳様突起より 10mm 下方の部分に, 筋束中央部に筋繊維の走行と平行になるよう電極間距離を 40mm とし双極導出法によって導出・記録した. 図 3-3 に筋電位計測用の電極を貼り付けた様子を示す. またアース電極は皮膚直下に筋肉のない鎖骨部分に貼り付けた. なお, 測定時に鎖骨部分の加速度ピックアップと干渉しないよう, 左をアース電極とし, 右を加速度ピックアップとした. 表面筋電位の計測は導出筋上の皮膚面をアルコール綿で拭くことにより皮膚表面の汚れを取り除き, 電気抵抗を低下させた.

筋電位は Bio Amp ML132 (AD Instruments 社) により増幅後 (High pass 500Hz, Low pass 10Hz), A/D 変換器 (Power Lab ML825 2125, AD Instruments 社) を介してサンプリング周波数 1kHz で記録した. 動作分析などの手段として表面筋電位を用いる場合, 筋電位信号の平均振幅が対象となる [3-8]. 本実験において記録した筋電位原波形に対して 0.1 秒間毎に 0.1 秒区間の二乗平均平方根 (Root Mean Square ; RMS) を算出した [3-9].

筋力の発揮には個人差があることから最大の筋力を発揮した時の筋電位に対する実験時の筋電位の割合で評価を行う. そこで段差降下実験時の筋活動を最大努力で力を発揮した際のもので正規化するため最大随意収縮力 (Maximum voluntary contraction ; MVC) の測定を行った. MVC は最大努力にて発揮するときの筋力である. MVC の測定は段差降下実験を行う前に座位にて前を向いた状態で頭を動かさないように教示し, 頸部において 10 秒間最大努力にて力を発揮してもらい, その際の胸鎖乳突筋の筋電位を測定した [3-10], [3-11]. MVC

の発揮は不慣れな被験者には難しいため、休憩を入れながら練習を行った後、計測を繰り返し、ばらつきが小さいことを確認した上で測定を行った [3-8]. この筋電図に対して上記と同様に **RMS** を算出し、**RMS** の最大値を **MVC** とした. 段差降下実験における **RMS** を **MVC** に対する割合 (**%MVC**) で示すことより正規化をした. なお、**%MVC** が高いほど筋肉に負担がかかっていると評価することができる.



(※写真掲載に関しては本人より許諾済み)

図 3-3 筋電位の電極の位置

3.4 結果および考察

3.4.1 未制御車両と制御車両の比較

実験結果の一例としてシート上下方向の絶対加速度，頭部上下方向の絶対加速度，鎖骨に対する頭部前後方向の相対加速度の時刻歴を図 3-4～図 3-6 に示す。同図は (a) 未制御車両，(b) 制御車両である。前輪が降下してから約 2 秒後に後輪が降下しており，後輪が降下した際の加速度が前輪に比べ大きくなっている。前輪降下後に車両前後方向における重心周りの回転モーメントのバランスが前輪側で大きくなり，後輪が降下すると同時に重心周りの回転モーメントのバランスが元に戻ろうとする。この力が作用するため後輪降下時の加速度が大きな推移を示したものと考えられる。加速度は制御を適用することにより低減していることが分かる。

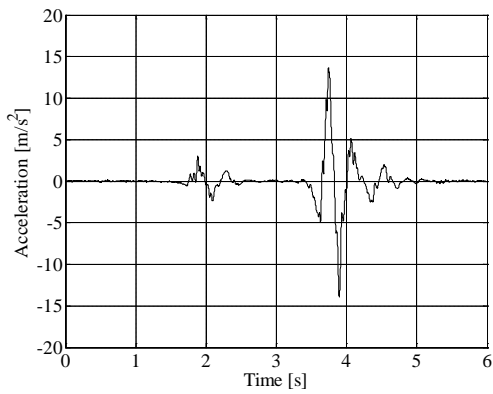
図 3-7 に未制御車両と制御車両におけるシート上下方向の絶対加速度，頭部上下方向の絶対加速度，頭部前後方向の相対加速度の最大振幅を，図 3-8 に胸鎖乳突筋の %MVC の最大値を示す。なお，本章における過渡的な衝撃が入力された場合の検討では振幅が比較的大きいことから，前章における継続的な振動が入力された場合の統計的な整理ではなく，最大振幅により整理し，評価を行った。各被験者にて 5 回実験を行い平均値を算出した。両図はさらにこの値 10 名分の平均値と標準偏差を示した。これらの加速度の最大振幅値および胸鎖乳突筋の %MVC の最大値はすべて後輪が降下した際に生じる衝撃によるものであることを確認している。未制御車両の値を 100% とすると制御車両はシート上下方向の絶対加速度が約 55%，頭部上下方向の絶対加速度が約 67%，頭部前後方向の相対加速度が約 69%，%MVC が約 53% となり，すべての指標において制御車両にて低減していることが確認できる。また，この 4 つの指標について有意水準 5% で t 検定を行い，制御車両と未制御車両の差の有意性を確認したところシート上下が有意確率 $P=0.000$ ，頭上下が $P=0.000$ ，頭-肩（前後）が $P=0.001$ ，%MVC が $P=0.003$ となっており，未制御車両に比べて制御車両は全ての指標において有意に低下した ($P<0.05$)。

ここで被験者 10 名に関して筋負担の主観的評価を行った。筋負担レベルが最大筋力の 8～10% 以上であると筋肉痛などといった筋骨格系の痛みの原因になると考えられている [3-12]，[3-13]。本実験においては各被験者が負担に感じる筋力を発揮した際の %MVC を測定し，評価に用いた。

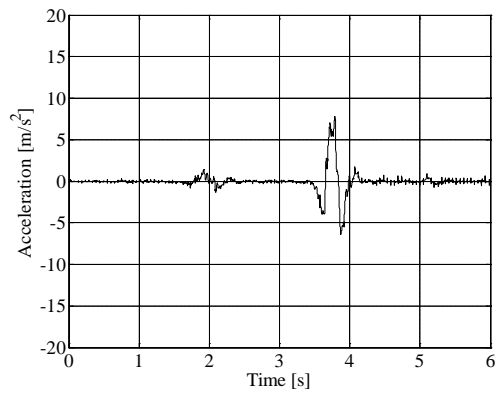
筋負担の主観的評価の方法は，被験者が前を向いて頭を動かさずに継続して筋力を発揮した時に，その状態を持続させることが苦痛であるという筋力を発揮するように教示した。この時の筋電位を 5 秒間測定し，0.1 秒間毎に 0.1 秒区

間の RMS を算出して、その 5 秒間の平均値を求め、さらにこの測定を 5 回行い、5 回の実験データの平均値を算出し、これを %MVC として示した。負担を感じる筋力の %MVC の 10 名分の平均値および標準偏差は $11.02 \pm 7.83\%$ であった。図 3-9 にこの値を実線にて示した。また、全ての被験者において、負担を感じた際の %MVC は未制御車両よりも小さく、制御車両よりも大きい値であることを確認している。これにより段差降下時に未制御車両では頸部に負担を感じるが、制御車両においては負担を感じないということが分かった。

以上の結果よりアクティブシートサスペンションにより、シート上下方向の絶対加速度を低減させることにより、運転者の頭部に与える衝撃は緩和され、その際 10 名の被験者すべてにおいて頸部への負担がなくなるということが明らかになった。

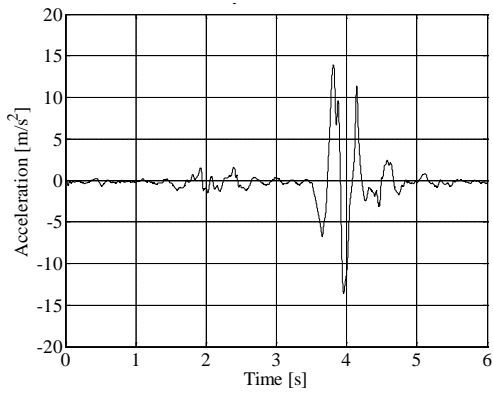


(a) 未制御車両

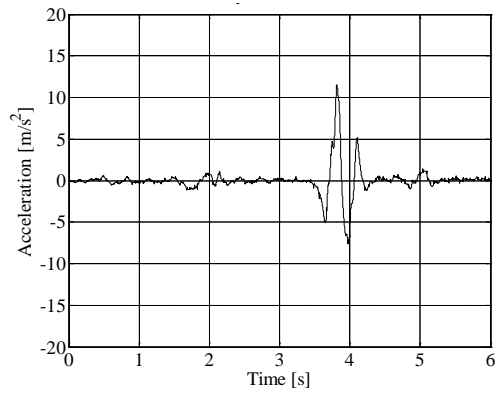


(b) 制御車両

図 3-4 シート上下方向の絶対加速度の時刻歴

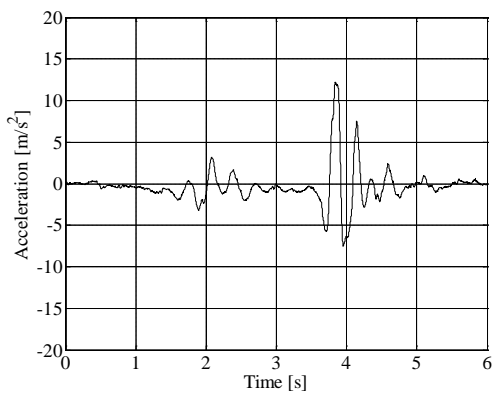


(a) 未制御車両

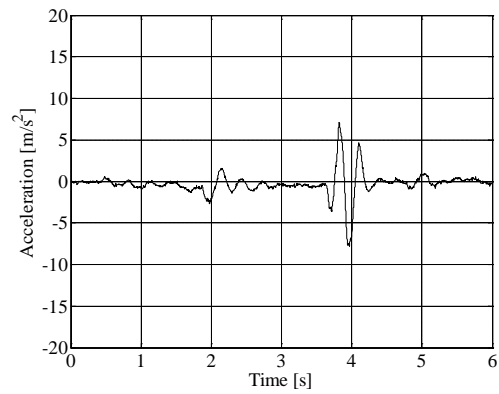


(b) 制御車両

図 3-5 頭上下方向の絶対加速度の時刻歴



(a) 未制御車両



(b) 制御車両

図 3-6 頭部前後方向の相対加速度の時刻歴

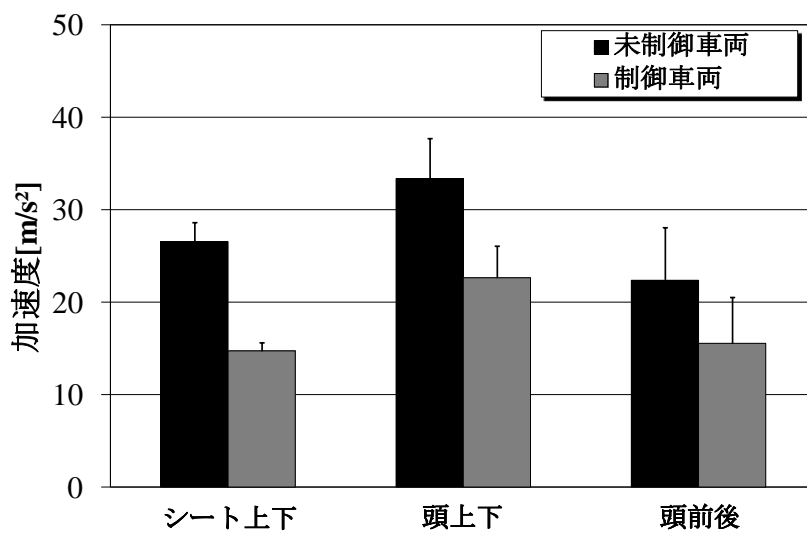


図 3-7 加速度の最大振幅の比較
(被験者 10 名分の平均値)

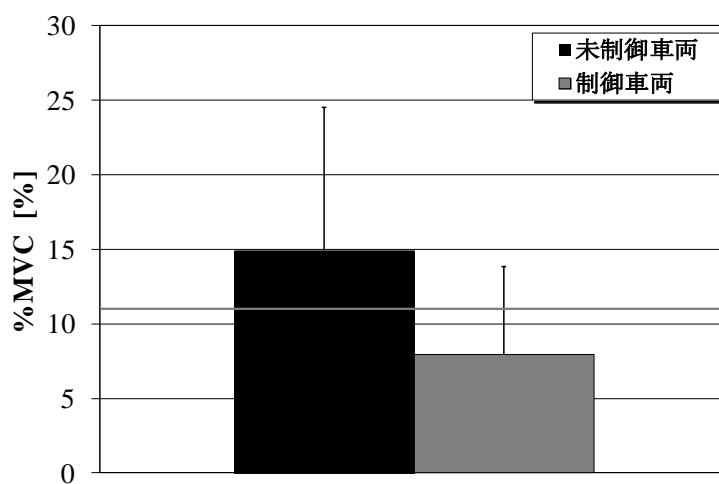


図 3-8 胸鎖乳突筋の%MVCの比較
(被験者 10 名分の平均値)

3.4.2 座面加速度低減に対する頭部の負担低減

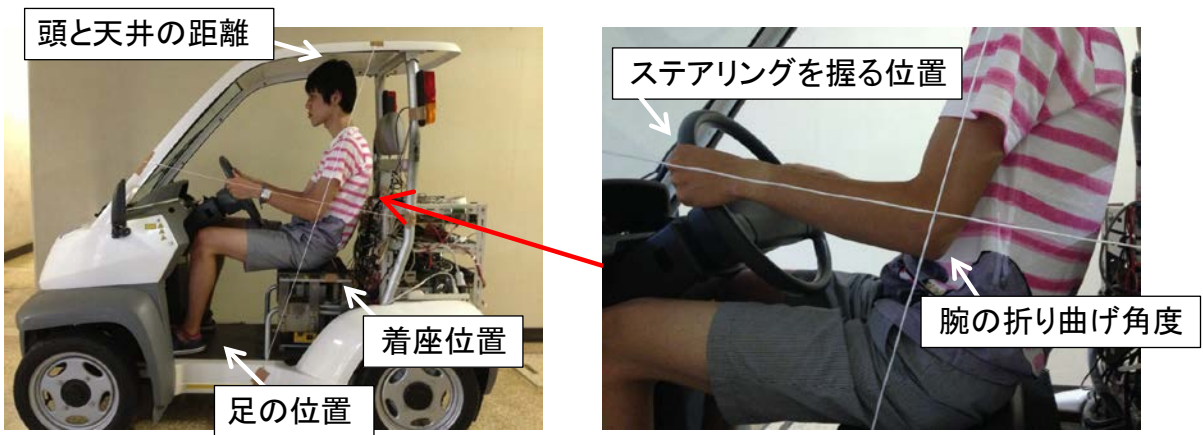
シート加速度の変化により頸部への負担がどのように変化するかを検討するために数種類のシートの制御器を準備し、シートの制御力を変化させた。なお、前項における10名のうち最もシート加速度の低減効果があった被験者(23歳、身長178.5cm、体重57.1kg)にて検討を行った。

本実験においては特に運転姿勢が常に同じになるよう図3-9に示す通りステアリングの握る位置、腕の折り曲げ角度、フットレストへ足を置く位置、シートの座り方の深さおよび運転者の頭部から車両天井までの距離は各段差降下実験にてすべて一致させた。また、各実験においては休憩を設け、走行直前において頸部に筋肉疲労などによる痛みや違和感がないことを確認している。これに加えて、運転者のストレス状態も常に一定程度であることを確認するため、唾液アミラーゼ活性を測定した。

図3-10～図3-13は横軸がアクチュエータに流れた電流の最大振幅値、縦軸がそれぞれシート、頭部上下方向の絶対加速度、頭部前後方向の相対加速度の最大振幅値、胸鎖乳突筋の%MVCの最大値を示している。なお、縦軸は未制御車両を100%とした際の各値を表した。各プロットは実測値5回の平均値である。唾液アミラーゼ活性はたとえば0Aのデータ取得時では 70.2 ± 7.98 KIU/L、また1.6A付近では 71.2 ± 13.6 KIU/Lとなっており、運転者のストレス状態もほぼ同等であった。同図より制御電流が低下するとシート加速度の制振性能は劣化する傾向が確認でき、頭部上下および前後加速度と%MVCにおいても同様の傾向があることが確認できた。

各指標に関して未制御車両と制御車両における相関係数 r を算出したところ[3-14]、[3-15]、シート上下加速度に対して頭部上下加速度は $r=0.964$ 、頭部前後加速度は $r=0.983$ 、%MVCは $r=0.975$ となり、それぞれ強い正の相関が認められた。また、シート上下に対する頭の上下および前後加速度、%MVCはいずれも1%の有意水準で正の相関を示しており、シート上下の加速度が低減することにより、頭部の加速度や%MVCの低減が得られていることが確認できた。

さらに、この被験者の頸部に負担を感じた際の%MVCは7.51%であった。図3-14に縦軸を%MVC値にて表したグラフに、この値を実線で示した。同図より、3A程度(19.4m/s^2 のシート加速度)までが頸部に負担を感じ、約3.5A以上(20.4m/s^2 のシート加速度)の場合は負担を感じないということが分かる。これより最高性能の1/3程度の供給エネルギーの制御にて頸部への負担はなくなり、衝撃低減効果があるということを示すことができた。



(※写真掲載に関しては本人より許諾済み)

図 3-9 運転姿勢

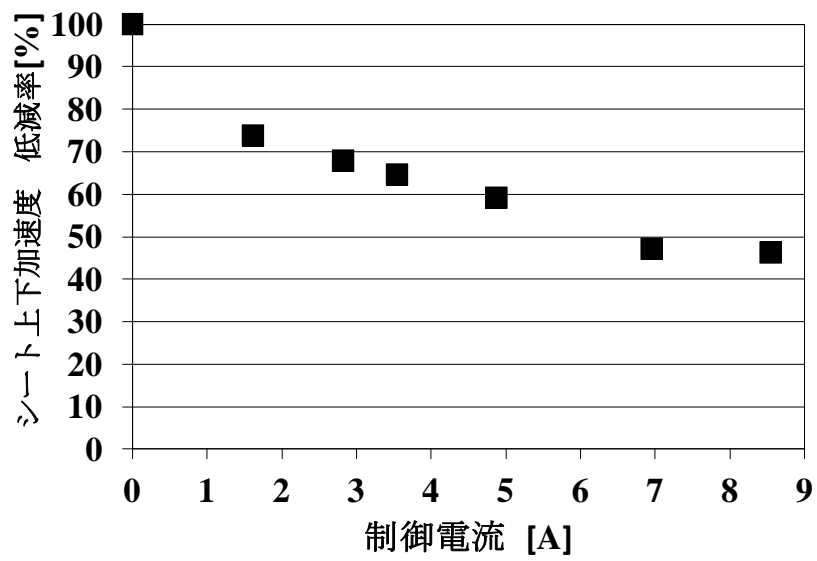


図 3-10 制御電流に対するシート上下方向の加速度

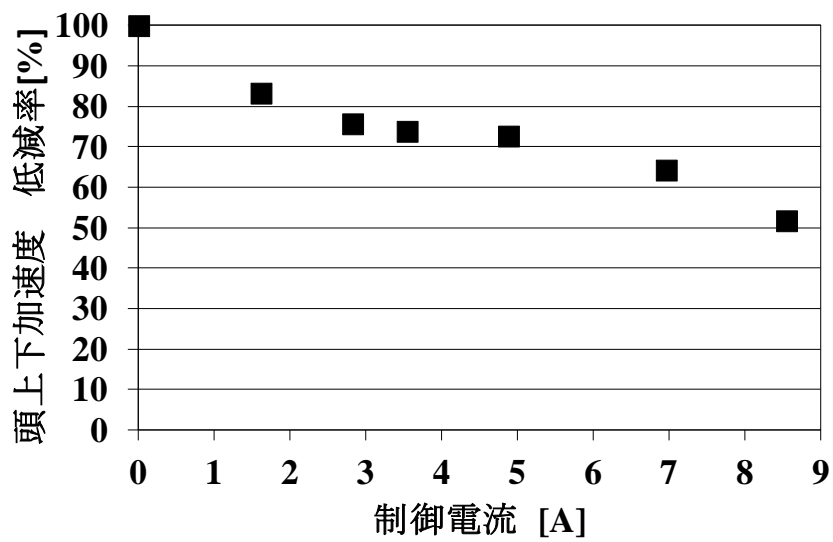


図 3-11 制御電流に対する頭上下方向の加速度

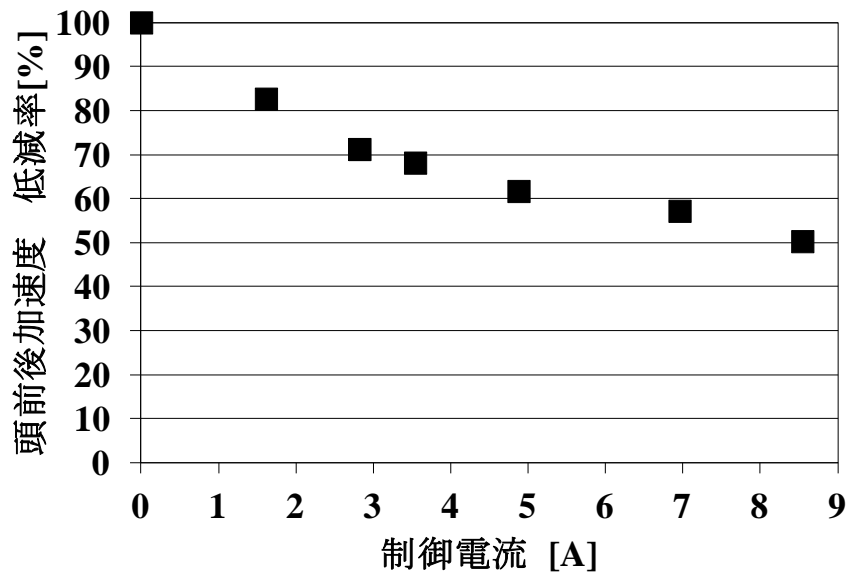


図 3-12 制御電流に対する頭前後方向の加速度

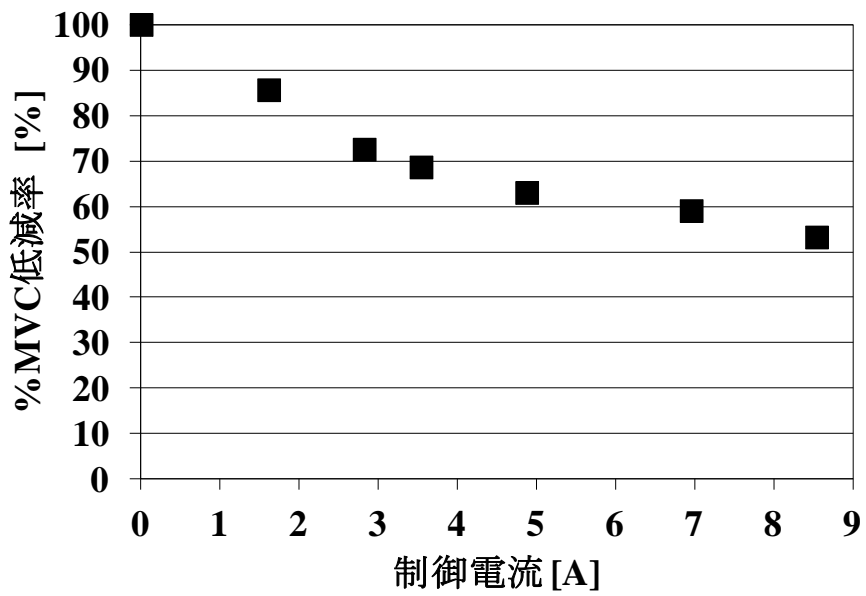


図 3-13 制御電流に対する胸鎖乳突筋の%MVC

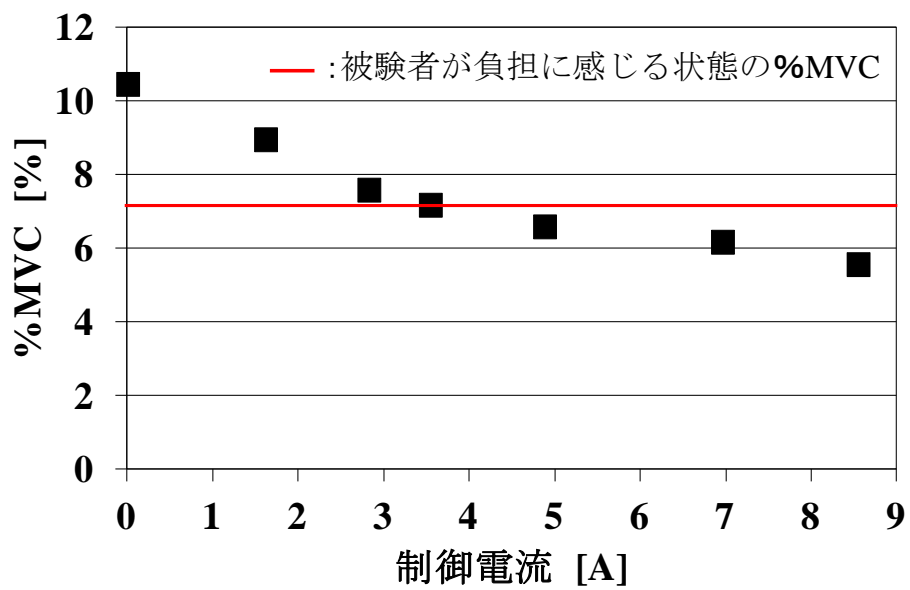


図 3-14 被験者が負担に感じる状態の%MVC 値

3.5 まとめ

本章では振幅が比較的大きく過渡的な衝撃が入力されるような路面を超小型電気自動車が行走における、アクティブシートサスペンションによる運転者頭部の衝撃低減効果について検討を行った。様々な場所に乗り入れることが容易な超小型電気自動車であるが、特に歩道から車道へ降りる場合などの段差を通過するときには大きな衝撃が入力される。運転者の頭部に受ける衝撃の低減効果について加速度および頭部を支える胸鎖乳突筋の筋電位から検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) アクティブシートサスペンションによりシート上下方向の絶対加速度を低減させることにより運転者の頭部に与える衝撃も低減することが可能となり、未制御時にあった頸部への負担はシートの制御によりなくなるということが10名の被験者の結果から分かった。
- (2) シートの制御力を変化させていき未制御車両に対する加速度の低下率を変化させた際、シート加速度の変化により頭部の加速度および頸部への負担に関して各指標間に強い相関があることが分かった。シートの加速度を低下させることにより、頭部に受ける衝撃を低減させることが可能であるといえ、供給エネルギーを考慮した上で頸部への負担度が低減する制御を行うことが可能であることが明らかとなった。

第4章

運転者の生体情報を用いた
アクティブシートサスペンションの制御

4.1 はじめに

前章では超小型電気自動車走行時における肉体的な負担感を生体情報である筋電位を用いることにより定量化を行っているが、本章では走行時における運転者の気分や心理状態を心電図の測定により得られる心拍変動から、自律神経系における交感神経および副交感神経の活動を推定することで乗り心地を定量的に評価する方法について述べる。さらにその評価方法を基に運転者のリアルタイムの心理状態を制御系にフィードバックする「RRI-SW (RRI-Switching) 制御」の提案を行い、その有用性について述べている。

まず、自律神経系と心電図および心拍変動の関係に関して整理を行った。次に、アクティブシートサスペンションの制御を運転者の乗り心地感覚に近づけるため、制御パラメータに生理情報を組み込むための基礎的な検討として、車両の振動が運転者の乗り心地に与える影響について心拍変動を用いることにより、リアルタイムに取得、評価する方法について検討した。この結果より、運転中の交感神経および副交感神経の活動を心拍変動である RRI から測定し、RRI を用いた乗り心地評価手法について検討を行った [4-1] ~ [4-7]。

さらに、加速度などの計測物理情報のみをフィードバックする従来の制御手法に加え、運転者の生体情報を測定し日々の体調や運転条件などによる気分などの心理状態を制御に取り入れることを目指した。その初期段階として運転者の心拍変動をフィードバックすることによりゲインの切り替えを行うアクティブシートサスペンションの制御手法に関して提案し、その有用性を確認するため走行実験を行った [4-8] ~ [4-9]。

4.2 心拍変動による乗り心地の評価

4.2.1 心電図 [4-10], [4-11]

本章では心拍変動を用いて自律神経系の活動を捉え、運転者のストレス状態、リラックス状態を推定し、乗り心地評価を行う。1章にて述べた通り、従来の研究では様々な生体情報を計測・解析することによって緊張や疲労の度合いを推定する試みがなされているが、車両への搭載を目的とし、乗員のリアルタイムの乗り心地状態を検出した。また、運転操作をする乗員にも適用をしいたいため比較的簡易に使用することができ、さらに時系列データを連続的に容易に取得できることから心拍変動を用いた。

そこで、まず図 4-1 に示すような心電図を測定した。心電図は心臓を挟む 2 点と接地部位に電極を装着して、差動増幅すれば容易に得られる。胸部、四肢にかかわらず肩や顔面、頭部に電極をおいても心臓からの電位伝播の位相が異なる 2 部位であれば心電が計測される。なお、本研究における心電図の測定方法に関しては後掲 4.3 節に示す。

心電図は横軸に時間、縦軸に心臓の筋電位 (Electrocardiograph ; ECG) を示し、心筋が収縮するとき生じる電気活動を測定したものである。心臓の働きは大きく 6 つのプロセスに分かれており、この流れを心臓の動きの 1 周期である心周期として表し、各プロセスの働きにおいて生じる筋電位を可視化したものが心電図である。この波形のうち、血液を左心室から大動脈に送り出す時に生じる最も大きなピークを R 波という。この R 波から次の R 波までの間隔を RR 間隔 (RRI) とよび、これから 1 分当たりの心拍数が求められる。なお心音やバリストグラム、胸郭の動き計測のように心臓の収縮周期を求めることのできる方法であれば心電図以外の方法でも求めることができるが、脈波など末梢血管から得られた場合は脈波数と呼び、これとは区別されている。

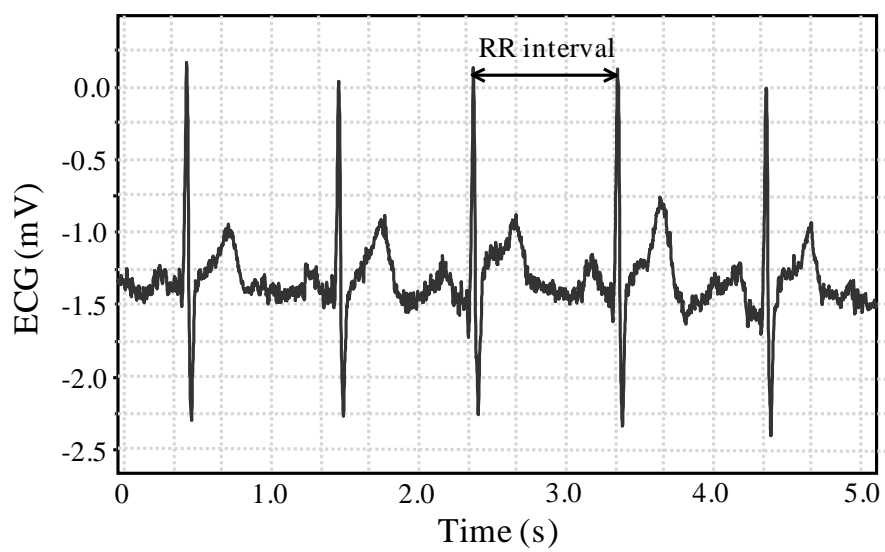


図 4-1 心電図と RR 間隔 (RRI)

4.2.2 自律神経系

自律神経系は循環・呼吸・体温調節など生命維持に欠くことのできない機能を意志の介在なしに自律的に制御するもので、内分泌系、免疫系とともに身体の内環境（恒常性）の維持に貢献している。自律神経は交感神経と副交感神経からなり、この2つの相反する神経の働きのバランスによって多くの臓器の調節にその両方がかかわっており、たとえば心拍数は心臓交感神経系が賦活すると上昇し、心臓副交感神経系が賦活すると減少するというように2つの神経系により拮抗支配されている [4-12] ~ [4-14]。

交感神経系は心拍数や血圧を上昇させ末梢血管を収縮させて筋肉への血流量を増やす、呼吸数を増やして酸素の取り込み能力を高める、手掌や足裏の発汗を促すなど身体の活動レベル、運動能力を高める方向に働く。交感神経の一時的な賦活によって生じる反応は闘争・逃走反応と呼ばれ、狩猟生活ではきわめて合目的であったと考えられる。現代社会では多くは精神的なストレスであり身体的な活動を伴う対処が必要ないにもかかわらず同様の反応が起こってしまう。

一方、副交感神経系は心身の鎮静化を進める方向に働く、急速時には副交感神経系が優位になりエネルギーの消費を抑え内臓の消化活動を活発にしてエネルギーを整える。また外敵についての情報収集が必要な際には心臓や呼吸の動きを沈め外からの刺激を最大限に取り込めるようにしていると考えられる。さらに、副交感神経系はそのときの行動や状態に応じて個々の臓器を個別に制御する役割もあり、賦活度は臓器によって異なるともいえる。

上述のように、交感神経系は闘争、防御、逃避および数学的な処理（計算）などの行動を開始する前に緊張状態をつくり上げる。これは様々な行動を円滑に行えるよう覚醒状態を強化し、血圧の上昇、活動器官へ分配される血液量の増加に伴う心拍数の増加など身体の働きを調整する。一方、副交感神経系は身体の消耗を回復させるよう、その活動により消化管の機能や排泄機能が促進され、心臓の活動が抑制されるものである。これにより心拍数が減少する。本研究では交感神経が働き続けると疲れやすくなるため、交感神経優位となる要因をストレスと定義する [4-15]。

4.2.3 RRI

本研究では自律神経の制御下にある交感神経または副交感神経を調べるために、心電図よりR波から次のR波までの時間であるRR間隔(R-R Interval ; RRI)を算出する。

RRIを時刻歴として整理することにより、運転者の乗り心地感覚をリアルタイムで評価することができる。

心電図からRRI時刻歴を算出する方法を模式的に図4-2に示す。心電図においてR波から次のR波までの時間を算出し、これを縦軸RRI[msec]、横軸時間[sec]として構成されるRRIの時刻歴として表す。なお、心電図のRRIが広くなれば心拍数は減少しており、時刻歴は上昇、狭くなれば心拍数は増加しており、時刻歴は下降する。このRRIの時刻歴により自律神経系の活動状態を把握し、被験者の緊張、ストレス状態あるいはリラックス状態を判断する。

図4-2のように時刻歴として整理したRRIの値が前の時刻の値よりも下降すると心拍数が増加していることを表すため、交感神経系が優位であることからストレス、緊張状態と評価し、上昇すると副交感神経系が優位であることからリラックス状態として評価を行った[4-16]、[4-17]。

心拍変動を用いた自律神経系の活動状態の把握はたとえばRRIのパワースペクトル密度により算出されるLF・HF[4-18]やRRIのゆらぎを評価するRRV3-8[4-19]などがある。また、一般に健常者は安静時に心拍が不規則となり、RRI時刻歴は大きくゆらぐが、ストレス時には安定することが知られている。この安静時のゆらぎは呼吸性不整脈と呼ばれている。呼吸性不整脈は、効率よく血液を送り出すために起こる心拍変動であり、これにより交感神経活動を捉えることができると考えられている。吸気時は心拍数を増加させ、より多くの酸素を血液に送り、呼気時は酸素をあまり吸収しないよう心拍数を減少させる。すなわち、RRI時刻歴の高周波成分のばらつきが小さければ交感神経の活動が優位になったといえる。しかしながら、個人差が大きいという特徴があり、本研究では被験者間の比較も行いたいため、RRI時刻歴における高周波成分による評価は行わない。

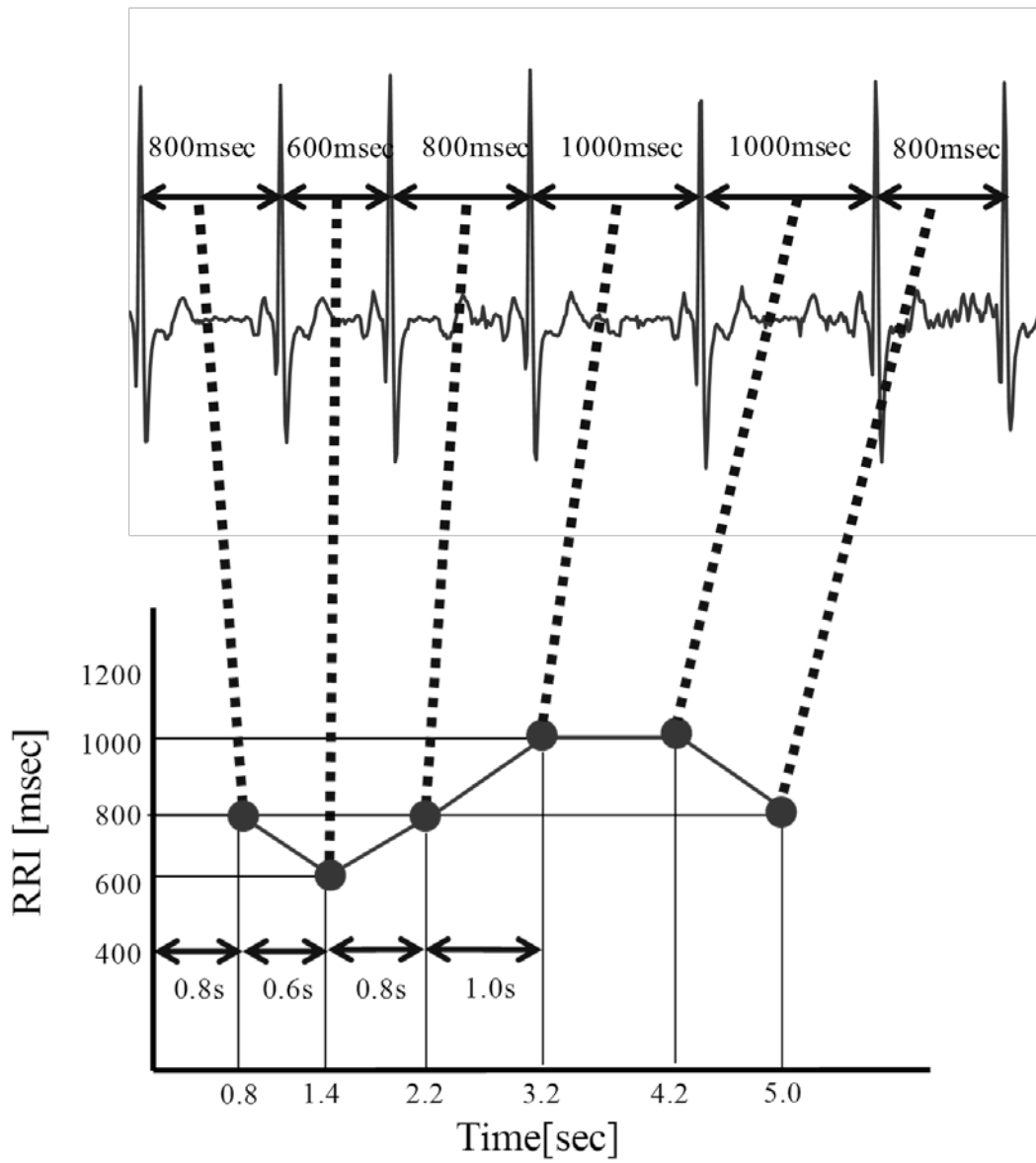


図 4-2 RRI 時刻歴の描き方

4.3 振動加速度が心拍変動に与える影響

4.3.1 実験装置

超小型電気自動車運転時における振動加速度の変化が心拍変動に与える影響について検討するため、走行実験を行った。実験には 2.2 節にて示した座席部にアクティブシートサスペンションを搭載した超小型電気自動車を用いた。制御車両と未制御車両にて乗車し、心拍変動に与える影響について検討を行った。なお、本実験にて用いたフィードバックシステムも 2.2 節にて示したものを適用している。また、屋外走行実験を行うため心電図測定装置、加速度ピックアップのチャージアンプ、DSP、ラップトップ PC およびこれらの周辺機器とボイスコイルモータ駆動用のバッテリーを車両後部に搭載した。

4.3.2 走行実験の方法

走行実験の流れを図 4-3 に示す。走行前および走行後に座位安静時間をそれぞれ 3 分間とり、1 回目の走行として未制御車両にて 3 分間、2 回目として制御車両にて 3 分間の走行を行うものとし、全 12 分間における被験者の心電図を採取した。なお、アクティブシートサスペンションの制御および未制御については被験者には教示しない。被験者は普通自動車免許を持つ健康な男子大学生および大学院生 10 名（年齢の平均と標準偏差は 23.4 ± 1.5 歳）とした。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（承認番号：12033）、被験者に対しては研究参加への説明を行った。実験への協力に関して同意する被験者は同委員会にて承認を得た同意書に署名捺印をした。

実験場所は図 4-4 に示す東海大学湘南キャンパス内にある水平な道路とした。また、周囲の環境による生体反応の影響を考慮し、キャンパス内において他の車両や歩行者が通らないような場所を選定した。走行路は前掲図 2-5 に示した硬質ゴム製の外乱（幅 30mm、高さ 6mm、長さ 150mm）を前後輪は硬質ゴム板を同時に乗り上げるよう 320mm 間隔で約 25m 設置し、その上を速度 5km/h にて走行するものとした。本研究で用いているような超小型電気自動車は軽自動車など従来の小型車両と比較して軽量、重心高である。よって路地、未舗装路など乗り心地の劣化が著しい悪路では安全性、操縦性から比較的低速にて走行することが予想されるため、走行速度を約 5 km/h とした。2 回の各走行時間においては図 4-5 に示すように走行路を U ターンして 3 分間の車両走行をする。路面から入力される振動は 5Hz で卓越するものとした。

未制御車両にて走行路を走行した際のシート座面加速度の一例を図 4-6(a)に、

制御車両にて走行した際を(b)に示す。同図から走行路により入力される振動に対してアクティブシートサスペンションにより制御を行ったことにより、加速度の振幅が約半分程度に抑えられていることが確認できる。なお、制御手法に関しては現代制御理論の中でも最も典型的な手法である最適制御理論を適用した。重み係数は本システムにおいて最も効果の高い前掲 2.4.1 項の表 2-2 ものを採用した。

心電図測定には図 4-7 に示す AD Instruments 社の Power Lab ML825 2/25 を用い、解析システムは同社の Heart Rate Variability を用いた。また皮膚表面電極として日本光電社のディスプレイ電極 J ビトロードを用いた。心電図を測定する際、体に貼る電極は心臓をほぼ正三角形に取り囲んで取りつけることが望ましいとされている。本研究では車両走行時におけるステアリング操作で腕を頻繁に動かすため、その際にノイズが出にくく、安定して測定することのできる図 4-8 に示す NASA 誘導を採用した。電極貼り付けの際には皮膚面をアルコール綿で拭くことにより皮膚表面の汚れを取り除き、電気抵抗を低下させた。さらに、粘着力が強くて薄いサージカルテープを用いて皮膚に固定をし、ステアリング操作などによる干渉によりノイズが載らないように測定を行った。

また、実験前に被験者のその日の気分を T-A (緊張-不安)、D (抑うつ性)、A-H (怒り-敵意)、V (活気)、F (疲労)、C (混乱) の 7 つの尺度にて測定する質問紙 POMS による調査を実施した [4-20]。

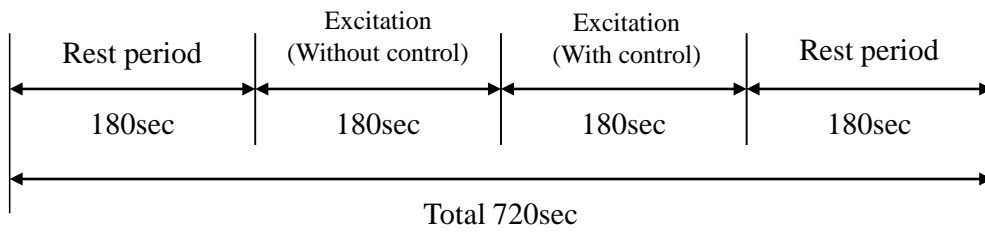


図 4-3 走行実験の流れ（振動加速度が心拍変動に与える影響）



図 4-4 走行実験の様子

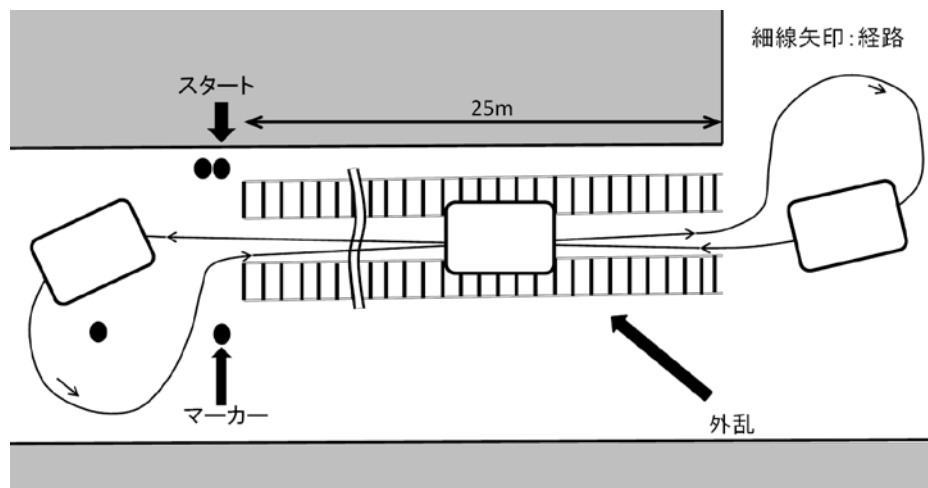
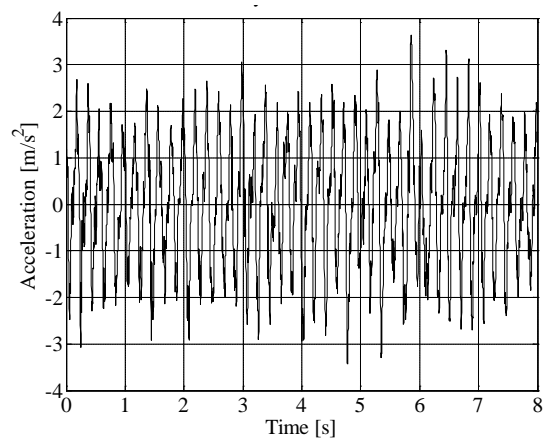
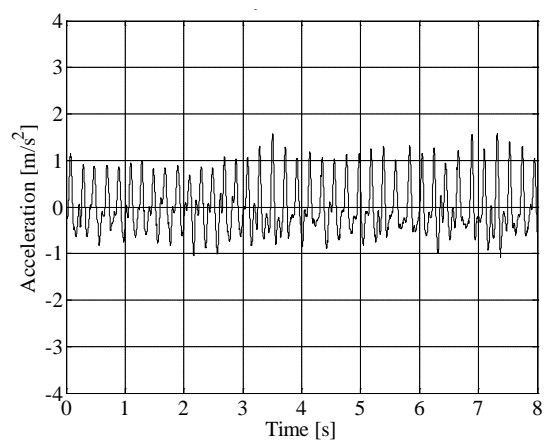


図 4-5 走行路の全体図



(a) 未制御車両



(b) 制御車両

図 4-6 加速度の時刻歴の一例

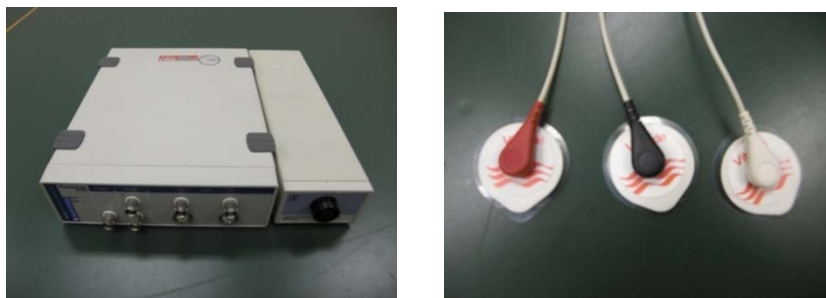


図 4-7 心電図測定装置

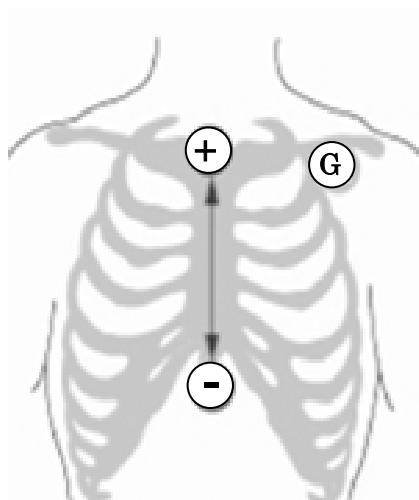


図 4-8 心電図測定における電極の貼り付け位置 (NASA 誘導)
(出典 : http://www.cardiac.jp/view.php?lang=ja&target=monitor_lead2.xml)

4.3.2 結果および考察

図 4-9 に 10 名の被験者のうちの 1 人である被験者 A の RRI 時刻歴を一例として示した。走行時間と比べて走行前後の安静時間では RRI のゆらぎが大きくなっていることが確認でき、4.2.3 項にて述べた通り、RRI 時刻歴の高周波成分に、自律神経活動が現れていることが分かる。ここでは各区分における被験者の乗り心地状態を比較するため、図 4-9 を基に安静時間および制御、未制御走行の各区分における RRI の平均値を算出した。さらに、図 4-10 は各被験者間の比較を行うために走行前安静の RRI 平均値を 100% として、各区分における RRI 平均値の変動を示したグラフである。時刻歴として整理した RRI の値が走行前安静時間における平均値よりも上昇すなわち 100% を超えると走行前安静に対して副交感神経が優位であることからリラックス状態である。また下降すると交感神経が優位であることから緊張状態である。図 4-10 の未制御車両走行時では走行前安静時と比較してすべての被験者において RRI の平均値が低下しており、走行を始めることにより安静時間に対してストレス状態であることが分かる。これは走行操作や振動により受けたストレスによるものと考えられる。

また、被験者 D, F, G, H, I, J に着目すると未制御と比べ制御車両にて RRI 平均値が上昇していることから、制御車両においてリラックス状態となっていると評価できる。それに対し、被験者 A, B, C, E は未制御と比べて制御車両にて RRI 平均値が上昇しておらず、リラックス状態になっていないことが分かる。

そこで図 4-11 に各被験者を未制御車両より制御車両においてリラックス状態となったグループ（被験者 D, F, G, H, I, J）およびリラックス状態とならなかったグループ（被験者 A, B, C, E）の 2 つに整理した POMS の結果を示す。同図(a)制御車両においてリラックス状態となったグループでは各被験者において気分尺度の T スコア値を比較すると全 6 名が V（活気）>F（疲労）となっているのに対し、同図(b)制御車両においてリラックス状態になっていないグループでは 1 名を除き V（活気）<F（疲労）の傾向になっている。この結果より、制御車両にてリラックスとなったグループでは心理状態が安定しており振動の影響が顕著に表れたと考えられる。

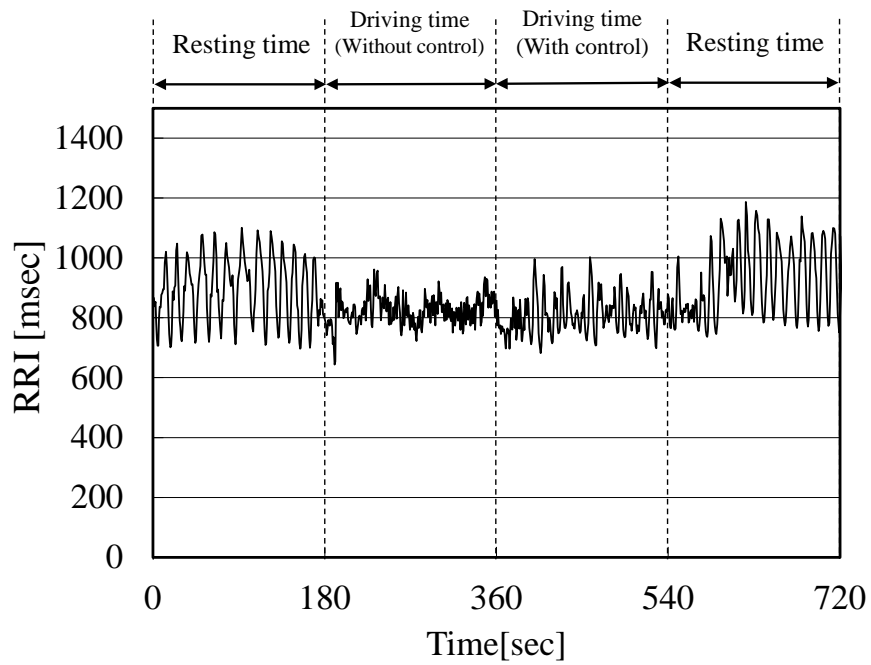


図 4-9 走行実験における RRI の時刻歴の一例（被験者 A）

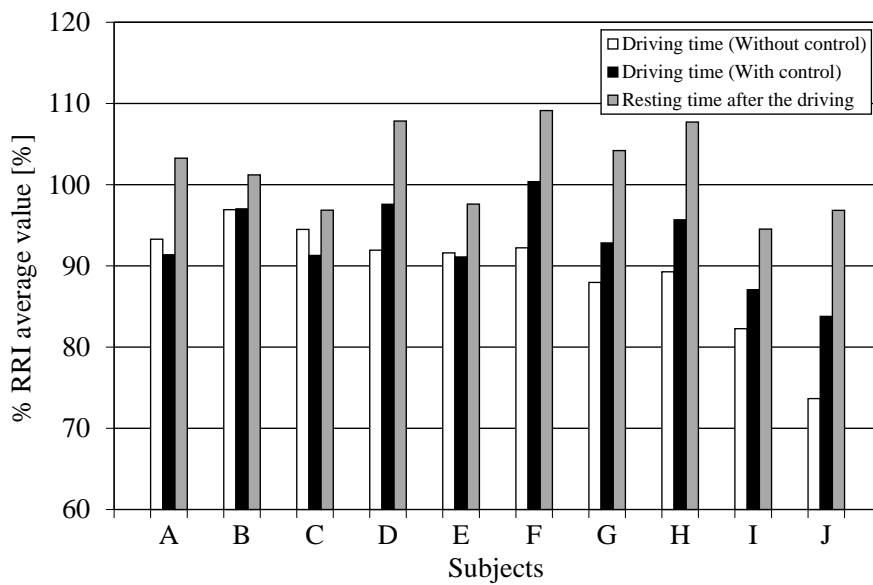
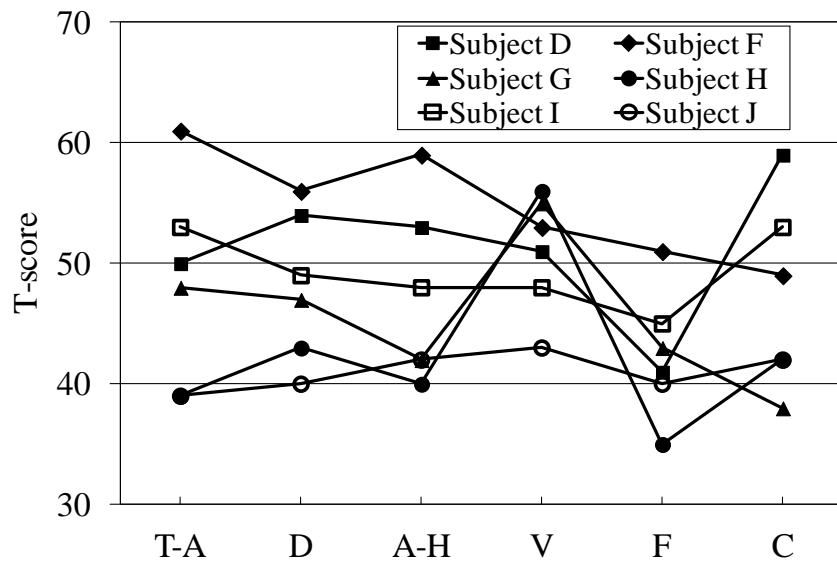
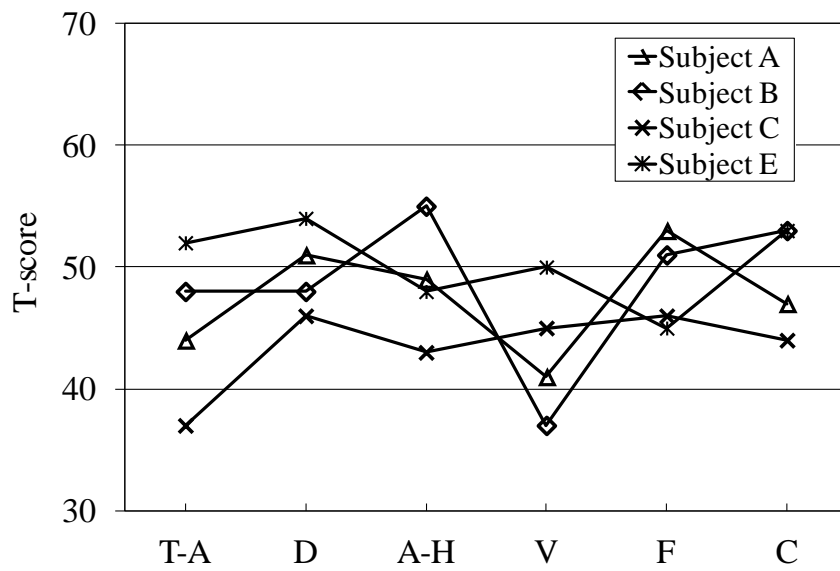


図 4-10 走行前の安静時間に対する走行時間中の RRI 平均値



(a) 被験者 D, F, G, H, I, J



(b) 被験者 A, B, C, E

図 4-11 被験者 10 名の POMS の結果

4.4 心拍変動を用いた制御

4.4.1 RRI-SW 制御

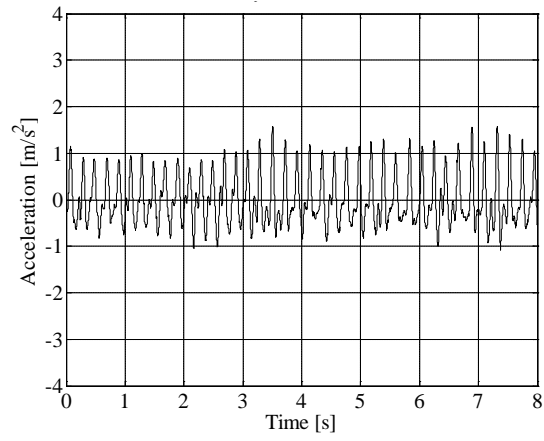
本節では前節までの乗り心地を心拍変動によりリアルタイムに取得，評価する手法を基に制御パラメータに生体情報を取り入れてアクティブシートサスペンションを制御する手法を検討し，運転者一人一人にあわせた乗り心地の制御を提案する．

本研究では運転者の生理情報である RRI の変動によりその時の運転者の状態を推定し，それを元に予め設定した制御を切り替えるという制御（RRI-SW 制御）を提案する．

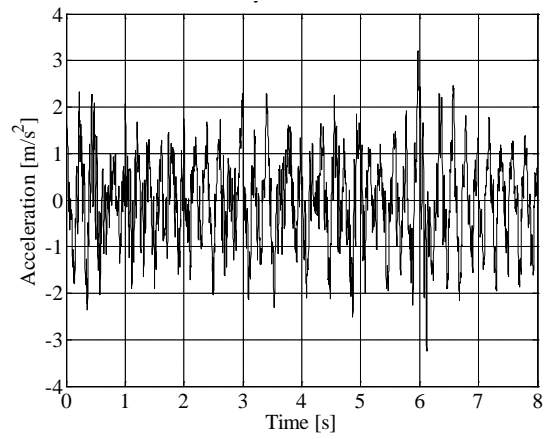
また基礎的な検討として 2 種類の制御（制御 A，制御 B）を設定した．制御 A は外乱上を走行した際の制振性能が高い状態になるようボイスコイルモータを駆動するアクティブ制御とし，制御 B はばねとダンパのみで制御電圧を加えないパッシブ制御とした．図 4-12 に外乱上を走行した際の座面加速度の一例を示す．同図より制御 A で走行している際の座面加速度が制御 B と比較して低い値になっており，制御 A にて制振性能が高いことが分かる．

図 4-13 に RRI の変動に基づく制御の切り替え手法のフローチャートを示す．制御と RRI 平均値の推移の組み合わせから，より運転者がリラックスし RRI 平均値が上昇するようにアルゴリズムを作成した．RRI の分析は制御結果が運転者の心拍変動に反映する時間とリアルタイムにフィードバックする制御であることを考慮して 1 分ごとに RRI 平均値を算出することとした．また，RRI 平均値算出と制御切り替えの様子を図 4-14 に示す．たとえば制御 A にて走行しており，この区間で測定された 1 分間の RRI 平均値が前区間の 1 分間の RRI 平均値よりも下降した場合には制御 A では運転者がストレスを感じていると判断し，次の区間では制御 B に切り替える．制御 B で走行しており，RRI 平均値が上昇傾向になった場合には運転者は制御 B でリラックスになると判断出来るため，引き続き制御 B を適用する．

図 4-15 に RRI-SW 制御を適用したアクティブシートサスペンション制御システムの概略図を示す．制御に用いる y ， \dot{y} は，前掲 2.2 節にて示した通り，加速度ピックアップからの信号をコンピュータ内でデジタル積分することで検出している．さらにボイスコイルモータに流れる電流を検出し，これらの観測量を用いて制御電圧をコンピュータで計算し，ボイスコイルモータを駆動して制御力を発生させる．これに加えて，運転者の心電図を測定し，コンピュータ内で RRI の時刻歴を算出し，これにより制御の切り替えを行う．



(a) 制御 A



(b) 制御 B

図 4-12 加速度の時刻歴

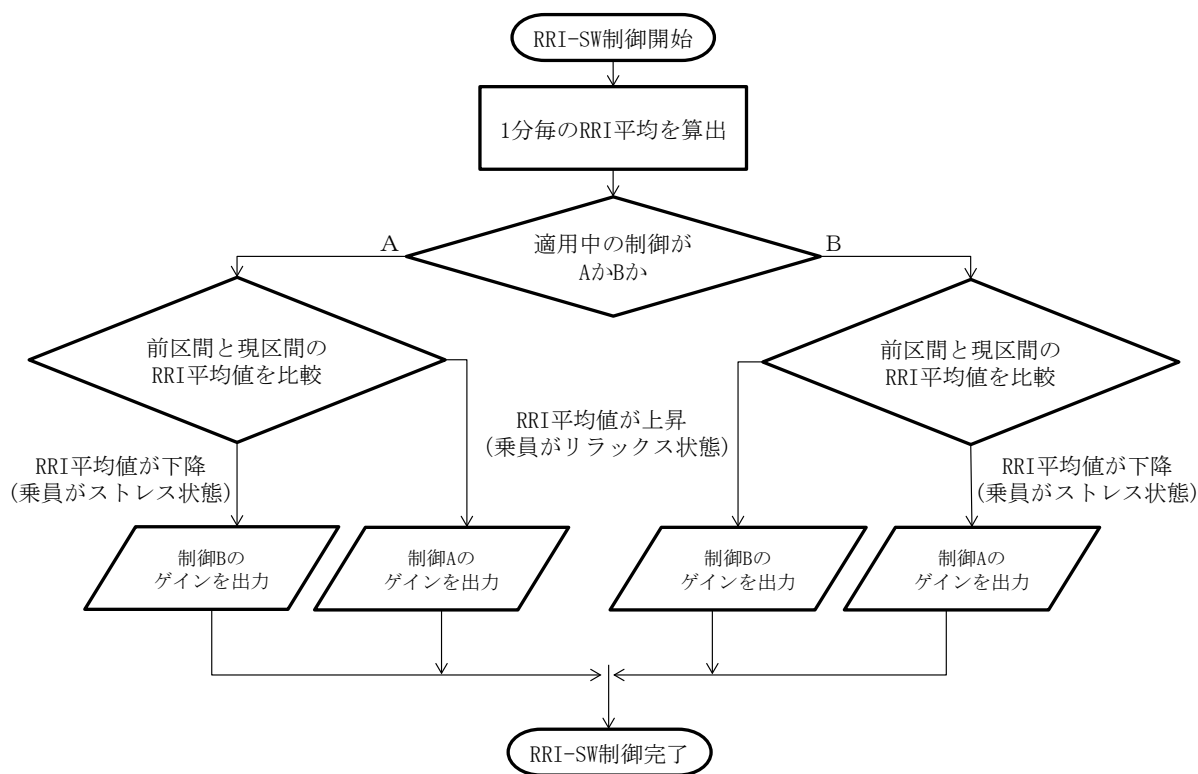


図 4-13 RRI-SW 制御のフローチャート

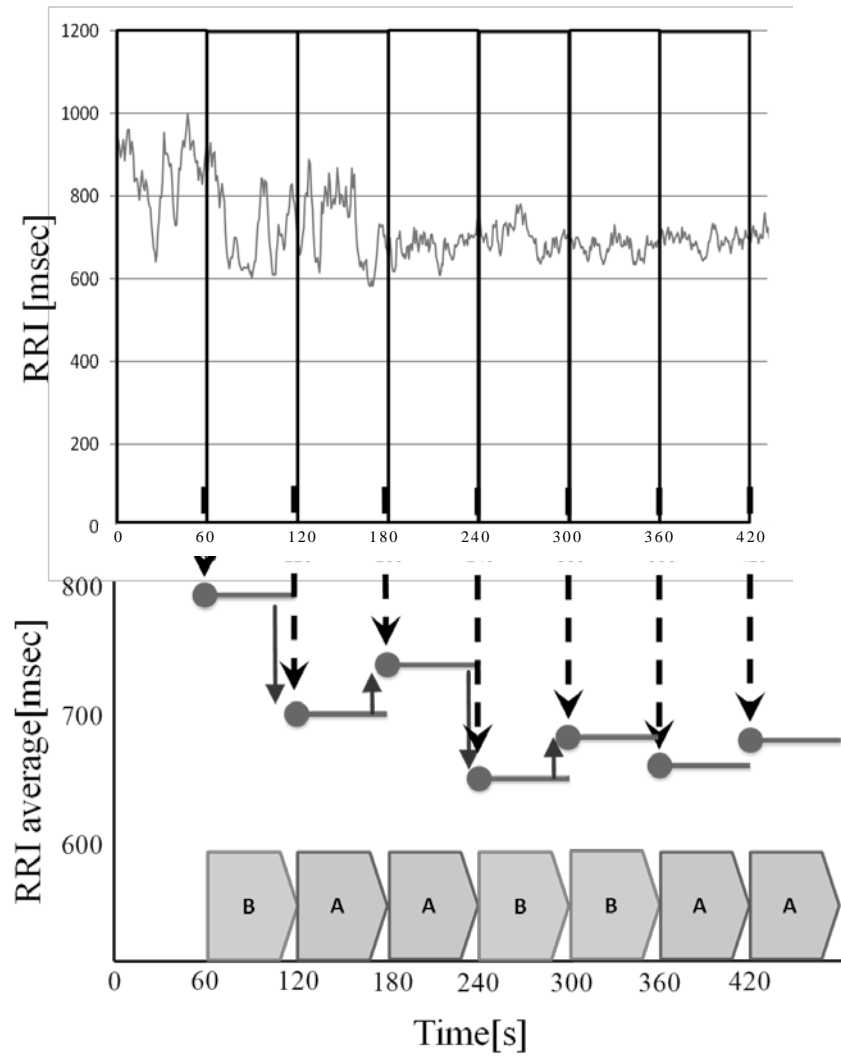


図 4-14 RRI 平均値算出と制御切り替えの様子

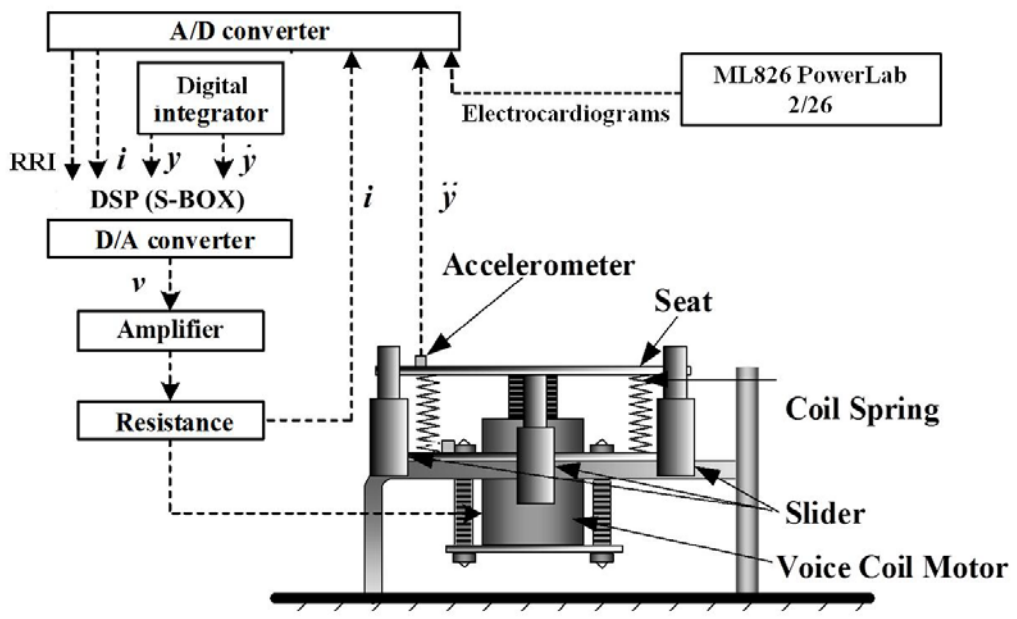


図 4-15 RRI-SW 制御システムの概略図

4.4.2 走行実験の方法

実験では RRI-SW 制御車両，制御 A のみを適用し切り替えを行わない制御車両，従来の自動車に設置されている座席と同様に座面と床面が同位相で動く未制御車両の 3 種類の車両を用意した．これにより RRI-SW 制御車両の有用性を検討する．走行実験の流れは図 4-16 に示す通り，それぞれの車両にて 10 分間走行するものとし，各走行前に 3 分間の座位安静時間を設けた．走行車両の順序は RRI-SW 制御車両，制御車両，未制御車両の順とし，被験者には教示しないものとした．

実験場所は前節 4.3 における実験と同様，周囲の環境による生体反応の影響を考慮し，キャンパス内において他の車両や歩行者が通らないような場所を選定し，東海大学湘南キャンパス内にある水平な道路とした．また，走行路も前節 4.3 における実験と同様，硬質ゴム板（幅 30 mm，高さ 6 mm，長さ 150 mm）を車両の進行方向に設置した波状路とし，その上を速度 5km/h にて走行するものとした．3 種類の各走行時間においては走行路通過後は U ターンをして 10 分間の連続走行をする．

なお，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（承認番号：11013），被験者に対しては研究参加への説明を行った．実験への協力に関して同意する被験者は同委員会にて承認を得た同意書に署名捺印をした．

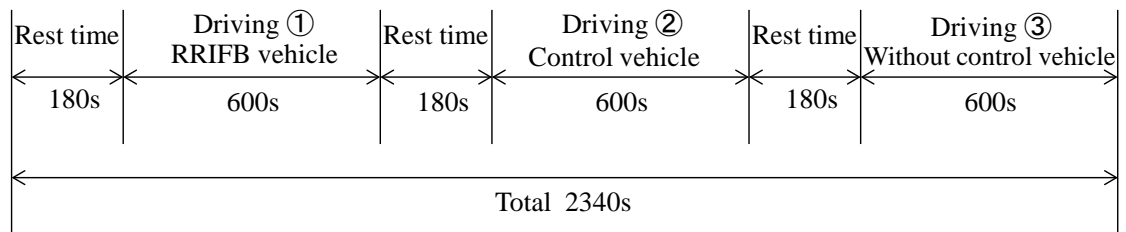


図 4-16 実験の流れ (RRI-SW 制御)

4.4.3 結果および考察

各車両における座面加速度の違いを図 4-17 に示す走行時 10 分間の標準偏差により比較を行う。同図より未制御車両が最も高く、次に RRI-SW 制御車両が高くなっており、最も加速度が低減したのは制御車両であり、未制御車両の約 50%であった。

図 4-18 に (a) RRI-SW 制御車両、(b) 制御車両、(c)未制御車両における安静時と走行時の RRI 時刻歴の推移を示した。なお、それぞれの図における 0 秒から 180 秒は安静、180 秒から 780 秒は走行時である。ここで安静時に対する走行時の運転者の状態を定量的に比較するために、運転者への負荷を評価する指数として運転負荷軽減指数を次式にて定義する。

$$\text{運転負荷軽減指数} = \frac{\text{走行時のRRI平均値}}{\text{安静時のRRI平均値}} \times 100 [\%] \quad (4-1)$$

この指数は走行直前の状態を基準とすることで車両の運転負荷の大きさを評価することが目的である。指数が 100%に近づいた場合は走行時の状態が安静時の状態に近いことを示しており、指数が高い程車両の運転負荷は低く、リラックス状態であるといえる。

図 4-19 に図 4-18 の各 RRI 時刻歴より求めたそれぞれの車両における運転負荷軽減指数を示す。図 4-19 より RRI-SW 制御車両と制御車両、未制御車両の運転負荷軽減指数を比較すると RRI-SW 制御車両が他の 2 車両と比較して高い値を示しており、3 車両の中で最も副交感神経が優位であることからリラックス状態であると評価できる。また消費電力量（表 4-1）を比較しても RRI-SW 制御車両は制御車両と比較して低い電力量であることが分かる。従来の加速度のみを制御する手法に比べて本研究にて提案したシステムは有効であるということが 1 人の被験者からの結果ではあるが示すことができた。

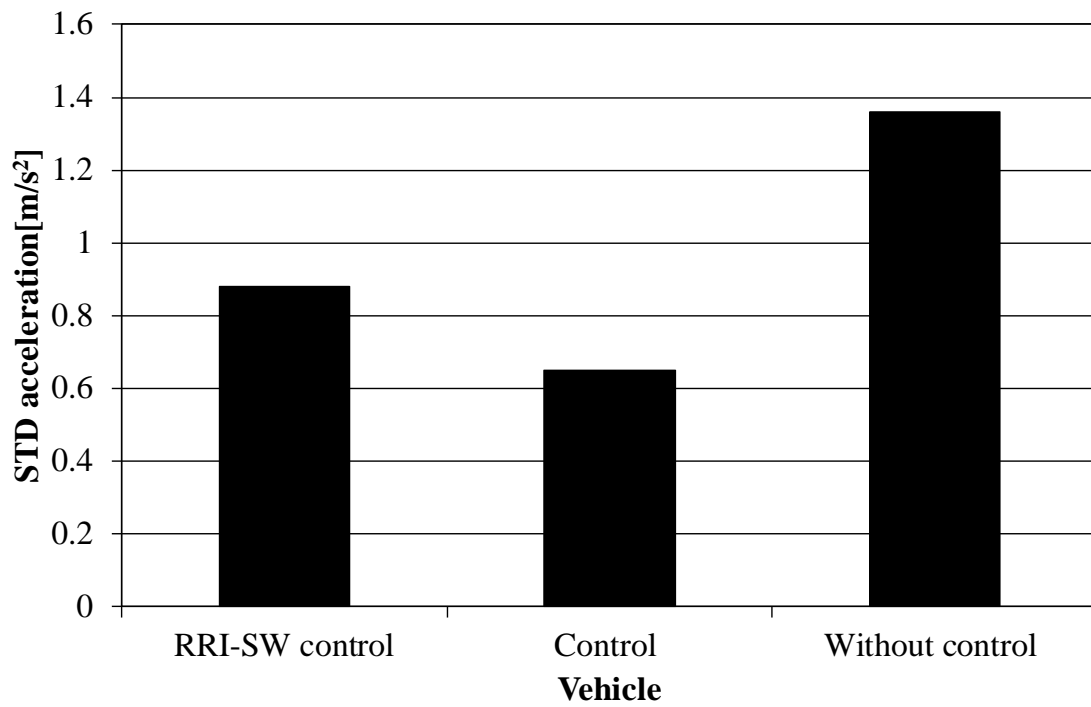
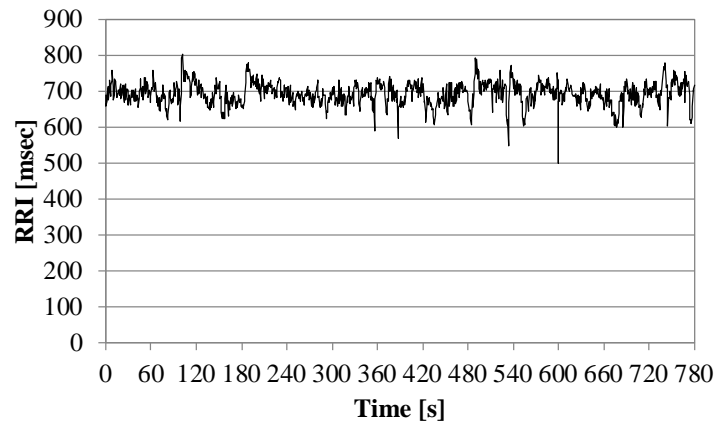
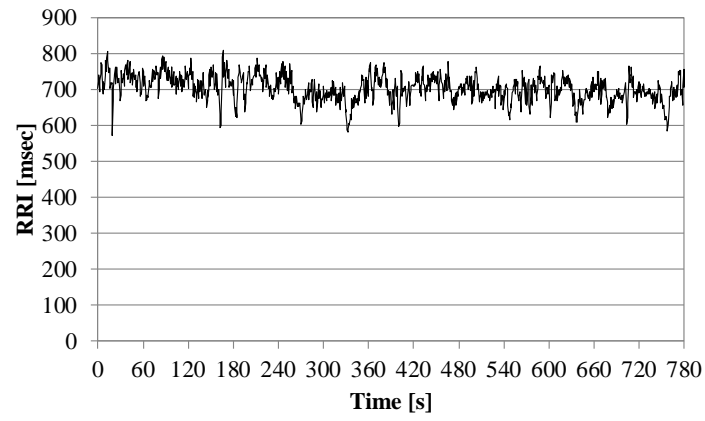


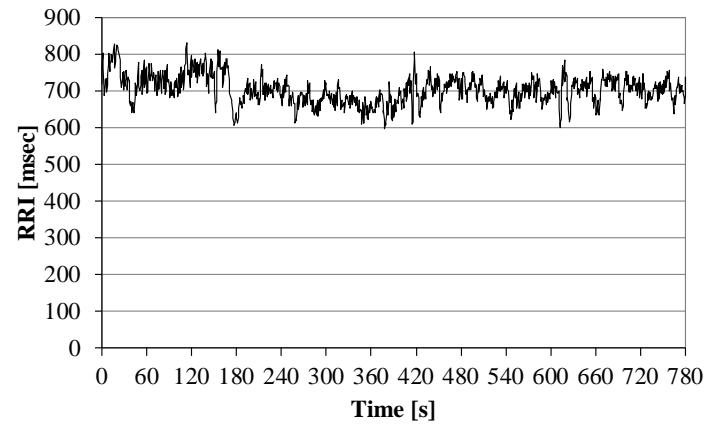
図 4-17 座面加速度の標準偏差



(a) RRI-SW 制御車両



(b) 制御車両



(c) 未制御車両

図 4-18 RRI の時刻歴

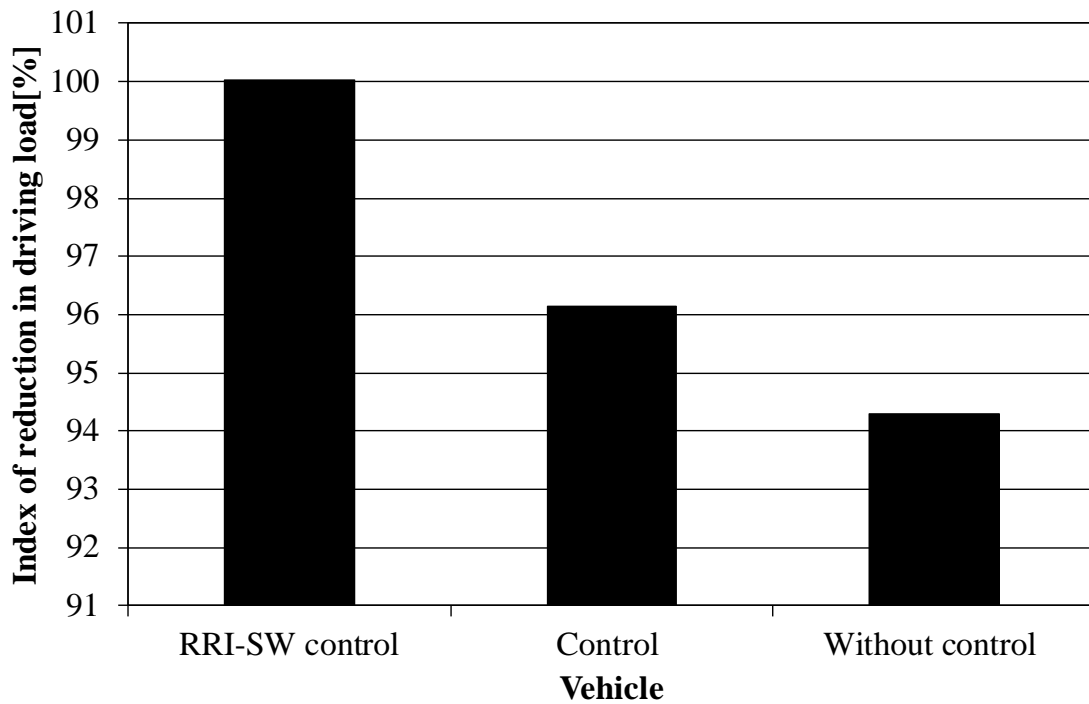


図 4-19 各車両走行時における運転負荷軽減指数

表 4-1 消費電力量

	RRI-SW 制御	制御	未制御
消費電力量 [Wh]	21.7	34.1	0

4.5 まとめ

本章では走行時における運転者の精神的な気分や心理状態を心電図を測定することにより得られる心拍変動から、自律神経系における交感神経系および副交感神経系の活動を推定することで乗り心地を定量的に評価する方法について検討を行った。さらにその評価方法を基にアクティブシートサスペンションの制御を運転者の乗り心地感覚に近づけるため、制御に生体情報を組み込むことを目指した。

- (1) 基礎的な検討として車両の振動が運転者の乗り心地に与える影響について心拍変動を用いることにより、リアルタイムに取得、評価する方法の検討を行い、運転中の交感神経および副交感神経の活動を **RRI** から測定し、**RRI** を用いた乗り心地評価が可能であることを示すことができた。
- (2) 従来の計測物理情報のみの制御手法に運転者の心拍変動をフィードバックすることにより、ゲインの切り替えを行うアクティブシートサスペンションの制御手法に関して提案をし、その有用性について検討を行い、その有用性を走行実験により明らかにした。

第 5 章

結論

本研究では近年、販売と開発が盛んである 1 人乗り用の超小型電気自動車の乗り心地改善を目指し、座席部分にアクティブシートサスペンションを搭載し研究を行った。

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 緒言

本章では本論文にて行った研究の背景となる超小型電気自動車の普及とその乗り心地に関する課題点について明らかにし、自動車全般において従来行われてきた乗り心地改善技術や乗り心地の評価方法について述べた。さらに、本研究にて用いたアクティブシートサスペンションの特色と生体情報を基に乗り心地制御をする手法の概要について説明するとともに、本論文にて述べた研究内容の概要や研究を行うことによる社会的意義を明らかにした。

第 2 章 悪路走行時における振動低減効果

本章ではまず、以降の議論に備えるためにアクティブシートサスペンションのシステムと実験装置の構成について説明した。次に制御対象であるアクティブシートサスペンションのモデル化および定式化を行ったうえで制御システムに対して適用した制御理論について説明し、制御理論をアクティブシートサスペンションシステムに適用する意義を明らかにした。

その後、座面加速度の低減効果および実用性の高い制御手法を検討することを目的として超小型電気自動車が容易に乗り入れることが予想される悪路を想定して波状路と砂利路を用いて振動低減効果について検討を行い、継続的な振動が車両に入力された際における検討として下記の研究成果を得られた。

本章では超小型電気自動車の搭載したアクティブシートサスペンションシステムに最適制御理論とスライディングモード制御理論を適用した。超小型電気自動車が悪路に乗り入れた際に継続的に振動が入力した場合を想定し、波状路および砂利路にて走行実験を行い、各制御手法の振動低減効果の比較を行った。その結果得られた研究成果は以下の通りである。

- (1) ロバスト性を有するスライディングモード制御を適用することで最適制御と比較して本アクティブシートサスペンションシステムに対する有用性を提示することができた。両手法の供給エネルギー量に着目してもスライディングモード制御は実用上、有効な制御システム設計が可能であることを明らかにした。
- (2) 波状路を利用した路面からの入力周波数変動実験および悪路の中でも最も乗り心地の劣化が予想される砂利路走行実験においてもスライ

ディングモード制御の優位性を示すことができた。

- (3) 超小型電気自動車のカーシェアリングを想定した運転者の体重変動実験においては波状路および砂利路にてスライディングモード制御適用時が最適制御適用時より、全ての運転者質量に対して安定した制振性能が得られることが確認できた。さらに、供給エネルギー量もスライディングモード制御の方が低いことからアクティブシートサスペンションへ適用する際の有用性が確認できた。

第3章 段差降下時における衝撃低減効果

本章では振幅が比較的大きく過渡的な衝撃が入力されるような場合に頭部に受ける衝撃の低減について検討を行った。様々な場所に乗り入れることが容易な超小型電気自動車であるが、特に歩道から車道へ降りる場合などの段差を通過するとき大きな衝撃が入力されることから、アクティブシートサスペンションにより、乗員の頭部に受ける衝撃の低減効果について加速度および頭部を支える胸鎖乳突筋の筋電位から検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) アクティブシートサスペンションによりシート上下方向の絶対加速度を低減させることにより運転者の頭部に与える衝撃も低減でき、未制御時にあった頸部への負担は制御時になくなるということが分かった。
- (2) シートの制御力を弱めていきシートの上下方向の絶対加速度の低下率を変化させた際、頭部の加速度および頸部への負担がどのように変化するかについて検討を行ったところ各指標間に強い相関があることが分かった。この結果からもシートの加速度を低下させることで頭部に受ける衝撃を低減させることが可能であるといえ、どの程度シートの加速度を低下させれば頸部への負担度が低減するのかなどということが分かった。

第4章 運転者の生体情報を用いたアクティブシートサスペンションの制御

本章では走行時における運転者の心理状態を心電図を測定することにより得られる心拍変動から自律神経系における交感神経系および副交感神経系の活動を推定することで乗り心地を定量的に評価する方法について検討を行った。さらにその評価方法を基にアクティブシートサスペンションの制御を運転者の乗り心地感覚に近づけるため、制御に生体情報を組み込むことを目指した。

- (1) 基礎的な検討として車両の振動が運転者の乗り心地に与える影響につ

いて心拍変動を用いることにより，リアルタイムに取得，評価する方法を検討を行い，運転中の交感神経および副交感神経の活動を **RRI** から測定し，**RRI** を用いた乗り心地評価が可能であることを示すことができた．

- (2) 従来の計測物理情報のみの制御手法に運転者の心拍変動をフィードバックすることにより，ゲインの切り替えを行うアクティブシートサスペンションの制御手法に関して提案をし，その有用性について検討を行い，その有用性を走行実験により明らかにした．

以上に示した研究成果により超小型電気自動車の乗り心地向上に対するアクティブシートサスペンションを適用した制御システムの有用性を明らかにした．さらに本研究ではアクティブシートサスペンションのシステムに運転者一人一人の感じる乗り心地を反映させることを目的として生体情報をリアルタイムに取得しそれをフィードバックすることにより振動の制御手法を変化させ，乗り心地の改善を行う手法に関して提案を行い，その実現性に関する指針を示すことができたといえる．

本研究の今後の展望として **RRI-SW** 制御に関しては乗り心地の好みなどをデータベース化し，数多くの制御方法からその時の心理状態に最適な制御へのスムーズな切り替えをするシステムの構築を行っていくことでより乗り心地感覚にあった制御を行うことができると考えられる．また，心電図のほかに，脳波や発汗，呼吸などの生体情報を計測し，それらの指標を分析することでより詳細な運転者・乗員の心理状態の推定を行っていくことが可能となる．さらに，これらの分析を基に車両に乗るだけで健康状態のチェックや管理ができ，乗車することで心身の健康を維持できる走るクリニックとなるようなシステムを実現していきたい．

謝辞

本研究を行なうにあたり多大なるご指導，ご鞭撻ならびにご尽力を賜りました本学 工学部 動力機械工学科 押野谷康雄 教授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 精密工学科 槌谷和義 准教授，工学部 精密工学科 山本佳男 教授，工学部 医用生体工学科 菊川久夫 教授，工学部 電気電子工学科 大山龍一郎 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。

また，数々の貴重なご助言をいただきました本学 工学部 動力機械工学科 長谷川真也 講師に深く感謝の意を表します。最後に，本学の諸先生，諸先輩，同僚，大学院生ならびに押野谷研究室の諸氏に感謝いたします。

平成 26 年 1 月

加藤 英晃

参考文献

第 1 章 序論

- [1-1] 国土交通省都市局・自動車局：超小型モビリティ導入に向けたガイドライン—新しいモビリティの開発・活用を通じた新たな社会生活の実現に向けて—, (2012).
- [1-2] 星明彦, 超小型モビリティによるスマートライフの提案, 自動車技術, Vol.67, No.3, 2013, pp.18-23
- [1-3] 鎌田実, 藤井直人, 秋山哲男, 高齢者の使用に適した移動具の研究 (第 1 報 高齢者の特性調査とそれに基づく移動具への要求機能の検討), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.665, (2002), pp.220-227.
- [1-4] 鎌田実, 畝田真宏, 寺島義人, 藤井直人, 秋山哲男, 高齢者の使用に適した移動具の研究 (第 2 報 シルバービークルコンセプトの提案とプロトタイプ製作・評価), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.669, (2002), pp.1487-1497.
- [1-5] 鎌田実, 寺島義人, 藤井直人, 秋山哲男, 高齢者の使用に適した移動具の研究 (第 3 報 タウンモビリティ社会実験による提案コンセプトの評価とまちづくりの方向性), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.669, (2002), pp.1495-1502.
- [1-6] L.D.バーンズ, J.B.マコーミック, C.E.ボローニ=バード, 燃料電池が変える自動車の未来, 日経サイエンス 2003 年 1 月号, pp.28-37.
- [1-7] 廣田幸嗣, 足立修一, 出口欣高, 小笠原悟司, 電気自動車の制御システム 電池・モータ・エコ技術, 東京電機大学出版局, (2009), pp.100-101.
- [1-8] (有)タケオカ自動車工業 車いす用一人乗り小型電気自動車 フレンドリーエコ <http://www.takeoka-m.co.jp/friendly.html>
- [1-9] 佐藤桂, 永井正夫, 高齢者の自動車の運転, 運転免許証の自主返納および返納後の移手段に対する意識調査, 日本機械学会第 20 回交通・物流部門大会, (2011), pp.317-320.
- [1-10] 赤松幹之, 加齢による機能変化からみた高齢者のためのモビリティ技術, 自動車技術, Vol.67, No.3, (2013), pp.49-54.
- [1-11] 2013 年 8 月 29 日付 朝日新聞「自動運転者「20 年までに」日産、発売時期を表明」
- [1-12] 2013 年 8 月 28 日付 日本経済新聞「日産、自動運転車 20 年までに発売 試作車公開」
- [1-13] 須田義大, 次世代モビリティ—新たなモビリティ社会のツール—, 自動車技術, Vol.67, No.3, (2013), pp.4-11.
- [1-14] ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 大前学, 超小型電気自動車を用いた自動運転システムの研究開発, 自動車技術, Vol.66, No.3, (2012), pp.81-87.
- [1-15] ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 稲田一成, 永井正夫, 超小型電気自動車の通常運転行動モデルに基づく個別適合運転支援システムの開発, 日本ロボッ

- ト学会誌, Vol.27, No.8, (2009), pp.885-891.
- [1-16] ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 小竹元基, 永井正夫, 超小型電気自動車の車輪独立駆動トルク制御による車線追従制御システム, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.72, No.715, (2006), pp.795-801.
- [1-17] 高木友博, 西達也, 山口亨, 新田洋志, 田野俊一, 和田文雄, 鎌田実, バリアフリーカーにおける人間中心型運転支援システムの構成法, 電気学会論文集 C, Vol.121, No.7, (2000), pp.1227-1236.
- [1-18] 荻野弘彦, 小林誠也, 長谷川紳, 小型電気自動車のスキッド制御に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.77, No.784, (2011), pp.282-294.
- [1-19] 野波健蔵, 範啓富, μ シンセシス理論を用いたアクティブ振動制御系の設計と制御性能, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.60, No.572, (1994), pp.1203-1209.
- [1-20] 谷藤克也, 永江哲哉, 鉄道車両のアクティブ制振における制振性能の改善 (H_{∞} 制御則を適用した模型実験装置による検討), 日本機械学会論文集 (C編), Vol.60, No.572, (1994), pp.1203-1209.
- [1-21] 谷藤克也, 小林哲也, 鉄道車両のアクティブ制振における制振性能の改善 (第 2 報, μ シンセシスの適用による車体質量の変動に対するロバスト性の向上), 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.617, (1998), pp.118-125.
- [1-22] 宇都宮健児, 湯村敬, 岡本健一, エレベーター用アクティブ制振技術に対する μ 設計の適用, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.78, No.785, (2012), pp.92-101.
- [1-23] 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.
- [1-24] J.A. Tambolia, S.G. Joshib, Optimum Design of a Passive Suspension System of a Vehicle Subjected to Actual Random Road Excitations, Journal of Sound and Vibration, Vol.219, No.2, (1999), pp.193-205.
- [1-25] Hamid D. Taghirad, E. Esmailzadeh, Automobile Passenger Comfort Assured Through LQG/LQR Active Suspension, Journal of Vibration and Control, (1998), pp.603-618.
- [1-26] 佐川貢一, 猪岡光, 猪岡英二, 救急車用アクティブ制御ベッドの開発, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.63, No.609, (1997), pp.127-133.
- [1-27] 小野貴彦, 猪岡光, 救急車用 2 自由度アクティブ制御ベッド, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.71, No.711, (2005), pp.46-52.
- [1-28] 大田慎一郎, 西山修二, 能動制御を用いた自動車用シートの乗り心地向上に関する研究 (第 1 報 最適化アルゴリズムの検証), 日本機械学会論文集 (C編), Vol.77, No.779, (2011), pp.36-47.
- [1-29] 大田慎一郎, 西山修二, 能動制御を用いた自動車用シートにおける乗員頭部の振

- 動低減に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.78, No.791, (2012), pp.42-50.
- [1-30] 松岡由幸, 下川真人, 佐藤陵, 車いす車載システムにおける振動乗り心地評価予測手法の構築と免振装置の開発, 設計工学, Vol.38, No.10, (2003), pp.48-57.
- [1-31] 栗田裕, 村岸恭次, ボイスコイルモータによる車載用防振台のアクティブ制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.61, No.586, (1995), pp.106-111.
- [1-32] Jian-Da Wu, Rong-Jun Chen, Application of an active controller for reducing small-amplitude vertical vibration in a vehicle seat, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.274, (2004), pp.939-951.
- [1-33] Han, Y. M., Jung, J. Y., Choi, S. B. and Wereley, N. M., Ride quality investigation of an electrorheological seat suspension to minimize human body vibrations, *Proceeding Institution of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol.220, (2006), pp.139-150.
- [1-34] Seung-Bok Choi, Young-Min Han, Vibration control of electrorheological seat suspension with human-body model using sliding mode control, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.303, (2007), pp.391-404.
- [1-35] 木原三津夫, 加藤英司郎, 松浦和利, 感性に基づく車両運動性能評価, *NISSAN TECHNICAL REVIEW*, No.45, (1999), pp.12-15.
- [1-36] 小泉孝之, 辻内伸好, 植田勝彦, 兼田哲男, 人体動特性を考慮した乗り心地評価とそのモデル化, *Dynamics and Design Conference 1999 講演論文集*, (1999).
- [1-37] 小泉孝之, 辻内伸好, 小濱明久, 兼田哲男, 人体動特性を考慮した乗り心地評価, *Dynamics and Design Conference 2000 講演論文集*, (2000).
- [1-38] 玉置元, 吉村卓也, 品川貴志, 人体の振動感覚の定量化に関する基礎研究, *Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM 論文集*, (2001).
- [1-39] 内川竜一, 小島重行, 小倉由美, 藤田悦則, 金子成彦: 振動の乗り心地の生理指標を用いた定量化, 日本機械学会 *Dynamics and Design Conference* (2011), 講演番号 618.
- [1-40] 王峰, 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.
- [1-41] 藤田悦則, シートの快適性, *日本機械学会誌*, Vol.104, No.997, (2001), pp.786-788.
- [1-42] 土居俊一, 石黒陸雄, 武井一剛, 徳田寛, 石川浩, 車両の過渡振動と乗り心地評価, *日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集*, Vol.1, (1992), pp.267-272.
- [1-43] 前田節雄, ISO 2631 に基づいた乗り物振動評価の動向, *日本音響学会誌*, Vol.53, No.1, (1997), pp.33-38.
- [1-44] 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.
- [1-45] 佐藤都也子, 健康な成人女性におけるハンドマッサージの自律神経活動および気分への影響山梨大学看護学会誌, Vol.4, No.2, (2006), pp.25-32.
- [1-46] 段旭東, 田代学, 呉迪, 山家智之, 仁田新一, 伊藤正敏, アロマによる自律神経活動と脳活動, Journal of International Society of Life Information Science Vol. 24, No.2, (2006), pp.383-395.
- [1-47] 長坂猛, 田中美智子, 須永清, 増田敦子, 楊箬隆哉, 佐伯由香, 榊原吉一, 音刺激が心拍変動に及ぼす影響, 宮崎県立看護大学研究紀要, Vol.1, No.2, (2000), pp. 61-65.
- [1-48] 西本哲也, 永井孝太, 自動車急制動時の下肢筋電応答に及ぼす加齢の影響, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.78, No.792, (2012), pp.2962-2971.
- [1-49] 橋本博, 片山硬, 運転者の脈波のゆらぎと心身状態について, 自動車技術, Vol. 52, No. 4, (1998), pp.21-25.
- [1-50] 片山硬, 橋本博, 阪井和男, 自動車運転時のドライバーの脈波のゆらぎ, 自動車技術会論文集, Vol. 27, No. 4, (1996), pp. 89-93.
- [1-51] 野口義博, 木村尚史, 豊福勝也, 山川新二, 石合克也, 実運転時に対応した心拍変動性指標解析手法の検討, 自動車技術会論文集, Vol.29, No.1, (1998), pp.71-76.
- [1-52] 中村聡, 木村賢治, 渥美文治, ドライバー状態の推定技術, TOYOTA Technical Review, Vol. 56, No.2, (2009), pp.64-69.
- [1-53] 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, 電気学会研究会資料 産業計測制御研究会, Vol.2011, No.72, (2011), pp.73-76.
- [1-54] 中村士, 富田洋平, 満倉靖恵, 橋本隆次, 村上和朋, 高尾浩二, 自転車乗車時の生体信号計測によるユーザ特性の評価, 電気学会研究会資料 産業計測制御研究会, Vol.2011, No.72, (2011), pp.77-80.
- [1-55] 定常円旋回時の車両運動のドライバーに与える精神的負荷 (心拍のウェーブレット解析), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.752, (2009), pp.935-941.
- [1-56] 田口敏行, 稲垣大, 永井孝幸, 石川浩, 長時間運転時のドライバ疲労に関する考察, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.1, (1997), pp.77-82.
- [1-57] 田口敏行, 稲垣大, ドライバの運転疲労における上下振動の影響 (ストレスホルモンを指標とした評価), 自動車技術会論文集, Vol.30, No.2, (1999), pp.93-97.
- [1-58] 茂吉雅典, 横山清子, 吉岡貴芳, 渡辺與作, 高田和之, 高速道路の長時間運転における心電図 R-R 感覚時系列の経時変化, 自動車技術会論文集, Vol.27, No.3, (1996), pp.107-112.
- [1-59] 岡本裕司, 中野公彦, 大堀真敬, 多加谷敦, 須田義大, 堀重之, 筋電位測定によ

- る自動車の乗り心地評価, 生産研究, Vol.62, No.3 (2010) pp.267-270.
- [1-60] Rencheng Zheng, Kimihiko Nakano, Yuji Okamoto, Masanori Ohori, Shigeyuki Hori, Yoshihiro 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. 405-413.
- [1-61] 有馬正和, 脇水俊行, 船舶の乗り心地評価のための心拍変動性指標の解析, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, No.4 (2007) 論文番号 2007S-G3-17.
- [1-62] 有馬正和, 平井達之, 細田龍介, 船舶の乗り心地評価に関する研究 (第 4 報 乗り物酔い発症時の表情の変化), 日本造船学会論文集, 日本造船学会論文集, Vol. 184, (1998), pp.599-605.
- [1-63] 有馬正和, 田村裕貴, 高速旅客船の乗り心地評価に関する研究 (第 2 報 心理的反応の計測と解析), 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 3, (2006), pp. 177-181.
- [1-64] 水野康文, 心電図 R-R 間隔による運転疲労評価法の研究, 自動車技術会論文集, Vol.27, No.3 (1996) pp.101-105.
- [1-65] 三野弘幸, 土居俊一, シート特性を考慮した自動車運転時のドライバ状態推定, 日本機械学会第 18 回交通・物流部門大会講演論文集 (2009), pp.291-294.
- [1-66] 柳平雅俊, 安土光男, 杉浦康司, 南野政明, 望月正人, ドライバー状態検出装置の開発, PIONEER R&D, Vol.11, No.2 (2001) pp.67-72.
- [1-67] 柳平雅俊, 安土光男, 運転状態推定技術の開発 (心拍解析による眠気状態の検出), PIONEER R&D, Vol.13, No.2 (2003) pp.75-82.
- [1-68] 林知広, 岩月幸一, 山海嘉之, 神経・筋活動の制御に支障がある重度対麻痺患者の脚上げ意思推定と歩行アシスト, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.77, No. 774, (2011), pp.439-449.
- [1-69] 林知広, 岩月幸一, 長谷川真人, 田上未来, 山海嘉之, 自力運動困難な麻痺患者に対するロボットスーツを用いた新しい随意運動訓練 (重度脊髄損傷患者への臨床適用), 生体医工学, Vol.50, No. 1,(2012), pp.117-123
- [1-70] 河本浩明, 山海嘉之, 人間の運動特性に基づいたパワーアシストシステムのための定量的運動制御解析手法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.70, No. 692, (2004), pp.439-449.
- [1-71] 新宮正弘, 江口清, 山海嘉之, バイオフィードバックを用いたポリオ経験者の筋神経系制御能力の改善とロボットスーツ HAL による麻痺肢動作支援, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.772, (2010), pp.3630-3638.

第 2 章 悪路走行時における振動低減効果

- [2-1] ISO, Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, No.ISO-2631-1978(e).
- [2-2] Janeway, R.N, Human Vibration Tolerance Criteria and Application to Ride Evaluation, SAE Technical Paper Series, 750166, 24 (1975).
- [2-3] 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, ボイスコイルモータを用いた小型車両用シート
の制御 (悪路走行時における制御性能の検討), Journal of The Magnetics Society of Japan, Vol.37, No.3-1, (2013), pp.95-101.
- [2-4] H. Kato, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, H. Kasuya, Use of Active Seat Suspension to Improve Ride Comfort during Travel on Gravel Roads, Proc. Sch. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol. 35, (2010), pp.53-57.
- [2-5] H. Kato, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, H. Kasuya, Experimental Examination of Riding Comfort Improvement with Active Seat Suspension of Small Vehicle during Driving on a Bad Road (Comparison of the Control Performances by a Trade-Off Curve), Proc. Sch. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol.36, (2011), pp.35-42.
- [2-6] 中島一成, 赤崎賢史, 加藤英晃, 押野谷康雄, 長谷川真也, 小型車両用シートのアクティブサスペンション (悪路における基礎的検討), 日本機械学会 関東支部第 17 期総会講演会講演論文集, pp.191-192
- [2-7] 加藤英晃, 赤崎賢史, 中島一成, 長谷川真也, 押野谷康雄, 小型車両用アクティブシートサスペンション (ロバスト制御適用時の基礎的検討), 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集 CD-ROM, (2011).
- [2-8] 加藤英晃, 中島一成, 蘭慶輝, 押野谷康雄, 長谷川真也, VCM を用いた小型車両のアクティブシート (悪路走行時における制御性能の比較), 第 35 回日本磁気学会学術講演会講演論文集, p. 253, (2011).
- [2-9] H. Kato, K. Nakashima, Q. Lan, S. Hasegawa, Y. Oshinoya, Active Seat Suspension for a Small Vehicle (Effect of Weight Change on Vibration Suppression Performance), The International Conference on Electrical Engineering 2012 Proceedings CD-ROM, (2012).
- [2-10] H. Kato, Q. Lan, K. Sunga, S. Hasegawa, Y. Oshinoya, Active control of small vehicle seat with voice coil motor (Experimental consideration on weight change), ICAUMS2012/36th Conference on Magnetics in Japan Abstracts, p.406, (2012).
- [2-11] 蘭慶輝, 中島一成, 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, 小型車両用シートのアクティブサスペンション (ロバスト制御適用時の制振性能の比較), 日本機械学会 関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, pp.117-118, (2012).

- [2-12] 須永啓太, 蘭慶輝, 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, 小型車両用シートのアクティブサスペンション (悪路走行時における実験的検討), 日本機械学会 関東支部第 19 期総会講演会講演論文集, pp.583-584.
- [2-13] 芳村敏夫, 竹井一剛, 栗本政雄, 日野順市, 1 車輪モデルに対するファジィ推論を用いたアクティブサスペンションに関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 67, No. 658, (2001), pp.1779-1784.
- [2-14] 中川聡子, 蛭原崇, 松本陽, 鉄道車両のための H^∞ 制御アクティブサスペンションの研究, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 63, No. 606, (1997), pp. 349-355.
- [2-15] 野波健蔵, 範啓富, μ シンセシス理論を用いたアクティブ振動制御系の設計と制御性能, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.60, No.572, (1994), pp.1203-1209.
- [2-16] 野波健蔵・西村秀和・平田光男, MATLAB による制御系設計, 東京電機大学出版, 1998.
- [2-17] 野波健蔵, 田宏奇, スライディングモード制御, コロナ社, 1994.
- [2-18] 山本重彦, 加藤尚武, PID 制御の基礎と応用, 朝倉書店, 1997.
- [2-19] R. L. Kosut, Suboptimal Control of Linear Time-Invariant Systems Subject to Control Structure Constraints, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-15, pp. 557-563, 1970.
- [2-20] 白石昌武, 入門現代制御理論, 哲学出版, 1987.
- [2-21] K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc, 1997.
- [2-22] V. I. Utkin, Sliding Modes in Control and Optimization, Springer-Verlag, 1992.
- [2-23] A. S. I. Zinober, Variable Structure and Lyapunov Control, Sringer-Verlag, 1994.
- [2-24] 野波健蔵, 田宏奇, ロバスト最小次元 VSS オブザーバを適用した弾性ロータ・磁気軸受系のスライディングモード制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.60, No. 571, (1994), pp.897-905.

第3章 段差降下時における衝撃低減効果

- [3-1] 須永啓太, 増野将大, 蘭慶輝, 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, 超小型電気自動車用シートのアクティブサスペンション (段差降下時における基礎的研究), 第25回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.310-311.
- [3-2] 石田勝樹, 須永啓太, 蘭慶輝, 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, ボイスコイルモータを用いた超小型車両用シートの制御 (段差降下時における基礎的検討), 第36回日本磁気学会学術講演会講演論文集, p.72, (2013).
- [3-3] 国土交通省 都市・地域整備局長 道路局長, 歩道の一般的構造に関する基準等について, 2005.
- [3-4] 藤原哲司, 筋電図・誘発電位マニュアル (改訂第4版), 金芳堂, 2004.
- [3-5] 廣瀬和彦, 筋電図判読テキスト (第2版), 文光堂, 2007.
- [3-6] 藤田恒夫, 入門人体解剖学 (改訂第5版), 南江堂, 2012.
- [3-7] 道田奈々江, 元吉菜緒子, 宮原民夫, シートリラックス装備の提案と生理学的評価, マツダ技報, No.25, (2007), pp.112-117.
- [3-8] 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵, 表面筋電図, 東京電機大学出版, 2006.
- [3-9] 浅井智也, 田川善彦, 手指等尺性屈曲保持における負荷タイプの違いによる疲労差, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.78, No.790, (2012), pp.2152-2161.
- [3-10] 高野純一, 青村茂, 菊池恵美子, 牧田收, 鈴木健太郎, 急停車時と急発進時における車載車いす搭乗者の身体挙動と筋活動 (シートベルトとヘッドレストの有効性), 日本保健科学学会誌, Vol.11, No.3, (2008), pp.115-124.
- [3-11] 山下和彦, 今泉一哉, 岩上優美, 佐藤満, 中島佐和子, 井野秀一, 小山裕徳, 川澄正史, 伊福部達, 高齢者の定量的下肢筋力評価のための膝間力計測器の開発, 電気学会論文誌C, 電子・情報・システム部門誌, Vol.130, No.2, (2010), pp.267-274.
- [3-12] 埴田和史, 辻村祐次, 北原照代, 西山勝夫, 回転座席使用によるフォークリフト運転者の身体負担軽減効果の検討, 産業衛生学雑誌, Vol.44, No.5, (2002), pp.180-187.
- [3-13] Westgaard RH: Effects of physical and mental stressors on muscle pain, Scand J Work Environ Health, Vol. 25, Supplement 4, (1999), pp.19-24.
- [3-14] 倉森章, 酒井大輔, 上條正義, ドライバの筋電図計測を用いた運転疲労評価手法の検討, 自動車技術会論文, Vol.41, No.2, (2010), 489-493.
- [3-15] 倉森章, 高口紀貴, 上條正義, 佐渡山亜兵, ドライバの筋活動に着目した運転しやすさ評価の検討, 自動車技術, Vol.61, No.6, (2007), pp.116-121.

第 4 章 運転者の生体情報を用いたアクティブシートサスペンションの制御

- [4-1] H. Kato, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, H. Kasuya, Psychological and Physiological Effects of Active Seat Suspension on Ride Comfort of Small Vehicles, Proc. Sch. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol.35, (2010), pp.47-51.
- [4-2] H. Kato, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, H. Kasuya, Ride Comfort Evaluation of Active Seat Suspension for Small Vehicles Using Psychology and Physiology (Fundamental Consideration by Analysis of Heart Rate Fluctuation and Salivary Amylase Activity), Proc. Sch. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol.36, (2011), pp.29-34.
- [4-3] 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, 超小型車両用アクティブシートサスペンションの乗り心地評価 (振動加速度が心拍変動に与える影響), 東海大学工学部紀要, Vol.52, No.2, (2012), pp.247-254.
- [4-4] 加藤英晃, 大土厚徳, 筒井陽平, 押野谷康雄, 長谷川真也, 粕谷平和, 小型車両におけるアクティブシートサスペンションの乗り心地評価 (心理・生体情報を用いた基礎的検討), 2010 年度自動車技術会 関東支部 学術研究講演会講演 CD-ROM.
- [4-5] 筒井陽平, 大土厚徳, 加藤英晃, 押野谷康雄, 長谷川真也, 小型車両用シートのアクティブサスペンション (生体情報を用いた基礎的検討), 日本機械学会 関東支部第 17 期総会講演会講演論文集, (2011), pp.193-194.
- [4-6] 山崎悠平, 筒井陽平, 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, 小型車両用シートのアクティブサスペンション (路面変化が運転者の心理と生理情報へ与える影響), 日本機械学会 関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, (2012), pp.115-116.
- [4-7] 加藤英晃, 山崎悠平, 長谷川真也, 押野谷康雄, 小型車両用シートのアクティブサスペンション (生体信号を用いた乗り心地評価に関する基礎的検討), 第 24 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, (2012), pp.595-596.
- [4-8] 石田勝樹, 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, 超小型電気自動車用シートのアクティブサスペンション (心拍変動を用いた切り替え制御手法の提案), 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, (2013), pp.312-313.
- [4-9] H. Kato, M. Ishida, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, Active Seat Suspension for Ultra-Compact Electric Vehicle (Fundamental Considerations on a Method for Switching Control Using Heart Rate Variability), Tokai Univ., Ser. E, Vol. 38, (2013), pp.75-82.
- [4-10] Dale Dubin, M.D., 村上祐二, 図解心電図テキスト, 文光堂, 2009.
- [4-11] 池田隆徳, そうだったのか! 絶対読める心電図, 羊土社, 2011.
- [4-12] 大須賀美恵子, 自律神経指標を用いたドライバの状態推定, 自動車技術, Vol.64,

No.10, (2010), pp.24-29.

- [4-13] 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), 自動車技術会シンポジウム, Vol.7, No.12, (2013), pp.40-45.
- [4-14] 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, 2009.
- [4-15] 竹宮隆, 下光輝一, 運動とストレス科学, 杏林書院, 2003, pp.85-100.
- [4-16] 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.
- [4-17] 板東武彦, 小山省三, バーン・レヴィ生理学, 西村書店, 2003, pp.201-349.
- [4-18] 森信彰, 佐田理, 松本佳昭, 江鐘偉心拍変動による精神ストレスの短時間解析に関する研究, 日本機械学会年次大会講, 演論文集, No.7 (2008) pp. 205-206.
- [4-19] 渥美文治, 心拍計測によるドライバの意識状態の評価, 自動車技術会学術講演会前刷り集, No. 946, (1994) pp.133-136.
- [4-20] 横山和仁, 荒記俊一, 日本語版 POMS 手引き, 金子書房, 1994.