超小型電気自動車用アクティブシートサスペンション —筋電位を用いた乗り心地評価に関する基礎的検討—

Active Seat Suspension for Ultra-Compact Electric Vehicle —Fundamental Consideration on Ride Comfort Evaluation Using Myoelectric Potential—

加藤 英晃^{*1}(正員), 増野 将大^{*2}, 石田 勝樹^{*2},
長谷川 真也^{*1}(正員), 押野谷 康雄^{*1}(正員)

Hideaki KATO (Mem.), Masahiro MASHINO, Masaki ISHIDA,
Shinya HASEGAWA (Mem.), Yasuo OSHINOYA (Mem.)

In recent years, several manufacturers have marketed ultra-compact electric vehicles. We suggest active seat suspension (ASS) to improve the ride comfort by the bad road run as a high value-added product. We used a voice coil motor, which is a kind of linear motor as an actuator of ASS. The ultra-compact electric vehicles are different from a normal car and the frequent riding into to the narrow way and bad road occurs. There are lot of steps and small obstacles on a road surface, and the aggravation of the ride comfort of the vehicle is expected by the comparatively low-speed run. In this study, we focused on the neck electromyogram and seat acceleration when fall from the bump. As a result, we suggested control method of the ASS considering the neck feeling of burden.

Keywords: active seat suspension, ride comfort, ultra-compact electric vehicle, myoelectric potential.

1 緒言

近年, 1 人から 2 人乗り用の超小型電気自動車がいくつかの自動車メーカーから販売されている。2012 年に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が発表され[1], メーカー各社の開発も加速しておりコンセプトカーの発表などが盛んに行われている。さらに, これらの車両は外出の制約により孤立している高齢者の自立支援対策などにも望ましい移動具であるという報告があり[2], 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と予想される。

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。市場調査によればこれらの自動車は都市部の近距離移動のほかに郊外や農村部, 山間部における利用者も多いことが明らかとなっており, 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。

このような背景から著者らはリニアモータ用いたアクティブシートサスペンション (以下 ASS と称する) を搭載し, 乗り心地改善を提案している[3]。座席

部分に簡易装着が可能である ASS は車体が非常にコンパクトであるために大掛かりな装置の改良が難しい超小型電気自動車に適している。また ASS は車体から独立したシート部分をダイレクトに制振するため, 4 輪のアクティブサスペンションにて車両全体を制御する従来のシステムよりも大幅に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に大きなメリットをもたらす。

シートサスペンションのアクティブ制御に関してはいくつかの報告があるが, それらは従来の乗用車における舗装路走行やエンジンから入力される比較的小さな振動を取り扱うにとどまっている[4], [5]。これに対し著者らはこれまでに悪路進入時の振動低減効果に関して検討を行っており, 観光地や集合住宅にて利用意向の高い超小型電気自動車のカーシェアリングに対して実用性の高い制御手法を明らかにしている[6]。

一方, 高齢者対応のモビリティ手段として超小型電気自動車には安全性や快適性の面において解決すべき点も多くある。赤松[7]は高齢者のための超小型電気自動車は認知機能の面からこれまで以上に振動低減の必要があると言及している。中でも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の低下が課題として挙げられ, 走行中に入力される比較的大きな振動に対して車体やシート構造により乗員頭部への

連絡先: 加藤 英晃, 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1, 東海大学工学部動力機械工学科,
e-mail: hkato@tokai-u.jp

^{*1}東海大学 ^{*2}東海大学大学院

Fig. 1 Photograph of ultra-compact electric vehicle.

Fig. 2 Photograph of active seat suspension (ASS).

負担を低減していくことが必要となってくる。超小型電気自動車は駐車スペースなどから歩道を通り、車道に降下することが頻繁にあり、その際運転者は大きな衝撃を受ける。本論文ではこのような場合を対象とし、ASS による運転者の頭部に受ける衝撃の低減効果について明らかにする。

また Zheng ら[8]は車両横方向の加速度を対象に頸部筋活動により乗り心地評価を行っているが、上下方向の振動に対して評価を行っている事例は見受けられない。本研究では運転者の負担感について頭部を支える頸部の筋活動から評価を行い、頸部の負担を考慮したより実用的な ASS 制御の可能性について示す。

2 実験装置

実験には 1 人乗り用の超小型電気自動車を用いた。車両の外観を Fig. 1 に示す。座席部には Fig. 2 に示す ASS を搭載している。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られ、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リニアモータの一種であるボイスコイルモータを採用した。車両およびボイスコイルモータの仕様を Table 1 に示す。なお DSP など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。

Table 1 Specifications for vehicle and voice coil motor.

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
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

Fig. 3 ASS control system.

3 ASS の制御システム

本論文ではシート加速度を制御することによる頭部の衝撃低減効果について検討を行った。なお頭部の加速度低減を対象として制御を行うシステムも考えられるが、人体のモデル化は大変複雑な上に個人差を考慮しなければならないため上記手法を用いた。

ASS のフィードバック制御システムの概略図を Fig. 3 に示す。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 y 、速度 $\dot{y}$ は加速度ピックアップからの信号 $\ddot{y}$ 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 i 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。

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。またクッション等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になる。

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

ここで m : 人間 (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 : 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。

また, ボイスコイルモータの回路方程式は次式のようになる。

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

ここで 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] 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,

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

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

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

4 制御理論

ASS の制御には最適制御理論を用いた。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。

$$v_d = -\mathbf{F}_d \mathbf{y}_d \quad (4)$$

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

ここで $\mathbf{F}_d$: フィードバック行列, $\mathbf{Q}_d$: 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_d : 制御電圧に関する重み係数である。

制御器はシミュレーションにより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下記の重み係数を本システムに対する最高性能として採用した。

$$\mathbf{Q}_d = \begin{bmatrix} 10^{11} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{9.2} & 0 \\ 0 & 0 & 10^5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r_d = 10^5 \quad (7)$$

5 頸部筋電位を用いた乗り心地評価

5.1 筋電位の測定方法

本研究では運転者への負担感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[9]。胸鎖乳突筋は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時, 頭部の揺れを抑制するために活動する。表面筋電位の計測は皮膚表面電極 J ビットロード (日本光電社製) を用いた。Fig. 4 に電極の貼り付け位置を示す。計測した信号は Bio Amp ML132 (AD Instruments 社) により増幅後, 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。動作分析の手段として筋電位を用いる場合, 信号の平均振幅が対象となるため[10], 計測した信号に対して 0.1 秒区間毎の二乗平均平方根 (RMS) を算出した。

5.2 評価方法

筋力の発揮に対する筋活動には個人差があるため最大の筋力を発揮した時の筋電位である最大随意収縮力 (以下 MVC と称する) にて正規化を行った。MVC は段差降下実験を行う前に椅座位にて前を向き頭を動かさないように指示し, 被験者が 10 秒間最大努力にて頸部に力を発揮した時の筋電位を測定することにより算出した。測定した信号を 0.1 秒区間毎の RMS として整理し, その最大値を MVC とした。この MVC に対する段差降下実験の RMS 値の割合を百分率で表した %MVC にて負担感

Fig. 4 Photograph of the position of the electrode.

Fig. 5 Test course of bump road using hard rubber.

の評価を行った。% MVC は被験者がどの程度筋活動をしたのかという指標であり、この値が高いほど筋肉に高い負担がかかったと評価することができる。

6 段差降下実験

6.1 走行路

段差降下実験における走行路は Fig. 5 に示すように歩車道境界の段差を想定した硬質ゴム板を用いた。車両が民地などに出入りするため、縁石の一部を切り下げてい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[11]。本実験では最悪の状況を想定し硬質ゴム板の高さを 50mm とした。なお事前に段差乗り上げについても検討し、段差降下の方がより大きな衝撃となることを確認している。さらに乗り上げ時は衝撃が入力するタイミングを運転者は予測でき降下時ほど高い負担にはなりにくいため段差降下にて検討を行った。

6.2 被験者

本実験は初めての試みであることから身体機能や筋力が低下した高齢者を対象とした場合、予期せぬ怪我などの危険性もあると考えられる。そこで今回は 10 名の男子大学生・大学院生にて基礎的な検討を行った。

なお将来的には専用の高齢者疑似体験装具などを用いて若年成人を対象とした実験を重ね行き、その上で高齢者を対象とした検討を進めていく予定である。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。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いる。

6.3 実験方法

実験は 4 章にて示した制御を適用した制御車両と未制御車両（アクチュエータ設置済み、電気回路開放）にて検討を行った。ここで未制御車両は、本来この車両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ようにしたものである。なお被験者に制御・未制御車両について教示しないものとした。加速度はシートと頭部（額に加速度ピックアップを固定）の上下方向を測定した。測定時に運転姿勢が変わらないよう着座位置、ステアリングホイール把持位置、フットレストへ足を置く位置を一致させた。なお実際の走行時における最悪な状態を想定し運転者の体が座席の背もたれおよびヘッドレストに接触しないものとした。また各測定時においては休憩を設け被験者が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。

運転者が予期せず衝撃を受けた場合を想定し、被験者に降下するタイミングは教示しないものとした。被験者がブレーキおよびアクセルを踏んでいないクリーブ状態でストッパーにより車両を停止させ、実験担当者がストッパーを外すことで段差から降下させた。なおストッパーを外した瞬間に段差から前輪が降下するように車両を停車させている。特に段差があるような走行環境においては安全性、操縦性から低速にて走行すると考えられるため走行速度は約 2km/h とした。

7 結果および考察

7.1 シートおよび頭部加速度

実験結果の一例としてシートおよび頭部の加速度の時刻歴を Fig. 6, 7 に示す。破線が未制御車両、実線が制御車両である。両図において 1 秒付近にて加速度が高く推移しているがこれは後輪が降下した時のものである。なお後輪が降下した際の加速度は前輪に比べ大きくなっていることから後輪降下時の結果を示した。Fig. 8 は未制御車両と制御車両におけるシートおよび頭部加速度の最大振幅値である。なお一被験者に 5 回の実験を行い 10

Fig. 6 Time histories of seat acceleration.

Fig. 7 Time histories of head acceleration.

Fig. 8 Comparison of displacements in seat and head.
(average 10 subjects)

名分の平均値を棒グラフにて、標準偏差をエラーバーにて示した。未制御車両の値を 100%とすると制御車両はシートが約 55%, 頭部が約 67%となった。上下振動のみに拘束しているシートに対し、頭部は前後にも揺動するためシート加速度の方がより低減したと考えられる。また有意水準 5%で t 検定を行ったところ、シート・頭部ともに制御車両と未制御車両の有意確率 $P < 0.05$ であった。これにより ASS を用いてシート加速度を低減させることで頭部への衝撃は低減することが明らかとなった。

7.2 運転者の胸鎖乳突筋の活動

Fig. 9 に 5 章で述べた % MVC の時刻歴の一例を示す。破線が未制御車両、実線が制御車両である。両車両と

Fig. 9 Time histories of % MVC.

Fig. 10 Maximum %MVC values and feeling of burden.
(average 10 subjects)

もに後輪が降下した 1 秒付近にて最大値となっていることがわかる。また Fig. 10 は各 5 回の実測を行った 10 名分の % MVC の最大値を平均値と標準偏差として整理した結果である。未制御（黒色の棒グラフ）と制御（白色の棒グラフ）は $P < 0.05$ であり優位に低下したことを確認している。

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と考えられている[12]。そこで本実験では各被験者が主観的に負担を感じる筋力を発揮した際の % MVC を算出し評価に用いた。方法は被験者が 5 章にて示した MVC 測定時の姿勢にて段階的に頸部筋力の発揮を強めていくよう指示し、瞬間的にその状態が苦痛であると感じるときの筋電位を 5 秒間発揮してもらい測定した。この主観的に負担と感じた時の % 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。Fig. 10 にはこの値もハッチングの棒グラフで示した。同図より負担を感じた % MVC 値は未制御車両の % MVC の最大値よりも小さく、制御車両よりも大きい値であることが分かる。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程度まで低減したといえる。またすべての被験者が制御車両にて負担を感じなくなったということも実験

Fig. 11 Relation between % MVC and control current.

後にアンケートを取り確認している。以上の結果から ASS によりシート加速度を低減させることで運転者が頸部に負担を感じなくなるまで頭部への衝撃は低減することが明らかになった。

7.3 エネルギー供給量と負担感低減効果

ここで供給エネルギーに対する負担感低減効果について考察するために数種類の制御器を準備しシートの制御力を変化させて実験を行った。なお前節における 10 名のうち最もシート加速度が低減した被験者（23 歳，身長 178.5cm，体重 57.1kg）にて検討を行った。

Fig. 11 は横軸がアクチュエータに流れた電流の最大振幅値，縦軸が胸鎖乳突筋の % MVC の最大値を示している。各プロットは実測値 5 回の平均値である。なお最小二乗法を用いた近似曲線を実線で示した。0A は未制御時を示し，最高性能である約 8.5A は 7.1 節および 7.2 節にて用いた制御器である。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ことから % MVC は上昇していることが確認できる。さらにこの被験者が主観的に頸部に負担を感じた時の % MVC は 7.51% (Fig.11 の破線部分) であった。同図より 2.8A（このときのシート加速度の最大振幅値は 19.4m/s^2 ）の測定値までが頸部に負担を感じ，3.5A（シート加速度は 20.4m/s^2 ）の測定値以上の場合には負担を感じないということが確認できる。なお他の被験者にも同様の傾向が見られた。これより運転者個々の頸部の負担感を評価することで，より実用的にエネルギー供給量の範囲を決定できる基礎資料を示すことができた。

8 結言

本研究では超小型電気自動車の段差降下時を対象に ASS による運転者の衝撃および負担感の低減効果について加速

度と頸部筋活動から検討を行った。その結果，以下のことが明らかになった。

- (1) ASS によりシート上下方向の加速度を減少させることで運転者の頭部に受ける衝撃は低減し，未制御時にあった頸部への負担も低減するということを示した。
- (2) シート加速度の減少に伴い頭部に受ける衝撃も低減させていくことができ，頸部の負担感を評価することで ASS の制御力の範囲をより実用的に決定できる可能性を示すことができた。

(2014 年 3 月 7 日受付，2014 年 10 月 10 日再受付)

参考文献

- [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.
- [2] 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，pp.1495-1502，2002.
- [3] 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検討），日本機械学会年次大会講演会論文集，Vol.7，No. 2-1，pp. 175-176，2002.
- [4] 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, pp.939-951, 2004.
- [5] 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, pp.139-150, 2006.
- [6] 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, pp.95-101, 2013.
- [7] 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，pp. 49-54，2013.
- [8] R. Zheng, K. Nakano, Y. Okamoto, M. Ohori, S. Hori, 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, pp.405-413, 2013.
- [9] 廣瀬和彦，筋電図判読テキスト（第 2 版），文光堂，2007.
- [10] 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.
- [11] 国土交通省 都市・地域整備局，道路局，歩道の一般的構造に関する基準等について，2005.
- [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.180-187，2002.