# 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)

# Active seat for ultra-compact mobility with voice coil motor (Fundamental consideration on design method of motors considering control of vibration)

遠藤文人<sup>a)</sup>・池田圭吾<sup>b)</sup>・三野輪良祐<sup>b)</sup>・加藤英晃<sup>c)†</sup>・成田正敬<sup>c)</sup> <sup>a)</sup>東海大学大学院総合理工学研究科,神奈川県平塚市北金目4-1-1(〒259-1292) <sup>b)</sup>東海大学大学院工学研究科,神奈川県平塚市北金目4-1-1(〒259-1292) <sup>c)</sup>東海大学工学部,神奈川県平塚市北金目4-1-1(〒259-1292)

A. Endo <sup>a)</sup>, K. Ikeda <sup>b)</sup>, R. Minowa <sup>b)</sup>, H. Kato <sup>c)</sup><sup>†</sup>, T. Narita <sup>c)</sup>

<sup>a)</sup> Graduate School of Science and Technology, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

<sup>b)</sup> Graduate School of Engineering, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

<sup>c)</sup> School of Engineering, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

Ultra-compact mobility is leveraged to streamline transportation. This mobility makes it easy to drive vehicles on narrow roads because it makes them light in weight. However, there is a possibility that ride comfort is degraded because ultra-compact mobility often means that equipment must be made simple so that it can be miniaturized. To improve ride comfort against vertical vibration, we previously proposed an active seat suspension mounted on the seat section of a vehicle. This active suspension makes it possible to control vibration actively by means of a voice coil motor. We examined the reduction in vibration with the suspension when entering rough roads and developed a practical control method. Motor characteristics, e.g. motor stroke, thrust variability, and voltage capacity, are important factors for reducing vibration. In particular, ride comfort is affected when going over bumps. Therefore, in this paper, the voice coil motor was evaluated by using electromagnetic field analysis. Moreover, the efficiency of vibration control was investigated in a simulation in which voltage capacity and nonlinearity of thrust were considered.

Key words: active seat suspension, ride comfort, ultra-compact mobility, optimal control, voice coil motor

# 1. はじめに

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安 心かつ安全な近距離移動の手段として超小型モビリティの需要が 近年拡大している.超小型モビリティは1~2人乗り用の非常に小 型かつ軽量な車両であり、細い路地での走行が簡単であることが 特徴である.しかし、小型化・軽量化を実現させるために座席やシ ャシサスペンションなどが非常に簡素な設備となっている.その ため路面の凹凸等に起因する振動による乗り心地や快適性の劣化 が問題となっている.乗員への振動を低減するため、シャシサスペ ンションにアクチュエータを設置したアクティブサスペンション による振動制御が提案されている<sup>1,2</sup>.しかしながら4輪分のシャ シサスペンションの交換が必要になるため、容易に設置すること が難しく、車両重量の増加にも繋がる.

著者らは振動による乗り心地劣化の問題を解決するためにアク ティブシートサスペンションを提案している<sup>30</sup>. アクティブシート サスペンションは車両座席部分に搭載するサスペンションであり, 乗員に伝わる振動をダイレクトに制振する装置である.著者らは ボイスコイルモータ (VCM)をアクチュエータとしたアクティブ シートサスペンションを実車に搭載し、様々な路面環境において 振動低減効果があることを実験的に確認している<sup>470</sup>.

VCM は内部にコイルの移動を支える機構を持たないダイレクトドライブの構造となっており、高効率でメンテナンスフリーとなるメリットがある.しかしながら、アクティブシートサスペンションを超小型モビリティに搭載する際に次の2点が問題となる.

(1) アクチュエータを軽量化するためには永久磁石を小型化す る必要があるが、それによって可動部の変位による推力変動が大 きくなる.(2)車両の軽量化のためにバッテリ搭載量には制限が ある.本研究では以上2点の問題について検討を行うため、電磁 界解析を用いてアクチュエータの推力特性ならびに制御性能につ いて検討を行った.特に VCM の性能に影響を与える設計パラメ ータとして考えられる導線径に着目した.まず、電磁界解析を用い て VCM の導線径が変化した際の特性を明らかにした.次に実際 の振動制御を想定した運動解析を行い、各導線径における振動低 減効果を明らかにした.さらに、超小型モビリティでの利用を考慮 し、電源電圧の制限による振動低減効果の変化についても確認し た.

# 2. アクチュエータ

本研究で対象としたアクティブシートサスペンション (Fig. 1) ではアクチュエータとして Fig. 2 に示す VCM を用いている. こ の 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. コイルを挟むよ うに永久磁石が配置されている. そのためコイルに電流を印加す るとフレミングの左手則にしたがって推力が発生する. 可動部は 直接シート座面に取り付けられるため,座面を直接制振すること が可能となる. なお,車内空間に厳しい制約のある超小型モビリテ ィ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. 超小型モ ビリティ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<sup>®</sup>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,本報告では鉛直方向の振動のみを抑制する



Fig. 1 Active seat suspension.



Fig. 2 Voice coil motor.

1自由度のVCMを用いて検討を行っている.

#### 3. アクティブシートサスペンションのモデリングと制御

#### 3.1 制御モデル

本報告では Fig. 1 のアクティブシートサスペンションを対象と し、1 自由度システムとして Fig. 3 のようにモデル化している. ア クティブシートサスペンションのシートはコイルスプリング、リ ニアスライダ、ボイスコイルモータによって支持されている. 本報 告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ている. そのため、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.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = Ki \tag{1}$$

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], <math>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], <math>k: ばね定数 (4 本の合計値)[N/m], <math>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.

$$L\dot{i} + Ri + K\dot{y} = v \tag{2}$$

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 [ $\Omega$ ], v: 制御電圧 [V]である.



 $Fig. \ 3 \quad {\rm Model \ of \ active \ seat \ suspension}.$ 

式(1)、(2)を整理し、状態方程式化すると次式のようになる.

$$\dot{\boldsymbol{y}}_{s} = \boldsymbol{A}_{s}\boldsymbol{y}_{s} + \boldsymbol{B}_{s}\boldsymbol{v} \tag{3}$$

ただし,

$$\mathbf{y}_{s} = \begin{bmatrix} y & \dot{y} & i \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
$$\mathbf{A}_{s} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} & \frac{K}{m} \\ 0 & -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{B}_{s} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

である.

# 3.2 制御理論

本報告ではアクティブシートサスペンションを最適制御理論に 沿って振動を制御すると仮定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 みを最小とする制御電圧 мを 求める.なお添え字dは離散化を表している.

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{d}} = -\boldsymbol{F}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}} \tag{4}$$

$$J_{d} = \sum_{j=0}^{\infty} \left[ \boldsymbol{y}_{d}(j)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}_{d} \boldsymbol{y}_{d}(j) + r_{d} v_{d}(j)^{2} \right]$$
(5)

$$\boldsymbol{Q}_{d} = \begin{bmatrix} q_{1} & 0 & 0 \\ 0 & q_{2} & 0 \\ 0 & 0 & q_{3} \end{bmatrix}$$
(6)

$$\boldsymbol{F}_{d} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \end{bmatrix}$$
(7)



Fig. 4 Model of voice coil motor.



Fig. 5 Equivalent circuit structure of voice coil motor.

ここで **F**a: 変位, 速度およびボイスコイルモータへの入力電流に 関するフィードバックゲイン fi, fc, faを要素とするフィードバッ ク行列, **Q**: 変位, 速度およびボイスコイルモータへの入力電流に 関する重み係数 **q**, **q**, **q**3を要素とする重み行列, **r**a: 制御電圧に 関する重み係数である.

# 4. 電磁界解析によるアクティブシートサスペンション用 VCM の特性

# 4.1 解析の概要

一般的な VCM ではストローク時においてもコイルへ均一な磁場を得るため、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な 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

 Table 1
 Specifications of voice coil motor.

Permanent magnet (PM)	NEOMAX-46BH
Number of PMs	4
Remanence of PM	1.2 T
Stroke	60 mm
Number of coils	2
Gap	3 mm
Material of yoke	SS400

**Table 2** Specifications of voice coil motor for each coilwire diameter.

Wire diameter	Inductance	Resistance
<i>d</i> [mm]	$L[\mathrm{H}]$	$R\left[\Omega ight]$
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

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.本章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明らかにする.

# 4.2 VCM モデルのパラメータと解析手法

本解析で用いた VCM のモデルおよび寸法を Fig. 4 に, 等価回 路の回路図を Fig. 5 に示す. 2 つのコイルは並列回路で接続され ている.またコイルの巻き付け方向は上下で逆方向となっている. それに伴い、永久磁石の磁極方向も反対になっており、磁気回路が 形成されるようになっている. Table 1 には VCM の諸特性を示し ている. 超小型モビリティ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一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 を想定する必要があ 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. 解析では VCM の可動部を5mm 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. なお電流は全ての 条件において1Aとした. VCM ではコイルが得ている磁束密度が 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.

# 4.3 導線径に対する VCM の諸特性

本解析で得られた各導線径における抵抗ならびにインダクタン スをTable2に示す.この結果から太い導線径を用いて巻数を少な



Fig. 6 Effect of drive part displacement on thrust.

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.

Fig. 6 に各導線径におけるストローク量に対する推力定数を示 した. 同図におけるストローク量0mm時に着目すると、 導線径 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 Fig. 4 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、Fig.7に一例として 導線径 d=0.6 mm での磁束密度分布を示す. 同図 (a)はストロー クが+30mm, (b)は0mm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. また他の導線径においても同様な傾向を確認することが できた. なお, Fig.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%と全ての導線径おいて等しくなっ た. また,ストローク0mmにおいて永久磁石から5.34mWb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、推力の発生に貢献している.

#### 5. 構築した VCM モデルの振動低減効果

#### 5.1 解析条件

4 章の解析結果を用いて実際に振動を制御した際の振動低減効 果を確認する.本解析では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、推力が最も求めら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.4章で示したように推力定数は



Fig. 7 Magnetic flux density of VCM (d = 0.6 mm).

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 Fig. 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章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節にて述べる.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 ータの破損に繋がる.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.

#### 5.2 重み係数の最適化

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. そのため各導線径において重み係数 q1, q2, q3, ra を 100から1010まで変化させ、総当たり的に組み合わせ、評価を行っ た. Fig. 8 に d=0.2 mm と d=1.0 mm における重み係数の変化 に対する加速度振幅の整定時間 tsを示す.また、d=0.6 mm にお いて運動解析によって得られた加速度波形の一例をFig.9に示す. 同図に示すように整定時間 taは初期値から定常値までの加速度ÿ∞ の 95%から 105%までの範囲に加速度が収まり、その後その区間 からはみ出さなくなる時間の事を指す.人間の振動知覚はその 加速度に大きな影響を受けると言われており、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、本報告では振動の大きさと継続時間を定量的に評価 可能な ts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. そのため、使用環境を空冷と想定し、電流密度が10A/mm<sup>2</sup>以下の 結果のみを採用する. Table 3 に各導線径における許容電流値を示 した. Fig. 8は d=0.2 mm では 0.31 A以下, d=1.0 mm では 7.85 A以下の結果をプロットしている. 同図から整定時間 なが最



Fig. 8 Settling time for each weight coefficient  $Q_{d}$  and  $r_{d}$ .

も短くなる重み係数が導線径によって異なることが分かる. この ようにして算出した各導線径に対する重み係数 Q, naならびにフ ィードバックゲイン Faを Table 4 に示す. 次節の解析ではこのフ ィードバックゲインを用いた. その結果を Fig. 10 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. 同図からすべての 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. 次節では実用上の使用条件を考慮した検討を行う.

#### 5.3 電源電圧に対する導線径の比較

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。特に超小型モビリティの ようなコンパクトな車両では搭載可能なバッテリ数に限りがある 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



**Fig. 9** Time history of acceleration (d = 0.6 mm).

**Table 3** Allowable current of each wire diameter.

Wire diameter $d$ [mm]	Allowable current [A]
0.2	0.31
0.4	1.26
0.6	2.83
0.8	5.03
1.0	7.85

れる. そのため前節にて探索されたフィードバックゲインを用い て、本節では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1つあたりの電源電圧を12 Vとし、そのバッテリを1~3 個を直列に接続して(12~36V)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節と同様のものとしている. 解 析の結果を Fig. 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、前節で得られた各導線径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.4章で前述したように導線径が太いほど推力定 数は低下するが、抵抗値ならびにインダクタンスも減少すること で応答性が良くなり、電源電圧が制限された条件でも高い制御性 能を発揮できることを確認した.

Wire diameter	Value
<i>a</i> [mm]	
0.2	$Q_{\rm d} = {\rm diag}(10^{10}, 10^8, 10^8), r_{\rm d} = 10^0$
	$f_1 = 3.73 \times 10^3, f_2 = 7.36 \times 10^3, f_3 = 7.42 \times 10^3$
0.4	$Q_{\rm d} = {\rm diag}(10^8, 10^4, 10^0), r_{\rm d} = 10^0$
	$f_1 = 1.60 \times 10^3$ , $f_2 = 285.09$ , $f_3 = 15.60$
0.6	$Q_{d} = diag(10^{7}, 10^{5}, 10^{3}), r_{d} = 10^{0}$
	$f_1 = -322.97, f_2 = 209.45, f_3 = 19.21$
0.8	$Q_{d} = diag(10^{8}, 10^{6}, 10^{0}), r_{d} = 10^{2}$
	$f_1 = -233.48, f_2 = 57.49, f_3 = 0.78$
1.0	$Q_{\rm d} = { m diag}(10^6, 10^4, 10^1), r_{\rm d} = 10^0$
	$f_1 = -135.96, f_2 = 64.93, f_3 = 1.78$

**Table 4** Weight coefficients and feedback gain for eachwire condition.

#### 6. おわりに

本論文では著者らが提案している超小型モビリティ用アクティ ブシートサスペンションに適した VCM に関して検討を行った. VCM の使用環境において最も負荷が大きく,またきめ細やかな応 答性が要求される車両の段差降下時を想定し,推力定数やインダ クタンスなどモータの特性からパラメトリックに評価を行った. また実際の使用状況を想定し,電源電圧の制約や推力特性の非線 形性を考慮した制御モデルに対する VCM の性能評価も行った. それにより実路にて車両が走行した際,高い振動低減効果を発揮 できる VCM の設計手法を明らかにした.また低電圧においても 十分制御可能な導線径についても解析的に検討し,昇圧回路とい った電圧の調整を必要としない簡素な回路においても振動を抑制 することが可能であることも明らかにした.

今後は様々な使用環境を想定し、より低電力または電源電圧の 制御も考慮したシステムの構築や限られたストローク量の中で高 い振動低減効果を発揮するような VCM の構成要素の構造や磁路 に影響するヨークの形状およびその仕様について明らかにしてい く.



**Fig. 10** Settling time using optimal control for each wire diameter condition.



**Fig. 11** Settling time ratio for each voltage limit condition.

#### References

- 1) T. Suzuki and M. Takahashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. C*, **78**, 446 (2012).
- Y. Kawamoto, Y. Suda, H. Inoue and T. Kondo: Trans. Soc. Autom. Eng. Jpn., 39, 3-35 (2008).
- Y. Oshinoya, H. Arai and K. Ishibashi: Int. J. Appl. Electromagn. Mech., 19, 437 (2004).
- Y. Oshinoya, H. Arai and K. Ishibashi: J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech., 11, 209 (2003).
- Y. Oshinoya, H. Arai and K. Ishibashi: J. Magn. Soc. Jpn., 28, 140 (2004).
- Y. Oshinoya, Y. Suzuki and K. Ishibashi: J. Magn. Soc. Jpn., 29, 332 (2005).
- H. Kato, S. Hasegawa, Y. Oshinoya: J. Magn. Soc. Jpn., 37 (2013).
- 8) Y. Yoshida, A. Koiso, H. Ito: Ergonomics, 9, 21 (1973).

2018年11月8日受理, 2019年4月19日再受理, 2019年5月31日採録