

# 小型車両用シートのアクティブサスペンション (モータ特性の変化が制御性能に与える影響)

神尾敬介\*<sup>1</sup>・勝又宏行\*<sup>1</sup>・押野谷康雄\*<sup>2</sup>  
石橋一久\*<sup>3</sup>・尾崎晃一\*<sup>2</sup>・荻野弘彦\*<sup>4</sup>

## Active Seat Suspension for Small Vehicle (Effects of Changes in Motor Characteristics on Control Performance)

by

Keisuke KAMIO, Hiroyuki KATSUMATA, Yasuo OSHINOYA,  
Kazuhiisa ISHIBASHI, Koichi OZAKI, and Hirohiko OGINO

(Received on March 31, 2006 & accepted on June 3, 2006)

### Abstract

The purpose of this study is to examine the effectiveness of active seat suspension in small cars and the problems associated with the practical use of active seat suspension. A small active seat suspension can be installed in a one-seater electric automobile. In an actual driving test, a test road, for which the concavity and convexity of an actual road surface were simulated using hard rubber, was prepared. In this study, we have aimed to develop a vibration isolation system with a high robustness for the driver's seat using sliding mode control, which is resistant to factors such as changes in motor characteristics. Experiments were carried out under several conditions, and the obtained results were compared with optimal control results. It was verified that the suppression of vibration by the sliding mode control of the vibration isolation system occurred.

**Keywords:** Active seat suspension, Riding comfort, Electric vehicle, Optimal control, Sliding mode control

### 1. はじめに

高齢化が進んでいる我が国において、高齢者の自立した日常生活および社会生活確保の重要性が増大してきており、その前提の一つとして、高齢者の交通手段に対する利便性および安全性の向上が課題となってきた。高齢者の使用に適した移動具の一連の研究が鎌田ら<sup>1)~3)</sup>によって報告されており、小型車両が高齢者にとって望ましい移動具であることが結論づけられている。

これらの小型車両は通常の乗用車と異なり、細い道、舗装されていない、いわゆる悪路などへの頻繁な乗り入れが生じる。このような道には段差、小さな障害物が多数路面上にあり、車両の乗り心地の劣化が予想される。そこで著者らは、この問題を解決するために、小型電気自動車に適合するアクティブシートサスペンションを提案している<sup>4)</sup>。これまでに、システムの制御性能を検討し、その実現性を確認している<sup>5)</sup>。さらに、乗り心地性能を中心に実用性に関する検討も行っている<sup>6)</sup>。

制御性能を検討する上で、パラメータの測定誤差によるモデル化誤差により制御性能の劣化といった問題が生じる。ここで

モデル化誤差には、運転者の質量変動やモータ特性の変化が挙げられるが、既に運転者の質量変動に関しては検討を行い報告している<sup>7)</sup>。しかし、これまでに当研究グループではモータ特性に関する検討には至っていない。

そこで本稿では、モータ特性の変化が制御性能に与える影響についての検討を行う。また、モータ特性の変化における制御性能を検討するために、制御手法として外乱やモデル化誤差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を用いる。さらに、比較対象として最適制御を用いて性能評価を行う。

### 2. アクティブシートサスペンション

実験に用いた小型電気自動車を Fig.1 に示す。また、座席部搭載のアクティブシートサスペンション装置を Fig.2 に示す。着座部はアルミ板(長さ:478mm, 幅:295mm, 厚さ:10mm)を使用し、4本のコイルスプリングによって支えられ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(VCM)を採用した。これによりダイレクトドライブ、メンテナンスフリーとなるメリットがある。車両ならびにボイスコイルモータの仕様は以下の通りである(小型電気自動車:トヨタ社製エブリデーコムS BASIC, 車両総重量:325kg, 全長:1935mm, 全幅:955mm, 全高:1600mm, 軸距:1280mm, 輪

\*1 工学研究科機械工学専攻修士課程  
\*2 工学部動力機械工学科教授  
\*3 第二工学部機械工学科教授  
\*4 工学部動力機械工学科助教授



Fig. 1 Photograph of electric vehicle.

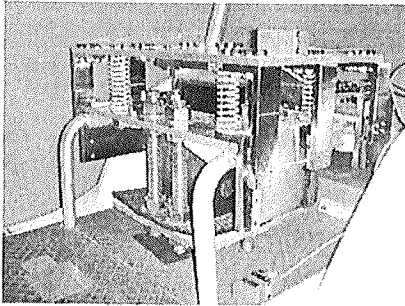


Fig.2 Photograph of experimental apparatus of active seat suspension.

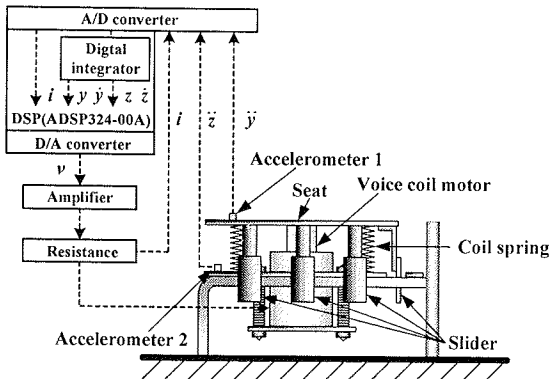


Fig.3 Active seat suspension control system.

距：前輪：840mm，後輪：815mm，ボイスコイルモータ：昭和電線電纜製 VCM18-150S ADE TYPE 3，ストローク：19mm，有効ストローク 18mm，推力定数：32N/A，定格推力 150N 以上，最大推力 220N 以上，定格電流：約 5.2A，本体重量：16.3kg）。シートサスペンションのフィードバック制御システムを Fig.3 に示す。制御に用いるシート座面の絶対変位，絶対速度は図の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する。

### 3. 制御システム

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るとし，運転者とシートは一体に運動すると仮定した。

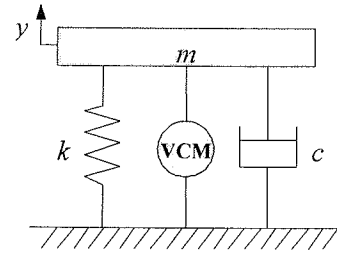


Fig. 4 Analytical model.

本装置におけるシャシサスペンションとシートサスペンションの共振周波数は比較的接近している。よって，本稿ではシャシサスペンションとシートサスペンションの連成振動は無視できるものとし，システムのモデルをシャシサスペンション等を含めた多自由度ではなく，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。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = Ki \quad (1)$$

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]。

$k$ ：ばね定数（4本の合計値）[N/m]。

$c$ ：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]。

$K$ ：アクチュエータの推力定数 [N/A]。

$y$ ：シートの絶対変位 [m]。

$i$ ：制御電流 [A]。

また，本実験で使用したボイスコイルモータは，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，内部にコイルの移動を支える直線軸受けは持たない構造である。ボイスコイルモータの回路方程式は次式のようになる<sup>8)</sup>

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K \frac{dy}{dt} = v \quad (2)$$

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]。

$v$ ：入力電圧[V]。

## 4. 制御実験

### 4.1 実験装置諸元

シート表面上に加わる運転者の体重は，足がペダル等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，その質量を 49.5 kg とした。また，リニアスライダの摩擦等を含めた見かけの減衰力，アクチュエータの推力定数等を測定するために，シート単体（VCM 装着済み）に対して性能評価実験を行なった。実験装置の諸元を以下に示す。

$m = 49.5 \text{ kg}$  (60 kg の運転者に相当する) + 18 kg (シート質量)， $k = 42500 \text{ N/m}$ ， $c = 400 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ ， $L_0 = 2.7 \text{ mH}$ ， $K_0 = 35.3 \text{ N/A}$ ， $R_0 = 3.8 \text{ }\Omega$ ， $T_s = 0.001 \text{ s}$ 。

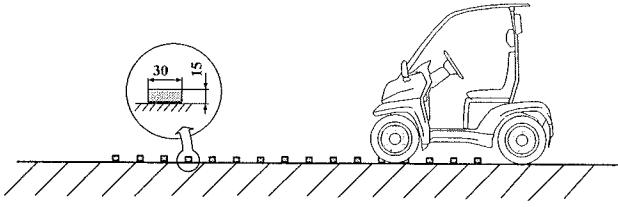


Fig. 5 Test road.

#### 4.2 制御手法

本研究では制御性能を検討する上で、数ある制御手法の中でもスライディングモード制御理論<sup>9)</sup>を用いる。スライディングモード制御理論を用いた理由として、外乱やモデル化誤差に対してロバスト性を有すること、設計が容易であることが挙げられる。スライディングモードではチャタリング<sup>9)</sup>という特有な高周波振動を発生してしまう場合もあるが、本制御システムではその周波数領域の振動は着座状態の人体特性等によって吸収されてしまうため大きく影響しない。さらにこの制御手法の比較対象として、最適制御理論<sup>10)</sup>を用いて制御性能について比較・検討を行う。

ここで、制御系設計パラメータはモータ特性が実測値  $L_0$ ,  $K_0$ ,  $R_0$  のとき、各制御手法を用いた場合の加速度がほぼ一致するように選択し、以下のように決定した。

最適制御における重み行列：

$$Q_d^{opt} = \begin{bmatrix} 10^{6.8} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{3.8} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{0.05} \end{bmatrix}, \quad r_d^{opt} = 1.8$$

スライディングモード制御における切換関数を決定する際に用いる重み行列における非線形入力項におけるパラメータ：

$$Q_d^{smc} = \begin{bmatrix} 10^{6.3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{3.05} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{0.01} \end{bmatrix}$$

$$r_d^{smc} = 0.01, \quad \eta = 0.875, \quad \varepsilon = 5$$

以降の実験は上述の制御パラメータにより設計したコントローラを用いて実施する。

#### 4.3 実験方法

一般に、乗り心地に影響する振動は上下方向に関して 4~8 Hz の加速度が大きく作用するということが ISO2631 など<sup>11), 12)</sup>によって提示されている。そこで、走行路として Fig.5 に示すように車両の進行方向に硬質ゴム製障害物(幅 30 mm, 高さ 15 mm, 長さ 150 mm)を並べ、車体の共振周波数を含めた 4~8 Hz の振動が路面から入力される走行速度 (3.3 km/h) で実験を行った。

#### 4.4 モータ特性の変化に対する制御性能の検討

モータ特性にモデル化誤差などが生じた場合に制御性能の劣化が考えられる。ここでモータ特性に影響するパラメータとしては抵抗値、インダクタンス、推力定数などが挙げられる。そこで本報告では、これらのパラメータの変化に着目し、この変化が制御性能に与える影響についての検討を行う。ただし、複数のパラメータを同時に変化させた場合、それらの影響の検討

が複雑になることから、本研究ではまず基礎的な検討としてパラメータを個別に変化させた場合について考察する。なお、制御性能を検討する際、個々のモータ特性は制御プログラムにおける数値を変化させ、これをモデル化誤差と等価として扱い実験を行う。そこで、モータ特性の変動に対する制御性能の検討を下項に記す。

##### 4.4.1 インダクタンス、推力定数の変化に対する制御性能の検討

インダクタンス、推力定数の実測値  $L_0$ ,  $K_0$  を基準とし、この値からマイナス側 60%、プラス側 100% の増減をさせた値を用いて計算されるそれぞれの制御電圧を用いて実験を行った。なお、最大 100% とした理由は測定誤差や人為的な入力ミスを十分許容できる範囲であると考えたことによる。また、マイナス側 60% を越える場合は制御ゲインが計算できなかったため、この値までとした。その結果をインダクタンスに関しては Fig.6 に、推力定数に関しては Fig.7 に示す。

Fig.6 において、横軸はコントローラ設計時のインダクタンス  $L$  を示し、システムの実際のインダクタンス  $L_0$  とコントローラ設計時のインダクタンスが一致している点を基準とし、この点より 0.54mH ( $L_0$  に対して 20% に相当) 単位でインダクタンスを増減させた。縦軸はこの時の実験におけるシート座面絶対加速度の標準偏差 (5 回の平均値) である。なお、□印は最適制御適用時、●印はスライディングモード制御適用時、▲印は未制御時の値である。

Fig.7 においても同様に、横軸はコントローラ設計時の推力定数  $K$  を示し、システムの実際の推力定数  $K_0$  とコントローラ設計時の推力定数  $K$  が一致している点を基準とし、この点より 7.06N/A ( $K_0$  に対して 20% に相当) 単位で推力定数を増減させた。

両図の結果から、基準値に対して -60% から 100% まで増減させても制御性能に劣化がみられないため、モータ特性に影響するパラメータであるインダクタンス、推力定数については制御性能にほとんど影響が無いことを確認した。

##### 4.4.2 抵抗値の変化に対する制御性能の検討

抵抗値の変動に対する制御性能について検討するため、上述と同様に抵抗値を変化させることで計算される制御電圧を用いて実験を行った。その結果を Fig.8 に示す。横軸はコントローラ設計時の抵抗値  $R$  を示し、システムの実際の抵抗値  $R_0$  とコントローラ設計時の抵抗値  $R$  が一致している点 (横軸  $R=R_0$  [Ω]) を基準とし、この点より 0.5 Ω 単位で抵抗値  $R_0$  をコントローラ上で増減させた。ここで、システムの基礎となる実際の抵抗値  $R_0$  (室温 22°C にて長時間モータ未使用時) は 3.8 Ω である。縦軸はこの時の実験におけるシート座面絶対加速度の標準偏差 (5 回の平均値) である。図中の ▲印は未制御時の値である。

また、Fig.9(a) は、この時のシート座面絶対加速度の時刻歴の一例であり、最大加速度約 3m/s<sup>2</sup>、卓越周波数 5.3Hz となっている。一方 Fig.9(b), (c) は基準の抵抗値  $R_0$  とコントローラ設計時の抵抗値  $R$  が一致している時の最適制御、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、制御電圧の時刻歴の一例である。両制御手法において同程度の制御性能を有していることがわかる。

コントローラ設計時の抵抗値  $R$  を 0.5 Ω 単位 ( $R_0$  に対して 13% に相当) で増減させた場合、最適制御理論を用いて設計した制御

系では、パラメータが増加するごとに制御性能が劣化した。2.0 Ω増加(53%増)の時点では加速度振幅の標準偏差は未制御時の値(Fig.8の▲印)を大きく越える結果を示し、さらに抵抗値を増加させると発散傾向となり制御が困難となった。

Fig.10は1.5Ω増加時のシート座面絶対加速度,制御電圧の時刻歴の一例である。同図(a), (b)を比較すると,制御電圧の最大値はほぼ同じであるが,シート座面絶対加速度の最大値は最適制御適用時が5.0m/s<sup>2</sup>であるのに対しスライディングモード制御適用時には1.8m/s<sup>2</sup>であった。

最適制御適用時に対し,スライディングモード制御適用時にはFig.8に示すように,4.0Ω増加(105%増)まで安定した制御を行うことができた。これよりスライディングモード制御を用いることで,抵抗値の変動が生じてても制御性能は維持でき,実用上有効であることを実験的に確認することができた。

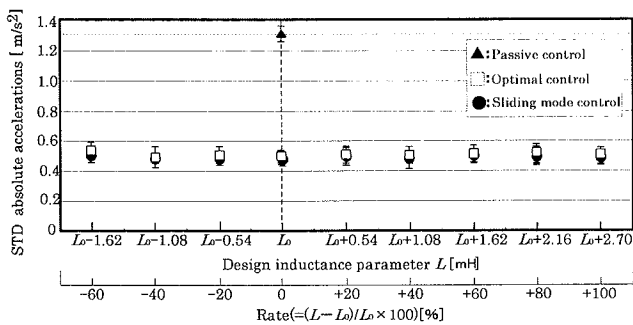


Fig. 6 Control performance results in the case that design inductance parameter changes .

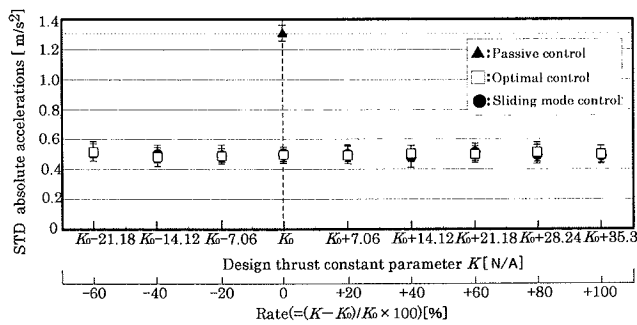


Fig. 7 Control performance results in the case that design thrust constant parameter changes .

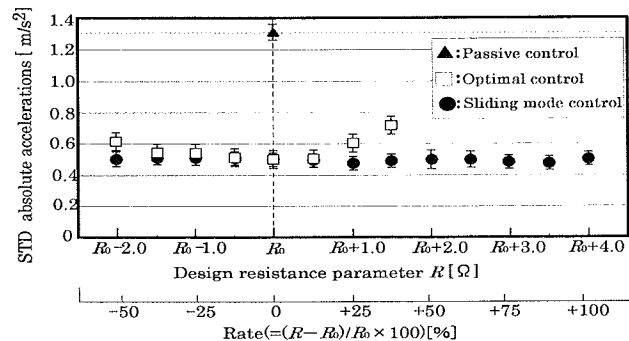
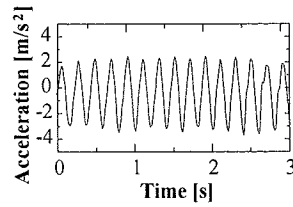
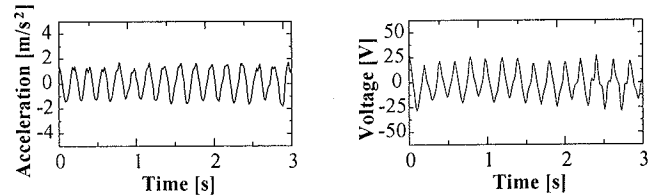


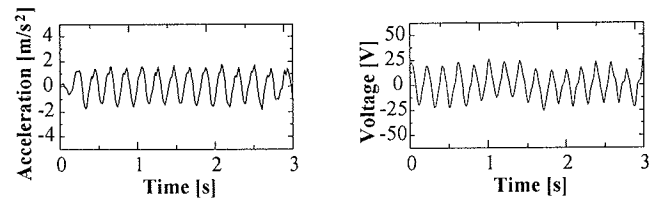
Fig. 8 Control performance results in the case that design resistance parameter changes .



(a) In the case of passive control.

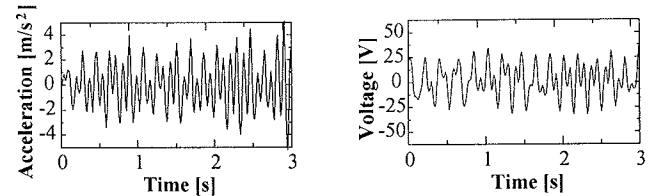


(b) In the case of using optimal controller.

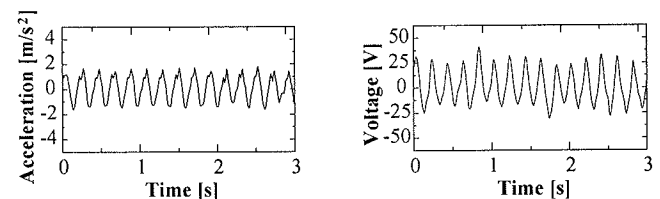


(c) In the case of using sliding mode controller.

Fig. 9 Time histories of seat acceleration and control voltage ( $R=R_0$  [Ω]).



(a) In the case of using optimal controller.



(b) In the case of using sliding mode controller.

Fig. 10 Time histories of seat acceleration and control voltage ( $R=R_0+1.5$  [Ω]).

## 5. まとめ

本研究では小型車両用アクティブシートサスペンションにおけるモータ特性のモデル化誤差による制御性能の劣化についての検討を行った。その結果,モータのインダクタンス,推力定数については制御性能にほとんど影響が無いことを確認した。この結果は,式(2)の中でインダクタンス  $L$  を含む項の関与率が他と比較して小さいことを示す。すなわち,本実験の検討範囲ではインダクタンスによるコイル電流の遅れは無視できる程度のものであることが分かる。推力定数についても上述と同様の傾向が認められ,モータに発生する逆起電力も小さいことが分かる。また,抵抗は制御性能に比較的大きく影響を及ぼしているが,これは式(2)においてインダクタンスや推力定数に関する

項の制御電圧に対する関与率が小さいことから明らかである。しかし、抵抗値に変化があらわれた場合であっても、ロバスト性を有するスライディングモード制御を用いることで、実際の値から変動が生じてても制御性能は維持でき、実用上有効であることを実験的に確認することができた。これはスライディングモード制御が、希望の特性に適応していく適応制御の特徴を持っているためであると考えられる。

#### 謝辞

本研究に際して、東海大学大学院生・鈴木康範氏（現 日本精工株式会社）、東海大学学部生・大槻篤志氏（現 東日本旅客鉄道株式会社）、川北貴文氏（現 富士精工株式会社）、に多大な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 鎌田, 藤井, 秋山: 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, 68-665, (2002), pp.220-227.
- 2) 鎌田, 畝田, 寺島, 藤井, 秋山: 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, 68-669, (2002), pp.1487-1494.
- 3) 鎌田, 寺島, 藤井, 秋山: 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, 68-669, (2002), pp.1495-1502.
- 4) 阿部, 新井, 押野谷, 石橋: 能動型シートサスペンションによる乗り心地改善(小型電気自動車を用いた基礎的考察), 日本機械学会 2002 年度年次大会講演会論文集, Vol.7, No.02-1, (2002), pp.175-176.
- 5) 新井, 阿部, 押野谷, 石橋: 小型車両用シートのアクティブサスペンション, 第 45 回自動制御連合講演会, (2002), 2P1-H4.
- 6) 鈴木, 神尾, 勝又, 押野谷, 石橋, 尾崎, 荻野: 小型車両用シートのアクティブサスペンション(官能評価値に影響する因子の検討), 東海大学紀要工学部, Vol.45, No.2, (2005), pp.79-84.
- 7) 押野谷, 新井, 石橋: ボイスコイルモータを用いた小型車両用シートの制御(一自由度モデルに対するスライディングモード制御を用いた実験的考察), 日本応用磁気学会誌, Vol.28, No.2, (2004), pp.140-144.
- 8) 例えば, 山田, リニアモータを使ってみると, (1994), 日刊工業新聞社.
- 9) V.I.Utkin, *Sliding modes in control and optimization*, (1992), Springer-Verlag, Berlin.
- 10) K.Ogata, *MODERN CONTROL ENGINEERING*, (1997), PRENTICE HALL.
- 11) I.S.O : Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, No.ISO-2631-1978(e).
- 12) Janeway, R.N.: *Human Vibration Tolerance Criteria and Application to Ride Evaluation* : SAE Tech.Pap.Ser., No.750166, (1975), p.24.