

ばね上情報のみを用いた インホイールモータ搭載車の乗り心地の向上

神谷 直希, 藤本 博志, 堀 洋一 (東京大学),
勝山 悦生, 狩野 岳史 (トヨタ自動車株式会社)

Reduction of Vertical Vibration for Improvement of Ride Comfort Using In-Wheel Motors
Naoki Kamiya, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)
Etsuo Katsuyama, Takeshi Kanou (Toyota Motor Corporation)

Abstract

Electric vehicle (EV) is an effective approach for reducing greenhouse gas emissions. EV can be controlled precisely with the quick response of the motor. Moreover, using the in-wheel motor (IWM) can be performed for several types of motion controls. However, the use of the IWM increased unsprung mass, and it brings negative effects of the ride comfort. In this paper, the vibration suppression control which was conventionally done with the active suspension is performed by the anti-dive force of the suspension generated by IWM driving. We confirm how changing suspension parameters affects the ride comfort. We then suggest that the proposed method which is only used sprung information for reduction of vertical vibration.

キーワード：電気自動車, 車両運動制御, インホイールモータ
(electric vehicle, vehicle motion control, in-wheel motor)

1. はじめに

近年自動車開発では環境への配慮は必須であり、ハイブリッド車をはじめ、電気自動車などの電気エネルギーを利用するモータ駆動は温室効果ガスの削減として有効な技術である。また、環境面のみならず、車両運動制御の観点において、モータのトルク応答が高速かつ正確であること、モータに流れる電流によりモータの発生トルクが正確に測定可能であること、インホイールモータ (IWM) を用いることでモータを分散配置し各輪を独立駆動することが可能であること、部品配置自由度が大幅に増えることにより従来の構成にとらわれない車両開発の革新がおきる可能性があることなどが優位点として挙げられる⁽¹⁾⁽²⁾。

一方で、ばね下重量の増加に伴いばね下の共振周波数が11Hz付近から10Hz付近に低下し、その付近でのゲイン特性の悪化が乗り心地の悪化する領域を生み出す。これにより、路面の段差等を通る際に上下振動が大きくなり乗り心地が悪化することが報告されている⁽²⁾⁽³⁾。また、4~8Hzは人々が不快感を抱く周波数帯(本論文では乗り心地領域と定義する。)でありこの帯域の振動低減は重大な課題である。これまでにばね下重量の増加による不快な振動を抑制するために、サスペンション上下力をアクティブに制御し乗り心地を改善する研究が行われてきた^{(4)~(6)}。古くは鉄道の分野で始まり、今日では様々な制御が検討されているが、制御則がシンプルで効果も大きいばね上の速度を用いたスカイフックダンパ制御が広く実用化されてきた。アクティブサスペンションを用いる場合は、アクチュエータを搭載する必要があるためコストや重量が増し、一部の高級車に適用は留まっている。アクチュエータを用いずに上下の起振力を出す方法としてインホイールモータの

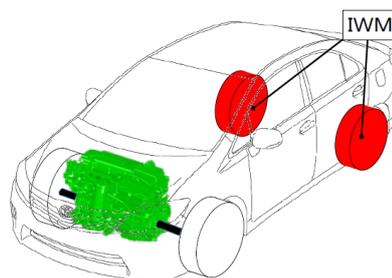


Fig. 1 実験車両 (Toyota SAI) [9]

正負のアンチダイブ力を用いた研究がこれまでになされてきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本報告では、ばね上情報のみを用いたインホイールモータ搭載車の乗り心地の改善に関して述べる。第2章では実験車両とそのモデルについて述べる。第3章ではサスペンションの粘性項と弾性項の特性に関して述べる。第4章では従来の制御則の紹介を行い、第5章では提案法について述べて、最後にまとめを述べる。

2. 実験車両と車両のモデル化

〈2・1〉 実験車両 本研究で用いた実験車両を Fig. 1 に示す。こちらの実験車両は、後輪に IWM が搭載されている。IWM の構造は Fig. 2 のようになっている。実験車両には各輪のばね上とばね下付近に加速度センサが搭載されている。後輪 2 輪を制御し、左右輪が出す制御入力には各輪の加速度センサから得られる情報を用いる。

〈2・2〉 車両のモデル化 上下方向の車両のクォーターカーモデルを Fig. 3 に示す。ばね上、ばね下の上下運動はそれぞれ式 (1), (2) で表す。上下方向のサスペンションの粘性項

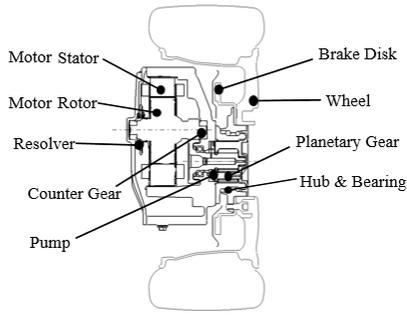


Fig. 2 IWM ユニット [9]

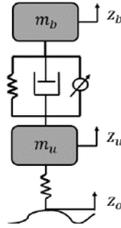


Fig. 3 クォーターカーモデル

と弾性項を式 (3), (4) にそれぞれ示し、タイヤの弾性力を式 (5) に示す。 F_z は上下方向の制御入力を表している。ここで、 k_z, c_z は上下方向のサスペンションの弾性係数と減衰係数、 k_t はタイヤばね定数である。 z_0, z_u, z_b はそれぞれ路面、ばね下、ばね上の上下変位を表している。

$$m_b \ddot{z}_b = F_{cz} + F_{kz} + F_z \quad (1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = -F_{cz} - F_{kz} + F_t - F_z \quad (2)$$

$$F_{cz} = c_z(\dot{z}_u - \dot{z}_b) \quad (3)$$

$$F_{kz} = k_z(z_u - z_b) \quad (4)$$

$$F_t = k_t(z_0 - z_u) \quad (5)$$

3. サスペンションの弾性項と粘性項の特性

〈3・1〉 サスペンションの粘性項の特性 サスペンションの減衰係数を増減させた際の上下方向の乗り心地特性を Fig. 4 に示す。サスペンションの減衰係数を小さい値に設定すると 2~8Hz 帯とばね下共振以上の領域で良好な特性が得られる。しかし、1 Hz 付近のばね上共振と 10Hz 付近のばね下共振の乗り心地は悪化する傾向にある。減衰係数が大きい値の際は逆の特性を示す。物理的な意味は、減衰力の小さいダンパを搭載した車両では、車体の動的な変化が大きいが、路面刺激の小さい穏やかな乗り心地を実現している。逆に、減衰力の大きいダンパを搭載した車両では車体の動きが小さくなり安定性は向上するが路面外乱を感じやすくなる。

〈3・2〉 サスペンションの弾性項の特性 サスペンションの弾性係数を増減させた際の上下方向の乗り心地特性を Fig. 5 に示す。このように、ばね上共振周波数にて変化が起きているのが分かり、弾性係数を小さくするとばね上共振周波数付近の特性が良くなっておりスカイフック制御と近い特性を示す。物理的な意味は、弾性係数を大きくするとばね上振動の共振

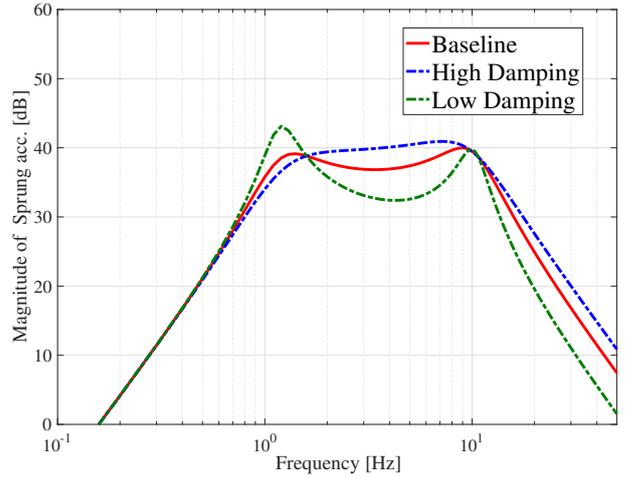


Fig. 4 サスペンションの粘性項の特性

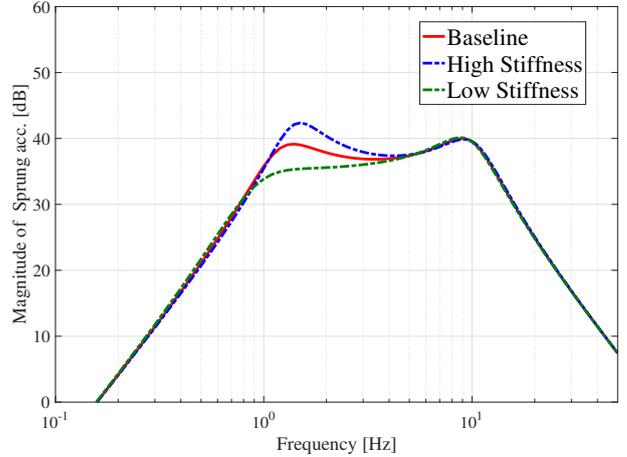


Fig. 5 サスペンションの弾性項の特性

周波数は上方に移動すると共に、人にとって敏感な 4~8Hz 付近の伝達特性が大きくなるためハードな乗り心地で路面刺激を感じやすくなる。

4. 従来制御則

〈4・1〉 スカイフックダンパ制御 一般的にサスペンション減衰係数を大きくすると収束性は向上するが、ばね下からの入力が大きくなるという背反をもつ。ばね上のみ減衰を付加するスカイフックダンパ制御を用いるとばね下からの入力は変化させずにばね上の収束性を向上させる効果がある。この制御法は、構造がシンプルで実車への適用が容易である。スカイフックダンパ制御は、式 (1) に、 $F_z = -c_{sv}\dot{z}_b$ を代入したもので使用しているのはばね上速度のみである。ばね上共振付近の低減に効果があるが、乗り心地領域に関しては特性を良くすることが難しい。

〈4・2〉 ばね下逆スカイフックダンパ制御 ばね下逆スカイフックダンパ制御は、ばね上情報を必要とせずばね下情報のみで制御を行うのが特徴の一つである。本制御は、式 (1) に、 $F_z = -c_{uv}\dot{z}_u$ を代入したもので使用しているのはばね下速度のみである。第 3 章にて述べた上下方向のサスペンションの粘性を変えた際の特徴とスカイフックダンパ制御のばね上共振を抑える性質からばね下逆スカイフックダンパ制御では、乗り心地領域が改善される。

5. 提案手法

ばね下逆スカイフックダンパ制御は、ばね下情報のみを使うシンプルな理論ではあるが、実装するには加速度センサのばね下への搭載や配線の困難さといった課題がある。そこで、ばね上情報のみで乗り心地領域の改善ができないか検討した。サスペンションのダンパ成分とばね成分の特性を解析する中で乗り心地領域の改善に関わる特性を見出した。そこで、仮想的にサスペンションのダンパ成分とばね成分を含むばね上加速度フィードバックを行うと乗り心地領域の改善が出来るという予想をたてた。以下で、ばね上加速度フィードバックについて述べたのち、提案法としてスカイフック制御とばね上加速度フィードバック制御を合わせたものについて述べる。その後、実車試験より得られたデータとシミュレーションとをつきあわせて分析を行う。

〈5・1〉 ばね上加速度フィードバック制御 式 (1) において $F_z = -c_{sa}\dot{z}_b$ を代入して整理すると、式 (6) となる。これより、制御量 F_z は式 (7) で表すことができる。

$$\ddot{z}_b = \frac{c_z(\dot{z}_u - \dot{z}_b) + k_z(z_u - z_b)}{m_b + c_{sa}} \quad (6)$$

$$F_z = -\frac{c_{sa}c_z(\dot{z}_u - \dot{z}_b)}{m_b + c_{sa}} - \frac{c_{sa}k_z(z_u - z_b)}{m_b + c_{sa}} \quad (7)$$

式 (7) の第 1 項、第 2 項はそれぞれメカニカルな粘性と弾性の付加を表している。Fig. 4 よりメカニカルな低減衰アブソーバの特性は乗り心地領域が改善されているが、ばね上共振は悪化している。その悪化分を Fig. 5 の低ステイフネス特性が補償している。以上のことから、ばね上加速度フィードバック制御は、路面外乱入力に対しては、ばね下逆スカイフックダンパ制御と類似した特性を示し、ばね下にセンサを用いない点で優位であると言える。

〈5・2〉 シミュレーション結果 ばね上加速度フィードバック制御と提案手法のばね上の上下加速度のボーデ線図を Fig. 6 に示す。提案手法は、スカイフックダンパ制御とばね上加速度フィードバック制御を合わせたもので、その際のブロック線図を Fig. 7 に示す。ここで、制御量は $F_z = -c_{sa}\dot{z}_b - c_{sv}\dot{z}_b$ で表す。ばね上共振が低下すると操舵や加減速などの操縦安定性が悪化することが知られており、本提案法は乗り心地の向上には効果は達成できているが、操縦安定性は悪化している。そこで、数式で操縦安定性を評価するために式 (1) と $F_z = -c_{sa}\dot{z}_b - c_{sv}\dot{z}_b$ よりばね下変位入力 z_u に対するばね上変位 z_b の伝達関数を求め無次元化すると式 (8) となる。ここで、 $c_{sa} = c_{sv}$ とし $k_z = k_z^*(1 + c_{sa})$ とすると式 (8) は、式 (9) となる。

$$\frac{z_b}{z_u} = \frac{\frac{1}{1+c_{sa}}c_z s + \frac{1}{1+c_{sa}}k_z}{m_b s^2 + \frac{1+c_{sa}}{1+c_{sa}}c_z s + \frac{1}{1+c_{sa}}k_z} \quad (8)$$

$$\frac{z_b}{z_u} = \frac{\frac{1}{1+c_{sa}}c_z s + k_z^*}{m_b s^2 + c_z s + k_z^*} \quad (9)$$

式 (9) より、メカニカルなサスペンションの弾性係数を大きくすることで操縦安定性を悪化させることなくばね上情報のみでばね下逆スカイフックダンパ制御を実現出来ている。ただ、本稿ではメカニカルな特性を変えることは困難であったため提案法はスカイフック制御とばね上加速度フィードバック制御を合わせたものとする。

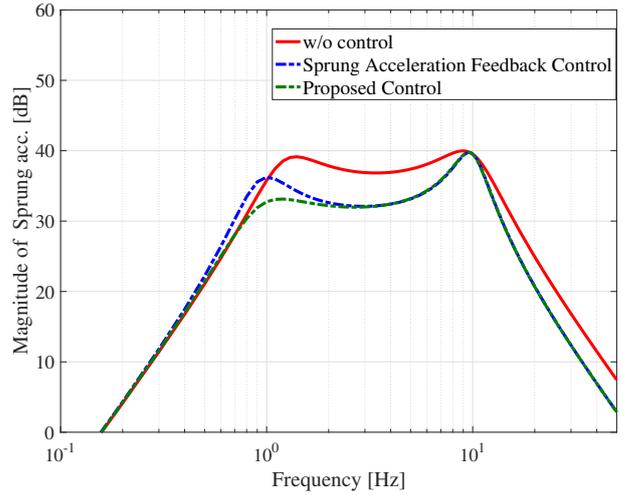


Fig. 6 提案法の上下方向の周波数特性

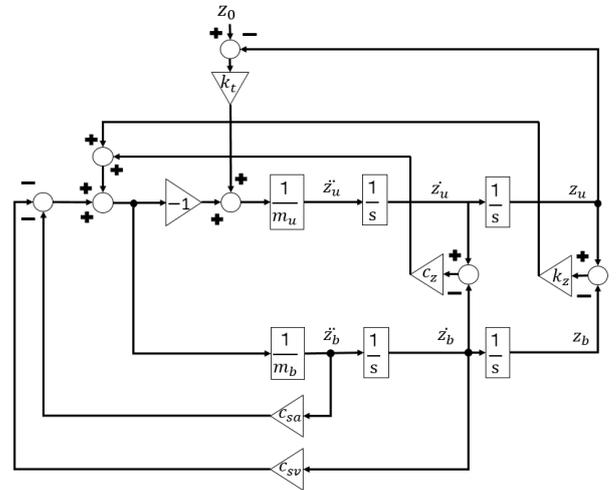


Fig. 7 提案法のブロック線図

〈5・3〉 実験結果 時速 80km で凸凹路を通過した際の PSD 解析の結果を Fig. 8 に示す。狙い通りばね上加速度フィードバック制御によって乗り心地領域が改善されている。しかし、1~4 Hz は Fig. 6 のような改善が見られない。その原因として、メカニカルな低減衰アブソーバの特性によって悪化したばね上共振での特性を低ステイフネス特性で補償しきれていないことが考えられる。また、ばね下の共振周波数にて提案法の方が悪化しているのが分かる。悪化の原因について次節で述べる。

〈5・4〉 時間遅れの影響 実験結果の Fig. 8 を見ると、ばね下共振周波数の 10Hz 付近においてゲイン特性が悪化しているのが分かる。Fig. 6 のシミュレーションでは時間遅れの影響を考慮していないが、実験する上で CAN 通信の無駄時間などの影響で時間遅れが発生している。そこで、15ms の一次遅れを入れたモデルで行ったシミュレーション結果を Fig. 9 に示す。ここで、制御量は $F_z = -c_{sa}\dot{z}_b D(s) - c_{sv}\dot{z}_b D(s)$ とし、 $D(s)$ は一次遅れとする。Fig. 9 から、時間遅れをいれるとばね下共振周波数にてばね上上下加速度のゲイン特性が悪化しているのが分かる。一方で、時間遅れを考慮するとばね下の接地

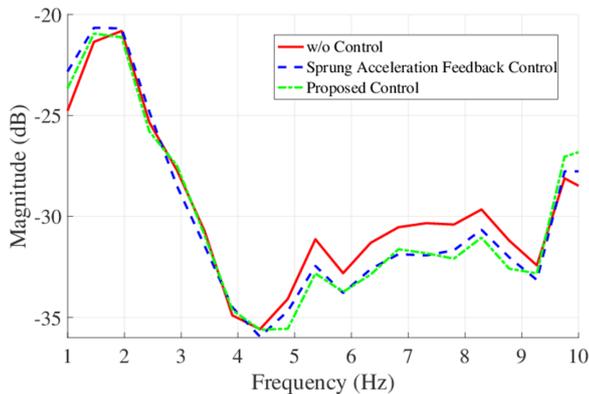


Fig. 8 提案法の実験結果

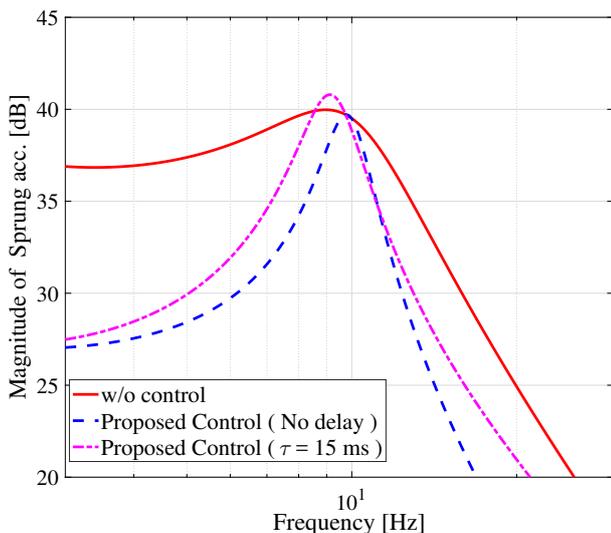


Fig. 9 時間遅れを入れた際のばね上加速度の周波数特性

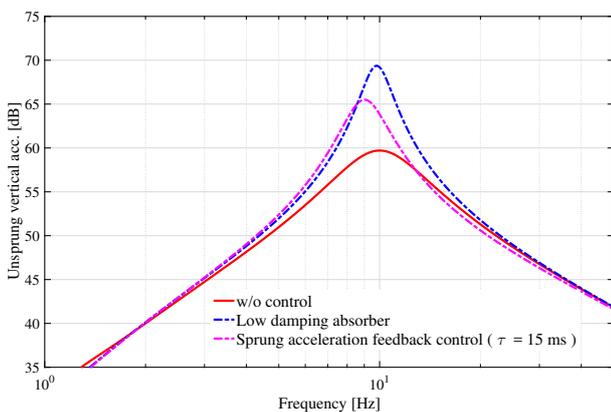


Fig. 10 時間遅れを入れた際のばね下加速度の周波数特性

性の向上が望める。Fig. 10 に、メカニカルなサスペンションの変更と 15ms の一次遅れのあるばね上加速度フィードバック制御を用いた際のばね下上下加速度の周波数応答を示す。Fig. 10 より、ばね上加速度フィードバック制御は、制御の時間遅れを用いることでメカニカルにサスペンションの係数の値を変更した際と比べてばね下共振がむしろ低減されており接地性が向上している。

6. まとめ

従来のスカイフックダンパ制御は構造が簡単のため広く使われてきたが、制御の遅れがあると乗り心地は悪化する。本稿では、応答性が高く、サスペンション反力の上下力成分の大きい IWM の特徴を生かした制御を用いることで乗り心地を向上した。はじめに、サスペンションのメカニカルな特徴について述べ、次に従来行われてきた制御法を紹介した。その結果、低減衰アブソーバと低ステイフネスであればばね上共振と乗り心地領域を改善することが可能であることが分かった。ばね上加速度フィードバック制御の物理的意味はばね上の質量を大きくすることによって安定性を上げることである。数学的に解くと低減衰アブソーバと低ステイフネスの項で構成されていることから所望の特性を得られることが分かる。また、近年発表された乗り心地領域改善のばね下逆スカイフックダンパ制御と同等の成果であればばね上情報のみで制振が可能なのは優位点である。しかし、低ステイフネスであればばね上共振が下がることによる運動性性能の悪化が懸念される。そこで、メカニカルなばね係数を固くすることで操縦安定性を変化させることなくばね下逆スカイフックダンパ制御と同等の性能を実現できることを示した。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（課題番号:26249061）によって行われたことを付記する。

参考文献

- (1) Y. Hori, "Future vehicle driven by electricity and control Research on four-wheel-motored "UOT Electric March II", " IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 5, pp. 954-962, 2004.
- (2) M. Anderson and D. Harty, "Unsprung Mass with In-Wheel Motors Myths and Realities," AVEC 10, pp.261-266, 2010.
- (3) S. Murata, "Vehicle Dynamics Innovation with In-wheel Motor," SAE Technical paper, 2011.
- (4) G. Koch and T. Kloiber, "Driving State Adaptive Control of an Active Vehicle Suspension System," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.22, no.1, 2014.
- (5) Y. Ma, Z. Deng and D. Xie, "Control of the Active Suspension for In-Wheel Motor," Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing.
- (6) W. Sun, H. Pan, and H. Gao, "Filter-Based Adaptive Vibration Control for Active Vehicle Suspensions With Electrohydraulic Actuators," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, 2016.
- (7) 勝山 悦生, 大前 彩奈, "インホイールモータを用いたばね下逆スカイフックダンパ制御による乗り心地の研究," 自動車技術会論文集, vol.48, no.2, pp.349-354, 2017.
- (8) 落 直哉, 藤本 博志, 堀 洋一, "四輪インホイールモータを搭載した電気自動車における正負のアンチダイブ力を用いたロール・ピッチ制御," Transportation and Logistics Conference, pp.95-98, 2012.
- (9) 福留 秀樹, "インホイールモータによる車両前後振動軽減," 自動車技術会秋季大会, pp.448-453, 2015.