

# ばね上情報のみを用いたインホイールモータ搭載車の 上下方向の乗り心地向上と 前後方向への干渉の抑制に関する研究

学生証番号 47-166063 神谷直希  
 指導教員 堀洋一 教授

Key Words : electric vehicle, in-wheel motor, vehicle motion control, ride comfort

## 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、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方式は環境面のみならず車両運動制御の観点においても有効である。そして、インホイールモータ (IWM) を用いると、モータの分散配置による各輪の独立駆動、部品配置自由度が増えることによる車両開発などの優位点がある [1]。一方で IWM 車は、ばね下重量の増加により乗り心地が悪化する。また、4~8 Hz は人々が不快感を抱く周波数帯 (以下、乗り心地領域とする。) でありこの帯域の振動低減は重大な課題である。これまでばね下重量の増加による不快な振動を抑制するために、IWM 特有の機構による上下力 (以下、サスペンション反力とする。) を用いて、数 Hz の低域から乗り心地領域を改善する研究が行われた [2, 3]。また、近年ばね下の速度情報を用いた制御手法が開発され、乗り心地の向上に高い効果を発揮している [3]。ただ、ばね下にセンサを搭載すると追加のセンサコストや配線の困難さなどの課題がある。また、これまで IWM の駆動力を用いた上下方向または前後方向運動の制振制御に関する研究はされてきているが、その上下と前後運動の干渉に関してはほとんど検討されていない。そこで本論文では、ばね上情報のみを用いた IWM 搭載車の乗り心地向上と前後方向への干渉の低減について述べる。第2章では車両のモデルについて述べ、第3章ではばね上情報のみを用いた乗り心地制御に関して述べる。第4章では提案法について述べ、最後にまとめと今後の方針を述べる。

## 2 車両のモデル化

本論文の提案手法で用いる車両のクワォーターカーモデルとブロック線図を図1、図2にそれぞれ示す。ばね上、ばね下の前後方向の運動方程式を式 (1), (2), 上下方向の運動方程式を式 (3), (4) にそれぞれ表し、

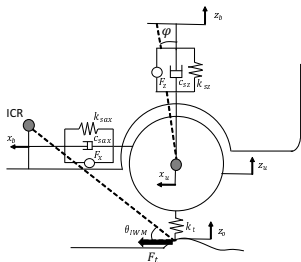


図1 クワォーターカーモデル

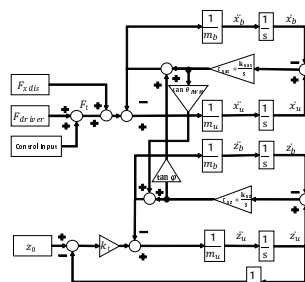


図2 ブロック線図

イヤの駆動力を式 (5) とし、 $F_{driver}$ ,  $F_{ux}$ ,  $F_{uz}$  はそれぞれドライバ入力、前後方向の制御入力、上下方向の制御入力を表している。また、上下運動の前後方向への干渉と前後運動の上下方向への干渉項を式 (6), (7) にそれぞれ表す。ここで、 $k_{sax}, c_{sax}$  は前後方向のサスペンションアームの弾性係数と減衰係数、 $k_{sz}, c_{sz}$  は上下方向のサスペンションの弾性係数と減衰係数、 $k_t$  はタイヤばね定数を表しており、 $\theta_{IWM}$  はインホイール型駆動の瞬間回転中心角、 $\phi$  はサスペンションの取り付け角をそれぞれ表している。また、 $F_{xdis}$  は前後方向の外乱、 $x_u, x_b$  はそれぞればね下とばね上の前後変位、 $z_0, z_u, z_b$  はそれぞれ路面、ばね下、ばね上の上下変位を表している。

$$m_b \ddot{x}_b = (c_{sax}s + k_{sax})(x_u - x_b) + F_x \quad (1)$$

$$m_u \ddot{x}_u = -(c_{sax}s + k_{sax})(x_u - x_b) - F_x + F_{xdis} + F_t \quad (2)$$

$$m_b \ddot{z}_b = (c_{sz}s + k_{sz})(z_u - z_b) + F_z \quad (3)$$

$$m_u \ddot{z}_u = -(c_{sz}s + k_{sz})(z_u - z_b) - F_z + k_t(z_0 - z_u) \quad (4)$$

$$F_t = F_{driver} - F_{ux} - \frac{F_{uz}}{\tan \theta_{IWM}} \quad (5)$$

$$F_x = (c_{sz}s + k_{sz})(z_u - z_b) \tan \phi \quad (6)$$

$$F_z = (c_{sax}s + k_{sax})(x_u - x_b) \tan \theta_{IWM} \quad (7)$$

## 3 ばね上情報のみを用いた上下方向の乗り心地向上制御

ばね下逆スカイフックダンパ制御 [3] は、ばね下の速度情報のみを用いる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向上を図れるばね上の加速度情報を用いた手法について説明する。また、本章では上下と前後方向の干渉を考慮しないモデルを用いて考え、ばね上とばね下の上下方向の運動方程式を式 (8), (9) にそれぞれ示す。 $F_{cz}$  は上下方向の制御入力を表している。

$$m_b \ddot{z}_b = (c_{sz}s + k_{sz})(z_u - z_b) + F_{cz} \quad (8)$$

$$m_u \ddot{z}_u = -(c_{sz}s + k_{sz})(z_u - z_b) + k_t(z_0 - z_u) - F_{cz} \quad (9)$$

ばね上加速度フィードバック制御は、式 (8), (9) に、 $F_z = -c_{sz} \dot{z}_b$  を代入した形で表せ、制御によって仮想的にばね上重量を大きくすることで安定した走行を実現している。また、本制御はセミアクティブサスペンションによる乗り心地領域の改善が実証されている [4]。そこで、IWM のサスペンション反力を用いた場合でも同様の効果が発揮されるかの検証を行う。ただ、ばね上加速度フィードバック制御単体では低域で周波

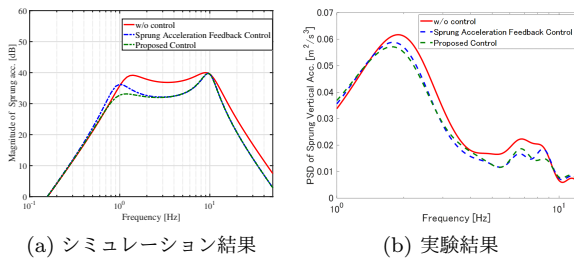


図3 ばね上情報のみを用いた乗り心地向上制御

数特性が悪化する部分があるため、低域に存在するばね上共振の抑制に有効なばね上速度のフィードバックを加えたものを本章の制御入力とする。制御入力は、式(8)、(9)に、 $F_{cz} = -c_{sa}\dot{z}_b - c_{sv}\dot{z}_b$ を代入した形で表し、路面変位入力に対するばね上加速度のボーデ線図のシミュレーション結果を図3(a)に、実験結果を図3(b)にそれぞれ示す。図3(b)を見ると、シミュレーションと同様実験結果においても中周波領域にて周波数特性が改善されていることが確認できる。以上のことから、ばね上加速度フィードバック制御はIWMのサスペンション反力を用いた場合であっても、乗り心地領域の改善に効果的な手法であることが実験結果から確認できる。

## 4 提案手法

本研究で注目している周波数帯は、前後方向は10 Hzのばね下共振周波数近傍、上下方向は4~8 Hzの乗り心地領域である。前章で上下方向の乗り心地領域を改善する手法の説明を行ったが、サスペンション反力を用いて上下の制振制御を行うと前後方向の10 Hz近傍のばね下共振周波数において干渉が生じる。そこで、上下制振時の前後方向への干渉の抑制を目的とし、前後方向の10 Hz帯の共振を抑えるのに有効な相対前後速度フィードバック制御をあわせた制御を提案手法とし、シミュレーションと実験により効果の検証を行う。

### 4.1 シミュレーション結果

提案法の路面変位入力に対する上下と前後方向のばね上加速度のボーデ線図を図4に示す。提案法の制御入力は、式(5)に $F_{uz} = -c_{sa}\dot{z}_b - c_{sv}\dot{z}_b$ 、 $F_{ux} = -c_{lv}\dot{x}_b$ をそれぞれ代入した形で表す。図4(a)から上下方向の乗り心地制御を行うと4~8 Hzの乗り心地領域をはじめ低域においても路面変位入力に対する上下のばね上加速度のゲイン特性が改善されていることが確認できる。ただ、図4(b)を見ると上下の乗り心地制御を行うと前後方向に起振力が発生し10 Hz帯に悪影響が出る。この悪化分に対して前後方向の粘性付加を意味する相対前後速度フィードバック制御を適用することで、10 Hz帯のピークを抑制するのが提案法であり効果が確認できる。ただ、図5(a)を見ると提案法は、10 Hz近傍にて相対前後速度フィードバック制御の影響が生じる。これは、前後方向のばね下共振の影響が駆動力を発生させることで上下方向の10 Hz帯に影響を及ぼすためであると考えられるが、本研究で着目している乗り心地領域への影響は小さいことがシミュレーションにより確認できる。

### 4.2 実験結果

時速60kmで凸凹路を通過した際の上下と前後方向の加速度のPSD解析結果を図5に示す。本実験では、前輪で車輪一定速制御を行い、後輪に制御入力を加えた。図5(a)から上下方向の乗り心地制御を行うと4~8 Hzの乗り心地領域にて改善されることが確認できる。次に、図5(b)を見ると上下の乗り心地制御を行うこ

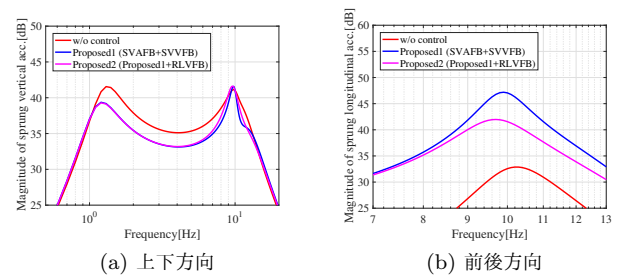


図4 提案法のシミュレーション結果

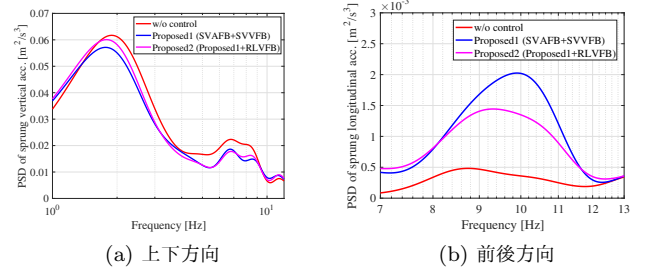


図5 提案法の実験結果

とにより生じる前後方向への影響が10 Hz帯の共振に出ているが、相対前後速度フィードバック制御を適用した提案手法により10 Hz帯の前後方向のブッシュに起因する共振のピークは抑制されている。しかし、図5(a)を見ると上下方向の10 Hz帯にて相対前後速度フィードバック制御による上下方向への影響が確認できるが、本研究で着目している4~8 Hzの乗り心地領域への影響はシミュレーション結果と同様小さい。以上のことから、本提案手法は上下方向の4~8 Hzの乗り心地領域と前後方向の10 Hz帯のばね下共振に対して有効な手法であることが実験により確認できた。

## 5 まとめと今後の課題

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の特徴を活かして、上下制振によって発生する前後方向の10 Hz帯に存在するばね下共振での悪化分の抑制と、その際の上下方向の4~8 Hzの乗り心地領域への影響が小さいことを実験により確認した。以上より、本提案法は今回の研究で注目した前後方向の10 Hz帯のばね下共振周波数と上下方向の4~8 Hzの乗り心地領域において有効な手法であるといえる。今後は、前後方向の制振をモデルベースでの制御手法で行うことによりばね下のセンサを取り除くことと上下方向への干渉を含めて検討を行う。

## 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] 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)
- [3] 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)
- [4] S. Savaresi and C. Spelta, "A Single-Sensor Control Strategy for Semi-Active Suspensions," IEEE Trans. On Control Systems Technology, Vol. 17, No. 1, pp.143-152 (2009)