

# インホイールモータ電気自動車のばね下挙動を考慮した外乱オブザーバを用いた垂直振動抑制制御

陳 奇, 阮 平明, 永井 栄寿, 藤本 博志 (東京大学)

## Vertical Vibration Suppression Control Using Disturbance Observer for In-wheel Motor EV Considering Unsprung Motion

Qi Chen, Binhminh Nguyen, Sakahisa Nagai, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Riding comfort attracts attention with the development of In-Wheel-Motor EV. Aiming for vertical vibration suppression and enhancement of robustness against plant variation, this paper proposes a disturbance observer combined with triple skyhook control. Simulation and experiments are carried out to prove the effectiveness of the proposed method.

キーワード：電気自動車, インホイールモータ, 垂直制振制御, 外乱オブザーバ, トリプルスカイフック, ばね下挙動 (Electric vehicle, In-wheel motor, Vertical vibration control, Disturbance observer, Triple skyhook control, Unsprung motion)

### 1. 序論

〈1・1〉 インホイールモータ電気自動車 近年、脱炭素社会の目標の一環として、新エネルギーの利用が注目されており、電気自動車 (EV) への関心が高まっている。EV は、従来の内燃機関車と比べて、電動モータの高トルク応答性により、操作指令に対して高速かつ正確にトルク出力が可能、出力トルクを含む車両運動状態を直接測定が可能、モータ・エネルギーシステムを分散配置が可能など、様々な利点がある<sup>(1)</sup>。これらの特徴を活かし、より高度な運動制御技術<sup>(2)</sup>を実現することができる。

車輪とモータが一体化した構造を有するインホイールモータ (IWM) 方式 (図 1) は、車輪の独立制御を可能にし、また、ドライブシャフトが不要であることから機械的な共振が発生しない利点があり、注目を集めている。

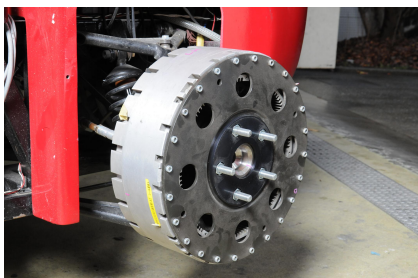


図 1 インホイールモータ  
Fig. 1. In-wheel motor.

〈1・2〉 ばね下共振問題と従来研究 IWM 方式はモータがばね下に配置されることから、ばね下質量が増加する

ため、ばね下の共振周波数が低下し、乗員が不快に感じる周波数域が振動しやすくなる<sup>(4)(5)</sup>。乗り心地改善、及び車の接地性・運動性能向上の視点で、EV に対する垂直方向の制振制御は必要不可欠である。

従来研究<sup>(6)</sup>は、車全体の複雑な構造による非線形性を考慮し、高性能の非線形制御器を構築したが、高い計算負荷と非線形制御器による周波数解析が困難であるという問題点がある。特定の周波数帯域における精密制御をするために、研究<sup>(6)</sup>は LQR と PID を導入し、線形制御による周波数分析が可能になる。しかしそれらの制御器の設計は、異なるプラントに対して独立に制御機器設計を行う必要があるという問題がある。

文献<sup>(8)</sup>では、Triple Skyhook (tSH) 制御による駆動力制御における垂直振動制御を検討し、アクティブサスペンション構造要らずモデルベースの制御器設計が提案され、一般車両に対しても有効であったが、一方でパラメータ依存のモデル化誤差<sup>(9)</sup>による安定余裕が問題である。

〈1・3〉 本文の構成 本論文では、数 Hz 程度のばね上振動に対し、10 Hz 以下の帯域を制御目標とし、外乱オブザーバを導入し、さらなる振動抑制効果と安定性向上を実現した。

本論文の以降の構成を以下に示す。第 2 章ではサスペンション反力と車両の垂直振動モデリングを紹介する。第 3 章は制御器の設計を示す。第 4 章はシミュレーション。第 5 章は実車を用いた実験。最後に、第 6 章で結論を述べる。

### 2. モデリング

〈2・1〉 サスペンション反力<sup>(10)</sup> 一般的に、車両の水平駆動方向駆動力  $F_d$  は、タイヤのスリップ率  $\lambda$  の関数であ

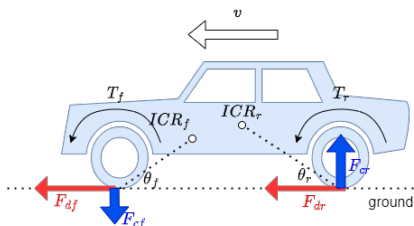


図2 瞬時回転中心とサスペンション反力

Fig. 2. Instant center of rotation and suspension reaction force.

り、以下の式に於ける。

$$F_d = f(\lambda) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{rw - v}{rw} \quad (2)$$

$r$  はタイヤの半径、 $w$  は車輪の回転速度、 $v$  は車体速度である。

本研究は、スリップ率が低い高摩擦路面に定常速度走行を前提とし、一輪の水平駆動力  $F_d$  とモータトルク出力  $T$  は以下の近似関係を満たす。

$$F_d = rT \quad (3)$$

図2に示すように、車体に駆動力  $F_d$  が働くとき、ある中心点の周りにモーメントが生じる。この中心点はICR(Instant Center of Rotation)と呼ばれ、発生したモーメントにより、力学特性により車体には垂直方向の反力  $F_c$  が発生する。ここで、 $\theta$  をアームと地面との角度と定義すると、 $F_d$  と  $F_c$  には、以下の関係式が成り立つ。

$$F_c = F_d \tan \theta = rT \tan \theta \quad (4)$$

式(4)により、インホイールモータのトルク制御により垂直方向のサスペンション反力が得られる。

〈2・2〉 クォーターカーモデル 本節では、クォーターカーモデルを用いて車の垂直方向の力学モデルを導出する。図3にクォーターカーモデルを示し、各変数を表1にまとめる。運動方程式は式(5)および(6)と導出される。

$$m_1 \ddot{z}_1 + (c_s + c_t) \dot{z}_1 + (k_s + k_t) z_1 = c_s \dot{z}_2 + k_s z_2 + c_t \dot{z}_0 + k_t z_0 - F_c \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_s \dot{z}_2 + k_s z_2 = c_s \dot{z}_1 + k_s z_1 + F_c \quad (6)$$

### 3. 制御器設計

〈3・1〉 トリプルスカイフック制御<sup>(7)</sup> 式(6)より、ばね下変位  $z_1$  からばね上変位  $z_2$  の伝達関数は以下で計算される。

$$z_2 = \frac{c_s s + k_s}{m_2 s^2 + c_s s + k_s} z_1 + \frac{c_s s + k_s}{m_2 s^2 + c_s s + k_s} F_c \quad (7)$$

ばね下変位  $z_1$  からばね上変位  $z_2$  に伝達される振動を抑制するために、サスペンション反力  $F_c$  を制御する。本研究では

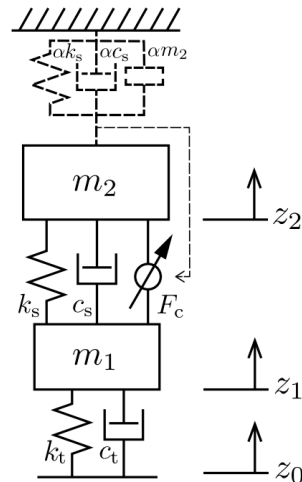


図3 クォーターカーモデルとトリプルスカイフック制御

Fig. 3. Quarter car model and triple skyhook control.

tSH制御(6)を適用し、サスペンション反力は式(8)と計算される。

$$F_c = -\alpha(m_2 s^2 + c_s s + k_s) z_2 \quad (8)$$

更に、式(9)より  $F_c$  からトルク出力に変換することができる。

$$T_{vib} = \frac{r}{\tan \theta} F_c \quad (9)$$

式(8)において、 $\alpha$  は車両のアクチュエータ出力制限に応じて調整する制御器のゲインである。式(8)により、式(7)の理想的な伝達特性は以下の式となる。

$$z_2 = \frac{1}{1 + \alpha} \frac{c_s s + k_s}{m_2 s^2 + c_s s + k_s} z_1 \quad (10)$$

表1 車両プラントパラメータ

Table 1. Vehicle plant parameter

Parameters	symbol	unit	value
sprung mass	$m_0$	kg	200
unsprung mass	$m$	kg	45
suspension stiffness front	$k_s$	N/(m)	20000
suspension damping front	$c_s$	N/(m/s)	1000
tire stiffness	$k_t$	N/(m)	150000
tire damping	$c_t$	N/(m/s)	500
ICR angle	$\theta$	rad	0.2

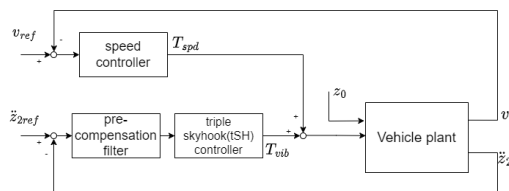


図4 tSH制御ブロック線図

Fig. 4. Block diagram of tSH control.

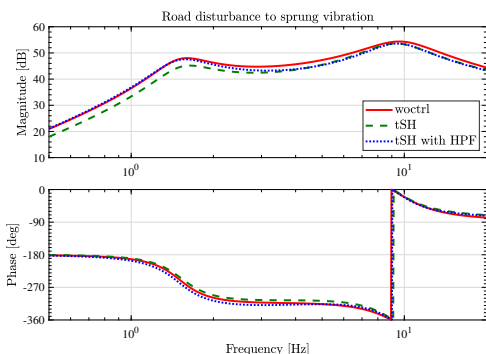


図5 tSH制御による周波数応答  
 Fig. 5. Frequency response of vibration with tSH control.

この制御器は、図3の上部に示すように、バネ-マス-ダンパを模擬し、空中の不動点に固定するような制御である。

図4に全体の制御ブロック線図を示す。車両制御は進行方向の速度制御、上下振動抑制のためのtSH制御で構成される。 $z_0$ は上下方向の外乱を表す。実際の車両制御に適用する際、ばね上振動加速度をフィードバックする時のセンサーノイズとオフセットの影響を考慮する必要がある。本論文では、これらの影響を低減するために式(11)および(12)式のローパスフィルタ(LPF)<sup>(7)(11)</sup>とハイパスフィルタ(HPF)の導入を行う：

$$Q_l = \frac{1}{\tau^2 s^2 + \sqrt{2}\tau s + 1}, \tau = \frac{1}{2\pi f_l} \approx 0.016, f_l = 10 \quad (11)$$

$$Q_h = \frac{s^2}{s^2 + 2\pi\zeta f_h s + (2\pi f_h)^2}, \zeta = 2, f_h = 1 \quad (12)$$

しかし、HPFの導入により、図5に示すようにtSH制御の低域性能はが低下し、LPFによる位相ずれもシステムの安定性に影響する可能性がある<sup>(8)</sup>。

〈3・2〉 外乱オブザーバに基づく制振制御 低域性能改善及びロバスト性向上を目指し、外乱オブザーバ(DOB)<sup>(11)</sup>を導入する(図6)。 $P_0$ は、式(4)(5)(6)の力学方程式で導出

したダイナミックモデル、 $\Delta G_p$ はダイナミックモデルと実車両間のモデル化誤差を表す。モデル化誤差は、主に以下の2つの要素に起因する：

- (1) モデル導出誤差  $\Delta G_{pm}$ : ダイナミックモデルの特性と実物の応答特性(一般的、システム同定実験によるモデル)との誤差を表す。
- (2) パラメータ変動による  $\Delta G_{pp}$ : モデリングのパラメータと老化・荷重などの原因による実物のパラメータとの誤差を表す。

垂直方向振動を抑制するための外乱オブザーバは、従来研究<sup>(12)</sup>より、構成されるノミナルモデルの逆モデル  $P_n^{-1}$ は、慣性モデルを考慮し、以下のように表される。

$$P_n^{-1} = \frac{T}{\ddot{z}_2} = \frac{r}{\tan \theta} m_2 \quad (13)$$

しかし、慣性モデルによるオブザーバ系は、特定帯域に対する補償性能がないため、バンドパスフィルタ付きの場合従来のtSH制御に対して性能向上は見られない。低域の制御性能を向上させるためには、ノミナルモデルの改善を行う必要がある。

本研究は、図7の二慣性系モデルに基づき、サスペンション特性を考慮した以下のノミナルモデルを提案する。

$$P_{np}^{-1} = \frac{T}{\ddot{z}_2} = \frac{r}{\tan \theta} \left( m_2 + \frac{c_s}{s} \frac{m_1 + m_2}{m_1} + \frac{k_s}{s^2} \frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) \quad (14)$$

オブザーバによる低域のトルクフィードバックを強化するため、ばね上加速度フィードバック信号  $\ddot{z}_2^*$  から  $\delta T$  の伝達関数は以下ようになる。

$$G_{\delta T} = \frac{k_{ob} P_n^{-1} Q_l}{1 + Q_h G_{tsh} P_0 + k_{ob} Q_l (P_0 P_n^{-1} Q_h - 1)} \quad (15)$$

$G_{\delta T}$ の周波数応答特性を図8に示す。提案モデルの低域フィードバック性能が向上することが確認できる。

〈3・3〉 モデル化誤差に対する安定性とパラメータ設計 プラントモデルはノミナルモデル  $G_0$ とモデル化誤差、 $\Delta G_p$

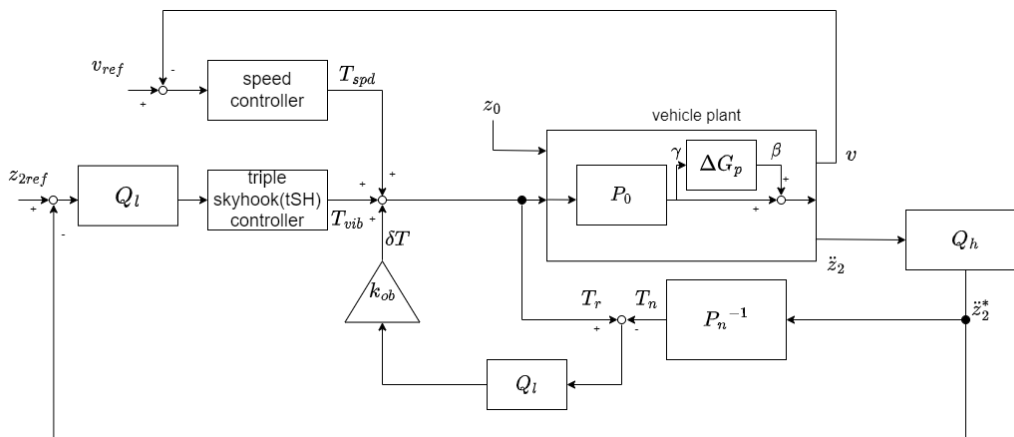


図6 提案手法制御ブロック線図  
 Fig. 6. Block diagram of proposal method.

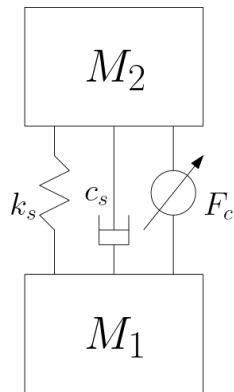


図7 二慣性系ノミナルモデル

Fig. 7. Nominal model based on two-inertia system.

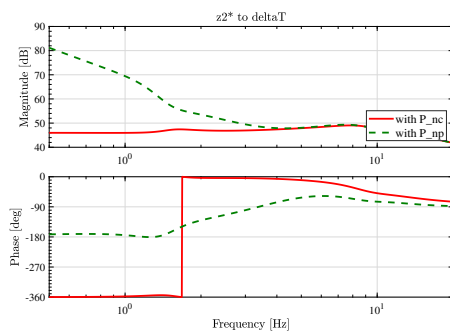


図8  $P_{nc}$  と  $P_{np}$  に応じる  $\delta T$  応答特性

Fig. 8.  $\delta T$  Frequency response with  $P_{nc}$  and  $P_{np}$ .

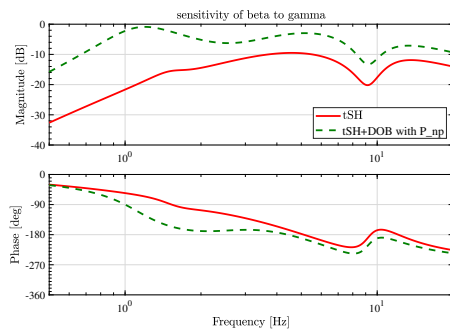


図9  $\beta$  から  $\gamma$  の相補感度関数

Fig. 9. Complementary sensitive function of  $\beta$  to  $\gamma$ .

に分けて記述することができる。誤差部分の影響は誤差モデル  $\Delta G_p$  の入力  $\gamma$  と出力  $\beta$  で表される。 $\beta$  から  $\gamma$  の相補感度関数を図9に示す。

図9より、提案手法は同じ tSH 制御構成を有するが、モデル化誤差部分に対する感度が低下させ、ゲイン余裕が向上することが分かる。

その上、外乱オブザーバのゲイン設計は、以下の条件を満たす必要がある：

- (1) モデル化誤差に対する感度が低減すること。

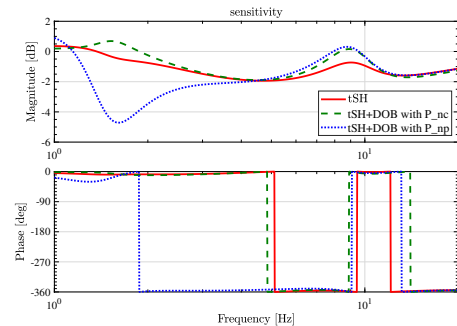


図10 ばね上振動の感度関数

Fig. 10. Sensitive function of sprung vibration.

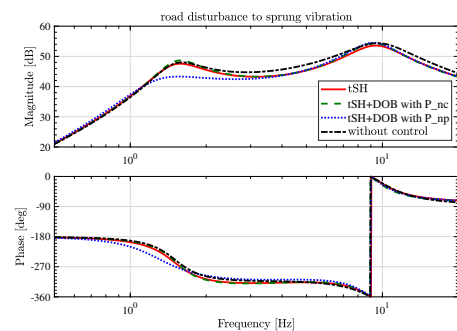


図11 路面外乱からばね上振動の伝達特性

Fig. 11. Frequency response from road disturbance to sprung vibration.

(2) 出力のサスペンション反力を、式(9)によりトルク出力まで変換し、モータトルク出力限界を満たすこと。

#### 4. シミュレーション

〈4・1〉 周波数応答シミュレーション 提案手法の  $\frac{z_2}{z_0}$  の感度関数を図10、周波数応答を図11に示す。感度関数に変動することにより、HPFを適用する場合、提案手法は従来の tSH 制御と比べて 1Hz から 3Hz の低周波数の制振性能が改善し、3Hz から 8Hz までの周波数の性能は同程度であり、8Hz から 12Hz において性能が劣化していることが分かる。提案したノミナルモデルは、従来研究<sup>(12)</sup>より性能が向上したことも確認できた。乗り心地において重要とされる 10Hz 以下の周波数帯域において提案制御器の有効性が示された。

〈4・2〉 時間領域シミュレーション シミュレーションにおける制御ブロック線図を、図12に示し、シミュレーションの条件を以下に示す：

(1) 路面外乱入力(図13)：0.01 m/s<sup>2</sup> 程度のオフセットと 10<sup>-6</sup>W 程度のガウシアンホワイトノイズ(a)を、高さ 3cm、通過周波数 2Hz 付近の路面変位外乱入力(b)とする。

(2) 制御器設定：tSH 制御のゲイン  $\alpha = 0.4$ 、外乱オブザーバのゲイン  $k_{ob} = 0.25$  とする。

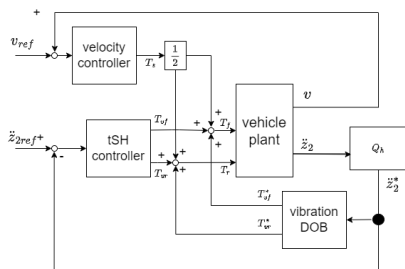
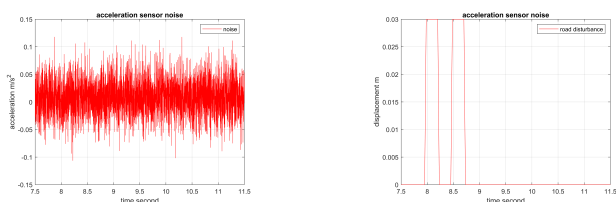


図 12 シミュレーション・実験の制御ブロック線図  
 Fig. 12. Block diagram of simulation and experiment controller.

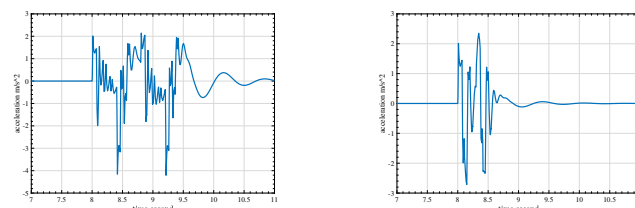


図 15 実験車両 FPEV2-Kanon  
 Fig. 15. FPEV2-Kanon for experiment.



(a) ノイズ・オフセット (b) 路面外乱

図 13 シミュレーション条件  
 Fig. 13. Simulation conditions.



(a) 2Hz 擬似外乱 (b) 5Hz 擬似外乱

図 16 擬似加速度外乱

Fig. 16. Imaginative road disturbance acceleration input.

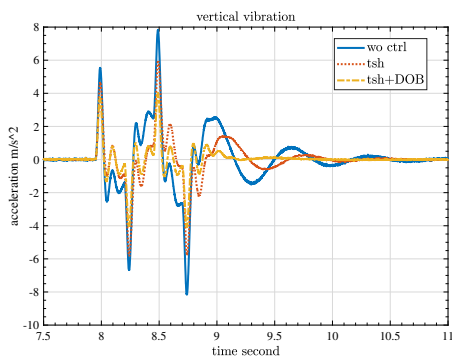


図 14 時間領域のシミュレーション結果  
 Fig. 14. Simulation result in time domain.

(3) その他: 高 $\mu$ 路面を想定し、極 1.4 の PI 制御で 3m/s の定常速度を維持する。

図 14 に示すシミュレーション結果から、提案手法は従来手法の tSH 制御より、最大振幅 (peak-to-peak) が 11% 程度減少、RMSE も 14% 程度減少した。これにより、提案手法の低周波数制振効果向上が検証された。

## 5. 実験

〈5・1〉 実験車両 実験に用いた車両は、図 15 に示す試験車両 FPEV2-Kanon である。本車両は四輪 IWM を搭載し、dSpace 社製の Autobox により提案制御を実装する。制御ブロック線図はシミュレーションと同じく、図 12 で構成される。

〈5・2〉 ソフトウェア外乱実験 ソフトウェア外乱実験

は、擬似的な外乱信号をセンサーフィードバックに印加し、車両の応答を測る実験である。この手法により、異なる路面状況を、簡単にテストすることができる。以下に手順を示す：

(1) 加速度センサーに、シミュレーションと同様の外乱入力 (図 13) による疑似的な垂直振動信号  $z_{2v}$  をセンサー取得値に加算するに入れる (図 16)。

(2) トルク出力からの車両に与える実際の反力振動  $z_{2r}$  を検知する。

(3) 擬似外乱と反振の総合  $z_{2v} + z_{2r}$  を、実振動  $z_2$  として取り扱う

2Hz と 5Hz のソフト外乱入力を用いた実験結果を図 17, 18 に示す。結果より、従来法は 2Hz の低域ではほぼ制振効果は見られないが、5Hz 付近において制振効果を示した。一方、提案手法は、二つの帯域に応じて、従来法より良い振動抑制効果を示した。

## 6. 結論

本研究は、ばね下挙動を考慮した一輪車モデルに基づき、tSH 制御と外乱オブザーバを用いた、垂直振動制御器を提案した。センサーノイズ・オフセット対処のため HPF を用いた場合、従来法の tSH 制御は 1Hz から 3Hz の低周波数領域に性能劣化が発生したが、提案手法は新しく設計したノミナルモデルを用いた外乱オブザーバを導入し、従来法の低周波数領域性能を改善しただけでなく、モデル化誤差による安定性向上も実現した。有効性は、シミュレーションと

実験によって示された。

文 献

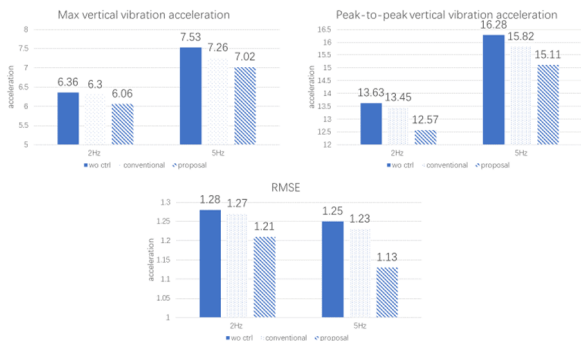
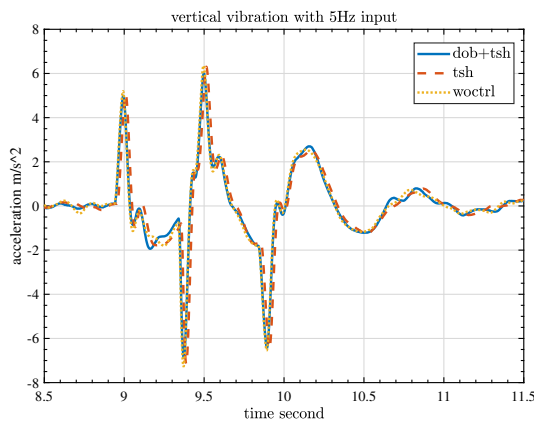
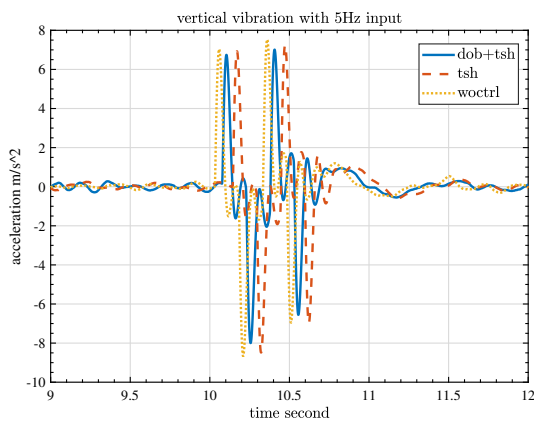


図 17 実験結果の指標

Fig. 17. Data of experiment result.



(a) 2Hz ソフトウェア外乱入力



(b) 5Hz ソフトウェア外乱入力

図 18 ソフトウェア外乱実験結果

Fig. 18. Result of software disturbance experiment.

- (1) X. Sun, Z. Li, X. Wang, and C. Li, "Technology development of electric vehicles: A review," *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 90, 2019
- (2) Marcel F. Heertjes, "Variable Gain Motion Control of Wafer Scanners," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 5, No. 2 pp. 90-100, 2016.
- (3) Shota Yamada, Thomas Beauduin, Hiroshi Fujimoto, Takeshi Kanou, Etsuo Katsuyama, "Active model-based suppression of secondary ride for electric vehicles with in-wheel motors", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 27, No. 6, pp. 5637-5646, 2022.
- (4) M. Morioka and M. J. Griffin, "Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot," *Journal of sound and vibration*, vol. 314, no. 1-2, pp. 357-370, 2008.
- (5) W. Wang, M. Niu, and Y. Song, "Integrated vibration control of in-wheel motor-suspensions coupling system via dynamics parameter optimization," *Shock and Vibration*, vol. 2019, 2019.
- (6) Wang, J. Zeng, Y. Wu, and B. Zhu, "Study on semiactive suspension applied on carbody underneath suspended system of high-speed railway vehicle," *Journal of Vibration and Control*, vol. 26, no. 9-10, pp. 671-679, 2020.
- (7) E. Katsuyama, "Improvement of ride comfort by triple skyhook control," in *9th International Munich Chassis Symposium 2018*. Springer, 2019, pp. 215-234.
- (8) T. Suzuki, M. Mae, T. Takeuchi, H. Fujimoto, and E. Katsuyama, "Model-based filter design for triple skyhook control of in-wheel motor vehicles for ride comfort," *IEEJ Journal of Industry Applications*, p.20004677, 2021.
- (9) Valentin Ivanov, Dzmitry Savitski, Klaus Augsburg, Schalk Els, Cor-Jacques Kat, Theunis Botha, Miguel Dhaens, Corina Sandu, Rui He, Sterling McBride, Angel Gabriel Alatorre Vazquez, and Alessandro Corr3a Victorino, "Challenges of Integrated Vehicle Chassis Control: Some Findings of the European Project EVE," *IEEJ J. Industry Applications*, vol. 8, no. 2, pp. 218-230, 2019.
- (10) Tomonori Suzuki, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Naoto Shimoya, Etsuo Katsuyama, "Vibration Control for Electric Vehicle with In-Wheel Motors on Slippery Road using Driving Force Control", *The 5th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization*, Chiba, Japan, 2019.
- (11) T. Umeno and Y. Hori, "Robust speed control of dc servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 38, no. 5, pp. 363-368, 1991.
- (12) Y. R.Sato, H.Fujimoto, "Improvement of rough terrain running ability for mobility robot with in-wheel motor," *IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization*, 2016.
- (13) Michael Ruderman, Hiroshi Fujimoto, Shota Yamada, Valentin Ivanov, Examples of actuator uncertainties in environmental systems of mechanical systems (SoMS), *The 3rd IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization*, pp. N/A, 2017