

# サスペンション共振周波数を用いた低速無人運転EVの 歩行者による力操作法のためのセンサレス外力分離の検証

邢宏遠\*, 阮平明, 清水修, 藤本博志 (東京大学)

Verification of Sensorless External Force Separation for Pedestrian Force Manipulation  
in Low-Speed Unmanned EVs Using Suspension Resonance Frequency

Hongyuan Xing\*, Binh-Minh Nguyen, Osamu Shimizu, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

This study aims to address the drawback of unintended stops caused by road surface irregularities in "Pedestrian Force Manipulation for Low-Speed Unmanned EVs" by distinguishing between the forces exerted by road surface contact and those applied by pedestrians. Through experiments and simulations, it was verified that force separation is possible by analyzing the suspension resonance of the reaction force acting on the vehicle.

**キーワード**：電気自動車, 歩行者による力操作, 外力分別, センサレス力制御, 外乱オブザーバ, バックドライバビリティ

(Electric Vehicle, Pedestrian Force Manipulation, External Force Separation, Sensorless Force Control, Disturbance Observer, Backdrivability)

## 1. 序論

電気自動車 (EV) は電動モータを使用しており, 内燃機関に比べて部品が少なく, 迅速かつ高精度な制御が可能である特徴により, EV はさまざまな自動運転機能に適している。例えば, 駐車場において EV を無人走行させて自動で駐車させたり, 所有者の元へ車を呼び寄せる技術が実現されており, 利便性の高さから社会的に広く受け入れられている<sup>(1)</sup>。しかし, 自動運転車に搭載されている RGB カメラ, ミリ波レーダ, LiDAR 等の外界センサは光量の変化, 天候, 周囲の信号の跳ね返りなどの外界要因に影響されやすく, 駐車場の歩行者と車両が近距離で混雑している状況においては, 歩行者との距離を正確に検出することが難しい課題となっている<sup>(2)</sup>。

我々の研究グループでは, 人間と車両が近距離で混雑している駐車場などの低速での自動駐車や自動呼出し時において, 外界センサによる歩行者検出の問題点を解決するために, センサレスコンプライアンス制御を用いた「歩行者による力操作法」を提案している<sup>(3)</sup>。この方法は, モータが車輪に内蔵している In-Wheel Motor(IWM)-EV 車の高い応答性と各輪駆動の特性を生かして<sup>(3)-(5)</sup> 歩行者が軽く触れている間だけで車両が停止する IWM-EV の制御技術を提案している。

「歩行者による力操作法」では, 外界センサを一切使用しないため, 外界要因によって引き起こされるセンサの精度低下による歩行者の誤検知を殆ど無くすることが期待できる。しかし, この制御方式では EV 走行時に路面変位に接

触すると, 接触した際に受ける外力によって停止してしまうという欠点が存在する。この方法が使用される場所は主に駐車場だが, 駐車場にはロック板やスピードバンプなどの路面変位が多く存在するため, この方法は実用性がないと言える。

本稿では, 「歩行者による力操作法」の実用化に向けて, EV に外力が作用した際, その外力が路面変位によるものか, 歩行者によるものかを外界センサなしで判断することを目的としている。提案法の妥当性は, シミュレーションと実車実験により検証される。本稿の構成を以下に示す。第2章では, 本稿の問題設定を示す。第3章では, 提案法であるサスペンション共振周波数に注目した外力分離方法を示す。第4章では, 提案法の妥当性を証明するためのシミュレーション結果及び実験結果を示す。第5章では, 本稿のまとめを行い, 今後の研究方針について示す。

## 2. 問題設定

**〈2・1〉 低速無人運転 EV の歩行者による力操作法** 従来法では Fig.1 に示す通り, 一定速度で走行している無人走行 EV に歩行者が少しの力を加えるだけで簡単に停止させることができ, 手を離すと走行を再開するといった, あたかも EV が軽く感じられるようなヒューマンインタフェースを実現している。この手法では, 力センサなどを用いずに外乱オブザーバによって推定された外力に対して<sup>(6)-(9)</sup>, 仮想的に質量や粘性を変更できるセンサレスコンプライアンス制御を応用し<sup>(10)-(13)</sup>, 実際よりも少ない力で質量の大きい EV を停止させることができる。従来法のブロック線図

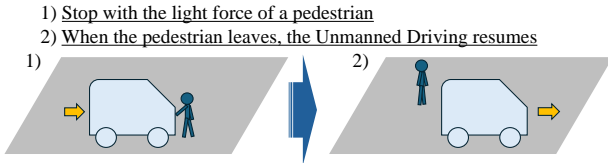


Fig. 1: 従来法の問題設定  
 Fig.1: Problem setting in previous research

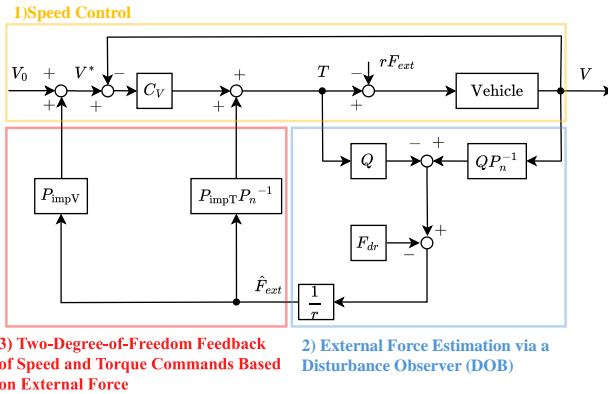


Fig. 2: 従来法のブロック線図  
 Fig.2: Block diagram of the conventional method

を Fig.2 に示す。

Fig.2 は従来法のブロック線図を示している。ここで、Vehicle は EV のプラントモデル、 $r$  は車輪半径、 $J_\omega$  は車輪のイナーシャ、 $Q$  はローパスフィルタ、 $F_{dr}$  は実験により決められる走行抵抗の補償値である。従来法は「1: 速度制御」、「2: 外乱オブザーバーによる外力推定」、「3: 外力に応じた速度指令値とトルク指令値の 2 自由度制御」の 3 つのアルゴリズムで形成されている。それぞれのアルゴリズムについて以下に構築する。

(1) 速度制御

従来法では、外力が車体にかからないときは速度制御を行い、一定速度で走行する。ここで、速度指令値を  $V_0$  とし、速度制御器には比例制御を使用している。

(2) 外乱オブザーバーによる外力推定

従来法では、外乱オブザーバー (DOB) を用いて EV にかかる外力  $F_{ext}$  を推定している。ここで  $P^{-1}$  はノミナルプラントモデルの逆モデルを示している。従来法では、スリップしないと仮定した一輪モデルを用いており、入力トルク  $T$  から出力車輪速度  $V$  までの伝達関数は以下の運動方程式で表される。

$$P = \frac{V}{T} = \frac{r}{(J_\omega + r^2 M)s} \tag{1}$$

(3) 外力に応じた速度指令値のトルク指令値を 2 自由度制御

従来法では、EV にかかる外力の推定値  $\hat{F}_{ext}$  に仮定の質量、粘性をかけることによって EV に外力がかかる間 ( $\hat{F}_{ext} \neq 0$ )



Fig. 3: 実験車両 FPEV2-Kanon 丸型バンプ: 奥行き 35cm, 高さ 4.5cm  
 Fig.3: The experimental vehicle is FPEV2-Kanon. Bump is round, with a width of 50 cm, a depth of 35 cm

だけ速度指令値、トルク指令値を 0 にする 2 自由度制御を用いたコンプライアンス制御を使用している。ここで、 $P_{impV} = \frac{1}{m_V s + b_V}$ 、 $P_{impT} = \frac{1}{m_T s + b_T}$  であり、 $m_V, b_V$  はそれぞれ速度フィードバックの仮定の質量、仮定の粘性であり、 $m_T, b_T$  はそれぞれトルクフィードバックの仮定の質量、仮定の粘性である。

(2・2) 従来法の問題点

従来法では、無人走行中の EV にかかる全ての外力  $F_{ext}$  を歩行者が与えている力と定義し、 $F_{ext} \neq 0$  の場合は速度とトルクを減少させる。しかし、従来法の応用先である駐車場にはスピードバンプや、下がっている状態の車輪ロックプレートなどの路面変位が多く存在する。EV がこれらの路面変位に接触すると、接触時に発生する外力  $F_{ext}$  を歩行者からの外力と誤認し、その力に対してコンプライアンス制御を行ってしまう。よって、この制御方法では、駐車場において路面変位に接触するたびに EV が停止してしまうという問題点が存在する。

(2・3) 実験による従来法の検証

この章では、従来法の効果およびその問題点を検証するための実験結果を示す。実験では Fig.3 に示す、従来研究で使用されていた本研究グループが所有する IWM 車両 FPEV2-Kanon を用いる。この車両は車輪内にダイレクトドライブ方式の IWM が内蔵されており、今回の実験では左後輪を駆動輪としている。車輪の速度はレゾルバで計測しており、分解能は 12 ビットである。計算機は dSPACE DS1103 が用いられており、1 ミリ毎秒での計測・制御をしている。

接触前の速度指令値を 0.8 m/s とし、「歩行者による力操作法」によって歩行者とバンプに接触した時の車輪速度、車輪速度の積分値として算出する車両の移動距離の実験結果をそれぞれ Fig.4, 5 に示す。

Fig.4(a), 5(a) に注目すると、歩行者が車両に接触している間は車両は停止をしているが、手を離すと車両が再び走り出すことが確認できる。一方、Fig.5(a), 5(b) に着目すると、車両がバンプに接触すると車両は先に進まなくなることが確認できる。

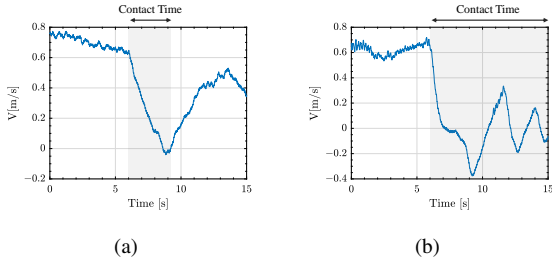


Fig. 4: 車輪速度 (a) 歩行者接触時, (b) バンプ接触時  
Fig. 4: Wheel speed. (a) Pedestrian contact (b) Bump contact

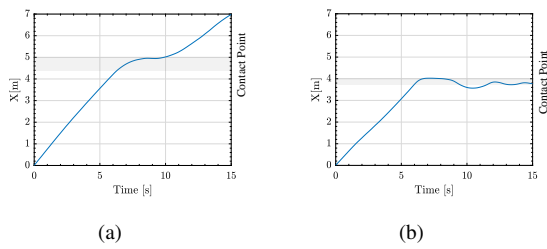


Fig. 5: 距離 (a) 歩行者接触時, (b) バンプ接触時  
Vehicle Position. (a) Pedestrian contact (b) Bump contact

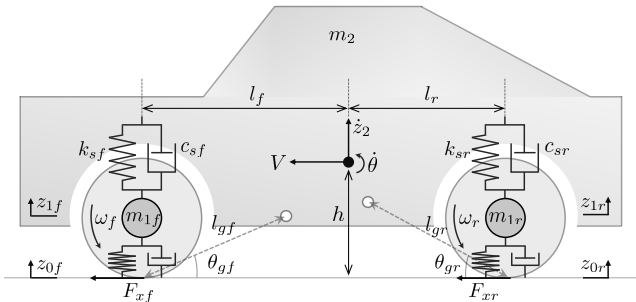


Fig. 6: 車両運動モデル  
Fig. 6: Vehicle motion model

### 3. サスペンション共振周波数を用いたセンサレス外力分別

本研究では、低速無人走行中のEVを歩行者が接触した場合にのみ最小限の力で停止させることを目的として、従来法の外界センサを用いないという利点を生かしつつ、EVに作用する外力 $F_{ext}$ が歩行者によるものか、路面変位によるものかを区別する方法について車両モデルを元に考察する。

**〈3・1〉車両モデリング** 本節では、四輪駆動IWM-EVのモデルについて説明する。本論文では直進走行のみを考慮するため、左右の車輪の動力学は同一であると仮定する。そのため、車両の前後車輪間の相互作用を考慮した縦方向運動解析では、Fig.6に示すハーフカーモデルを使用できる。このモデルでは、前後の車輪がサスペンションを介して車体に接続されている。

車両の縦方向運動中に前後車輪が車体と一体的に動くことと仮定すると、車体の運動方程式は以下のように表される。

$$(m_2 + 2m_{1f} + 2m_{1r})\dot{V} = 2 \sum_{k=f,r} F_{x,k} - F_{dr} - F_{ext} \quad (2)$$

ここで、 $m_2$ は車体の質量、 $m_{1f}$ は前輪の質量、 $m_{1r}$ は後輪の質量、 $F_{x,k}$ ( $=F_{xf}, F_{xr}$ )は前後車輪の駆動力、 $F_{ext}$ は歩行者または路面の不整による外力を表し、添え字 $k$ は $f$ (前輪)または $r$ (後輪)を示す。

一方で、車輪の回転運動方程式は次のように表される。

$$J_\omega \dot{\omega}_k = T_k - rF_{x,k} - rC_r F_{z,k} - M_{sus,k} \quad (3)$$

ここで、 $J_\omega$ は前後車輪の慣性モーメント、 $\omega_k$ は前後車輪の角速度、 $T_k$ は前後車輪のモータートルク、 $r$ は車輪半径、 $C_r$ は転がり抵抗係数、 $F_{z,k}$ は前後車輪の垂直荷重、 $M_{sus,k}$ はホイールベース変動によるトルク外乱を表す。

また、摩擦が高い道路を低速で走行するため、車輪はスリップ率しないと仮定し、車体速度 $V$ と前後輪の車輪速度 $V_{\omega,k}$ は一致するものとして以下のように計算する。

$$V = V_{\omega,k} = r\omega_f = r\omega_r. \quad (4)$$

車体の垂直方向およびピッチ運動の運動方程式は以下の通りに表される。

$$m_2 \ddot{z}_2 = F_{sf} + F_{gzf} + F_{sr} + F_{g zr} - m_2 g, \quad (5)$$

$$I_y \ddot{\theta} = -l_f (F_{sf} + F_{gzf}) + l_r (F_{sr} + F_{g zr}) - (h + z_2 - z_{0f}) F_{xf} - (h + z_2 - z_{0r}) F_{xr}, \quad (6)$$

ここで、 $z_2$ は車体重心の垂直位置、 $F_{sf}, F_{sr}$ は前後のサスペンション力、 $\theta$ は車体のピッチ角、 $I_y$ はピッチ慣性モーメント、 $l_f, l_r$ は前後車軸から重心までの距離、 $h$ は静止時の車体重心の高さ、 $z_{0f}, z_{0r}$ は前後車輪接地点の高さである。

前後車輪の垂直運動は次の運動方程式で記述される。

$$m_{1f} \ddot{z}_{1f} = -F_{sf} - F_{gzf} + F_{zf} - m_{1f} g, \quad (7)$$

$$F_{sf} = -k_{sf}(z_2 - l_f \theta - z_{1f}) - c_{sf}(\dot{z}_2 - l_f \dot{\theta} - \dot{z}_{1f}) + F_{sf0}, \quad (8)$$

$$F_{zf} = -k_f(z_{1f} - z_{0f}) - c_f(\dot{z}_{1f} - \dot{z}_{0f}) + F_{zf0}, \quad (9)$$

$$m_{1r} \ddot{z}_{1r} = -F_{sr} - F_{g zr} + F_{zr} - m_{1r} g, \quad (10)$$

$$F_{sr} = -k_{sr}(z_2 + l_r \theta - z_{1r}) - c_{sr}(\dot{z}_2 + l_r \dot{\theta} - \dot{z}_{1r}) + F_{sr0}, \quad (11)$$

$$F_{zr} = -k_r(z_{1r} - z_{0r}) - c_r(\dot{z}_{1r} - \dot{z}_{0r}) + F_{zr0}, \quad (12)$$

ここで、 $z_{1f}$ と $z_{1r}$ は前後車輪中心から地面までの距離、 $g$ は重力加速度、 $k_{sf}, k_{sr}$ は前後のサスペンションの弾性係数、 $c_{sf}, c_{sr}$ は前後のショックアブソーバーの減衰係数、 $k_f, c_f$ はタイヤの弾性係数と減衰係数である。また、 $F_{sf0}, F_{sr0}$ は前後の静的サスペンション力、 $F_{zf0}, F_{zr0}$ は前後の静的垂直荷重である。

サスペンションジオメトリにより発生する上下力 $F_{gzf}$ および $F_{g zr}$ は次の式で表される<sup>(14)</sup>。

$$F_{gzf} = -F_{xf} \cdot \tan \theta_{gf}, \quad (13)$$

$$F_{g zr} = F_{xr} \cdot \tan \theta_{gr}, \quad (14)$$

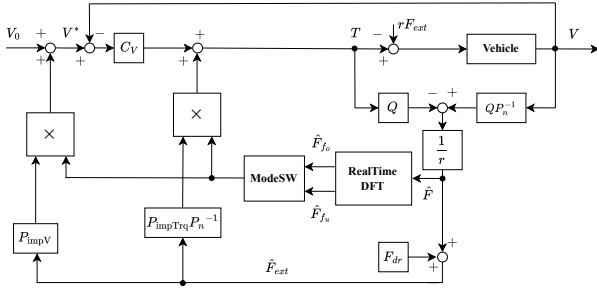


Fig. 7: 提案法のブロック線図

Fig.7: Block diagram of the proposed method

ここで、 $\theta_{gf}$ ,  $\theta_{gr}$  は前後車輪の接地点からサスペンションの瞬間回転中心 (ICR) までの仰角である。

例えば車輪が路面変位に接触してサスペンション力  $F_{sf}$  または  $F_{sr}$  が発生すると、モーメント  $M_{susf}$  または  $M_{susr}$  が ICR 周りに発生し、ICR から車輪軸までの水平距離  $l_{gf} \cos \theta_{gf}$  または  $l_{gr} \cos \theta_{gr}$  が変化する。ここで、ICR 周りに発生するモーメントが、車輪のナックルとタイヤ間で発生するモーメントとして伝わるため<sup>(14)</sup>,  $M_{susf}$  または  $M_{susr}$  がトルク外乱として車輪に伝達され、次の通り表される。

$$M_{susf} = -(F_{sf} - F_{sf0}) \cdot l_{gf} \cos \theta_{gf}, \quad (15)$$

$$M_{susr} = (F_{sr} - F_{sr0}) \cdot l_{gr} \cos \theta_{gr}. \quad (16)$$

**〈3・2〉 提案法** 本章では、低速無人走行中の EV が道路変位によって受ける外力と、歩行者からの接触によって受ける外力を、外界センサを用いずに識別する方法を提案する。車両の前輪または後輪の接地点の高さ  $z_{of}$  または  $z_{or}$  が変化すると、車体のピッチ方向の変位  $z_2 - l_f \theta$  および  $z_2 + l_r \theta$ , さらにホイールセンタの上下の変位  $z_{1f}$  および  $z_{1r}$  が二つの共振周波数を持つことが知られている。これらはそれぞれバネ上共振周波数  $f_o$  とバネ下共振周波数  $f_u$  として定義され、以下の式で近似されることが知られている<sup>(15)</sup>：

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_{s,k}}{(m_2 + 2m_{1f} + 2m_{1r})}}, \quad (17)$$

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_{st}}{m_{1,k}}}. \quad (18)$$

(8)~(13), (16), (17) 式に注目すると、 $z_{of}$  または  $z_{or}$  が変化すると前後輪の垂直荷重  $F_{zf}$  および  $F_{zr}$ , さらに前後輪のホイールベース変化によるトルク外乱  $M_{susf}$  および  $M_{susr}$  も  $f_o$  と  $f_u$  で振動することが確認できる。(2) 式より、この振動は前後輪の回転方向にも伝播する。

提案法のブロック線図を Fig.7 に示す。ここで、走行中の EV が路面変位に接触する場合と歩行者に接触する場合を比較すると、前輪または後輪が路面変位に接触する場合は  $z_{of}$  または  $z_{or}$  が変化するため、前後輪両方にかかる外乱  $rC_r F_{z,k} + M_{sus,k}$  は  $f_o$  [Hz] と  $f_u$  [Hz] で振動する。一方、歩行者



Fig. 8: Fig.8: 実験車両 FPEV5. バンプ 1(丸型バンプ): 奥行き 35cm, 高さ 4.5cm, バンプ 2(台形型バンプ): 底辺 30cm, 上辺 18cm, 高さ 5cm

The experimental vehicle FPEV5. Bump 1 is round, with a width of 50 cm, a depth of 35 cm, and a height of 4.5 cm. Bump 2 has a trapezoidal shape with a top base of 18 cm, a bottom base of 30 cm, and a height of 5.0 cm

に接触する場合は  $z_{of} = 0, z_{or} = 0, M_{sus,k} \approx 0, rC_r F_{z,k} = rC_r F_{z,k0}$  となる。また  $F_{z,k0}$  は定数であるため、前後輪両方にかかる外乱は  $f_o$  [Hz] と  $f_u$  [Hz] で振動しない。

ここでは後輪駆動の EV を想定し、 $T_f = 0, T_r = T$  とする。(1)~(3) 式を連立すると、DOB によって推定される  $\hat{F}$  は、歩行者接触時と路面変位接触時で以下のように表される：

歩行者接触時：

$$\hat{F} \approx -F_{ext} - F_{z,k0}. \quad (19)$$

路面変位接触時：

$$\hat{F} \approx -F_{ext} - rC_r F_{z,k} - M_{sus,k}. \quad (20)$$

ここで、 $-rC_r F_{z,k} - M_{sus,k}$  は  $f_o$  [Hz] と  $f_u$  [Hz] で振動しているため、路面変位接触時のみ  $\hat{F}$  は  $f_o$  [Hz] と  $f_u$  [Hz] の振動成分を持つ。そのため、 $\hat{F}$  にリアルタイムで DFT (Discrete Fourier Transformation) を適用し、 $\hat{F}$  の  $f_o$  成分  $\hat{F}_{fo}$  と  $\hat{F}$  の  $f_u$  成分  $\hat{F}_{fu}$  がそれぞれ閾値  $\alpha, \beta$  を超えた場合 ( $\hat{F}_{fo} > \alpha, \hat{F}_{fu} > \beta$ ), EV に与えられた外力  $F_{ext}$  は路面変位によるものと判断し、コンプライアンス制御の速度フィードバックおよびトルクフィードバックを 0 にして一定速度制御を行う。一方、 $\hat{F}_{fo} < \alpha, \hat{F}_{fu} < \beta$  の場合は、 $F_{ext}$  が歩行者によるものと判断し、コンプライアンス制御を行う。閾値  $\alpha, \beta$  の大きさは、歩行者接触時に発生する僅かなピッチングによる振動を考慮し、歩行者接触時の  $\hat{F}_{fo}, \hat{F}_{fu}$  の大きさに基づいて実験的に決定される。この制御方法により、追加センサを用いることなく、低速無人走行中の EV は路面変位を乗り越え、歩行者に接触している間のみ軽い力で停止することが可能となる。

#### 4. シミュレーションおよび実験による評価

本章では、一定速度制御によって提案法の外力分離方法における考察の妥当性を分析する。

提案法の検証には、車両パラメータがホワイトボックスになっている Fig.8 に示す新型実験車両 FPEV5 を用いた。

Table 1: 車両パラメータ

Table 1: Vehicle Parameters

Symbol	Value	Symbol	Value
$m_2$	934 kg	$k_{sf}, k_{sr}$	40 000 N/m
$m_{1f}, m_{1r}$	40 kg, 80 kg	$c_{sf}, c_{sr}$	2600 N/(m s)
$J_\omega$	1.24 kg m <sup>2</sup>	$k_t$	470 000 N/m
$r$	0.294 m	$c_t$	1370 N/(m s)
$h_g$	0.51 m	$\theta_{gr}$	0.222 rad

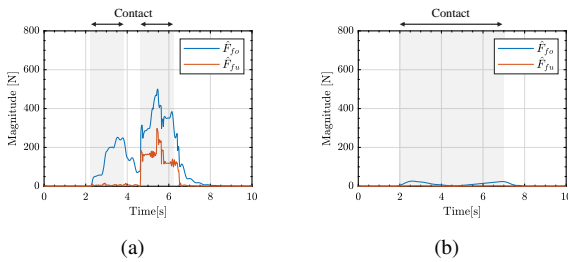


Fig. 9: 外力推定値  $\hat{F}$  の  $\hat{F}_{fo}$  (2 Hz) 成分,  $\hat{F}_{fu}$  (12 Hz 成分) のシミュレーション結果。(a) バンプ接触時 (b) 歩行者接触時

Fig. 9: The simulation results of the estimated external force  $\hat{F}$  components:  $\hat{F}_{fo}$  (2 Hz) and  $\hat{F}_{fu}$  (12 Hz). (a) Contact with a bump (b) Contact with a pedestrian

本研究で使用した車両は、後輪に IWM を搭載し、ADSP-ACEDS1007 プロセッサボードが装備されている。懸架方式はダブルウィッシュボーン方式を採用しており、後輪にのみ ICR が存在している。車両の仕様は Table 1 に示す。シミュレーションは、実験車両のパラメータを用いて MATLAB/Simulink を使用して実施された。この実験車両のバネ上共振周波数  $f_o$ 、バネ下共振周波数  $f_u$  は、それぞれ、 $f_o$ : 約 2 Hz,  $f_u$ : 約 12 Hz である。

**〈4・1〉 シミュレーション結果** 本章 3 のハーフカーモデルを用いて、速度指令値 1 m/s で Fig. 8 のバンプ 1 を通過した場合と、歩行者に接触した場合の解析を実施した。解析対象は、駆動輪の外力推定値  $\hat{F}$  のバネ上共振成分  $\hat{F}_{fo}$  およびバネ下共振成分  $\hat{F}_{fu}$  である。歩行者モデルには、人間の拮抗筋を模したバネダンパモデルを採用し、従来の研究を参考に弾性係数  $k = 100$ 、減衰係数  $c = 20$  と設定した<sup>(3)</sup>。周波数解析には、1 秒間の窓関数を 1 サンプル: 1 ms ごとに更新する移動窓を用いて、オフライン DFT を実施した。

Fig. 9(a) および Fig. 9(b) は、それぞれ走行中の EV がバンプモデルを通過した場合と、歩行者モデルに接触した場合における外力推定値  $\hat{F}$  の 2 Hz 周辺成分および 12 Hz 周辺成分を示している。Fig. 9(a) では、2.2 秒から 3.7 秒の間に前輪がバンプに接触し、5.0 秒から 6.5 秒の間に後輪がバンプに接触している。一方、Fig. 9(b) では 4.6 秒から 6.1 秒の間に車両が人間に接触している様子を示す。

シミュレーションより、バンプ接触時のみ  $\hat{F}_{fo}, \hat{F}_{fu}$  が著し

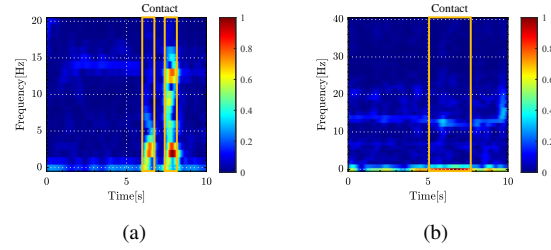


Fig. 10: 外力推定値  $\hat{F}$  の実験結果の STFT (a) バンプ接触時 (b) 歩行者接触時

Fig. 10: Experimental results of the STFT of the estimated external force  $\hat{F}$ : (a) During bump contact (b) During pedestrian contact

く上昇していることが確認できる。

**〈4・2〉 実験結果** Fig. 10 は 2 m/s で速度制御時にバンプ 1 と歩行者に接触した時の駆動輪の外力推定値  $\hat{F}$  の STFT (Short-Time Fourier Transform) 結果であり、縦軸は周波数 [Hz]、横軸は時間 [s]、色は強さを表している。バンプ接触時と歩行者接触時を比べると、前輪のバンプ接触時は  $\hat{F}_{fo}$  のみ強くなり、後輪のバンプ接触時は  $\hat{F}_{fo}, \hat{F}_{fu}$  の両方が強くなることを確認できる。一方、歩行者接触時は直流成分 (0 Hz) のみ強くなっていることが確認できる。よって、路面変位接触時のみ駆動輪の外力推定値  $\hat{F}$  はバネ上共振  $\hat{F}_{fo}$  である 2 Hz、バネ下共振  $\hat{F}_{fu}$  である 12 Hz の振動成分を持つことが確認できる。

式 (17) および (18) に注目すると、 $\hat{F}_{fo}$  はサスペンションの弾性係数、減衰係数、および車体の質量にのみ依存し、一方で  $\hat{F}_{fu}$  はタイヤの弾性係数、減衰係数、および車輪の質量にのみ依存していることがわかる。これらの項は、速度依存性および路面変位の形状依存性を持たないことが特徴である。これらの特性を確認するため、1 m/s と 2 m/s の異なる速度指令値を用いて実験を行った。詳細には歩行者と、Fig. ?? に示す二種類のバンプに対して速度制御下で実験車両を接触させた。実験結果は Fig. 11 に示す通りである。路面変位の形状や車両の走行速度に関わらず、車輪がバンプ接触時にのみ駆動輪の外力推定値  $\hat{F}$  が  $\hat{F}_{fo}, \hat{F}_{fu}$  の振動成分を持つことが確認できた。よって、外力推定値  $\hat{F}$  の  $\hat{F}_{fo}, \hat{F}_{fu}$  の振動成分の大きさを評価することにより、加えられた外力が歩行者によるものか路面変位によるものか判別が可能であることが示された。

## 5. 結論

本論文では、「低速無人運転 EV のための歩行者による力操作法」の弱点である、路面変位に遭遇した際に EV が停止する問題に取り組んだ。これに対して、路面変位接触時にタイヤの外力に伝達される 2 種類のサスペンション共振周波数成分に着目し、解決策を提案した。

これからの展望として、タイヤの外力のサスペンション

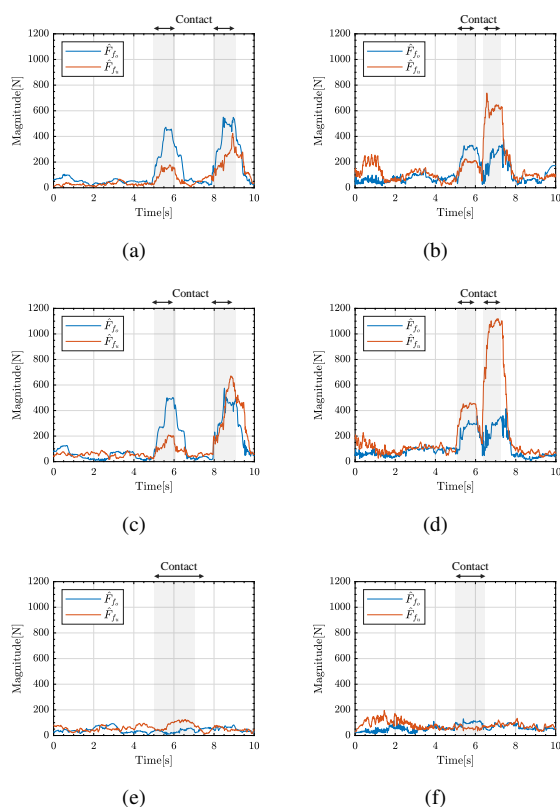


Fig. 11:  $\hat{F}_{fo}$  (2 Hz) 成分,  $\hat{F}_{fu}$  (12 Hz) 成分の実験結果 (a) 1 m/s でバンプ 1 に接触, (b) 2 m/s でバンプ 1 に接触, (c) 1 m/s でバンプ 2 に接触, (d) 2 m/s でバンプ 2 に接触, (e) 1 m/s で歩行者に接触, (f) 2 m/s で歩行者に接触

Fig. 11: Experimental results of  $\hat{F}_{fo}$  (2 Hz) component,  $\hat{F}_{fu}$  (12 Hz) component (a) Bump 1 contact with 1 m/s, (b) Bump 1 contact with 2 m/s, (c) Bump 2 contact with 1 m/s, (d) Bump 2 contact with 2 m/s, (e) Pedestrian contact with 1 m/s, (f) Pedestrian contact with 2 m/s

共振成分をオンライン DFT により抽出することにより, 路面変位を判断し, 路面変位は乗り越え, 歩行者接触時のみ軽い力で止まる制御法を実験により検証する。

## 文 献

- (1) X. Zhang, X. Xia, S. Liu, Y. Cao, J. Li, W. Guo: "An Integrated Framework on Autonomous-EV Charging and Autonomous Valet Parking (AVP) Management System", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol.8, No.2, pp.2836–2852 (2022)
- (2) T. Verstraete, N. Muhammad: "Pedestrian Collision Avoidance in Autonomous Vehicles: A Review", *Computers*, Vol.13, No.3, p.78 (2023)
- (3) K. Yonezawa, H. Fujimoto: "Human-Vehicle-Interaction System with Unmanned Driving EV in Parking Lots by Impedance Control", in The IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion, Control, and Optimization (2022)
- (4) T. Emmei, H. Fujimoto: "Force Control of In-Wheel-Motored Electric Vehicles", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.9, No.4, pp.384–391 (2020)
- (5) H. Lukas, I. Valentin, A. Klaus, R. Vincenzo, D. Miguel, S. Monzer Al, P. Kylian, M. J. Vazquez: "Ride Blending Control for AWD Electric Vehicle with In-Wheel Motors and Electromagnetic Suspension", in 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp.1–5 (2020)
- (6) H. Komiyama, Y. Uchimura: "Speed Control and Sensorless Force Control with Magnetic Gear", in 2010 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), pp.325–330 (2010)
- (7) N. Kageyama, T. Nishimura, T. Itoh, T. Atsumi, S. Nakadai: "Detection of Reduced Magnetic Attraction Force Using a Disturbance Observer for Crawler Robots", in 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), pp.1–6 (2021)
- (8) T. Homan, K. Seki, M. Iwasaki: "Tension Estimation and Control in Winding Process of Web Handling Systems", in 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.1–6 (2021)
- (9) K. Shimamoto, T. Murakami: "Force sensorless hybrid position/force control with equivalent mass matrices switching for decoupled rubbing motion", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.12, No.2, pp.107–116 (2023)
- (10) G. Nguyen, S. Hara, S. Hirokawa, H. Okuda, M. Nagatsuka, N. Ogawa, T. Suzuki: "Manual Control Mode for Autonomous Mobile Robots Using Velocity-Based Impedance Control", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.11, No.5, pp.650–663 (2022) released on J-STAGE September 01, 2022.
- (11) T. Shibanoki, M. Sasaki, T. Tsuji: "An EMG-controlled Mobile Robot Based on a Multi-layered Non-contact Impedance Model", in 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), pp.126–127 (2021)
- (12) C. Mitsantisuk, K. Ohishi, S. Urushihara, S. Katsura: "Kalman Filter-Based Disturbance Observer and its Applications to Sensorless Force Control", *Advanced Robotics*, Vol.25, No.3-4, pp.335–353 (2011)
- (13) I. Kotani, T. Nozaki: "Admittance Separation Method for Admittance-Based Bilateral Control", in IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.1–6 (2023)
- (14) H. Ichikawa, T. Ueno, O. Shimizu, H. Fujimoto: "Model Building and Experimental Validation for Regeneration of Perpendicular Vibration by In-Wheel Motor", in IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp.1213–1218 (2024)
- (15) S. Nie, Y. Zhuang, F. Chen, Y. Wang, S. Liu: "A method to eliminate unsprung adverse effect of in-wheel motor-driven vehicles", *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol.37, No.4, pp.955–976 (2018)