

走行中ワイヤレス給電における路面側コイルと車両の間の横ずれの推定および制御手法の提案 —IMUと車両側コイル電流を用いた実用的な手法—

○小石 知明, 阮 平明, 藤本 博志 (東京大学)

Proposal of Estimation and Control of Lateral Misalignment between Vehicle and Roadside Coil in Dynamic Wireless Power Transfer: A Practical Method Using IMU and Vehicle Side Coil Current

*T. Koishi, B. Nguyen, H. Fujimoto (The University of Tokyo)

Abstract— Dynamic wireless power transfer (DWPT) has recently gained attention in view of the widespread use of electric vehicles (EVs). A key challenge in using this technology is the elimination of coil misalignment, which reduces the coupling coefficient and thus significantly affects the efficiency of power transfer. Considering the rectangular coils, this paper presents a new method for estimating and eliminating lateral misalignments. This paper shows that there exists a one-to-one relationship between the receiver side current and the lateral misalignment. Based on the vehicle dynamics model, the lateral misalignment is estimated at high rate by fusing the DWPT current and the onboard inertial measurement unit. On the other hand, the misalignment of the vehicle is controlled by using the front active steering system. The effectiveness of the proposed method has been demonstrated by simulations considering the vehicle dynamics and by experiments with an experimental vehicle developed by our research group.

Key Words: Electric vehicle, motion control, wireless power transfer

1 序論

近年地球温暖化や大気汚染などの環境問題への関心から、電気自動車 (Electric Vehicle: EV) が注目を集めている。しかし充電時間の長さや航続距離の短さがEVの普及の際の課題となってきた。そこでこの課題を解決する技術として、走行中ワイヤレス給電 (Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT) が研究されている^{1, 2, 3, 4}。DWPTは様々な方式が提案されているが、本論文では路面に埋設したコイルから磁界共鳴を用いてEVに取り付けられたコイルを通して電力を供給する方式に注目する。その中でも角型コイルを用いたDWPTはその給電距離の長さや漏洩磁界の小ささにより盛んに研究されてきた。

DWPTを実現するために対処すべき課題の1つとして、路面側コイルと車両側コイルの間に横ずれがあると結合係数が減少し送電効率が低下してしまう課題がある。

先行研究において横ずれ、つまり経路追従誤差を推定する手法が提案されてきた。その一部として画像処理やGPSなどを用いて車両の位置を推定する手法などが提案されている一方で^{5, 6}、電圧や電流などのDWPTを通して得られる電気的な情報を用いて横ずれを推定する手法が提案されている^{7, 8, 9}。後者の手法は追加センサを必要とせず、また送電コイルの実際の位置と道路標示の位置との間の位置ずれに影響を受けないという点において優れている。しかし先行研究では平行二線方式や円形コイルを対象とした手法しか提案されておらず、角型コイルを用いたDWPTには適用することができなかった。

そこで我々の研究グループにより角型コイルを用い

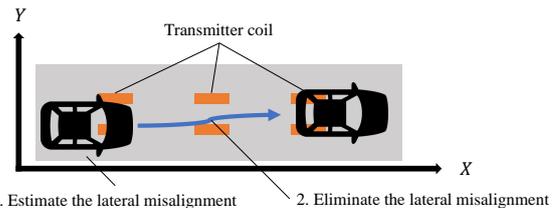


Fig. 1: Idea of this study: estimate and eliminate the lateral misalignment.

たDWPTにおいて横ずれを推定し位置制御により解消する手法が提案された¹⁰。その手法の主な部分は横ずれと1回の給電における電流の平均値との関係を調べたことであつた。その関係を用いて近似モデルを適用することで、リアルタイムに横ずれを正確に推定することができる。しかしこの論文の検証は車ではなく、進行方向と横方向に独立に動くテストベンチを用いたものであつた。

本論文ではその横ずれ推定手法をテストベンチではなく実車に適用するために拡張する。Fig. 1は本研究の目的を示している。先行研究^{7, 8, 9}では横ずれのみが考慮されており、ヨー角は考慮されていなかった。本研究では横ずれとヨー角を共に制御する手法を用いる。また先行研究¹⁰では横ずれは給電1回につき1回の推定しか行えず推定周期が長かつたが、本論文では横ずれ推定の周期を短くするため、電流値に加え慣性測定ユニット (Inertial Measurement Unit: IMU) を用いる。また推定した横ずれを前輪操舵制御により横ずれを解消する手法についても記述する。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章では車両および回路のモデルについて説明し、第3章では横ず

Table 1: PARAMETER DESCRIPTION

Parameter	Description
l_f, l_r	Distance from the center of gravity to the front and rear axles
C_f, C_r	Cornering stiffness of the front and rear wheels
m	Mass of the vehicle
I_z	Moment of inertia
r	Wheel radius
d	Tread of the rear axle
l_{cx}, l_{cy}	x- and y-axis distance from the center of gravity to the receiver coil
θ	Yaw angle
γ	Yaw rate
β	Sideslip angle of the body
Y_{cg}	Lateral position of the center of gravity
Y_{coil}	Lateral misalignment between the transmitter and receiver coils
v	Absolute velocity of the vehicle
v_x, v_y	x- and y-axis components of v
δ_f	Steering angle of the front wheel

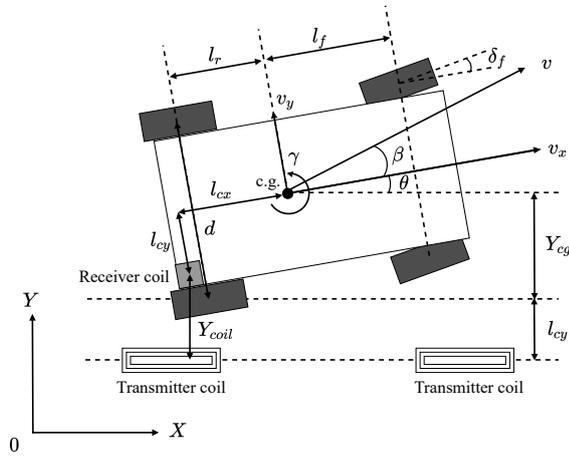


Fig. 2: Planar vehicle model with coils.

れの推定手法および制御手法を提案する。また第4章でシミュレーションにより提案する推定および制御手法の検証を行った結果を示し、第5章ではDWPTにおける電流値と横ずれとの関係を実験で検証した結果を示す。最後に、第6章で結論を述べる。

2 モデル

2.1 車両モデル

Fig. 2 に送電コイルおよびEVに取り付けられた受電コイルの位置を考慮した車両モデルを示す。本研究では後輪駆動前輪操舵の車両を前提とする。Table 1 にパラメータの説明を示す。

この下で、 β および θ が小さいという仮定のもと運

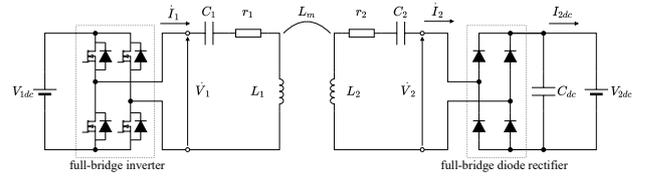


Fig. 3: Diagram of the WPT circuit.

動方程式は次のようにおける。

$$\begin{aligned}
 mv_x(\dot{\beta} + \gamma) &= 2C_f \left(\delta_f - \frac{l_f}{v_x} \gamma - \beta \right) \\
 &\quad + 2C_r \left(\frac{l_r}{v_x} \gamma - \beta \right), \\
 I_z \dot{\gamma} &= 2l_f C_f \left(\delta_f - \frac{l_f}{v_x} \gamma - \beta \right) \\
 &\quad - 2l_r C_r \left(\frac{l_r}{v_x} \gamma - \beta \right), \\
 \dot{Y}_{cg} &= \frac{v_x}{\cos \beta} \sin(\beta + \theta) \simeq v_x(\beta + \theta), \\
 \dot{\theta} &= \gamma.
 \end{aligned} \tag{1}$$

また受電コイルは Fig. 2 に示されるような位置にあるため、 Y_{coil} は次のように表される。

$$Y_{coil} = Y_{cg} - (l_{cx} \sin \theta - l_{cy} (1 - \cos \theta)). \tag{2}$$

2.2 回路解析

Fig. 3 に本研究で前提とする WPT の回路構成を示す。送電側はフルブリッジインバータを用いており、受電側はフルブリッジダイオード整流器を用いている。またバッテリーを模擬するため、定電圧負荷を用いている。ここで V, I, r, L, C はそれぞれ電圧、電流、抵抗値、自己インダクタンス、電気容量を示している。また添え字の '1', '2', 'dc' はそれぞれ送電側、受電側、そして整流後の成分を示している。

電源電圧の角周波数 ω_0 は送受電側ともにその共振条件を満たすようなものとして与える。

ここでインバータの出力電圧 V_1 は矩形波であるが、WPT 回路はバンドパス特性を持つため高次高調波を無視して解析を行う。 V_1, V_2 は RMS の値であるため、フーリエ級数展開により次の関係が導かれる。

$$V_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{1dc}, \quad V_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{2dc}. \tag{3}$$

したがって、AC-AC の送電効率は次のように書ける。

$$\eta = \frac{V_{2dc}(\omega_0 L_m V_{1dc} - R_1 V_{2dc})}{V_{1dc}(\omega_0 L_m V_{2dc} + R_2 V_{1dc})}, \tag{4}$$

ただし L_m は送電コイルと受電コイルの間の相互インダクタンスである。この式より、相互インダクタンスが正であれば効率は相互インダクタンスが大きいほど向上することが分かる。

また電源電圧及び負荷電圧がともに一定であれば、 I_{2dc} は相互インダクタンスのみに依存するため、相互インダクタンスは電流値から得られることが予想される。これに加え相互インダクタンスは横ずれに依存するため、横ずれは I_{2dc} から推定できることが示唆される。

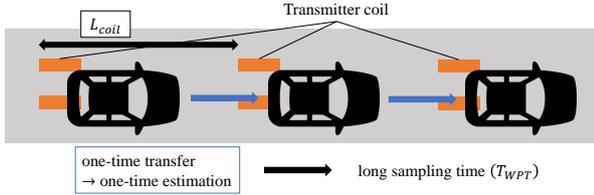


Fig. 4: The estimation result from DWPT information is obtained with a long interval.

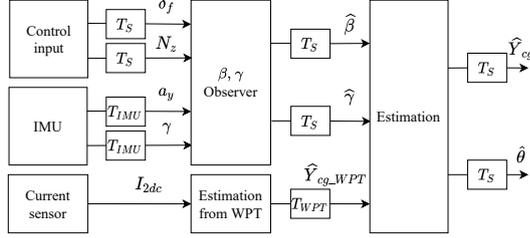


Fig. 5: Block diagram of the proposed estimation method.

3 横ずれ推定・制御手法

3.1 先行研究における電流値を用いた横ずれ推定手法

我々の研究グループは先行研究¹⁰⁾において1回の給電における受電側DCリンク電流から横ずれを推定する手法を提案した。この手法の前提は送電側および受電側のパラメータが既知であること、また受電コイルが送電コイルに対し左右どちらにあるかも既知であることである。この手法では双曲線関数および定数 a, b, c を用いて近似的なモデルを次のように表す。

$$Y_{coil} = \frac{1}{b} \operatorname{arccosh} \left(\frac{\overline{I_{2dc}} - c}{a} \right), \quad (5)$$

ここで $\overline{I_{2dc}}$ は受電側DCリンク電流の平均値である。ただし電流を平均する区間は結合係数が高い領域であり、本論文ではこの区間を「電流平均区間」と呼ぶ。

ここでFig. 4に示すように、推定は1回の給電につき1回行われる。送電コイルどうしの間隔やDWPTにおける車速を考慮すると、この推定周期はIMUのもの T_{IMU} より長い。例えば送電コイル間の間隔3m、車速2m/sとすると、推定周期 T_{WPT} は1.5sであり、 T_{IMU} は多摩川精機製IMUのAU7864において1msである。

3.2 横ずれ推定手法

前節で述べた通りDWPTにおける電流値を用いた横ずれ推定は低サンプリングレートのセンサとみなせる。このサンプリング周期を改善するため、先行研究¹¹⁾でGPSとIMUを組み合わせていたように、サンプリング周期が長いセンサを短いセンサと組み合わせることができる。

そこで本研究ではFig. 5に示すような推定手法を提案する。ただしヨー角 θ の初期値は0であるという前提を置いている。また横方向の加速度 a_y および車体のヨーレート γ がIMUから得られるとしている。

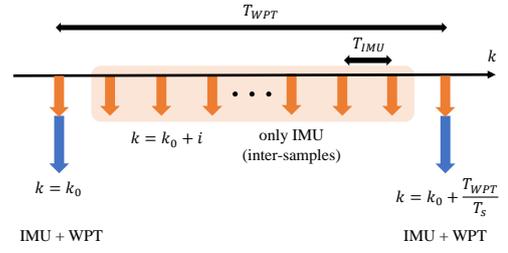


Fig. 6: The different rates between IMU measurement and WPT-based-lateral position.

まず(1)より、状態空間モデルは次のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du, \\ x &= \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} a_y \\ \gamma \end{pmatrix}, u = \delta_f \end{aligned}$$

ここで各行列は次のようである。

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} -\frac{2(C_f + C_r)}{mv_x} & -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{mv_x^2} - 1 \\ -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{I_z} & -\frac{2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{I_z v_x} \end{pmatrix}, \\ B &= \begin{pmatrix} \frac{2C_f}{mv_x} \\ -\frac{2C_f l_f}{I_z} \end{pmatrix}, \\ C &= \begin{pmatrix} -\frac{2(C_f + C_r)}{m} & -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{mv_x} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ D &= \begin{pmatrix} \frac{2C_f}{m} \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

ここで k を次のように置く。

$$t = kT_s,$$

ただし T_s は制御周期である。本論文では T_{IMU} は T_s に等しいと仮定する。すると横すべり角およびヨーレートは k を用いた次の式で表されるようなオブザーバから推定できる。

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= A_d \hat{x}_{k-1} + B_d u_{k-1} \\ &\quad - L_d (C_d \hat{x}_{k-1} + D_d u_{k-1} - y_{k-1}), \end{aligned} \quad (7)$$

ここで L_d は v_x が一定という仮定のもと極配置を行ったオブザーバゲインであり、 A_d, B_d, C_d, D_d は次のような離散化した状態空間表現における各行列である。

$$\begin{aligned} A_d &= e^{AT_s}, \\ B_d &= \int_0^{T_s} e^{A\tau} B d\tau, \\ C_d &= C, D_d = D. \end{aligned}$$

前節3.1で述べた通り、 T_{WPT} は T_{IMU} に比べはるかに大きい(Fig. 6)。横ずれを高サンプリングレートで推定するため、(1)を用いて次のような推定式を構成

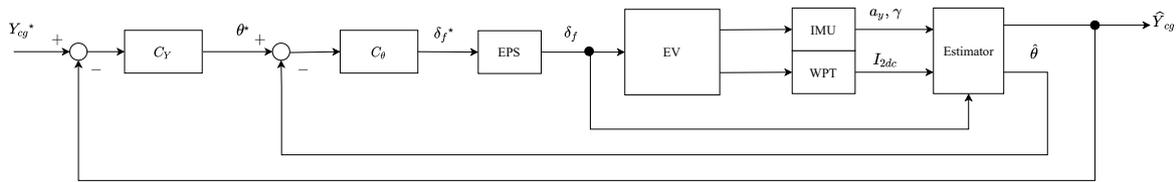


Fig. 7: Block diagram of the proposed lateral position control system.

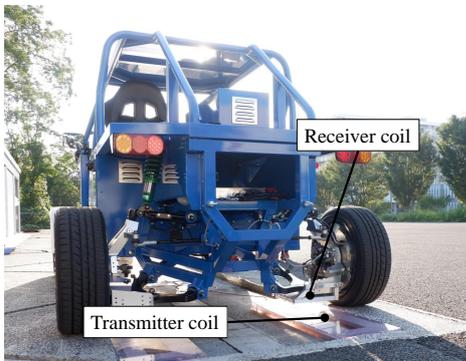


Fig. 8: Experimental vehicle for the DWPT system.

する。

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + T_S \hat{\gamma}_{k-1},$$

$$\hat{Y}_{cg,k} = \begin{cases} \hat{Y}_{cg,k-1} + T_S v_x (\hat{\beta}_{k-1} + \hat{\theta}_{k-1}) \\ \hat{Y}_{cg_WPT,k} \end{cases}, \quad (8)$$

ここで n は整数であり、 \hat{Y}_{cg_WPT} は (2) から計算される。また (5) における \hat{Y}_{cg_coil} について次のような式が成立する。

$$\hat{Y}_{cg_WPT,k} = \hat{Y}_{cg_coil,k} + (l_{cx} \sin \hat{\theta}_k - l_{cy} (1 - \cos \hat{\theta}_k)). \quad (9)$$

3.3 横ずれ制御手法

Fig. 7 に本研究で用いる横ずれの制御ブロック線図を示す。 Y_{cg}^* は Y_{cg} の指令値であり、本論文では 0 である。横ずれとヨー角のカスケード制御になっており、内側はヨー角制御ループ、外側は横ずれ制御ループを用いている。

4 シミュレーション

4.1 シミュレーション設定

送電コイルが 1 枚の場合、複数ある場合それぞれについて提案手法の有効性を検証するため MATLAB/Simulink を用いてシミュレーションを行った。プラントとして、Fig. 8 に示すような我々の研究グループの所有する実験車両である FPEV5¹²⁾ のパラメータを持つ線形な車両モデルを用いた。また受電側 DC リンク電流は先行研究¹³⁾ で提案された AC 電流値の近似モデルを用いて与えた。

Fig. 9 にシミュレーションの状況を示す。横ずれの初期値は 80 mm、ヨー角の初期値は 0 rad とした。1 枚

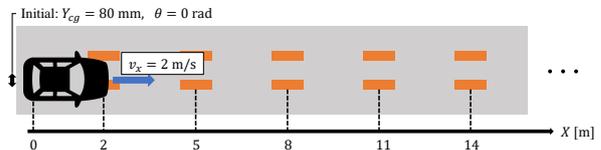


Fig. 9: Assumed condition of the simulation.

Table 2: PARAMETERS OF SIMULATION

Parameter	Value
l_f	1.44 m
l_r	1.11 m
m	1100 kg
I_z	840 kg m ²
l_{cx}	1.11 m
l_{cy}	0.43 m
v_x	2 m/s
R_1	342.5 mΩ
R_2	385.3 mΩ
V_{1dc}	100 V
V_{2dc}	100 V
f_0	85 kHz
τ_{EPS}	0.1 s
$C_Y \{k_{Yp}, k_{Yi}\}$	{0.700, 0.245}
$C_\theta \{k_{\theta p}, k_{\theta i}\}$	{2.68, 2.27}

目の送電コイルの位置は $X = 2$ m とし、それ以降の送電コイルは 3 m ごとに配置した。

Table 2 にシミュレーションで用いたパラメータの値を示す。なお入力 δ_f およびセンサ出力 a_y, γ にホワイトノイズを加えており、車速は一定とした ($v_x = 2$ m/s)。またオブザーバゲインは極が 50 rad/s となるように決定した。

4.2 推定手法のシミュレーション

提案した横ずれ推定手法の有効性を検証するためシミュレーションを行った。制御入力である前輪操舵角は Fig. 10(a) に示すような入力とした。

Fig. 10, Fig. 11 に送電コイル 1 枚の場合、複数の場合それぞれの結果を示す。 Y_{cg}, θ のグラフの青線は実際の値を、赤線は推定値を表す。まず送電コイルが 1 枚の場合の結果については、 Y_{cg} および θ については推定されているものの、Fig. 10(b) に示すように送電コイルが 1 枚の場合には Y_{cg} の推定に誤差が生じている。これは入力および出力にノイズがありそれが推定誤差として蓄積され、 Y_{cg} の誤差になってしまうためであると考えられる。一方で送電コイルが複数ある場合、DWPT における電流値を用いた横ずれ推定により、Fig. 11(b) に示されるようにその誤差は修正されていることが分かる。しかし送電コイルが複数ある場合においても、Fig. 11(b) に示す通り、例えば 4 s 付近において横ずれ推定誤差が大きくなっている。これは

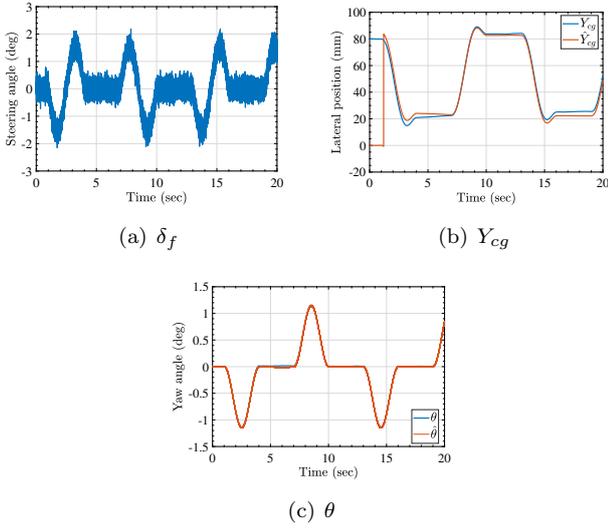


Fig. 10: Simulation result of the proposed estimation method with one transmitter coil.

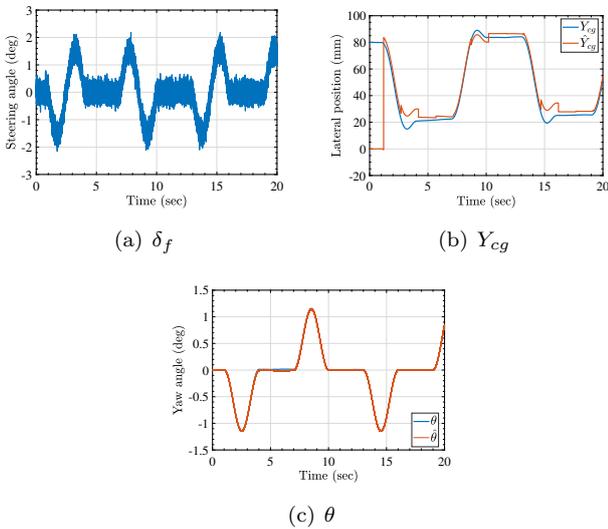


Fig. 11: Simulation result of the proposed estimation method with multiple transmitter coils.

DWPTにおける電流値の平均値と横ずれとの関係を用いた横ずれ推定に誤差があるためであるが、その誤差の原因は2つ考えられる。1つは(5)の横ずれ推定に用いる近似式が、横ずれが小さい領域においては推定誤差が大きくなることである。またもう1つはDWPTにおける電流値を用いた横ずれ推定手法の前提にヨー角0があり、これが満たされない領域では推定誤差が大きくなってしまふことである。

4.3 全体の制御システムのシミュレーション

提案する制御システムの有効性を示すため、送電コイルが複数ある場合においてシミュレーションを行った。その他の条件は前節の横ずれ推定手法のシミュレーションと同様である。

制御器については、内側のヨー角制御ループ、外側の横ずれ制御ループ共にPI制御器を用いた。この制御器のパラメータはTable 2に示している。またEPSは簡単のため時定数 $\tau_{EPS} = 0.1s$ の1次遅れ系としてシミュレーションを行った。

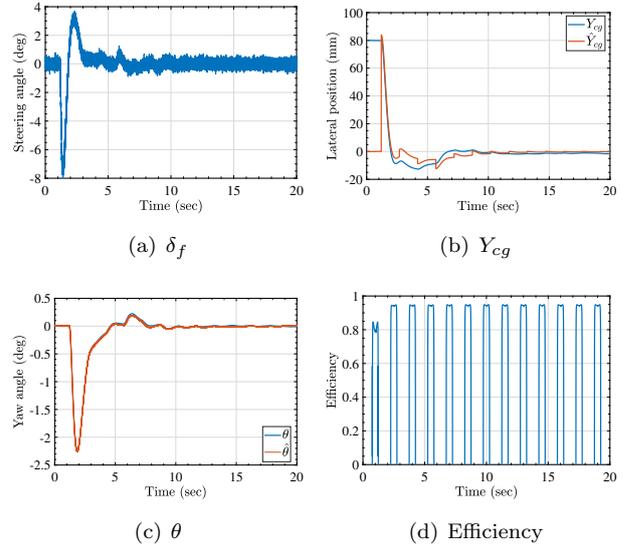


Fig. 12: Simulation result of the proposed control method.

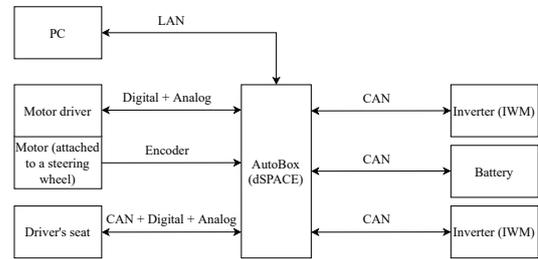


Fig. 13: System configuration of the experimental vehicle for the DWPT system.

また制御手法の有効性を示すため、次の式のように表される1回目、2回目におけるAC-ACエネルギー効率 η_e を取得した。

$$\eta_e = \frac{W_2}{W_1},$$

ここで W_1 は電流平均区間において送電側が供給したエネルギー、 W_2 は受電側が受け取ったエネルギーである。

Fig. 12にシミュレーション結果を示す。制御システムにより横ずれが0に収束していることが分かる。このときの横ずれの追従誤差は横ずれ推定誤差に起因するものである。またFig. 12(d)に電力効率を示しているが、電流平均区間におけるエネルギー効率は1回目の送電で81.0%だったのに対し2回目では93.2%まで改善した。またシミュレーション終了までその効率は高い状態で保たれていた。

5 実験

5.1 実験機

Fig. 8に示されるような実験車両を用いて実験を行った。Fig. 13に車両のシステムの構成を示す。dSPACE社製のコントローラAutoBoxによりパラメータを取得し制御を行っている。左右の後輪にインホイールモータが搭載されており、これにより車両が駆動される。

また送電コイル、受電コイルはFig. 13に示すように角型コイルを用いている。DWPTに用いたコイルなど

Table 3: COIL PARAMETER USED IN EXPERIMENT

Parameter	Value
L_1	237 μ H
L_2	91.4 μ H
C_1	15.4 nF
C_2	38.2 nF
V_{1dc}	50 V
V_{2dc}	25 V
f	85.2 kHz
v_x	1 km/h
Air gap	50 mm

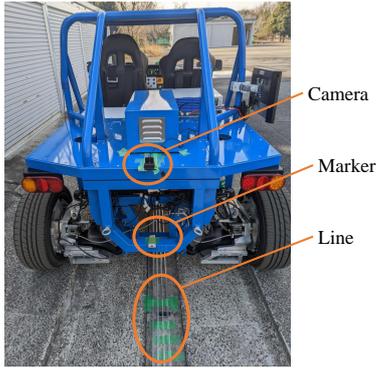


Fig. 14: Camera used to maintain constant lateral misalignment.

のパラメータを Table 3 に示す。ここで f はインバータの駆動周波数である。

5.2 DWPT における電流値と横ずれとの関係の検証

提案する横ずれ推定手法の一部である、DWPT における電流値と横ずれとの関係を確認するため実験を行った。車輪速は PI 制御器により一定に保たれるように制御を行い、その中で 1 枚の送電コイルの上を通過し電流値を測定した。また操舵については手動で動かした。ここで横ずれを一定に保ちながら走行するため、Fig. 14 のようにカメラとマーカーを設置し、路面に設置した基準線の上をマーカーが通過するように操舵の操作を行った。

電流値の測定結果の一部を Fig. 15 に示す。この波形を用いて電流平均区間における電流の平均値を計算し、(5) の近似モデルのフィッティングを行った。そのフィッティングした関数およびデータ点との関係を Fig. 16 に示す。今回の実験では横ずれを細かく設定するのが難しく、その結果フィッティングする対象であるデータが少なくなった。そのためフィッティングした関数の精度は高いとは言えない。また先行研究¹⁰⁾ においては横ずれが大きくなると電流平均値も大きくなっていったが、本実験の結果ではその逆の傾向を示している。これは先行研究¹⁰⁾ と実験の状況が違うためであると考えられる。ここに上げた 2 つの点については今後の研究においてより深く分析することが求められる。

6 結論

本論文では DWPT における送電効率の向上を目的とし、横ずれの推定および解消を行う手法を提案した。

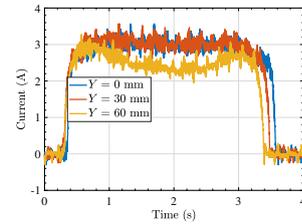


Fig. 15: Experiment: Receiver side currents with different lateral misalignments.

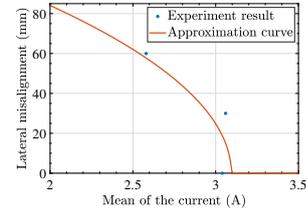


Fig. 16: Approximate curve and the result data of the relationship between the lateral position and the mean of the DC link current.

まず横ずれ推定手法として、先行研究¹⁰⁾ で提案された手法を IMU と組み合わせることにより、高サンプリングレートで横ずれを推定する手法を提案した。また横ずれの解消を行う制御手法として横ずれとヨー角のカスケード制御器を用いた制御システムを提案した。さらにシミュレーションにより横ずれ推定手法および制御システムの検証を行い、両者の有効性を示した。また実験車両を用いて DWPT における電流値と横ずれとの関係の検証を行った。

今後の研究として、まず実車実験による提案手法の検証が求められる。本論文では電流平均値と横ずれとの関係の検証であったため、提案した IMU との組み合わせの有効性を検証する必要がある。

謝辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業 (Grant 番号: JPMJMI21E2), および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP21005) の支援を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) Grant Anthony Covic and John Talbot Boys. Modern trends in inductive power transfer for transportation applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 28–41, 2013.
- 2) S. Li and C. C. Mi. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 4–17, 2015.
- 3) Devendra Patil, Matthew K. McDonough, John M. Miller, Babak Fahimi, and Poras T. Balsara. Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 4, No. 1, pp. 3–37, 2017.
- 4) Osamu Shimizu, Sakahisa Nagai, Toshiyuki Fujita, and Hiroshi Fujimoto. Potential for co2 reduction by dynamic wireless power transfer for passenger vehicles in japan. *Energies*, Vol. 13, No. 13, 2020.

- 5) Ashraf Abosekeen, Aboelmagd Noureldin, and Michael J. Korenberg. Improving the riss/gnss land-vehicles integrated navigation system using magnetic azimuth updates. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 1250–1263, 2020.
- 6) Hongru Xiao, Yanqun Han, Junqiao Zhao, Jiafeng Cui, Lu Xiong, and Zhuoping Yu. Lio-vehicle: A tightly-coupled vehicle dynamics extension of lidar inertial odometry. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 1, pp. 446–453, 2022.
- 7) Pakorn Sukprasert, Binh Minh Nguyen, and Hiroshi Fujimoto. Estimation and control of lateral displacement of electric vehicle using WPT information. In *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM*, pp. 329–334, 2015.
- 8) Karam Hwang, Jaehyoung Park, Dongwook Kim, Hyun Ho Park, Jong Hwa Kwon, Sang Il Kwak, and Seungyoung Ahn. Autonomous coil alignment system using fuzzy steering control for electric vehicles with dynamic wireless charging. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2015, , 2015.
- 9) Karam Hwang, Jaeyong Cho, Dongwook Kim, Jaehyoung Park, Jong Hwa Kwon, Sang Il Kwak, Hyun Ho Park, and Seungyoung Ahn. An autonomous coil alignment system for the dynamic wireless charging of electric vehicles to minimize lateral misalignment. *Energies*, Vol. 10, No. 3, 2017.
- 10) Tomoaki Koishi, Ryo Matsumoto, and Hiroshi Fujimoto. Estimation and positioning control of lateral displacement using coil current in dynamic wireless power transfer with rectangular coil on dynamic bench. In *2022 Wireless Power Week (WPW)*, pp. 322–326, 2022.
- 11) Binh Minh Nguyen, Yafei Wang, Hiroshi Fujimoto, and Yoichi Hori. Sideslip angle estimation using gps and disturbance accommodating multi-rate kalman filter for electric vehicle stability control. In *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1323–1328, 2012.
- 12) 清水修, 藤田稔之, 永井栄寿, 藤本博志, 大森洋一. 第3世代ワイヤレスインホイールモータにおける走行中給電用コイルの開発. 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 141, No. 8, pp. 638–645, 2021.
- 13) Jirawat Sithinamsuwan, Hiroshi Fujimoto, and Yoichi Hori. Sensorless vehicle position detection in electric vehicle by logistic estimation function of mutual inductance. In *2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer, WoW*, pp. 254–259, 2020.