

電気自動車への走行中ワイヤレス給電における受電側電流に基づく受電コイルの横ずれ・角度ずれ推定手法の基礎検討

田内良太*, 清水修, 藤本博志 (東京大学)

Study on a method for estimating lateral and angular misalignment of the receiver coil based on the receiver current for dynamic wireless power transfer

Ryota Tauchi*, Osamu Shimizu, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

This paper proposes a method for simultaneously estimating the yaw angle and lateral misalignment of a vehicle based on the receiver DC link current in order to compensate for the misalignment of the receiver and transmitter coils in dynamic wireless power transfer. The method calculates the angle from the change in lateral displacement heuristically estimated from the current values and the distance in the direction of vehicle travel. Bench experiments show that the proposed method can estimate the yaw angle without additional sensors from previous studies.

キーワード：電気自動車, 走行中ワイヤレス給電, マルチレートカルマンフィルタ, 横ずれ, 角度ずれ (electric vehicle, dynamic wireless power transfer, multi-rate kalman filter, lateral misalignment, angular misalignment)

1. 序論

近年、環境への配慮から電気自動車 (Electric Vehicle: EV) の普及が進められている。EV は走行中に排気ガスを出さないうというメリットがある⁽¹⁾。一方で、一回の充電における航続距離が内燃機関自動車と比較して短いことや車載バッテリーの大きな EV は価格が高いことなどのデメリットがある。そこで、近年走行中ワイヤレス給電 (Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT) が注目されている。DWPT とは走行中の EV に無線で電力を供給し、バッテリーを充電する技術であり、路面下に設置された送電コイルから電磁誘導を利用して、車両に搭載された受電コイルに電力を送ることが可能である。そのため、EV は走行中でも充電されるため、航続距離の延長やバッテリー容量抑制により EV の低価格化につながる。一方で、DWPT には路面側の送電コイルと EV 側の受電コイルの相対位置がずれると結合係数の低下により効率が低下するという問題がある。したがって、DWPT においては位置ずれの推定及びその補償が不可欠である。

これまで、走行中、停車中の両方を含めた EV へのワイヤレス給電における位置ずれ推定や補償に関する研究は世界的に行われてきた⁽²⁾⁻⁽¹⁴⁾。特に、DWPT としては磁気センサを用いて横ずれを推定する研究⁽²⁾⁽³⁾や、EV に搭載されたカメラを使って横ずれの推定を行う研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾、送電側の電流から横ずれを推定する研究⁽⁶⁾、ニューラルネットワークを用いて磁束密度の値から横ずれと送受電コイル間の距離を推定した研究⁽⁷⁾、検知コイルを EV 側あるいは送電側に設け、誘導された電圧を読み取ることで横ずれを推定する

研究⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾などがある。また、センサコイルを受電側回路の補償インダクタとして用いた研究もある⁽¹⁴⁾。また、停車中の WPT における位置ずれ推定でも検知コイルを用いた方法が多い⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。このように追加のセンサやセンサコイルを用いる方法は多く研究されているが、高価なセンサが必要であったり、余分な電力消費が発生するという課題がある。そこで、我々の研究グループでは電流や電圧などの DWPT の電気的な情報を利用した自己位置推定の研究が行われてきた⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾。これらは主に受電側 DC 電圧に基づく手法⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾と受電側 DC 電流にもとづく手法⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾に大別される。本論文で従来法として扱う先行研究⁽¹⁸⁾では、受電側のバッテリーに流れる電流から推定される横ずれと慣性計測ユニットから取得される車両のヨーレートの 2 つの情報をカルマンフィルタで統合することで、自己位置推定を行い、前輪操舵により横ずれ補償を行った。しかし、先行研究では受電コイルと送電コイルの相対的な角度ずれ、つまり車両のヨー角を考慮しておらず、特に走行中に DWPT レーンに車線変更した際などの車体にヨー角がつく状況を想定すると、カルマンフィルタによる推定の初期値としてヨー角を推定し与えることが必要となる。そこで、本研究では、追加センサを用いずに車線変更時の進入角度を推定する手法を提案する。本稿の構成を以下に示す。第 2 章では、DWPT における横ずれの推定手法の先行研究を具体的に紹介する。第 3 章では、本研究において提案するヨー角推定法を紹介する。第 4 章では、シミュレーションについて紹介する。第 5 章では、ヨー角推定について基礎検討として行った実験について示す。第 6 章では、本論文の結論を示す。

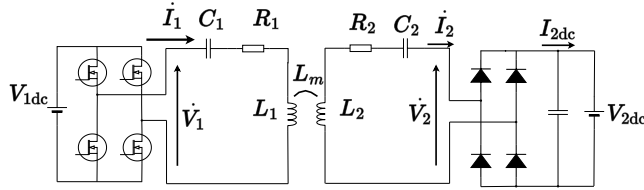
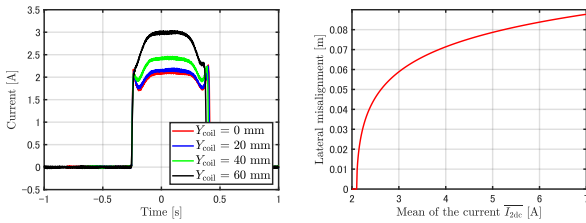


図1 SS方式WPT回路

Fig.1: WPT schematic.



(a) 電流と横ずれの関係

(b) 横ずれ推定関数

図2 電流-横ずれマップの導出

Fig.2: Derivation of current-lateral misalignment map.

2. 先行研究

〈2・1〉 受電側電流に基づく横ずれ推定・制御手法 本節では、先行研究⁽¹⁸⁾における受電コイルと送電コイル間の横ずれ推定手法について述べる。まず、使用した回路方式はS-S方式で、その回路図は図1である。このうち、受電側DCリンク電流 I_{2dc} の理論式は式(1)となる。

$$I_{2dc} \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_2 = \frac{8}{\pi^2} \frac{\omega L_m V_{1dc} - R_1 V_{2dc}}{\omega^2 L_m^2 + R_1 R_2} \quad (1)$$

ここで、 V_{1dc} 、 V_{2dc} 、 R_1 、 R_2 、 ω 、 L_m はそれぞれ送電側電圧源電圧、受電側バッテリー電圧、送電側内部抵抗、受電側内部抵抗、動作角周波数、相互インダクタンスを表す。回路パラメータ V_{1dc} 、 V_{2dc} 、 R_1 、 R_2 、 ω_0 が一定と考えると、 I_{dc} は相互インダクタンス L_m に依存して変化する。したがって、横ずれが大きくなるほど相互インダクタンスが小さくなり、電流が増加する。その関係を図2(a)に示す。 Y_{coil} は受電コイルが送電コイル縦方向の中心にきたときの横ずれを表す。受電側の電流値は横ずれが大きくなるほど増大していき、この関係は受電側と送電側で共振周波数が完全に一致していることを仮定すると式(2)のように表現される。

$$\hat{Y}_{coil} = \frac{1}{b} \operatorname{arccosh} \left(\frac{\overline{I_{2dc}} - c}{a} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\overline{I_{2dc}}$ は結合の変化が小さく、電流の変化が小さい部分の平均値である。また、変数 a, b, c はフィッティングパラメータである。この関数の概形は図2(b)となる。式(2)を用いることで、走行中に受電コイルと送電コイルの横ずれの大きさを電流のみで推定することが可能となる。しかし、本手法は受電コイルと送電コイルが対向したときのみ有効であり、送電コイル上に受電コイルがないときでも

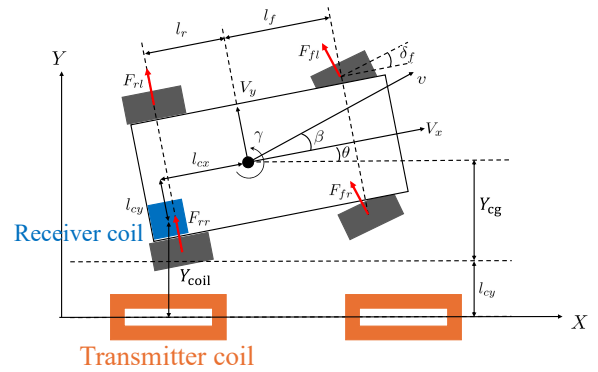


図3 車両モデリング

Fig.3: Vehicle Modeling.

EVが自己位置推定を行うために、カルマンフィルタを利用した手法が提案されている⁽¹⁸⁾。先行研究⁽¹⁸⁾で使用されたカルマンフィルタを利用するための車両モデルの導出を行う。四輪の車両運動モデルを図3に示す。四輪車両モデルを二輪モデルへと簡略化し、状態空間表現で表すと式(3)、式(4)となる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ Y_{cg} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2(C_f+C_r)}{m v_x} & -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{m v_x^2} - 1 & 0 & 0 \\ -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{I_z} & -\frac{2(C_f l_f^2 - C_r l_r^2)}{I_z v_x} & 0 & 0 \\ v_x & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ Y_{cg} \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{I_z} \\ \frac{m v_x}{2C_f l_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_f \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ Y_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \\ Y_{cg} \\ \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、状態変数として β 、 γ 、 θ 、 Y_{cg} はそれぞれ横滑り角、ヨーレート、ヨー角、車両重心からみた横ずれであり、 δ_f は操舵角を表す。また、 m 、 I_z 、 v_x 、 C_f 、 C_r 、 l_f 、 l_r はそれぞれ車両の重量、ヨーイング慣性モーメント、進行方向の速度、前輪および後輪のコーナリングスティフネス、車両重心点と前後車軸間の距離を表す。また、簡略化して状態方程式は式(5)と表現する。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\delta_f \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (5)$$

また、 Y_{cg} と Y_{coil} は式(6)のような関係がある。

$$Y_{cg} = Y_{coil} + (l_{cx} \sin \theta - l_{cy} (1 - \cos \theta)) \quad (6)$$

ここで、 l_{cx} 、 l_{cy} は車両重心とコイル中心の縦方向と横方向の距離である。得られた車両モデルを用いてカルマンフィ

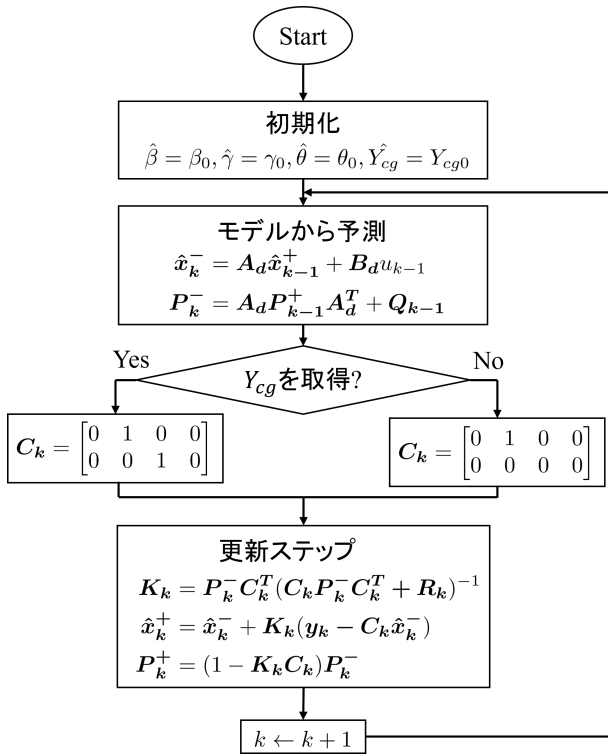


図4 マルチレートカルマンフィルタのフローチャート

Fig.4: Flowchart of Multi-rate Kalman Filter.

ルタを構築することになるが、出力状態変数である γ と Y_{cg} の両者はサンプリングレートが異なる。特に、 Y_{cg} は送電コイル上でのみ得られることになるので、出力行列 C を変化させることでサンプリングレートの違いに対応する。このようなカルマンフィルタはマルチレートカルマンフィルタ (Multi Rate Kalman Filter: MRKF) と呼ばれる。MRKF の推定フローチャートを図4に示す。 A_d , B_d はそれぞれ A 行列と B 行列を離散化したもの、受電コイルが送電コイル上にきて横ずれの推定値が得られたときに出力行列 C_k を変化させている。それ以外の部分は通常の線形カルマンフィルタと同様のアルゴリズムである。

〈2・2〉 先行研究における課題 先行研究⁽¹⁸⁾ においては、式(2)とマルチレートカルマンフィルタを用いることで、車両の状態をリアルタイムで推定することができるが、推定の開始時にカルマンフィルタの初期値を与える必要がある。ヨー角 θ に着目すると、直進路を進行している際は $\theta = 0$ という初期値設定でよいが、実際の走行では車線変更や、カーブのついた道路など車両にヨー角がつく状況があり、初期値として $\hat{\theta} \neq 0$ となる場合があり、ヨー角の推定して値を与えることで自己位置推定精度が向上し、横ずれの収束を早められることが期待される。次節では、センサを追加せずにヨー角を推定する方法について説明する。

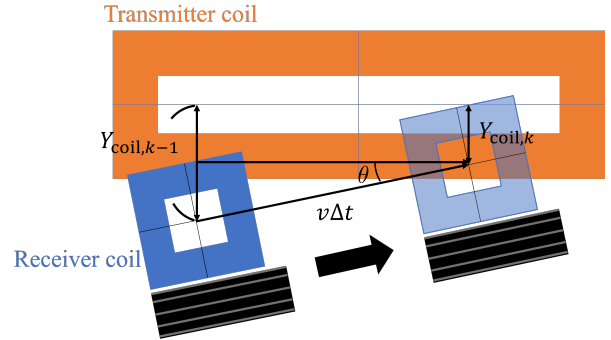


図5 2つの横ずれ値とヨー角の関係

Fig.5: Relationship between 2 lateral misalignment values and yaw angle

3. ヨー角推定手法

〈3・1〉 提案手法の概要 本節では、ヨー角を推定するための手法について述べる。提案手法は横ずれ Y_{cg} の時間変化を利用する方法である。提案手法のイメージを図5に示す。 $Y_{coil,k-1}$, $Y_{coil,k}$, v はそれぞれ、 $k-1$ 番目、 k 番目の横ずれ推定値、車速を表している。従来手法ではEVが送電コイル上を通過する際に横ずれ Y_{coil} をDCリンク電流の平均値から1回算出していたが、提案手法では電流の瞬時値を2回とって横ずれを2回算出することで、その幾何学的な関係からヨー角を推定する。ヨー角の推定式は式(7)を利用する。

$$\hat{\theta} = \arcsin \frac{Y_{coil,k-1} - Y_{coil,k}}{v \Delta t} \quad (7)$$

横ずれの時間変化、すなわち微分をみて、その逆正弦をとることで算出する。また、従来手法にあるような電流の平均値ではなく瞬時値をとることによるノイズの問題については、電流センサの値にローパスフィルタや移動平均をかけることでノイズの影響を低減することで瞬時値でも式(2)による横ずれ推定が可能であると考えられる。

〈3・2〉 提案手法の詳細 本節では、送電コイル上での2点の選び方について述べる。アルゴリズムのイメージ図を図6に示す。まず、電流の直流成分 I_{2dc} の立ち上がりを検出した後、EVは Δt_1 秒後に1回目の横ずれ推定を行う。その後、さらに Δt_2 秒後に2回目の横ずれ推定を行い、2点間の横ずれの差と移動距離から、式(7)を使ってヨー角を推定する。ここで、 Δt_1 , Δt_2 は車両が電流を検知してから結合が安定する領域までの距離と、その安定領域の長さを事前に決定しておき、速度センサからの速度の値を用いることで次の式(8), (9)で求められる。

$$\Delta t_1 = \frac{l_1}{v} \quad (8)$$

$$\Delta t_2 = \frac{l_2}{v} \quad (9)$$

l_1 , l_2 はそれぞれ電流立ち上がりから1回目の横ずれ推定までの距離、1回目から2回目の横ずれ推定までの距離を表

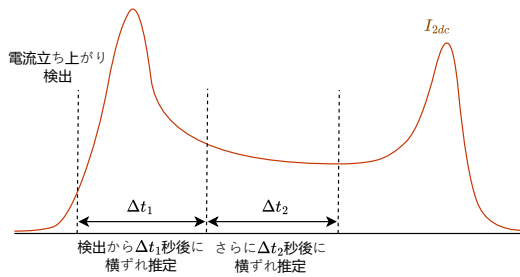


図6 横ずれの2回測定点

Fig.6: Two sensing point of lateral misalignment.

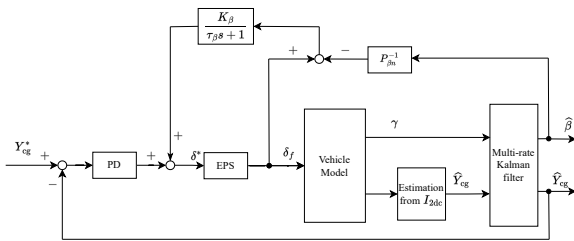


図7 横ずれ制御ブロック線図

Fig.7: Block diagram of lateral misalignment control.

す。また、 v は速度センサから取得した車両速度である。 l_1 と l_2 は送電コイルの形状ごとに異なる値となるが、実際に相互インダクタンスなどを計測することで結合の安定する領域を把握することができるため、事前に取得できる。

4. シミュレーション

シミュレーションで用いる車両の横ずれを解消するための制御系のブロック線図を図7に示す。 τ_β 、 K_β 、 $P_{\beta m}^{-1}$ は微分器の時定数、外乱オブザーバのゲイン、操舵角から横滑り角までのノミナルプラントの逆モデルを表す。本手法では、横ずれ推定値 \hat{Y}_{cg} の値をフィードバックしてPDコントローラと外乱オブザーバによって前輪の操舵入力から車両の位置制御を行っている。制御器設計は極配置設計を行った。具体的なシミュレーションパラメータを表1に示す。ここで、 λ_y 、 Y_{cg0} 、 θ_0 、 $Q_{Y_{cg}}$ 、 Q_θ 、 $R_{Y_{cg}}$ はそれぞれPD制御器の極、横ずれ初期値、ヨー角初期値、横ずれのプロセスノイズ、ヨー角のプロセスノイズ、横ずれの観測ノイズを表す。シミュレーションの具体的な状況を図8に示す。シミュレーションでは、送電コイルは中心間隔で3mごとに敷かれており、一枚目は $x = 2$ mの位置にあるとした。また、受電コイルは車両の後輪側に2つ取り付けられていると想定しており、今回は右後輪に関するシミュレーションを行った。従来法のように一枚目の送電コイルを通過して最初の送電コイルを通過した時点から状態推定を始めるが、この際、ヨー角

表1 シミュレーション条件

Table1: Simulation Condition.

Parameter	Value		unit
	Conventional method	Proposed method	
λ_y	5.0	7.0	rad/s
Y_{cg0}	0.1	0.1	m
θ_0	2.0	2.0	deg
v	2.0	2.0	m/s
$Q_{Y_{cg}}$	1.0e-6	1.0e-11	-
Q_θ	1.0e-2	1.0e-10	-
$R_{Y_{cg}}$	1.0e-5	1.0e-3	-
τ_β	5.0e-2	5.0e-2	s
K_β	0.4	0.4	-

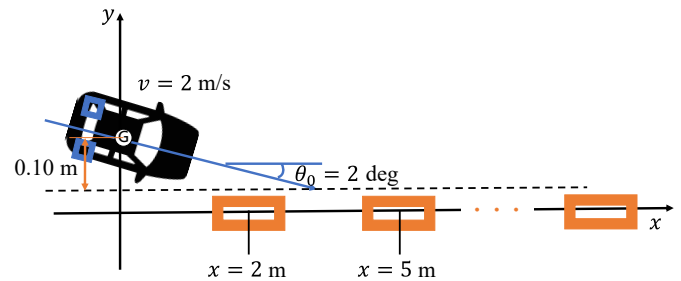


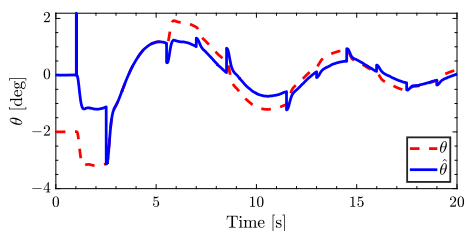
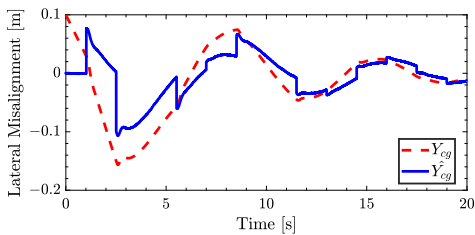
図8 シミュレーションでの状況

Fig.8: Condition of simulation.

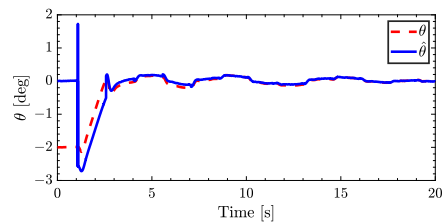
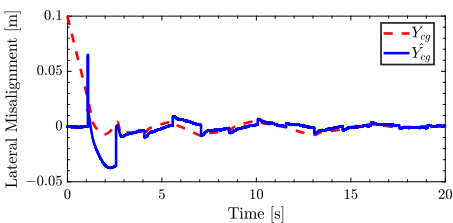
の推定値の初期値を $\theta_0 = 0$ と仮定して推定を行う。一方、提案法では、ヨー角の初期値を推定して、状態推定の初期値を与える。これら2つの方法を比較し、それぞれの性能を評価する。従来手法では、結合係数が高く、受電電流が安定している領域の平均値から式(2)を用いて横ずれを推定するのに対し、提案法では瞬時値を用いている。結合係数が高い領域では受電電流が安定し、縦方向のずれの影響を受けづらくなるので横ずれの推定に瞬時値を用いることができると考えられる。シミュレーション結果を図9に示す。従来手法では、ヨー角の初期値が真値と大きくずれているため、結果的に初期段階の横ずれの推定精度が悪く、大きく振動している。一方、提案手法を用いた場合はヨー角の初期値が真値に近い状態で与えられたことで横ずれの推定精度が向上し、適切な操舵入力が入ったことで大きな横ずれを防ぎ、大きく振動することなく収束している。

5. 実験

〈5・1〉 実験概要 本節では、実際に受電側DC電流の値からヨー角が推定できることを基礎検討するために行った実験について述べる。実験では、様々な横ずれ・ヨー角のパターンで受電側DC電流を測定し、その結果から式(7)を用いてオフラインで角度の推定を行った。実験に用いたベンチ装置の写真を図10に示す。また、実験で用いたパラ



(a) 従来手法



(b) 提案手法

図9 横ずれとヨー角の真値と推定値の応答

Fig.9: True and estimated value of lateral misalignment and yaw angle response.

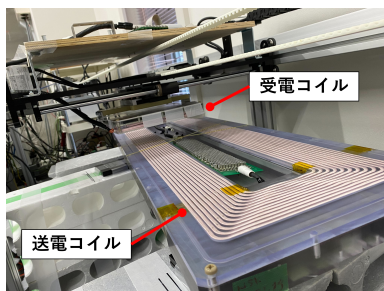


図10 実験装置

Fig.10: Experimental Setup.

メータを表2に示す。実験では、横ずれを0～60mmの範囲で20mmずつずらし電流の測定を行った。このとき、それぞれの横ずれのパターンで角度を0～5度まで1度ずつ

表2 実験条件

Table2: Experimental Condition.

Parameter	Value	Unit
Velocity	5.0	km/h
Air gap	50.0	mm
Frequency	85.0	kHz
V_{1dc}	25.0	V
V_{2dc}	25.0	V
L_1	236.1	μH
L_2	97.2	μH
C_1	14.9	nF
C_2	37.4	nF
R_1	312.4	m Ω
R_2	151.7	m Ω

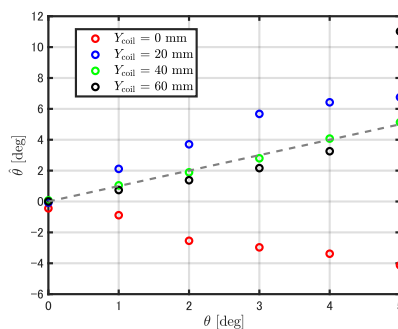


図11 提案手法による角度のオフライン推定結果

Fig.11: Yaw angle offline estimation result.

変化させている。

〈5・2〉 ヨー角オフライン推定 本節では、前節で得られた電流データを用いてヨー角のオフラインでの推定を行った結果を示す。本研究では式(8),(9)における l_1, l_2 を $l_1 = 0.30\text{ m}, l_2 = 0.30\text{ m}$ として推定を行った。このときの結果を図11に示す。ヨー角の推定結果では、横ずれ $Y_{\text{coil}} = 40, 60\text{ mm}$ の場合は角度の推定が点線で示される真値に近い値が推定されている。したがって、角度によって電流に大きく変化が出る場合は、式(2)で推定した横ずれ推定値を用いて(7)が適用できると考えられる。一方で、 $Y_{\text{coil}} = 0, 20\text{ mm}$ のときは、電流の波形に角度ごとの違いがほとんど表れていない。 $Y_{\text{coil}} = 20\text{ mm}$ のときは、横ずれの推定に用いた式(2)は横ずれの小さな範囲では横ずれの変化による電流の変化量が小さく、推定の正確性が低いため、結果的にヨー角の推定ができなかった。また、 $Y_{\text{coil}} = 0\text{ mm}$ のときは、受電コイルが送電コイルの中央を通過するため、電流の波形がほぼ左右対称になるのに加え、横ずれ値の符号が変化するため、(7)が適用されず、推定されなかった。したがって、提案手法によるヨー角推定は横ずれがある状況下で有効であると考えられる。

6. 結論

本稿では、走行中ワイヤレス給電における横ずれと角度ずれの同時推定手法を提案し、シミュレーションによる検証と、実験によるヨー角推定の基礎検討を行った。シミュレーションでは提案手法により、横ずれの収束が早まったことを確認した。また、ベンチを用いたヨー角のオフライン推定実験により、横ずれが存在する場合にはヨー角推定が有効だが、横ずれのない場合には推定ができないことを確認した。今後は実車による実験を行い、提案手法の有効性を確認し、また、横ずれがない場合でもヨー角を推定する方法の考案と従来手法で用いられていた車両制御手法の改良や角度によって適切な値の異なる l_1 , l_2 の決定法についても考えていく。

文 献

- (1) S. Yui and K. Furuya, "V2X Products and Social Implementation in Japan-Prospects from a "Global Warming Problem" Perspective," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 541-547, 2023.
- (2) A. Ahmad, M. S. Alam, Y. Rafat, and S. Shariff, "Designing and demonstration of misalignment reduction for wireless charging of autonomous electric vehicle," *eTransportation*, vol. 4, May 2020.
- (3) J. Thalapil Vaheeda and B. George, "TMR Sensor-Based Detection of EVs in Semi-Dynamic Traffic for Optimal Charging," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 13721-13730, Aug. 2022.
- (4) Y. Tian, Z. Zhu, L. Xiang and J. Tian, "Vision-Based Rapid Power Control for a Dynamic Wireless Power Transfer System of Electric Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 78764-78778, 2020.
- (5) V. Cirimele et al., "The Fabric ICT Platform for Managing Wireless Dynamic Charging Road Lanes," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 3, pp. 2501-2512, March 2020.
- (6) R. Tavakoli and Z. Pantic, "ANN-based algorithm for estimation and compensation of lateral misalignment in dynamic wireless power transfer systems for EV charging," *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, OH, USA, 2017.
- (7) R. Tavakoli, T. Shabaniyan, E. M. Dede, C. Chou and Z. Pantic, "EV Misalignment Estimation in DWPT Systems Utilizing the Roadside Charging Pads," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 752-766, March 2022.
- (8) I. Cortes and W. -j. Kim, "Lateral Position Error Reduction Using Misalignment-Sensing Coils in Inductive Power Transfer Systems," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 2, pp. 875-882, April 2018.
- (9) A. Babu and B. George, "Sensor System to Aid the Vehicle Alignment for Inductive EV Chargers," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 7338-7346, Sept. 2019.
- (10) A. N. Azad, A. Echols, V. A. Kulyukin, R. Zane and Z. Pantic, "Analysis, Optimization, and Demonstration of a Vehicular Detection System Intended for Dynamic Wireless Charging Applications," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 147-161, March 2019.
- (11) H. Chen, S. Niu, Z. Shao and L. Jian, "Recognizing Multi-type Misalignments in Wireless EV Chargers With Orientation-Sensitive Coils: A Data-Driven Strategy Using Improved ResNet," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 20, no. 1, pp. 280-290, Jan. 2024.
- (12) L. Tan et al., "Mesh-Based Accurate Positioning Strategy of EV Wireless Charging Coil With Detection Coils," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 5, pp. 3176-3185, May 2021.
- (13) Z. Liu et al., "Receiver Position Identification Method of Wireless Power Transfer System Based on Magnetic Integration Inductance," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 1136-1145, Feb. 2022.
- (14) J. Wang, L. Wan, C. Cai, M. Xue, Y. Du and J. Zhang, "A Dual-Side Magnetic Integration-Based Receiver Detection Method of Long-Track DWPT System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 6, pp. 7752-7765, June 2024.
- (15) P. Kotchapansompote, Yafei Wang, T. Imura, H. Fujimoto and Y. Hon, "Electric vehicle automatic stop using wireless power transfer antennas," *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, Australia, 2011.
- (16) P. Sukprasert, B. M. Nguyen and H. Fujimoto, "Estimation and control of lateral displacement of electric vehicle using WPT information," *2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Nagoya, Japan, 2015.
- (17) J. Sithinamsuwan, H. Fujimoto and Y. Hori, "Sensorless Vehicle Position Detection in Electric Vehicle by Logistic Estimation Function of Mutual Inductance," *2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, Seoul, Korea (South), 2020.
- (18) T. Koishi, B. -M. Nguyen, O. Shimizu and H. Fujimoto, "Receiving Side Current-Based Lateral Misalignment Estimation and Automated Steering Control for Dynamic Wireless Power Transfer," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*