

# EV のパワートレイン振動の抑制を目指したオブザーバの研究

2020SC035 川崎磨那斗

指導教員：坂本登

## 1 はじめに

昨今、工業分野でのカーボンニュートラルへの動きが強まっている。その中で自動車業界は電気自動車 (BEV) や燃料電池自動車 (FCEV) の普及によりカーボンニュートラルの達成を目指している。電気自動車のもつモーター駆動系は、内燃機関を含む自動車特有のエンジン振動を持たず、レスポンス早さや高い静粛性などのメリットが多いことが知られており、世間から注目されている。しかし、メリットが多い反面、走行時のノイズや振動など乗り心地につながる部分が顕著に表れ、敏感になっている。電気自動車としてのメリットを活かすためには緻密な制御が必要不可欠である。特に電気自動車などのパワートレイン内に存在するギアバックラッシュによって発生する振動は、乗り心地の低下や構成部品の破損、システムに対して重大な故障につながる恐れがあるため、多くの企業がバックラッシュの振動抑制制御に注目している。バックラッシュとは、一方のギアが他方のギアと噛み合わず空転できる角度のことである。空転時はトルクの伝達が行われず、ギアが噛み合った瞬間からトルクが伝達される。そのギアが噛み合った直後は急なトルクの伝達により不必要な振動やノイズを発生させる。そこで、本研究ではバックラッシュによるパワートレイン振動に焦点をあて、初めに電気自動車を 2 慣性系モデルとしてモデリングし、バックラッシュを正確に推定するためのオブザーバの設計、シミュレーション、先行研究である Heinz らの論文 [2] によるオブザーバの設計も行い、新しく開発したオブザーバとの比較を行った。また、自動車では車輪側の角度の情報が正確に取れない点を考慮し、状態推定には駆動側の角速度と負荷側の角速度を用いた。本稿では、バックラッシュを含む 2 慣性系のモデリングを示した後に、オブザーバの設計とシミュレーションの結果を示す。

## 2 パワートレインモデル

本研究では EV パワートレインモデルをバックラッシュを含む 2 慣性系モデルとしており、実験機も同様のシステムである。バックラッシュを含む 2 慣性系モデルを図 1 に示し、モデリングを行う。ギアの接触時を Contact mode、バックラッシュ内すなわち空転時を Backlash mode とする。バックラッシュ部分のモデリングは、Nordin らによって提唱されたバックラッシュの物理特性を極めて正確に表

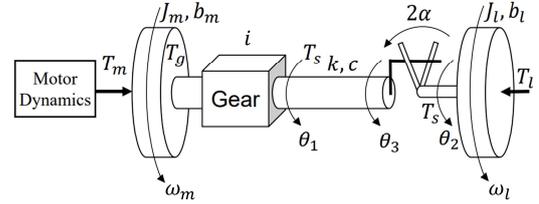


図 1  $2\alpha$  のバックラッシュを含む 2 慣性系モデル

現した式 (1), (2) を使用する [1].

$$\dot{\theta}'_b = \dot{\theta}_d + \frac{k}{c}(\theta_d - \theta_b) \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_b = \begin{cases} \max(0, \dot{\theta}'_b), & \theta_b = -\alpha \\ \dot{\theta}'_b, & |\theta_b| < \alpha \\ \min(0, \dot{\theta}'_b), & \theta_b = \alpha. \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_d$  は変位を表し、 $\theta_b$  はバックラッシュ角、 $\alpha$  は角度バックラッシュを  $2\alpha$  としたときの値を表している。図 1 において  $\theta_d = \theta_1 - \theta_2$  であり、 $\theta_b = \theta_3 - \theta_2$  である。 $T_m$  は駆動モータからの入力トルク、 $T_l$  は負荷トルク、 $T_g$ 、 $T_s$  はギアに接続したシャフトの両端にかかるトルクである。 $i$  はギア比、 $\omega_m$ 、 $\omega_l$  はそれぞれの慣性の回転角速度である。また、ギアのかみ合わせ部分、ねじれを考慮したバネ定数  $k$ 、減衰定数  $c$  が与えられているシャフト部分は無慣性である。かみ合わせ部分で発生するギア同士の衝突は非完全弾性衝突であり、ギア同士が接触した瞬間に一体となって運動する。図 1 で示したモデルの運動方程式は、以下ようになる。

$$J_m \dot{\omega}_m + b_m \omega_m = T_m - T_g \quad (3)$$

$$J_l \dot{\omega}_l + b_l \omega_l = T_s - T_l \quad (4)$$

$$T_g = \frac{1}{i} T_s \quad (5)$$

$$\theta_1 = \frac{1}{i} \theta_m \quad (6)$$

$$\theta_3 = \theta_l \quad (7)$$

シャフトのトルク  $T_s$  は、Nordin のモデルを用いて以下のようになる。なお、 $\theta_d = \frac{1}{i} \theta_m - \theta_l$  であるから、 $\omega_d = \dot{\theta}_d = \frac{1}{i} \omega_m - \omega_l$ 、 $\theta_b$  は (2) の積分値で表される。

$$T_s = k(\theta_d - \theta_b) + c(\omega_d - \omega_b) \quad (8)$$

また、モーターの回路方程式は以下のようになる。

$$L \frac{di}{dt}(t) + Ri(t) = u(t) - K_e \omega_m(t) \quad (9)$$

$$T_m = K_i i(t) \quad (10)$$

### 3 オブザーバ

先行研究である Hinze らの論文で紹介されたオブザーバは構造が複雑であり、予期せぬ演算トラブルが起きかねないため実用化する上で最適と言えない。そこで、シャフトの変位とバックラッシュ角の近似、状態変数の分類をすることで構造が単純化されたオブザーバを開発した。以下に示す。

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + F\hat{w}(t) + Bu(t) + K(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = C\hat{x}(t) \quad (12)$$

ここで、 $K$  はオブザーバゲインであり、 $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $F$  行列はそれぞれ以下の通りである。

$$A = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & 0 \\ l_1 & l_2 & l_6 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = [m_6 \ 0 \ 0]^T \quad (14)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$F = \begin{bmatrix} m_3 & m_4 & m_5 \\ l_3 & l_4 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

オブザーバゲイン  $K$  は、 $A$ ,  $C$  とプロセスノイズの共分散行列  $Q$ , 観測ノイズの共分散行列  $R$  から定常カルマンフィルタとして、以下の代数リカッチ方程式を解くことで得られる。

$$AP + PA^T - PC^T R^{-1} CP + Q = 0 \quad (17)$$

$$K = PC^T R^{-1} \quad (18)$$

### 4 シミュレーション

南山大学理工学部、坂本・中島研究室で作成されたバックラッシュを含む 2 慣性系モデルシミュレーターを使用して、オブザーバのシミュレーションを行った。以下にシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果より、精度がかなり高く推定できていることがわかる。ギアがかみ合う時間を平均 0.0125ms で推定できている。EV におけるモーターと ECU 間での通信速度が 1 ~ 10ms であることを考慮しても推定の精度はかなり高いことがわかる。

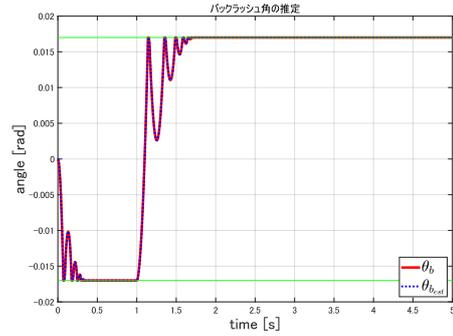
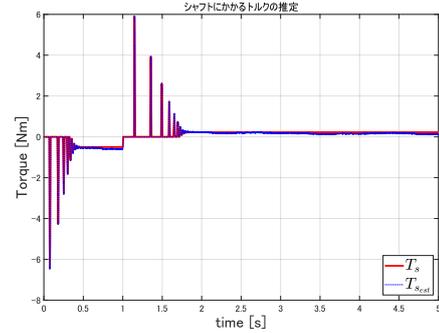


図 2 チップイン動作におけるシャフトのねじれトルクとバックラッシュ角のシミュレーション結果

### 5 おわりに

本稿では、先行研究のオブザーバより構造が簡単で推定精度が高いオブザーバの開発することができた。開発したオブザーバは EV パワートレインの様々な制御に役立てることができる。今後の課題として、予期せぬエラーに対応するためにより多くのシチュエーションでシミュレーションを行うことが必要である。また、今後の展望として開発したオブザーバを用いた振動抑制制御やシャフトのトルクショックの軽減を行う制御に応用していく。

### 参考文献

- [1] M. Nordin and P-O. Gutman, “New models and identification methods for backlash and gear play”, in Adaptive Control of Nonsmooth Dynamical Systems, G. Tao and F. L. Lewis, Eds. SpringerVerlag London, pp. 1-30, 2001.
- [2] Melanie Heinz Marc Reichenbacher and Oliver Nelles, “Estimation of Torsional Backlash Angle in Electric Powertrains”, in 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA) August 22-25, 2022.
- [3] 椎野功大:『バックラッシュを含む駆動系における非整数階 PID 制御器のトルク制御系への適用と検証用の実験機開発』. 南山大学大学院修士論文, 2022.