

# 負荷側高分解能エンコーダを搭載した減速機方式インホイールモータ による車体速度不要のスリップ率推定

延命 朋希\*, 藤本 博志, 堀 洋一 (東京大学),  
郡司 大輔 (日本精工株式会社),  
小俣 賢治 (Nikon 株式会社)

Slip Ratio Estimation for In-wheel Motors with Reduction Gears using Load-Side High Resolution Encoders  
Tomoki Enmei\*, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)  
Daisuke Gunji (NSK Ltd., Japan)  
Kenji Omata (Nikon Corporation)

## Abstract

Electric vehicles (EVs) have recently attracted broad interaction. Advantage of EVs is not only environmental performance but also higher response vehicle motion control compared with motion control in conventional internal combustion engine vehicle. In order to improve motion control performance of EVs, applying high-resolution encoders (rotation angle sensor) both on a motor side and a wheel side is a good solution. In this paper, we explain design and development progress of the actual vehicle test unit for experimental electric vehicle FPEV4-Sawyer and discuss effectiveness of using high-resolution encoder on vehicle motion control methods.

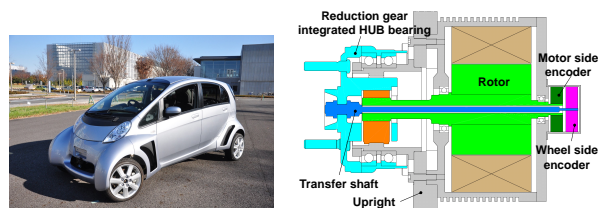
キーワード：電気自動車, 車両運動制御, 高分解能エンコーダ, スリップ率推定  
(electric vehicle, vehicle motion control, high-resolution encoder, slip ratio estimation )

## 1. 研究背景

地球温暖化問題をはじめとする各種の環境問題が顕在化するにつれて、環境負荷の少ないモビリティである電気自動車 (EV: Electric Vehicle) に注目が集まっている。EV は環境性能に優れるだけでなく、内燃機関を用いた自動車と比較してはるかに高い応答速度を持つことが知られており、モータに加わるトルクの推定が可能であるなど、制御面においても優位性がある<sup>(1)</sup>。また、EV はモータを分散配置することで各輪独立駆動が可能である。

これらの EV の特徴を活かした様々な車両運動制御が提案されている<sup>(2)</sup>。著者らは、外乱オブザーバに基づく駆動力推定手法<sup>(3)</sup>や、車体速度を用いないスリップ率推定手法<sup>(4)</sup>を提案している。これらの制御手法では、車輪の角速度や角加速度といった高次の状態量を用いている。高次の状態変数は通常、車輪の角度情報を微分することで得られる。しかし、従来の車両では車輪の角度情報を低分解能のエンコーダやレゾルバで取得しており、角速度や角加速度を精度良く得ることは困難である。オンボード式の EV の場合、車載モータにレゾルバを備えているが、モータと車輪をつなぐドライブシャフトのねじれにより、レゾルバにより得られた角度情報を車輪の角速度情報としてそのまま用いることはできない<sup>(5)</sup>。

また、近年盛んに開発が行われている減速機方式のインホイールモータは、ギアを介して駆動力を車輪に伝達している。減速機方式のインホイールモータは低コスト化や省スペース化といった利点がある反面、車輪とモータの間にバックラッシュやギアの弾性が存在するなど、従来の制御系では考慮されていなかった問題点がある。



(a) Experimental electric vehicle FPEV4-Sawyer (b) In-wheel motor with high-resolution encoder

Fig. 1 Experimental setup.

本研究室ではこれらの問題を解決するために角度情報の検出法として高分解能エンコーダを車載することを提案した<sup>(6)</sup>。光学式エンコーダは近年低価格化が進んでおり、産業用ロボット等の分野では 20 bit を超える高分解能なエンコーダが広く用いられている。このような高分解能エンコーダをインホイールモータに適用する場合、衝撃や粉塵による性能の劣化等が懸念されるが、産業用ロボットでの利用に耐えることから車載化は可能であると考えられる。そこで本研究では、車両運動制御性能の向上を目的として、EV の駆動用モータに高分解能エンコーダを適用する。本稿では減速機方式のインホイールモータに対して駆動側負荷側双方に高分解能エンコーダを取り付け可能な機構を提示し、車輪角速度や角加速度といった高次状態変数取得のために必要な分解能について検討を行う。また、その有効性及び実現性をスリップ率推定のシミュレーションと実験を通じて示す。

## 2. 実験装置

〈2・1〉 実験車両 本研究では実験車両として当研究室で

Tab. 1 Specifications of experimental vehicle.

Parameter	Value
Vehicle mass $M$	1183 kg
Wheel inertia $J_w$	1.13 kgm <sup>2</sup>
Tire radius $r$	0.574 m

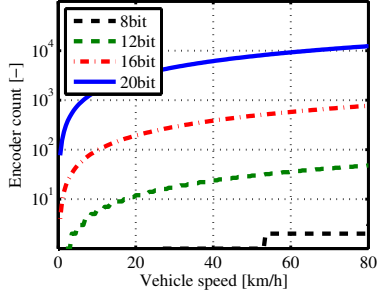


Fig. 2 Encoder count per sampling period.

制作した実験用電気自動車 FPEV4-Sawyer を用いる。車両の外観を Fig. 1(a) に、車両の緒元を Table 1 に示す。FPEV4-Sawyer は一般の乗用車を想定した構成となっており、本研究での検討結果は自動車応用において広く適用可能である。

〈2・2〉 高分解能エンコーダ搭載減速機方式インホイールモータ FPEV4-Sawyer に減速機方式のインホイールモータを搭載し、実験を行った。東洋電機製造製の中空モータに日本精工で開発中の遊星歯車減速機内蔵ハブ軸受を搭載し、小型ながらも高いトルク出力を実現している。

また、このインホイールモータの最大の特徴は駆動側（モータ側）と負荷側（減速機の出力側）それぞれに高分解能エンコーダを搭載していることである。これらは Nikon 製の産業用ロボットに用いられるエンコーダであり、分解能は双方 20 bit である。モータ内部の概念図を Fig. 1(b) に示す。本ユニットではモータを中空構造とし、車輪側に折り返し軸を接続してモータ側軸端に車輪側エンコーダを配置することで、車輪側の角度情報を高分解能に取得することを可能としている。ここで、車輪側エンコーダの慣性に対して折り返し軸の剛性は十分に高いため、折り返し軸の影響は無視できる。

### 3. 高次状態変数の取得に関する基礎検討

本節では角速度、角加速度の計測精度に対する角度分解能の影響について検討する。角速度、角加速度の検出手法には計数法を用いた。計数法においては高分解能と高サンプリング周波数により、高次状態変数を良好な検出精度で得られることが知られている<sup>(6)</sup>。制御周期が 1 ms の時のパルスカウント数を基に、擬似微分によって高次状態変数を十分な精度で取得できる分解能を検討する。

〈3・1〉 制御周期とエンコーダカウント数 制御系のサンプリング周期を  $T_s$ 、車体速度を  $V$ 、車輪半径を  $r$ 、角度分解能を  $n$  bit とすると、1 サンプル周期あたりのカウント数  $M$  は式 (1) となる。ただし、ここではスリップの影響は考慮しない。

$$M = \text{floor} \left( \frac{2^{n-1} V T_s}{\pi r} \right) \quad (1)$$

ここで floor は床関数であり、整数値への切り下げを行う。

式 (1) に基づき、制御周期 1 ms 時の車体速度とエンコーダ

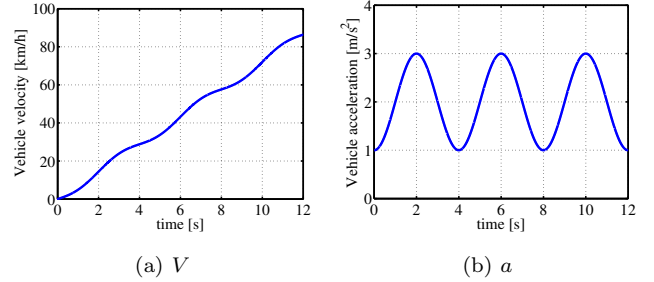


Fig. 3 Driving pattern (simulation).

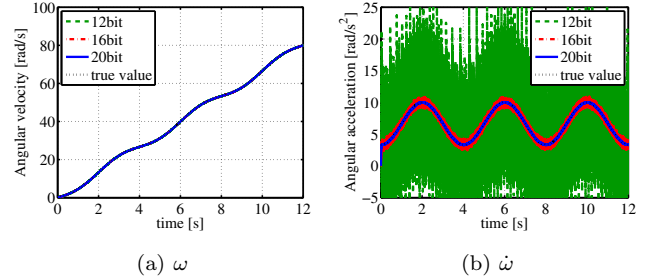


Fig. 4 High order state variables with different resolutions (simulation).

パルス数の関係を計算した。Fig. 2 に 8, 12, 16, 20 bit の各分解能での計算結果を示す。現在の市販車に用いられる分解能 8 bit 程度の角度センサでは、制御周期が 1 ms 程度の場合十分なエンコーダ信号を得ることが出来ない。摩擦の小さい路面での発進やそのスリップ抑制といった状況はごくありふれた問題設定であり、分解能 12 bit は車両運動制御に対しては不十分である。一方で分解能 20 bit のエンコーダを用いた場合、低速域でも 100 パルス以上のカウント数を確保できる。

〈3・2〉 角速度と角加速度の取得 車輪角速度や角加速度といった高次状態変数を、角度情報の時定数  $\tau_d$  の擬似微分によって取得する。 $\tau_d$  が大きい量子化によるノイズは低減されるが、位相遅れが大きくなる。ここでは、Fig. 3(a), 3(b) に示す車体速度、車体加速度パターンにおいて得られる各状態変数の計測精度について、分解能を変更してシミュレーションした。加速度パターンは周波数 0.25 Hz、振幅 1 m/s<sup>2</sup>、オフセット 2 m/s<sup>2</sup> の正弦波であり、車体の初速度は 0 km/h である。 $\tau_d$  を  $1/40\pi$  s とし、分解能 12, 16, 20 bit の 3 種類についてシミュレーションした。

Fig. 4 にシミュレーション結果を示す。Fig. 4(a), 4(b) はそれぞれ角速度と角加速度を表す。角速度はいずれの場合でも良好な計測精度が得られているが、角加速度は分解能に応じて量子化ノイズが表れており、分解能 12 bit の時の誤差は  $\pm 10$  rad/s<sup>2</sup> にのぼる。それに対して分解能 20 bit 時の誤差は  $\pm 0.2$  rad/s<sup>2</sup> 以内と極めて小さい。

以上のシミュレーション結果より、20 bit 程度の分解能のエンコーダを用いることで良好な角加速度計測精度が得られることが分かった。擬似微分においては量子化ノイズの抑圧と位相遅れはトレードオフの関係にあるが、分解能を向上させることで両者をともに改善することができる。自動車のスリップ率制御においては路面状況に応じて角加速度がステップ状に変化することが想定され、高分解能エンコーダの利用によ

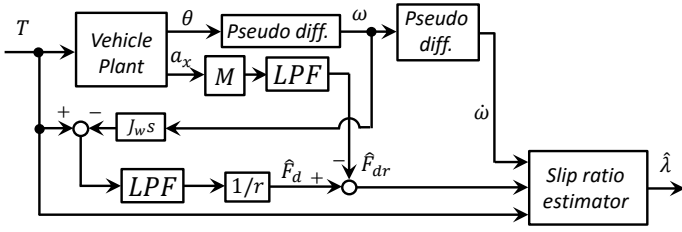


Fig. 5 Block diagram of SRE.

る位相遅れの改善の効果が大きいと考えられる。

#### 4. 車体速度不要のスリップ率推定

駆動力を発揮している車輪には常にスリップが発生する。スリップ率  $\lambda$  は車体速度と車輪速度の比を示す物理量であり、車体速度  $V$  及び車輪速度  $V_{\omega ij}$  を用いて式 (2) で定義される<sup>(4)</sup>。

$$\lambda = \frac{V_{\omega ij} - V}{\max(V_{\omega ij}, V, \epsilon)} \quad (2)$$

ただし  $\epsilon$  は零割を防ぐための微小変数であり、添え字  $i$  は前後 ( $f, r$ ) を、 $j$  は左右 ( $l, r$ ) を表す。2 輪駆動の車両では非駆動輪の車輪速度から車体速度を取得し、スリップ率を推定することが可能である。しかし 4 輪駆動の EV では非駆動輪が存在しないため、車体速度を検出することができない。車載の加速度センサはオフセットを持つため、積分して車体速度を求めるには不向きである。また、車体速度を検出する光学式のセンサは高価であり、市販車への適用は現実的ではない。そこで本研究では運動方程式に基づいて車体速度不要のスリップ率推定法 (SRE : Slip Ratio Estimation) を提案した<sup>(4)</sup>。駆動時においては  $V_{\omega ij} > V$  が成立するので、 $\max(V_{\omega ij}, V, \epsilon) = r\omega_{ij}$  である。ただし  $r, \omega$  はそれぞれ車輪半径と車輪角速度である。式 (2) の両辺を微分して整理することで式 (3) を得る。

$$\dot{\lambda}_{ij} = \frac{r\omega_{ij}\dot{\omega}_{ij}(1 - \lambda_{ij}) - \omega_{ij}\dot{V}}{r\omega_{ij}^2} \quad (3)$$

ここで、車輪の運動方程式は式 (4) で表される。

$$J_{\omega ij}\dot{\omega}_{ij} = T_{ij} - rF_{dij} \quad (4)$$

$T_{ij}, F_{dij}, J_{\omega ij}$  はそれぞれモータへの入力トルク、各輪の駆動力、車輪の慣性である。車両並進方向の運動方程式を式 (5) に示す。

$$M\dot{V} = \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} F_{dij} - F_{dr} \quad (5)$$

ここで  $M$  は車両重量を表し  $F_{dr}$  は走行抵抗である。式 (4)、(5) を用いて式 (3) から  $V$  を消去することで、式 (6) を得る。

$$\dot{\lambda}_{ij} = -\frac{\dot{\omega}_{ij}}{\omega_{ij}}\lambda_{ij} + \left(1 + \frac{1}{r^2M} \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} J_{\omega ij}\right) \frac{\dot{\omega}_{ij}}{\omega_{ij}} - \frac{1}{r^2M\omega_{ij}} \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} T_{ij} + \frac{F_{dr}}{rM\omega_{ij}} \quad (6)$$

走行抵抗  $F_{dr}$  は直接計測することが出来ないため、 $\lambda$  を求めるには  $F_{dr}$  を推定する必要がある。式 (5) より、 $F_{dr}$  は式 (7) によって推定できる。

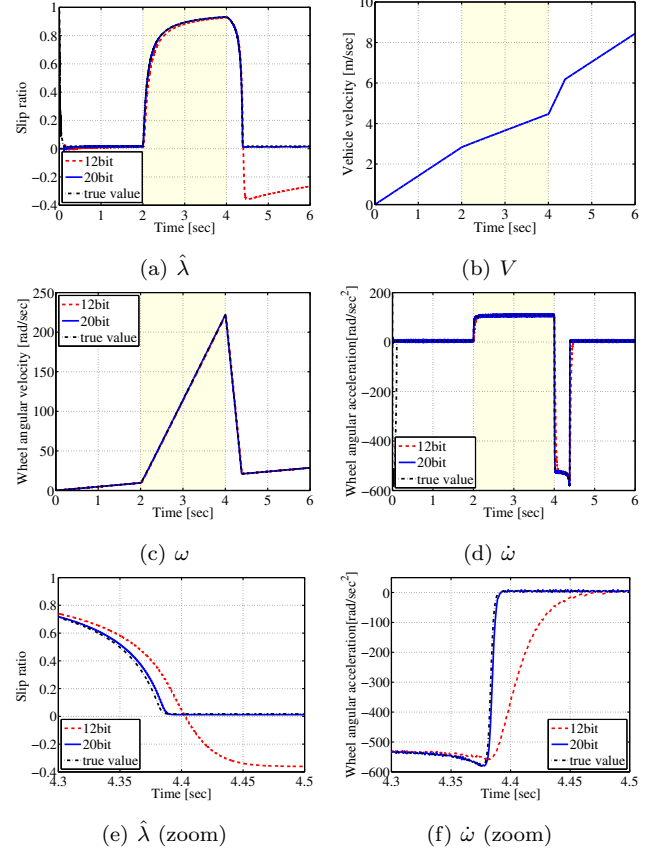


Fig. 6 Simulation results.

Tab. 2 Simulation conditions.

Parameter	Value
Sampling period	1 ms
Encoder resolution	12, 20 bit
Cutoff frequency of pseudo diff.	12, 240 Hz
Cutoff frequency of DFO	12, 240 Hz

$$\hat{F}_{dr} = \sum_{i=f,r} \sum_{j=l,r} \hat{F}_{dij} - M\dot{V} \quad (7)$$

ここで  $\hat{F}_{dr}$  は走行抵抗の推定値であり、 $\hat{F}_{dij}$  は駆動力オブザーバ (DFO : Driving Force Observer)<sup>(3)</sup> によって得られた駆動力の推定値である。また、 $\dot{V}$  は加速度センサによって取得する。式 (6), (7) を用いることで各輪のスリップ率を推定できる。Fig. 5 にスリップ率推定器のブロック線図を示す。車体速度不要のスリップ率推定には式 (2) と異なり、車輪角速度  $\omega$  や車輪角加速度  $\dot{\omega}$  といった高次状態変数が必要である。そのためスリップ率を精度よく推定するためには角度情報を高精度に取得する必要がある。本稿では高分解能エンコーダを用いることで計測精度の向上を図った。

#### 5. シミュレーション

SRE の推定精度へのエンコーダ分解能の影響をシミュレーションによって検証した。「駆動輪 2 輪で初速度 0 km/h の EV に 300 Nm 一定のモータ駆動力を入力して発進させ、 $0 \leq t \leq 2$  は高  $\mu$  路 ( $\mu = 1.0$ ) を走行し、 $2 \leq t \leq 4$  で低  $\mu$  路 ( $\mu = 0.2$ ) に進入、 $4 \leq t \leq 6$  で再度高  $\mu$  路に差し掛かる」という走行条件でシミュレーションを行った。タイヤモデルには magic formula を用いた<sup>(7)</sup>。角速度と角加速度の検出は擬似微分によって行っ



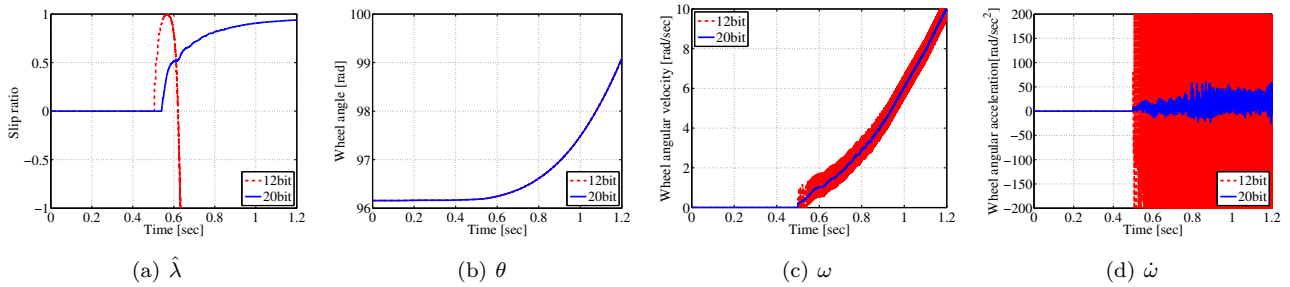


Fig. 7 Experimental results.

ており、各々の分解能での擬似微分の時定数は角加速度のリプルが同程度となるように決定した。

Fig. 6 に 12 bit のエンコーダを用いた場合と、20 bit のエンコーダを用いてスリップ率推定を行った場合の比較を示す。12 bit の場合、低  $\mu$  路から高  $\mu$  路に進入した際にスリップ率に大きな推定誤差が生じている。これは擬似微分の位相遅れによる影響であると考えられる。一方、20 bit では Fig. 6(a) に示すように擬似微分による位相遅れが小さいため、スリップ率の推定も精度よく行われている。

## 6. 予備実験

ジャッキアップした車両に当該モータを取り付けて予備実験を行った。モータに 0.5 s から正のトルクを入力し、その時の車輪側エンコーダの値を基に高次状態変数の取得とスリップ率の推定を行った。また、取得したエンコーダパルスを 12 bit に間引くことにより低分解能なエンコーダやレゾルバを再現し、比較を行った。

スリップ率計算のパラメータは Table 1 のものを利用し、走行抵抗は 0 とした。また、角速度は 166  $\mu$ s ごとに取得したエンコーダ情報を 120 Hz のカットオフ周波数で擬似微分することによって取得しており、角加速度は 2 回の擬似微分をして検出する。

Fig. 7 に実験結果を示す。シミュレーションと同様に角度情報については 12 bit の場合も 20 bit の場合も大きな差は現れない。一方で角速度や角加速度の情報には、エンコーダ分解能が 12 bit の時は大きく量子化ノイズの影響が表れているが、20 bit の場合はその影響が小さい。また、20 bit の場合はスリップ率の推定値が 0 から 1 の間に収まっているが、量子化ノイズの影響で 12 bit の場合は推定値がこの範囲を大きく逸脱し、発散してしまう。

## 7. 結 言

従来、車輪角度情報の取得には低分解能なモータ側エンコーダが用いられてきたが、高度な車両運動制御を適用するには高次状態変数の取得が不可欠であり、より高精度に角度情報を検出する必要がある。

本稿では産業用ロボット等に用いられる高分解能エンコーダをインホイールモータに適用することを提案した。必要とされるエンコーダの計測精度を計算し、20 bit の分解能で良好な推定精度が得られることをシミュレーションによって確認した。車両運動制御の例として当該モータを用いたスリップ率推定を行い、車両運動制御の大幅な性能向上が見込めることを確認した。また、ベンチによる予備実験を行いその実現性を示した。本手法はスリップ率推定のみならず、高次状態変数

の取得を必要とする車両運動制御の性能を劇的に改善することができる。

今後は駆動側のエンコーダを利用して実車でのスリップ率推定試験を行う。

## 謝 辞

モータ及びインバータを製作して頂いた東洋電機製造株式会社及び株式会社ブルーヘイズに対し、深く感謝申し上げる。最後に本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（課題番号:26249061）によって行われたことを付記する。

## 参考文献

- (1) Y. Hori, "Future vehicle driven by electricity and control - Research on four-wheel-motored "UOT Electric March II",," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 954–962, 2004.
- (2) H. Fukudome, "Reduction of vehicle longitudinal vibration by in-wheel motors," in *2015 JSAE Congress (Autumn)*, pp. 448–453, 2015.
- (3) M. Yoshimura and H. Fujimoto, "Driving Torque Control Method for Electric Vehicle with In-Wheel Motors," *IEEJ Transactions on Industry Applications*, vol. 131, no. 5, pp. 721–728, 2011.
- (4) K. Fujii and H. Fujimoto, "Traction control based on slip ratio estimation without detecting vehicle speed for electric vehicle," in *PCC-NAGOYA 2007*, pp. 688–693, 2007.
- (5) H. Sumiya and H. Fujimoto, "Driving Force Control Method Using Suppression Control of Driving-shaft Vibration for Electric Vehicle with On-board Motor," in *Proc. IEEJ Industry Applications Society Conf*, no. 106, pp. 115–120, 2012.
- (6) M. Kanematsu, H. Zhu, T. Miyajima, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Angular Acceleration Detection Method by Ultra-high Resolution Encoder with Hybrid Sampling Time for Automotive Motor Application," in *Proc. IEEJ technical meeting on Rotating Machinery, Linear Drive, and Home and Consumer Appliances*, no. RM-13-072, LD-13-082, HCA-13-048, pp. 37–42, 2013.
- (7) E. H.B.Pacejka, "the Magic Formula Tyre Model ,," *Proc. 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis*, vol. 131, 1991.