

# 電気自動車におけるモータトルクと加速度センサを用いた車体の速度推定

Tai Chien Hwa\*, 内田利之, 堀 洋一 (東京大学)

## Estimation of Electric Vehicle's Body Velocity Utilizing Motor Torque and Accelerometer

Tai Chien Hwa, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

### Abstract

The electric motor has excellent characteristics for advanced control and observer applications. In this paper, we propose a method of estimating the body velocity of an Electric Vehicle (EV) utilizing its motor torque and accelerometer inputs.

Compared with Internal Combustion Engine Vehicles (ICEV), the output torque of EVs can be much more accurately observed. Used together with data from the accelerometer, estimation of vehicle body velocity, which is difficult in ICEVs, is possible. In this paper, the effectiveness of the proposed method is tested through computer simulation and actual experiment.

キーワード: 電気自動車, オブザーバ, 速度推定, 加速度センサ

( Keywords: electric vehicle, observer, velocity estimation, accelerometer )

## 1 はじめに

電気自動車には様々な利点がある。例えば、環境保護の観点からの利点がある。しかし、特に見逃してはならないことは、電気自動車の制御面における利点である。電気自動車の駆動力源は電気モータであるため、以下の利点を有する。

1. トルク応答が高速であること
2. 出力トルクが正確に観測できること

エンジンはガソリンの噴出量を制御することによって、出力トルクを制御しており、その制御周期は 100 ~ 500[ms] オーダであるのに比べて、モータの制御周期は [ms] オーダである。また、エンジンはガソリンを燃焼させるので、その過程に非常に多くの非線形的な部分があり、正確に出力トルクを把握することは困難であるが、モータは流れる電流から出力トルクを正確に計算することができる。

電気自動車の出力トルクが正確に観測できることは自動車の制御に新たな情報を与え、様々な新しい可能性を開くことができる。本論文では、車体速度の推定においてその特長を生かし、従来の自動車では困難な、高精度の速度推定を実現する。

近年、電気自動車の研究が復活してきている。その背景には、1990 年のアメリカ・カリフォルニア州における ZEV (Zero Emission Vehicle) 規制をはじめ、北米そしてアジア諸国の各地で環境保護のための法律が定められ、自動車の排気に関する規制が各国において確立された点がある。そこで、電気自動車は環境に有害な物質を排出しないことが注目され始め、各国の大手自動車メーカーや政府の研究機関が電気自動車に関する大規模な研究に踏み出した。

現在世界規模の国際会議 FISITA や EVS などでも電気自動車の研究が積極的にとり挙げられており、電気自動車の技術的な進歩などが表面化している。また、近年トヨタのプリウスやホンダのインサイトなど、ハイブリッド電気自動車一般の消費者にも受け入れられ始めたということもあり、今後技術の進歩によっては純電気自動車 (PEV) や燃料電池電気自動車 (FCEV) も商品として一般に受け入れられることが期待される。

## 2 自動車の運動制御のための車体速度情報

自動車の運動制御を行なうためには、タイヤの力学と車両運動の力学の知識が必要である。そこで、タイヤと車両運動の力学の説明を行ない、自動車の運動制御における車体速度情報の必要性に結びつける。

### 2.1 タイヤの力学

タイヤは様々な役割を担っている。例えば、車体を支えることや、路面との間に摩擦力を発生させて車体の加減速や旋回をさせること、また進行中の振動を抑圧することなどが挙げられる。そのため、自動車の運動を制御するには、タイヤについて詳しく知る必要がある。タイヤのダイナミクスは非常に複雑である。しかし、自動車の運動の制御に関しては、タイヤの駆動力源としての特性に注目すればよい。タイヤと地面との間に発生する駆動力は以下の式で表せる。

$$F_d = \mu N \quad (1)$$

ただし、 $F_d$  はタイヤから得られる駆動力、 $\mu$  は摩擦係数、 $N$  はタイヤの垂直抗力である。

$\mu$  は定数ではなく、スリップ速度やスリップ率の非線形関数である。図 1 のように、スリップの絶対値が小さい領域では、 $\mu$  は線形的に増加するが、ある点  $\lambda_{max}$  で飽和し、それから減少していく。

スリップ率は

$$\lambda = \frac{V_w - V}{\max(V_w, V)} \quad (-1 \leq \lambda \leq 1) \quad (2)$$

で定義される。ただし、 $V$  は車体速度、 $V_w$  は車輪速度である。 $\lambda = 1$  は車輪が空転している状態であり、 $\lambda = -1$  は車輪がロックしている状態である。

$\mu$  の値は車両運動の安定性に重要である。 $\lambda$  の増大に伴い、最初は大きくなり、途中で飽和し、その後低下する。飽和の状態では、タイヤが滑り出して、ドライバーの制御がまったく効かなくなってしまう。そのため、 $\lambda < \lambda_{max}$  の領域において、 $\mu$  をできる

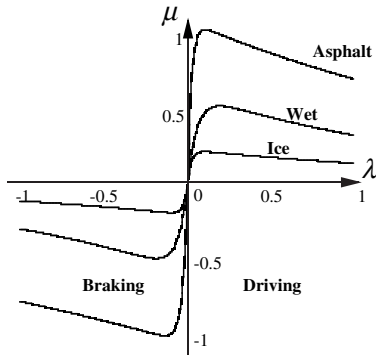


図 1:  $\mu$ - $\lambda$  曲線

だけ大きな値に保つことは、車体運動の安定性を向上させることになる。

$\mu$  と  $\lambda$  の関係は主に実験値を用いてカーブフィッティングによって表すことが多い。例えば、(3) 式の Bakker-Pacejka による方程式がある [7]。

$$\mu(\lambda) = C \sin\left\{B \tan^{-1} A\left[(1-D)\lambda + \frac{D}{A} \tan^{-1} A\lambda\right]\right\} \quad (3)$$

ただし、 $A, B, C, D$  は定数である。

## 2.2 自動車の運動力学

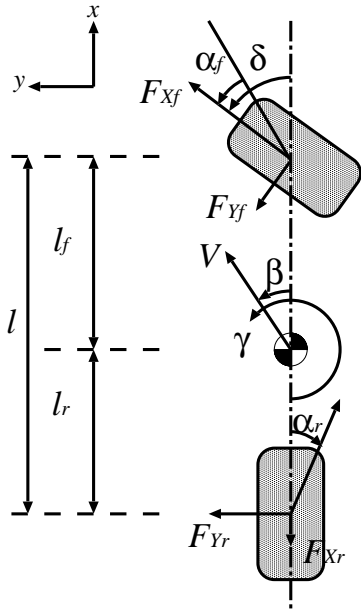


図 2: 二輪車モデル

自動車は 2 次元平面上を自由に走り回ることのできる乗物である。厳密に自動車の運動を考えると、直進方向の他に回転や振動に関するヨー、ピッチ、ロール、上下振動などがある。ここでは自動車をタイヤの付いた剛体として考え、以下のような二輪車モ

デルで表すことができる (図 2)。

$$MV(\dot{\beta} + \gamma) = F_{Xf} + F_{Xr} \quad (4)$$

$$I\dot{\gamma} = l_f F_{Yf} + l_r F_{Yr} \quad (5)$$

ただし、 $M$  は車両の質量、 $V$  は重心速度の大きさ、 $\beta$  は車体の重心における横滑り角、 $\gamma$  はヨーレート ( $z$  軸回りの角速度)、 $F$  は前輪や後輪に働く  $XY$  軸方向の力、 $\delta$  は前輪の操舵角、 $\alpha$  はタイヤの滑り角、 $l$  は前輪と後輪の車軸間距離、 $l_f$  は前輪の車軸と重心の距離、 $l_r$  は後輪の車軸と重心の距離である。

## 2.3 車体速度推定の必要性

前節までに述べたように、車体速度はスリップ率や車両の 2 次元運動に影響するため、自動車の制御に有効な情報である。例えば、車輪の大空転やロックを防止する ABS 制御や TCS 制御では、 $\mu$ - $\lambda$  曲線が飽和しているかどうかを知ることが有効であり、そのためには車体速度情報を用いてスリップ率を算出する必要がある。

しかし、実際には車輪速度の検出は簡単であるのに対して、車体速度の検出は難しい。エンコーダを使えば、車輪速度を検出できるが、スリップが伴うから、真の車体速度を検出するためには、路面の映像の画像処理によって車体速度を検出する高価な光学センサを使用するか、第 5 輪という小さい車輪を付ける必要がある。しかし、どちらも市販の車に使用するのはコストの面などから困難である。そこで従来では、2 輪駆動の自動車においては、非駆動輪の車輪速度を車体速度の近似として用いてきた。しかし、ブレーキが踏まれたときは 4 輪で制動するため、その手法を用いることができない。同じように、4 輪駆動の自動車でも当然、用いることができない。

## 3 オブザーバによる車体速度の推定手法

一つの観測系の中の状態量が直接に観測できない場合は、オブザーバを用いてその状態量を推定する手法が知られている。例えば [1][2] では、同次元オブザーバを用いて内燃機関自動車 (ICEV) において制動時の車体速度の推定を行なう研究がなされている。ここで、まずオブザーバの構成を説明し、次にオブザーバのための自動車モデルを築き、そして最後にシミュレーションでその推定手法の検証を行なう。

### 3.1 同次元オブザーバの構成

同次元オブザーバはセンサなどによって測定できない状態量とともに測定できる状態も一緒に推定する手法である。まず、状態方程式が (12)、(13) 式の形で表されるとき、その状態方程式を計算機の中で再現する。次に、入力値をシミュレータに入れ、得られた出力  $\hat{y}$  とプラントの実際の出力  $y$  との差にゲイン  $K$  をかけてシミュレータの入力にフィードバックすれば同次元オブザーバの構成になる。図 3 にその構成を示す (オブザーバは点線で示した部分である)。数式を書くと、推定値は

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - K(\hat{y} - y) \quad (6)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (7)$$

となる。(6) 式から (12) 式を引いて、(7) 式を代入すると、

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} - \dot{x} &= A(\hat{x} - x) - K(C\hat{x} - x) \\ &= (A - KC)(\hat{x} - x) \end{aligned} \quad (8)$$

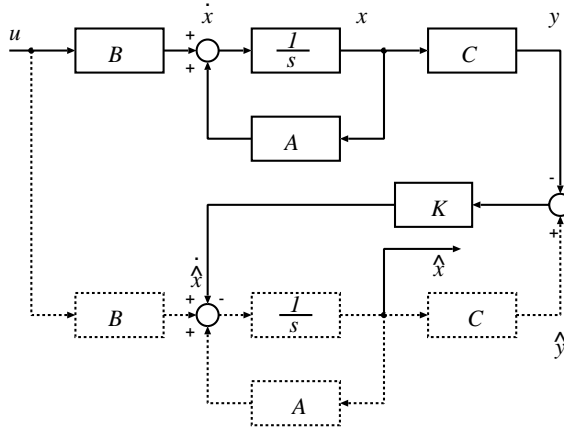


図 3: 同一次元オブザーバの構成

が得られる。したがって、 $e = \hat{x} - x$  と書き換えれば、

$$\dot{e} = (A - KC)e \quad (9)$$

になる。フィードバックゲイン  $K$  を調整することによって、行列  $(A - KC)$  の固有値を適切な値に設定できれば、誤差が 0 に収束して、状態量の推定値  $\hat{x}$  が真値  $x$  に収束するため、車体速度  $V$  の推定が可能となる。

### 3.2 自動車の 1 次元モデル

車の一つの車軸・タイヤに対して、以下の運動方程式が成り立つ (図 4, 図 5)。

$$M\dot{V} = F_d(\lambda) - F_a - F_r \quad (10)$$

$$M_w\dot{V}_w = F_m - F_d(\lambda) - F_r \quad (11)$$

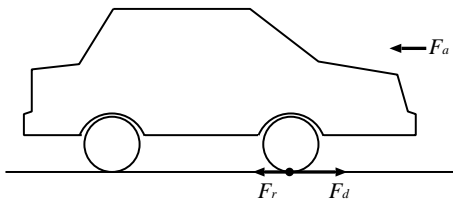


図 4: 車体に働く力

ただし、 $F_a$  は空気抵抗、 $F_r$  はタイヤの転がり抵抗、 $M_w$  は車輪イナーシャの質量換算値、 $V_w$  は車輪の速度換算値、 $g$  は重力加速度である。以上の運動方程式を状態空間表現で示す。一般的な状態空間表現は

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

$$y = Cx \quad (13)$$

である。

ここで、一基のモータを搭載した電気自動車を考える。転がり抵抗や空気抵抗を無視して、 $V_w, V, F_d$  を状態量とした状態方程式

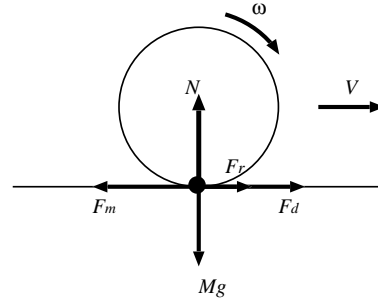


図 5: 車輪に働く力

を書くと、以下の式になる。

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_w \\ \dot{V} \\ \dot{F}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{M_w} \\ 0 & 0 & \frac{1}{M} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_w \\ V \\ F_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{M_w} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} F_m \quad (14)$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_w \\ V \\ F_d \end{pmatrix} \quad (15)$$

### 3.3 従来の推定手法によるシミュレーション

3.1 節の手法によって、同一次元オブザーバを設計し、MATLAB を用いて 3.2 節で築いた自動車の一次元モデルを電気自動車に適用した自動車モデルを作った。この自動車モデルは一基のモータを搭載した電気自動車のモデルであり、路面との摩擦による転がり抵抗が再現されている。そして、自動車モデルの車体重量の値に誤差があると想定し、誤差が  $\pm 0\%$ 、 $-10\%$  と  $+30\%$  の場合のシミュレーションを行なった。シミュレーションでは車両は静止状態から加速、一定速度での走行、そして減速をする。

シミュレーションの結果は図 6 に示す。結果によると、車両モデルの重量  $M$  に誤差がある場合には、加速時および一定速度の走行時に推定に大きな誤差が生じる。その誤差は減速時に少し減るが、最終的には定常誤差が残る。

### 3.4 シミュレーション結果についての考察

(9) 式に戻って、(14)、(15) 式の値を代入すると、

$$\dot{e} = \begin{pmatrix} -K_1 & 0 & -\frac{1}{M_w} \\ -K_2 & 0 & \frac{1}{M} \\ -K_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} e \quad (16)$$

ただし、 $K_i (i = 1, 2, 3)$  は同一次元オブザーバのフィードバックゲイン  $K$  の各成分である。(16) 式の固有値は  $0, -\frac{K_1}{2} \pm \sqrt{\frac{K_1^2}{4} + \frac{K_3}{M_w}}$  である。固有値に 0 が含まれているので、どのように  $K$  を選んでも定常誤差が残ることになる。車体速度は駆動力推定値を積分することによって推定するので、車両重量のノミナル値に誤差があれば、その誤差が積分によって蓄積される。またノミナル値が実際値と一致した場合でも、誤差が生じることが自動車モデルの中に摩擦や空気抵抗などの力を考慮していないためであると考えられる。

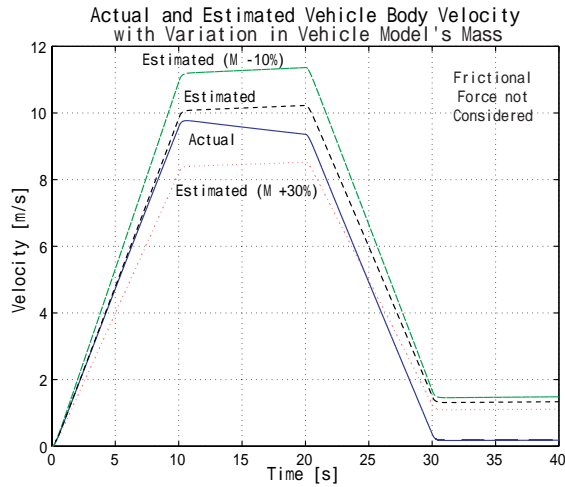


図 6: 車体速度推定のシミュレーション結果

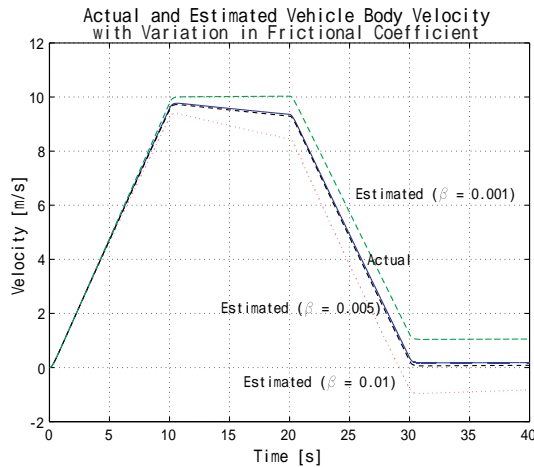


図 7: 摩擦を考慮したモデルのシミュレーション結果

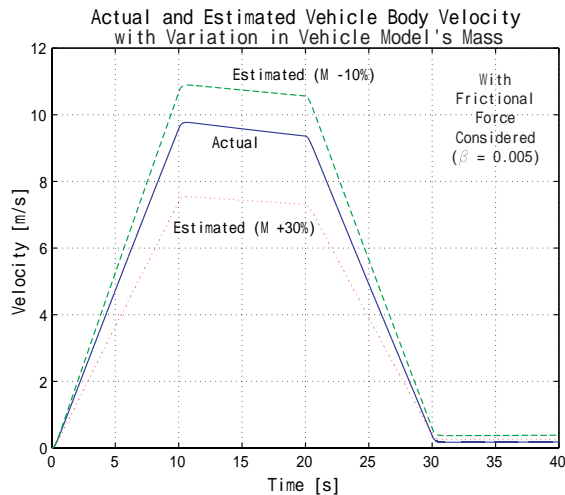


図 8: 摩擦を考慮したモデルに重量の誤差がある場合

## 4 モデル誤差の補償による推定手法の改善

第 3 章の考察では、観測系が不可観測であることが分かった。そこで自動車モデルを考え直し、誤差をどのように補償するのかという問題を考える。

### 4.1 摩擦を考慮した自動車モデル

前章では自動車モデルを簡単にするため、すべての抵抗の項が無視できると仮定したが、前述の 3.4 節で抵抗の項が無視できないことが分かった。そこで次に、仮の車体速度  $V$  に比例する抵抗分  $\beta$  を自動車モデルに挿入することを試みる。すると、(14) 式は (17) 式になり、(16) 式は (18) 式になる。

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_w \\ \dot{V} \\ \dot{F}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{M_w} \\ 0 & -\beta & \frac{1}{M} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_w \\ V \\ F_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{M_w} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} F_m \quad (17)$$

$$\dot{e} = \begin{pmatrix} -K_1 & 0 & -\frac{1}{M_w} \\ -K_2 & -\beta & \frac{1}{M} \\ -K_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} e \quad (18)$$

(18) 式の固有値は  $-\beta, -\frac{K_1}{2} \pm \sqrt{\frac{K_1^2}{4} + \frac{K_3}{M_w}}$  である。この場合には、0 の固有値はなくなるので、定常誤差が残らず、また (18) 式の系は可検出となる。

### 4.2 摩擦を考慮したモデルによるシミュレーション

(17) 式を用いて 3.3 節と同じ走行条件の下でシミュレーションを行った。なお、このシミュレーションでは自動車モデルの重量を真の値に設定した。この結果を図 7 に示す。車体速度に比例した抵抗を自動車モデルに入れると、確かに推定誤差は減るが、 $\beta$  を慎重に設定しないと補償しすぎることになり、推定誤差が逆に大きくなってしまふ。そこで、 $\beta = 0.005$  (図 7 より速度の推定値と真の値が一致した時の  $\beta$ ) を設定して、車両モデルの重量に誤差を導入し、再びシミュレーションを行った。この結果を図 8 に示す。図 8 より、摩擦の補償をモデルで行っても車両モデルの重量に大きな誤差がある場合においては推定誤差を完全に抑えるができないことが明らかになった。

### 4.3 摩擦を考慮したモデルによるシミュレーションの結果についての考察

車体に対する抵抗を考えたときの駆動力から車体速度までのブロック線図を図 9 に示す。 $\beta'$  は車体に対する抵抗の係数である。図 9 に基づいて、(10) 式を書き換えれば、

$$\dot{V} = \frac{F_d}{M} - \frac{\beta'}{M} V \quad (19)$$

が得られる。

(19) 式をみれば、 $\frac{\beta'}{M}$  は (18) 式の  $\beta$  となる。走行実験のデータによると、車体速度に比例する抵抗力の係数は  $0.5 [\text{kg/s}]$  程度である。 $\beta'$  の値は  $0.5 [\text{kg/s}]$  程度で、 $M$  が  $1000 [\text{kg}]$  程度であれば、 $\beta$  は  $5 \times 10^{-4} [1/\text{s}]$  程度になる。 $\beta$  は (18) 式の固有値の一つ



であるので、誤差が収束する時間が長いことが分かる。 $\beta$  を調整することによって、収束時間が変えられるが、 $\beta$  を大きく設定することによって逆に新たなモデル誤差を導入してしまうことになる (図 7)。

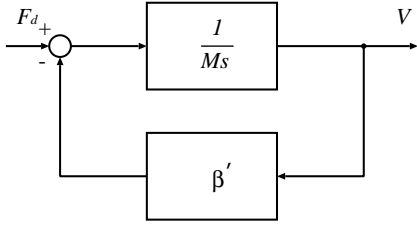


図 9: 駆動力から車体速度までのブロック線図

#### 4.4 車両重量の推定

4.3 節より、オブザーバを用いた車体の速度推定には車両モデルの重量の値をできるだけ真の値に設定する必要がある。しかし、実際には車両の重量は乗客の数や荷物の量によって異なる。ところで、この荷重の変動は自動車の始動時に起こるので、その時点できちんと車両の重量を観測することができれば、車両モデルに代入することができる。そこで、(10) 式に戻ってみる。自動車の始動時を想定して、抵抗力が小さくて無視できるとし、式を書き直すと、

$$F_d = M\dot{V} + \xi \quad (20)$$

が得られる。ただし、 $\xi$  は観測雑音である。(20) 式をさらに離散系に書き直すと、

$$F_{d_k} = M\dot{V}_k + \xi_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (21)$$

になる。最小二乗法の評価関数 (22), (23) 式を用いると  $M$  の値は (24) 式から計算できる。

$$J_r = \sum_{k=1}^i q_k (F_{d_k} - \hat{M}_r \dot{V}_k)^2 \quad (22)$$

$$\frac{\partial J_r}{\partial \hat{M}_r} = 0 = -2 \sum_{k=1}^r q_k \dot{V}_k (F_{d_k} - \hat{M}_r \dot{V}_k) \quad (23)$$

$$\hat{M}_r = \frac{\sum_{k=1}^r q_k \dot{V}_k F_{d_k}}{\sum_{k=1}^r q_k \dot{V}_k^2} \quad (24)$$

$\dot{V}$  は加速度センサから直接に得られる情報であるが、 $F_d$  はタイヤと地面との相互作用による力なので、直接に観測できない。しかし、 $F_d$  をモータトルクに対して外乱と見なした場合、図 10 の構造を持った外乱オブザーバを用いて推定することができる。電気モータの出力トルクを正確に観測できるので、 $F_d$  を精度よく推定することができる [9]。

## 5 実験による検証

第 4 章の手法を実験によって検証をした。実験車 UOT-March (図 11) は日産マーチを改造した電気自動車であり、駆動源

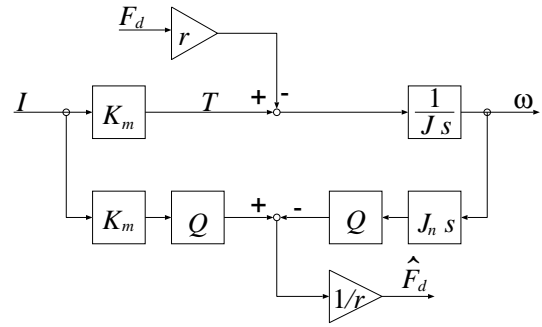


図 10: 駆動力オブザーバの構造

が一基の直巻直流モータ (定格出力 20.8 [kW] (1 hr) / 32.5 [kW] (5 min)) で、12 [V] の電池 10 個を載せている (図 12)。実験では直進の走行のみを行った。ドライバーを載せた車両の重量はあらかじめ車両重量計で測定している。加速度センサは安価な IC タイプ (Analog Devices ADXL202) で、2 軸の測定が可能なものである、その測定範囲は  $\pm 2g$  である。



図 11: 実験車 UOT-March の外見

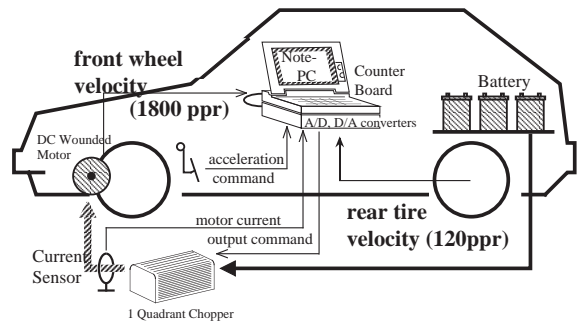


図 12: 実験車 UOT-March の構成

図 13 に車両重量の推定の結果を示し、図 14 に車体速度の推定の結果を示す。図 13 結果より、車両重量推定は 2% の誤差範囲以内でできたが、正確な車両重量が得られるまで 10 秒程度必要であった。図 14 では提案手法と従来の手法を比較する。上段は提案手法を用いた結果であり、自動車モデル内に摩擦の補償を行い、また車両モデルに正確な重量を代入した場合である。中段は、車両モデルの重量が正確であるが摩擦の補償が行われていない場

合、下段は摩擦の補償が行われながら車両モデルの重量に誤差がある場合の結果である。この結果より、摩擦の補償も自動車モデルの車両重量の正確な推定も必要であることが明らかになった。

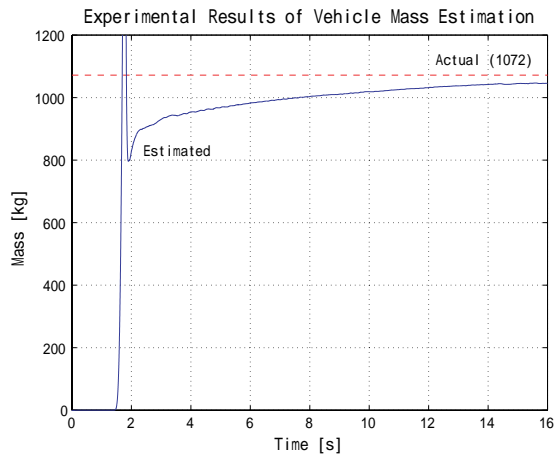


図 13: 車両重量推定の実験結果

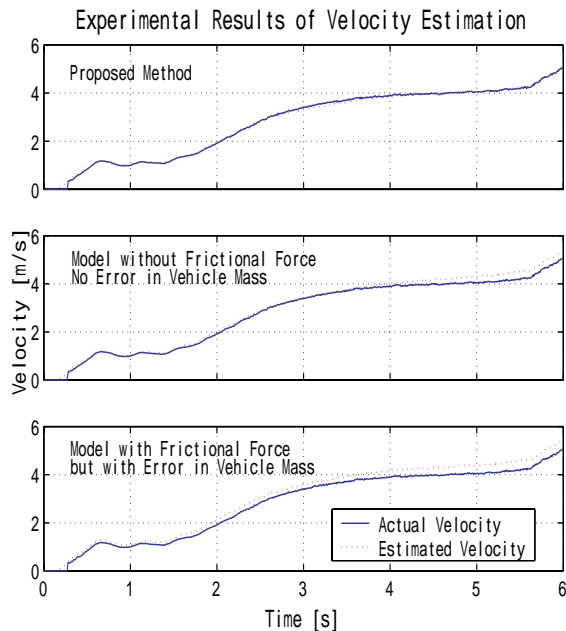


図 14: 車体速度推定の実験結果:提案手法と従来手法の比較 (上段: 提案手法 中段: 摩擦補償なし 下段: 車両重量誤差あり)

## 6 結論

以上の結果より、従来の同一次元オブザーバをそのまま用いたのでは車体速度の推定を精度良く行なうことはできないことが明らかになった。一番大きな問題は車体の重量のノミナル値が真値と一致しないときに、誤差が積分されることである。また、自動車が一一定の速度で走行しているときは、摩擦などの抵抗力の影

響が大きくなるので、自動車モデルの中に入れる必要がある。実験による結果から、モデルの車両重量の初期値の誤差が少なければ、車体速度の推定は精度よくできることがわかった。また、加速度センサと電気モータのモータトルクを用いれば、車両重量は $\pm 2\%$ の誤差範囲以内で推定できる。しかし、現在の段階では、車両重量の推定は10秒以上かかり、その間にモデルの誤差が増加してしまうことになる。

今後の課題は車両重量の推定方法を改良し、より速く推定を行い、車両モデルに正しい重量を与えることである。また加速度センサは引力による加速度にも反応するので、路面が傾いているときに、その傾斜度を検出することが理論的に可能である。従来、路面の傾斜度は加速度センサにとって誤差であり、速度の観測に大きな問題であったが、電気自動車の場合は、傾斜度に影響されない駆動力オブザーバと加速度センサの組み合わせによって、逆にそれを情報として利用できる可能性がある。最終的に推定から得られる様々な情報をEVの運動制御に使用していく予定である。

## 参考文献

- 劉永琦, 今村政道, “外乱オブザーバによる車両環境推定を用いたブレーキ制御の開発 (第1報)”, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No. 4-00, pp. 14-16, 2000.
- 今村政道, “外乱オブザーバによる車両環境推定を用いたブレーキ制御の開発 (第2報)”, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No. 4-00, pp. 17-20, 2000.
- 吉本貴太郎, 河村篤男, “電気自動車の車輪スリップ率推定方法”, 平成12年電気学会産業応用部門大会, Vol. 2, pp. 561-564, 2000.
- Gustafsson F., “Slip-based Tire-Road Friction Estimation”, Automatica, Vol. 33, No. 6, pp. 1087-1099, 1997.
- Sakai S., Sado H., Hori Y., “Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors”, IEEE-ASME Trans. Mech., Vol. 4, No. 1, pp. 9-16, Mar 1999.
- Kimbrough S., Datla K., “An Effective Means for Implementing Wheel Slip Control without a Ground Speed Sensor”, Veh. Syst. Dyn. Supp., No. 25, pp. 327-339, 1996.
- Pacejka H. B., Bakker E., Nyborg L., “Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies”, SAE Tech. Pap. No. 870421, pp. 1-15, Feb 1987.
- 坂井真一郎, 佐渡秀夫, 堀洋一, “電気自動車における車体速度情報不要の新しいタイヤ空転検出法”, 電気学会論文誌D, Vol. 120-D, No. 2, pp. 281-287, Feb 2000.
- 佐渡秀夫, 坂井真一郎, 内田利之, 堀洋一, “路面状態推定とスリップ率制御を用いた電気自動車の高性能トラクションコントロール”, 平成10年電気学会産業応用部門大会, Vol. 3, pp. 321-324, 1998.
- 堀洋一, 大西公平, 『応用制御工学』, 丸善, 1998.
- 安部正人, 『自動車の運動と制御』, 山海堂, 1992.
- 横浜ゴム株式会社 編, 『自動車用タイヤの研究』, 山海堂, 1995.
- 岩井善太, 井上昭, 川路茂保, 『オブザーバ』, コロナ社, 1988.