

3501 適切なすべり速度制御のためのすべり速度と粘着力の推定
 Estimation of Slip Velocity and Adhesion Force for Appropriate Slip Velocity Control

○ Lilit KOVUDHIKULRUNGSRI (東京大学) 立石大輔 (東京大学)
 古関隆章 (東京大学)

Lilit KOVUDHIKULRUNGSRI, Daisuke TATEISHI, Takafumi KOSEKI
 The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Abstract

It is necessary to consider the characteristic of adhesive coefficient versus slip velocity in order to realize an optimal traction drive but it is very difficult to grasp both parameters in real-time operation. This paper proposes an effective way to realize this by estimating the precise axle velocity and adhesion force by using multirate sampling observers and each car's body velocity by using disturbance observers based on the signals from the speed sensors installed in the front- and the rear-end cars. Various simulations verify the effectiveness of this method.

Keywords: Slip velocity, adhesion force, estimation

1. はじめに

車輪とレールの間の粘着は、鉄道が誕生して以来、営々と続いている問題である。粘着特性は粘着係数で表す。この粘着係数は、レールの状態や温度や湿度などに依存するので、区間によって粘着係数が大幅に変わることが多い。加速・ブレーキするときに粘着係数が小さい区間に入ると滑走・空転が発生し加・減速度が急に下がるため、再粘着制御をかけることが必要である。

効果的な再粘着制御を実現するため、速い滑走空転検知をしなければならない。従来の滑走空転検知方法では、パルスジェネレータ (PG) の信号を用いて加速度を演算し、閾値を超えると滑走と判定する。ところが、使われている PG は極めて低精度 (60ppr) のため従来の差分法を用いて速度を演算し、その演算した速度を用いてまた加速度を演算しローパスフィルタをかけて処理する。そのため加速度信号は実際の加速度より遅くなってしまふ。更に、滑走空転時には、適切なトルク絞込み率を得ることは難しい。絞り込みの設定は経験的に行われているのが現状である。

これらの問題を解決するため、著者らは DSP のサンプリングタイム毎に速度推定を行うマルチレートサンプリングオブザーバを提案した[1]。このマルチレートサンプリングオブザーバは正確な速度と加速度を推定するだけでなく、同時に粘着力も推定できるため、粘着力によるトルク絞り込みの調整が可能となった。[2,3]。しかし、この調整はモータ加速度の閾値による調整であるため、余裕を見て設計しなければ、再粘着しない可能性がある。

より効果的な駆動力を得るため、図 1 に示すすべり速度-粘着特性を考慮する必要がある。すべり速度を求めるには電動車 (M 車) の車体速度が必要であるが、車体絶対速度のセンサは通常にとりつけられていない。車体速度センサは、運転手に速度情報を知らせる役割で、先頭車と末尾車だけで付けられている場合が主流である。車両の間のバ

ネ系があるため、各車両の車体速度は必ずしも同一ではない。

本論文では、すべり速度と粘着力を正確に把握するため、表 1 に示す 2 種類のオブザーバを導入する。まず、粗い PG の情報を用いて精密な軸速度と粘着力を推定するマルチレートサンプリングオブザーバを各動輪軸に導入する。そして、外乱オブザーバで先頭車と末尾車の速度を用いて各電動車の速度を推定し、これらの車体速度をマルチレートサ

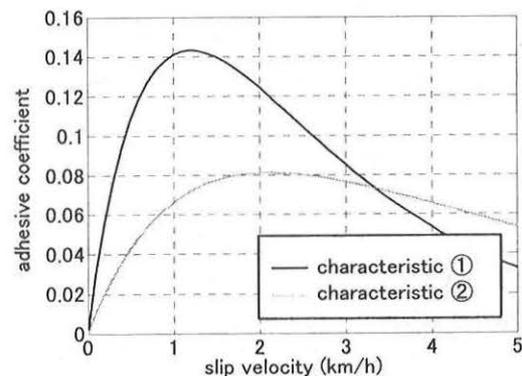


Fig.1. Adhesive coefficient vs. slip velocity

Table 1. Description of each observer

	Multirate sampling observer	Disturbance observer
Estimating objectives	Axle velocity, adhesion force	Body velocity
Order	4	6
Input	Motor torque or current	Estimated adhesion force
Signal for error correction)	PG pulse	T-car velocity

ンプリングオブザーバが推定した動輪軸速度との差をてりすべり速度を求めることを提案する。シミュレーションでこの方法の有効性を確認する。

2. 車両モデル

本論文で用いられている車両は図2に示すように6両編成の3M3Tである。各電動車に動輪軸を2つとし、制御装置を1つとする。車両間のバネ系を線形とする。その値を表2にまとめる。

3. マルチレートサンプリングオブザーバを用いた動輪軸速度と粘着力の推定

PG の出力信号は正弦波とほぼ同じ波形であるが、主電動機の回転速度が遅くなると波形の振幅が小さくなり、アナログ信号処理で速度を演算することは非常に困難である。このため、波形をデジタル信号とすることは一般的である。制御周期を0.2msとする場合、53.5km/h以上でなければDSPの制御周期ごとに速度情報を得ることができない。53.5km/h以下の制御周期(T_2)に対するPGから処理されたパルスを図3に示す。 m をパルスの番号で、 n をパルス間のサンプリング回数である。このサンプリング回数はパルスを検出したときにリセットされる。 $n=0\sim N$ をサンプリングフレームと定義し、サンプリングフレームのサイズはパルス間隔(T_1)に比例する。図3からわかるようにパルス間隔は制御周期より長い。そこで、パルス間の情報を推定するために、マルチレートサンプリングオブザーバを導入した。

このマルチレートサンプリングオブザーバの原理は、PGの信号から処理されたパルスがないときに慣性モデルに基づいて速度や外力力を推定し、パルスが生じて真の位置情報が分かる時に、推定誤差を修正することである。

オブザーバのブロック線図を図4に示す。オブザーバは離散ドメインで設計され、状態変数は

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\theta} & \hat{\omega} & \hat{T}_d & \hat{T}_d \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

である。ただし、 θ をモータシャフトの角度、 ω をモータ回転速度、 T_d を外乱力とする。今回は1次の外乱を考慮するため、外乱力の微分(\hat{T}_d)を状態変数とした。行列 A_2 、 B_2 、 C_2 は連続系における外乱を考慮した回転系から得られた。それぞれの連続系の行列は

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

である。2という下付きの添字は T_2 を周期することを意味する。オブザーバの入力($u = T_m$)は計測したd軸電流(i_d)とq軸電流(i_q)で計算する。一方、推定したモータ角度($\hat{\theta}$)をPGのパルス演算されたモータ角度($y = \theta$)と比較し、誤差修正を行う。この動作はパルスが来たときのみ行う。すると、

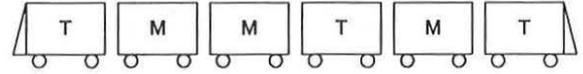


Fig.2. Model of analysis

Table 2 List of symbols

Symbol	Description	values
b	Damping constant	20000 N/m/s
F_{ad}	Adhesion force	
F_{dr}	Driving force	
i_d, i_q	d- and q- axis current	
J	Motor shaft's equivalent moment of inertia	15 kgm ²
k	Spring constant	500000 N/m
M_f	Equivalent mass of front cars	
M_M	Mass of M-car	20000 kg
M_r	Equivalent mass of rear cars	
M_T	Mass of T-car	17000 kg
R_g	Gear ratio	5.31
r	Wheel radius	430 mm
T_1	Interval between the pulses	
T_2	DSP sampling time	0.2 ms
T_d	Disturbance	
T_m	Motor torque	
v	Body velocity	
v_s	Slip velocity	
x	Car position	
θ	Rotor angle	
ω	Rotor speed	

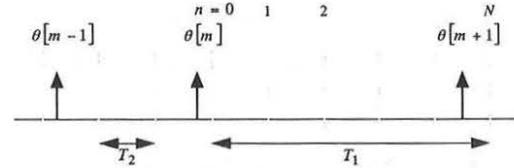


Fig.3. Pulses from PG

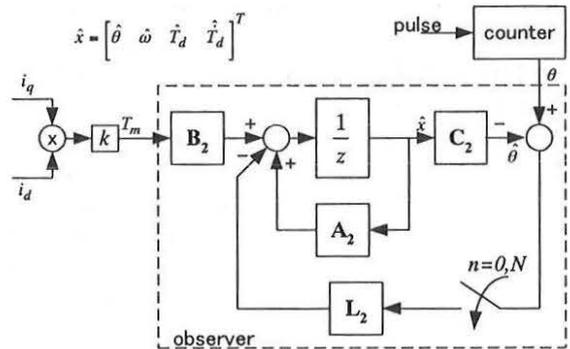


Fig.4. Block diagram of multirate sampling observer

$$n = 0, N; \quad \hat{\mathbf{x}}_{n+1} = \mathbf{A}_2 \hat{\mathbf{x}}_n + \mathbf{B}_2 u_n + \mathbf{L}_2 (y_n - \hat{y}_n), \quad (2)$$

$$n \neq 0, N; \quad \hat{\mathbf{x}}_{n+1} = \mathbf{A}_2 \hat{\mathbf{x}}_n + \mathbf{B}_2 u_n \quad (3)$$

となる。この式によりパルスが検出できるときに誤差修正を行う。いいかえれば、サンプリングフレーム内の最後のサンプリング回数 ($n=N$) はサンプリングフレームのダイナミクスに影響を及ぼす。サンプリングフレームのダイナミ

クスを

$$\hat{x}_n = A_2^{n-1}(A_2 - L_2 C_2)\hat{x}_0 + A_2^{n-1}B_2 u_0 + A_2^{n-2}B_2 u_1 \quad (4)$$

$$+ \dots + A_2^0 B_2 u_{n-1} + A_2^{n-1} L_2 y_0$$

で表す。

オブザーバのダイナミクスを極配置により決める。極は

$$\text{eig}\left(A_2^{N-1}(A_2 - L_2 C_2)\right) = 0 \quad (5)$$

の解である。得られた極は Z 平面上にあるので、Z 平面上で極を固定すると低速領域に問題はないが、高速領域ではゲインが大きくなりすぎて、ノイズに弱くなる。このため、高速領域では S 平面上に極を固定する。

図 5 に示すモータシャフトの簡易モデル図から、モータの運動方程式は

$$J\dot{\omega} = T_m - \frac{r}{R_g} F_{ad} \quad (6)$$

となる。ただし r を車輪半径、 R_g をギア比、 F_{ad} を粘着力とする。ここでオブザーバの方程式を厳密に考えると外乱項は

$$\hat{T}_d = \frac{r}{R_g} \hat{F}_{ad} \quad (7)$$

となる。従って粘着力はマルチレートサンプリングオブザーバが推定した外乱から求められる。

4. 外乱オブザーバを用いた車体速度の推定

先述したように車間のバネ系の影響により各車両の速度は同一でない。このため外乱オブザーバを導入し、先頭車と末尾車の車体速度を用いて各車両の速度を推定する。今回用いられている電車は 6 両編成であるため、6 慣性系と考えられる。これに応じてオブザーバを設計すると非常に高次になり計算時間が長くなる。

ここで、電動車外の前後の車両を等価的な車両をし、3 慣性系の外乱オブザーバを組む。その結果を図 6 に示す。オブザーバ方程式を

$$\dot{\hat{x}}_0 = A_0 \hat{x}_0 + B_0 u_0 + L_0 (y_0 - \hat{y}_0) \quad (8)$$

に表す。ただし

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{b}{M_f} & -\frac{k}{M_f} & \frac{b}{M_f} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{b}{M_M} & \frac{k}{M_M} & -\frac{2b}{M_M} & \frac{k}{M_M} & \frac{b}{M_M} & \frac{1}{M_M} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b}{M_r} & \frac{k}{M_r} & -\frac{b}{M_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{M_r} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad x_0 = \begin{bmatrix} v_f \\ x_{fM} \\ v_M \\ x_{Mr} \\ v_r \\ F_L \end{bmatrix}, \quad u_0 = \begin{bmatrix} F_{dr-f} \\ F_{dr-M} \\ F_{dr-r} \end{bmatrix}$$

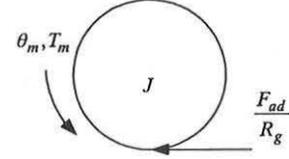


Fig.5. Free-body diagram of a motor shaft

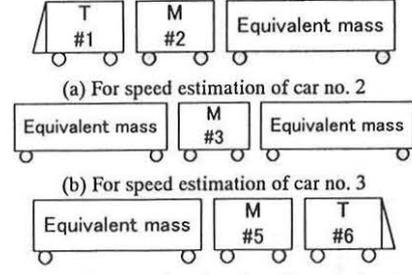


Fig. 6. Equivalent 3-car models

v を車体速度、 x を車体位置、 b をダンピング係数、 k をバネ係数、 F_{dr} を各電動車又は車両群の駆動力、下付きの添字 f を前の車両群、 r を後ろの車両群、 M を推定目的の M 車とする。プラントの出力 y_0 は先頭車と末尾車の速度センサから 2 つの信号がある、が図 6(a)と(c)に示す 2 号車の 5 号車を推定目的とする場合は、となりの車両のセンサ信号だけを使う。図 6(b)に示す 3 号車の速度を推定する場合は等価化の影響がより少ない先頭車のセンサの信号を使う。駆動力 F_{dr} はマルチレートサンプリングオブザーバで推定された各軸の粘着力の和である。

推定された各電動車の車体速度をマルチレートサンプリングオブザーバで推定された軸速度との差をとりすべり速度を求める。

5. シミュレーション結果

車両制御方式はノッチコマンド(電流レベル)によって、電流制御を行う。今回は推定値を確認するため、再粘着制御を行わない。車両を加速しながら 5 秒のときに、2 号車の前動輪軸はすべる区間(図 1 の特性②)に入って空転が発生した。そして、次々の動輪軸がすべる区間に入って空転になった。

5.1 軸速度の推定

すべり速度を求めるため、各動輪軸の速度を精密に推定しなければならないが、粗い PG が速度センサとして使われているため、従来の差分法で精密な速度を求めることは非常に困難である。ここで、マルチレートサンプリングオブザーバを用いて動輪軸の速度を推定した。2 号車(一番前の M 車)の前駆動軸でのシミュレーション結果を図 7 に示す。従来の差分法に比べ誤差が少なく推定できる。

5.2 粘着力の推定

(7)によりマルチレートサンプリングオブザーバが推定した外乱から粘着力を計算できることが分かった。その 2 号車の前動輪軸の粘着力を図 8 に示す。

5.3 すべり速度の推定

すべり速度を求めるため、外乱オブザーバを用いて各車

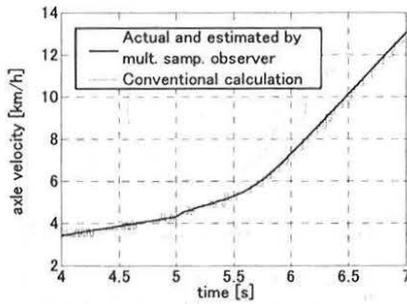


Fig.7. Comparison of speed estimation for axle 1 of car 2

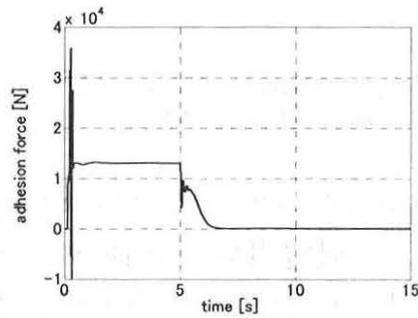


Fig.8. Estimated adhesion force of axle 1 of car 2

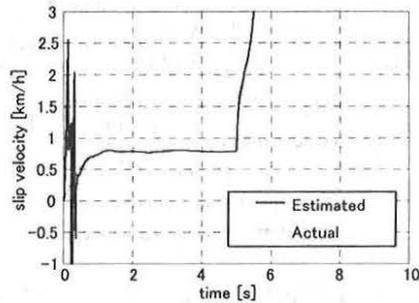


Fig.9. Slip velocity of axle 1 of car 2

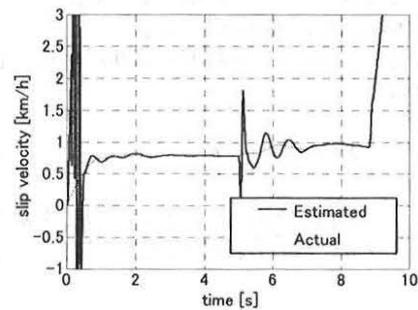


Fig.10. Slip velocity of axle 1 of car 3

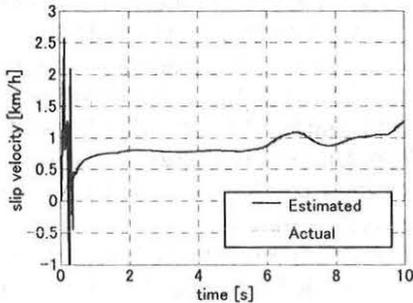


Fig.11. Slip velocity of axle 1 of car 5

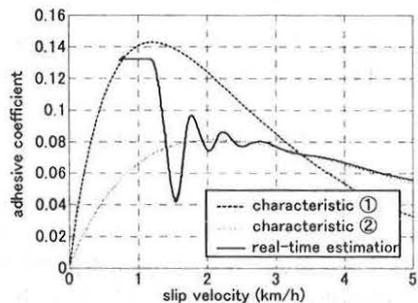


Fig.12. Estimated locus of adhesive coefficient vs slip velocity of axle 1 of car 2

両の車体速度を推定した。図6により3慣性系外乱オブザーバを3つ組んで2,3と5号車の車体速度を推定しそれぞれの動輪軸のすべり速度を計算した。その結果を図9~11に示す。2と5号車は隣のT車の信号を使うため正しく推定できたが、3号車の場合は車両群を1つの等価質量で近似した影響によって推定誤差が大きくなった。

推定した2号車の粘着力とすべり速度をプロットした曲線を図12に示す。推定した値は最初の1秒間に振動するので1秒以後の値をプロットした。空転発生の前に粘着係数は特性①の曲線の上であって、発生の後に特性②に移動することが分かる。ただ、過渡的な軌跡が発生したため、これは再粘着制御や適切なすべり速度制御への応用に影響がある可能性があるため、今後詳しく検討する必要があると考えられる。

6. 結論と今後の課題

本論文では、適切なすべり速度制御のためのすべり速度と粘着力の推定法を提案した。2種類のオブザーバを使用した。まず、PGの問題を解決するマルチレートサンプリングオブザーバを各動輪軸に導入し精密な軸速度と粘着力を推定した。そして、一般に先頭車と末尾車に設置されている速度ジェネレータという速度センサを用いて、外乱オブザーバを組んで各M車の車体速度を推定してすべり速

度を求めた。これらの推定法は誤差が少なく推定できることがシミュレーション結果により確かめられた。

今後の課題として、適切なすべり速度制御を実現するため、粘着係数対すべり速度のプロットで発生した過渡的な軌跡の影響とその抑制法を検討する必要がある。さらに、中の車両の速度推定誤差をより少なくすることも必要である。

参考文献

- 1) L. Kovudhikulrungsri, T. Koseki, "Improvement of Performance and Stability of a Drive System with a Low-Resolution Position Sensor by Multirate Sampling Observer", 平成15年電気学会産業応用部門大会, vol.2, pp.363-368, 東京2003年8月
- 2) 立石大輔, L. Kovudhikulrungsri, 古関隆章: "電気車の滑走再粘着制御への瞬時速度オブザーバの適用", 平成14年電気学会全国大会, vol.5, pp.310-311, 東京, 2002年, 3月
- 3) L. Kovudhikulrungsri, 立石大輔, 古関隆章: "マルチレートサンプリングオブザーバを用いた滑走空転検知のためのパラメータ推定" 平成15年電気学会全国大会, vol.5, pp.304-305 仙台, 2003年, 3月