DBW 自動車における車軸出力トルクと外乱負荷トルクの推定*

高 田 洋 吾^{*1}, 守 田 栄 之^{*1}Estimations of Axle Output Torque and Disturbance Load Torque
for Automobile by DBW

Yogo TAKADA and Shigeyuki MORITA

Recently, the vehicle which is adopting an electronically controlled throttle valve (ECTV) is controlled by DBW (Drive by wire) for the purpose of improving the automobiles performance. One of them is an optionally tuning for the accelerator pedal sensitivity, and it needs axle output torque as the feedback signal. Because the cost of hardware torque meter is the practical problem, the axle output torque should be estimated by adaptive observer with table-looking method. If the disturbance load torque by a slope of road and so on is not already-known, observer can not be used. Therefore the disturbance load torque should be estimated without sensor also. Expected observation and control results are obtained by using the simulation which is identified with an experimental device.

Key Words: Automobile, Gasoline Engine, Observer, Adaptive, Software Torque Meter, Drive by Wire, Accelerator Pedal Sensitivity, Disturbance Load Torque

1. はじめに

電子制御スロットル弁を装備した自動車では、DBW (Drive By Wire) の制御概念を用いて、アクセルペダルの踏込んだときの加速感(アクセル感度)を任意に設定可能である^{(1)~(3)}。ただし、アクセル感度を設定する場合、回転数信号のみならずトルク信号もフィードバック(FB)した方が設定が容易となることからトルクセンサの利用等が必要であった。しかし、それではコスト増、機械部品数増等の問題もあるためソフトウェア的にトルクの値を推定することが望ましい。車軸出力トルク信号はアクセル感度設定以外でも変速ギアシフトチェンジ時のショック低減や燃費最適化、その他様々な用途に役に立つのではないかと考えている。

スロットル弁角度信号と車軸回転数信号からアダプティブオブザーバを用いて車軸出力トルクを推定可能であるが、道路勾配やエアコン等で変化する外乱負荷トルクが既知であることが前提であった⁽⁴⁾。本報ではアクセル感度を設定した自動車において車軸出力トルクと外乱負荷トルクの両信号を同時推定する方法を述べる。

以下に使用記号を示す。他はその都度説明を加える。また、冠 $\sim$ は指令値、冠 $\hat{\cdot}$ は推定値を表わす。

J :	車重等価慣性モーメント	[kgm ²]
n_e :	エンジン回転数	[1/s]
n_w :	車軸回転数	[1/s]
$\tilde{n}_w$:	アクセル踏み量	[1/s]
R_m :	変速比	[-]
T_d :	外乱負荷トルク	[Nm]
T_e :	エンジントルク	[Nm]
T_L :	負荷トルク	[Nm]
T_w :	車軸出力トルク(センサ計測値)	[Nm]
$\hat{T}_{wt}$:	ソフトウェアトルク計で得たトルク	[Nm]
θ :	スロットル弁開度	[rad]

2. パワートレイン系モデル

図1は実機をモデル化したパワートレイン系のブロック線図である。 $T_e(\theta, n_e)$ は機関トルクを静的に近似した非線形特性を表現している。 L は燃焼室のレシプロエンジン特有の燃焼サイクルによる無駄時間であり、 τ_m は吸気系一次遅れ時定数である。 η_m は機械効率、 R_w は終減速比である。 J は車体重量に等価な慣性モーメントである。 T_d は道路勾配等の外乱負荷トルクである。また、 $\tilde{R}_m$ は変速比の指令値で、 R_m 値はその指令値 $\tilde{R}_m$ が時定数 τ_r

* 原稿受付 1998年6月18日。

^{*1} 正員, 大阪市立大学(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)。

E-mail: takada@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

Table1 Specification of object system

Swept Volume	0.0013 m ³
Maximum Power	58 kw
Maximum Torque	105.9 Nm
Vehicle Mass	900 kg
$J = 394 \text{ kgm}^2$	
$R_w = 5.246$	
$L = 0.1 \text{ s}$	
$\tau_m = 0.05 \text{ s}$	
$\tau_r = 2.0 \text{ s}$

Fig.1 Block diagram of powertrain model

の一次遅れ系要素を経て得られるようモデル化した。表1には実験装置の概要と対象系のパラメータを記述した。

本研究では実機と図1のモデルのシステム同定を行った上で、そのモデルのシミュレーションを長時間にわたる実機運転をする代わりに利用する。また実験では難しい広域な運転もシミュレーションでは可能であり検討に適している。図2は実機との同定結果を示しているが、良好に一致している。

3. アクセル感度設定と外乱負荷トルク推定

アクセル感度の設定をするには、図3のように n_w 信号と T_w 信号を用いてETCVを制御する。 n_w と T_w の両信号をフィードバックすることにより、図4(A)の車軸周りのトルク～回転数面上においてa点からb点へ加速させようとアクセルペダルをステップ状に踏み込んだ時、アクセル感度を表現するパラメータ f_0 によって定まる目標線上に運転点(n_w, T_w)があるようにスロットル弁は制御され、結果として図4(B)のように同一のアクセルの踏み代($\Delta \tilde{n}_w$)に対して、 f_0 により加速の仕方が異なるように設定可能となる。

f_0 によるアクセル感度設定を用いて、外乱負荷トルクを推定できる。外乱負荷トルク推定は現在の道路勾配を知ることができるというメリットもあるが、むしろ適応観測器により T_w を推定するのに $\hat{T}_d$ 信号を必要とするためである。 $\hat{T}_d$ を得るのに勾配計等を利用する方法もあるがコスト面から好ましくない。

Fig.2 Identification of simulation and experiment

Fig.3 Setting method of acceleration pedal sensitivity

Fig.4 Concept of tuning the sensitivity

平坦な道路を基準とした負荷トルク線と f_0 により定まる目標線の交点での回転数が $\tilde{n}_w$ である。一定速度で走行中、道路が登坂となった場合には図4 (A) のトルク～回転数面上での負荷線が上方へ道路勾配抵抗分だけシフトするため、アクセルの踏み込み量 $\tilde{n}_w$ を一定に保っていた場合には減速する。図5は道路が登坂になった場合の運転点 (n_w, T_w) の動きを表しているが、平坦道路時に b 点にあった運転点は c 点へ向かい、 $n_w < \tilde{n}_w$ となる。また下り坂となると加速することになる ($n_w > \tilde{n}_w$)。負荷トルクの変化に依らず回転数を一定にすることも可能であるが、DBW車にも従来車と同じ特徴を持たせようとしている。外乱負荷トルクが発生した時、回転数 n_w が $\tilde{n}_w$ とずれることを利用し、 T_d は推定可能である。例えば、道路が登坂となった場合、推定外乱負荷トルクは目標線傾きと負荷線傾きの和である f_0 を用いて、 $\hat{T}_d = f_0(\tilde{n}_w - n_w)$ として得られる。ただし、一定速度で走行していない場合、つまり $\partial n_w / \partial t \neq 0$ の時は加減速項を加え、 $\hat{T}_d$ は式(1)のように得られる。

$$\hat{T}_d = f_0(\tilde{n}_w - n_w) - J \frac{\partial n_w}{\partial t} \quad (1)$$

車軸トルク T_w 信号を得るのにトルクセンサを用いるのであれば、式(1)で正確に T_d を推定できるが、自動車にトルクセンサは無いのがコスト面からも望ましいため、 T_w 信号の代わりに推定したトルク $\hat{T}_{wt}$ 信号を用いる必要があるが、ここで問題となるのは $\hat{T}_{wt}$ 信号が実際のトルク T_w 値に対して誤差を有していた場合である。その時にはF B制御が正常ではないため、目標線上に運転点 (n_w, T_w) が存在しなくなり、道路勾配が0%であっても回転数誤差を生ずる。従って、 $\hat{T}_d$ が正しく推定されなくなる。

一定速度で走行中、回転数 n_w が $\tilde{n}_w$ と一致しなくなる要因は外乱負荷トルク T_d のため、トルクテーブル内データ $\hat{T}_{wt}$ のずれのため、以上の2つであるが、都市内の道路では T_d は時間平均すればゼロとなりうることを利用し、 $\hat{T}_{wt}$ がずれているかどうか認識できると考えた。式(2)に回転数時間平均誤差 E_{na} を示す。推定外乱負荷トルク $\hat{T}_d$ は E_{na} を用いて式(3)のように得られる。

$$E_{na} = \left\{ \sum \left(\tilde{n}_w - n_w - \frac{J}{f_0} \frac{\partial n_w}{\partial t} \right) \right\} / dn \quad (2)$$

$$\hat{T}_d = f_0(\tilde{n}_w - n_w) - J \frac{\partial n_w}{\partial t} - E_{na} f_0 \quad (3)$$

ここで、 E_{na} は $\hat{T}_{wt}$ と T_w の間に誤差が生じなくなればゼロとなる。本研究では2400秒間の平均を E_{na} とした。 dn はその一定時間内のサンプリング数である。

Fig.5 Motion of operating Point when car go uphill

4. 車軸出力トルクの推定

車軸出力トルク T_w は θ, n_w, R_m の3信号と図6に示すようなトルクデータテーブルにより推定できる。図6の各格子には $(n_e, \theta, \hat{T}_e)$ のデータがそれぞれ記録されている。例えば、図中P点において $\hat{T}_{wt}$ はP点を囲む点 P_1, P_2, P_3 にあるデータを元にして式(4)のように得られる。

$$\hat{T}_{wt} = R_m R_w (a_1 R_m R_w n_w + a_2 \theta + a_3) \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{(\hat{T}_{e3} - \hat{T}_{e2})\theta_1 + (\hat{T}_{e1} - \hat{T}_{e3})\theta_2 + (\hat{T}_{e2} - \hat{T}_{e1})\theta_3}{(n_{e3} - n_{e2})\theta_1 + (n_{e1} - n_{e3})\theta_2 + (n_{e2} - n_{e1})\theta_3}$$

$$a_2 = \frac{(\hat{T}_{e3} - \hat{T}_{e2})n_{e1} + (\hat{T}_{e1} - \hat{T}_{e3})n_{e2} + (\hat{T}_{e2} - \hat{T}_{e1})n_{e3}}{(\theta_3 - \theta_2)n_{e1} + (\theta_1 + \theta_3)n_{e2} + (\theta_2 - \theta_1)n_{e3}}$$

$$a_3 = \frac{(n_{e2}\theta_3 - n_{e3}\theta_2)\hat{T}_{e1} + (n_{e3}\theta_1 - n_{e1}\theta_3)\hat{T}_{e2} + (n_{e1}\theta_2 - n_{e2}\theta_1)\hat{T}_{e3}}{(n_{e2}\theta_3 - n_{e3}\theta_2) + (n_{e3}\theta_1 - n_{e1}\theta_3) + (n_{e1}\theta_2 - n_{e2}\theta_1)}$$

しかし、テーブル内に記録されたトルクデータが正確であれば良いが、経時変化や環境変化などにより $\hat{T}_e$ に誤差が生じている場合にはテーブルデータを補正する必要がある。

テーブルデータ更新は式(4)で得られる $\hat{T}_{wt}$ と、 $\hat{T}_w$ 及び

Fig.6 Illustration of torque data table

対象系入力 θ , 出力 n_w から算出される適応観測器⁽⁴⁾の出力 ($\hat{T}_{wb}$ とする) の差を見る。つまり、 $\hat{T}_{wt} \neq \hat{T}_{wb}$ のとき、式(5)のようにテーブル内の $\hat{T}_e$ 値を修正する。

$$\hat{T}_{e, new} = \hat{T}_{e, old} + h(\hat{T}_{wb} - \hat{T}_{wt}) \left(\frac{D_{max} - D}{D_{max}} \right) \quad (5)$$

h にはテーブルを徐々に変化させるために微小値を与える(本研究では $h = 0.01$ とした)。 h を大きくすればテーブル内データの修正に要する時間が短縮されるが、大切なテーブル内データの破壊を起こすことも考えられるため、好ましくない。自動車パワートレイン系における経時変化はゆっくりであるので、 h は小さい方が望ましい。また、 D は図6におけるP点からP₁点やその他の格子点までの距離である。ある1つの運転点で $\hat{T}_{wt} \neq \hat{T}_{wb}$ となり、データテーブルに修正が必要となった時、式(5)を用いて全格子点の $\hat{T}_e$ データを更新するが、 $(D_{max} - D)/D_{max}$ により、その運転点から近い格子点でのデータ修正は大きく、遠い格子点でのデータ修正は小さくした。

以上の処理をまとめたものが図7 [A]である。図の下側の k, k_T, k_n はアクセル感度変数 f_0 及び対象系の状態量によりゲインチューニングされる。図の上側はトルク推定の処理流れを表している。図7 [B]は同じくトルク推定の時間流れである。 E_{na} 計算は常時行われるが $\hat{T}_d$ 計算は E_{na} が十分計算された t_1 から始める。また、 $\hat{T}_d$ が計算されて後、式(5)によりテーブル内のデータ更新計算を

Fig.7 Estimating of T_w, T_d and setting of accelerator pedal sensitivity

行い始めるが、更新された結果は直接制御用トルクテーブルには書き込まれずに t_2 から t_3 に至るまでの間、別の記憶装置に蓄積される。時間が t_3 となった時、蓄積されたデータは制御用のトルクテーブルに書き込まれる。また同時に、 $\hat{T}_d$ やトルク推定器の計算はストップし、 E_{na} はリセットされ再び計算を開始する。本研究の例では実質的なトルクテーブルのデータ更新は1時間20分(4800秒)に一度だけしか行われれないが、エンジン特性のゆっくりとした経時変化には有効であると考えている。

5. シミュレーション結果

T_d と T_w の同時推定を表2の走行モードで行なった。この走行モードではステップ状のアクセルの踏み込み変更を5回行ない、外乱負荷トルクは $t=300$ から道路勾配-4.28

Table2 Traveling mode of simulation

$\tilde{n}_w$ [1/s]	4.0	14.0	11.5	9.0	6.5	4.0
T_d [Nm]	0	100	0	-100	0	
R_m	1.5	0.6	1.0	1.5		
t [s]	0	100	200	300	400	500 600 700 800

Fig.8 Result of simulation when $\hat{T}_{wt}$ have error

Fig.9 Error reduction by modification of torque data table

%の下り坂、 $t=500$ から+4.28%の登坂として与えた。変速機ギア位置は運転状況の必要に応じてチェンジした。

テーブルの $\hat{T}_e$ 値が $40/R_m$ [Nm]だけ実測トルク値より大きい方向にずれているまま制御した場合のシミュレーション結果を図8に示す。アクセルペダルの感度設定は $f_0 = R_w^2 \tan(\pi/3)$ とした。 $|\hat{T}_{wt} - T_w|$ はトルク推定誤差であるが、 $\hat{T}_e$ がずれたままであるため大きい値を示している。このトルクのずれにより n_w と $\tilde{n}_w$ は一致しない。とここで、 $|\hat{T}_{wt} - T_w|$ が時間とともに変動しているのはギア比の変動によるところが大きい。

表2の800秒のモードを繰り返し、約2万秒間シミュレートした時の推定トルクの誤差の推移を図9に示す。4800秒ごとにトルクテーブルが更新されるため、そのときごとに誤差が大きく低下している。

図10は約2万秒間（テーブル更新回数4回） $\hat{T}_e$ を更新した後に、そのトルクテーブルを用いてシミュレーションした結果であるが、 $|\hat{T}_{wt} - T_w|$ はかなり小さくなっている。したがって、 n_w も f_0 で指定したアクセル感度通りの良好な時間挙動が得られている。 $t=300 \sim 360$ [s]及び $t=500 \sim 560$ [s]における $\tilde{n}_w$ と n_w のずれは道路勾配変動によるものである。

6. 結言

適応観測器、トルクデータテーブル、アクセル感度設定を組み合わせることにより、道路勾配等による外乱負荷トルクと車軸出力トルクの両信号を同時に推定可能であることが確認できた。必要なセンサはアクセルペダル踏み込み量とスロットル弁開度を計測するためのポテンシオメータと車軸回転数を計測するためのロータリーエンコーダのみである。本研究結果を利用することにより、エンジンの経時変化によらず、誤差の小さい車軸出力トルクを推定でき、したがって良好なアクセルペダル感度設定が可能である。どのような環境（山道等）を走行する場合もトルクテーブルから車軸出力トルクを推定できるが、トルクテーブルの更新については都市

Fig.10 Result of simulation after table is modified fully

内等の坂道の比較的少ない道路でのみ行なう必要があると考える。

参考文献

- (1) 守田, 高田, 機論, 59-567, C(1993-11), 3330-3335
- (2) 守田, 自動車技術, Vol.48, No.10, (1994), 13-19
- (3) 守田, 高田, 瀧山, 自動車技術会論文集, Vol.26, No.4, (1995-10), 130-135
- (4) 高田, 守田, 機論, 64-624, B(1998-8), 2710-2714