

車体加速度波形推定による変速制御手法の研究

Study of Upshift Control Method by Estimation of Acceleration Waveform

亀田 真太郎*
Shintaro KAMEDA

稲川 靖*
Yasushi INAGAWA

要 旨

オートマチックトランスミッションのアップシフト時に発生する変速ショックを抑制し、商品性を向上させるためには、変速クラッチの持つトルク出力誤差を補償する制御が必要となる。出力軸回転数の変化量から変速時に発生する車体加速度波形の推定と評価をおこない、それを基にクラッチトルク出力誤差を検知し学習補正をおこなうことで、変速ショックを抑制し、アップシフト時の商品性を向上させる制御技術を開発した。

ABSTRACT

Control that corrects the torque output deviation of shift clutches is required to suppress the shift-shock produced when automatic transmissions up-shift, and enhance product quality. Control technology was developed that serves this purpose by estimating and evaluating the vehicle acceleration waveform generated when shifting, from the variation in output shaft rotations, and then detecting the output deviation of clutch torque and performing learning correction based on that acceleration waveform.

1. 緒言

近年のオートマチックトランスミッションの多段化が進む中で、アップシフト時の変速ショックの改善が重要となってきた。多段化が進むと一定の車速に加速していく間の変速回数が増加し、変速ショックが体感されることによりドライバに不快感を与えることとなる。逆に変速ショックを体感させない加速はドライバに爽快感を与え、より一層の商品性の向上を図ることができる。実機での変速ショックのケーススタディから、入力軸の回転変化期間（イナーシャ相）でのイナーシャトルク吸収に伴う揺り返し感（以降、イナーシャショックとする）の無い車体加速度波形を実現することを目標とした。しかし、フィードフォワード（以降、F/Fとする）制御のみでは、個体ばらつきに起因するクラッチトルク出力誤差により、安定した商品性が保てない。

*四輪 R&D センター

本研究では、イナーシャショックの無い車体加速度波形を安定して実現し変速時の商品性を向上させるため、クラッチトルク出力誤差を新たなセンサの追加なく補償するアップシフト変速制御手法を開発した。

2. 研究のねらい

平行軸歯車式オートマチックトランスミッション⁽¹⁾におけるアップシフト時のトルク伝達式を示す。

開放側クラッチから締結側クラッチへのトルク伝達経路の切り替え期間（トルク相）でのトルク伝達式は式（1）、（2）となる。

$$T_{in} = T_{of} + T_{con} \quad (1)$$

$$T_{out} = (T_{of} \cdot i_{of} + T_{con} \cdot i_{on}) \cdot i_f \quad (2)$$

Nomenclature

 T_{in} : Input torque [Nm] T_{of} : Opening side clutch torque capacity [Nm] T_{con} : Conclusion side clutch torque [Nm] T_{out} : Output shaft torque [Nm] i_{of} : Opening side gear ratio [-] i_{on} : Conclusion side gear ratio [-] i_f : Final reduction gear ratio [-]

締結側のクラッチトルクを増加，開放側のクラッチトルクを減少させて式(3)の関係となると，イナーシャ相が開始する。

$$T_{con} > (T_{of} + T_{in}) \quad (3)$$

イナーシャ相でのトルク伝達式は式(4)，(5)となる。

$$T_{in} = T_{con} - T_{of} + J_{in} \cdot \dot{\omega}_{in} \quad (4)$$

Nomenclature

 T_{of} : Opening side clutch torque [Nm] J_{in} : Input shaft inertia [kg·m²] $\dot{\omega}_{in}$: Input shaft angular acceleration [rad/s²]

$$T_{out} = (T_{con} \cdot i_{on} - T_{of} \cdot i_{of}) \cdot i_f \quad (5)$$

ここで，イナーシャ相開始以降に開放側クラッチトルクが0であるとすると，式(6)

$$T_{out} = T_{con} \cdot i_{on} \cdot i_f \quad (6)$$

となり，イナーシャ相中の出力軸トルクは締結側クラッチトルクにより決定される。

イナーシャショックの無い車体加速度波形を作り出すために，変速クラッチトルクとエンジントルクすなわちクラッチ入力トルクの協調による制御手法^{(2), (3)}が一般的に

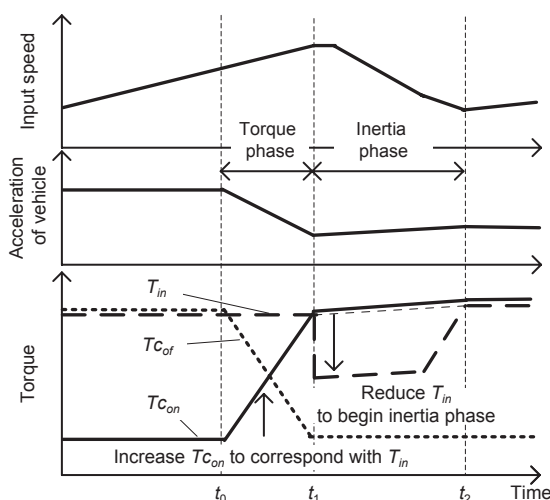


Fig. 1 Concept of reducing fluctuation of longitudinal acceleration during inertia phase

適用されている。Fig. 1にその概念図を示す。トルク相(時間 t_0 - t_1)では，終了時(時間 t_1)にクラッチ入力トルクと同値となるよう締結側クラッチトルクを増加させ，その増加分だけ開放側クラッチトルクを減少させる。そしてクラッチトルクの切り替えが完了した後にクラッチ入力トルクを減少させることにより，式(3)の条件を満たし入力軸の回転変化を開始する。

また，イナーシャ相(時間 t_1 - t_2)では締結側クラッチトルクを変速終了後のクラッチ入力トルクに対して滑らかにしながら出力することで，イナーシャショックの無い車体加速度波形となる。

しかし，実際にはクラッチトルクは初期公差などの個体ばらつきが原因のクラッチトルク出力誤差をもつ。そのため，クラッチ入力トルクを基にしたクラッチトルクのF/F制御によりイナーシャショックの無い車体加速度波形を作り出す場合，そのクラッチトルク出力誤差によりイナーシャショックが発生する。すなわち変速ショックにもばらつきが生じ，安定した商品性を確保することができない。例えば，クラッチトルクが指令値よりも低い場合はトルク相でのクラッチトルク不足によりエンジン回転の吹けあがりなどの事象が発生することになり，指令値よりも高い場合はイナーシャショックを発生させることとなる。

また，そういったクラッチトルク出力誤差は油圧センサやトルクセンサの追加により検出が可能となると考えられるが，コストやウェイトの増加につながる。

従来，トルクコンバータの特性式を利用して入力軸の回転変化率からイナーシャ相中の出力軸トルクを推定し変速制御に用いる手法が考案されている^{(4), (5)}。しかし，クラッチ入力トルクの減少により回転変化を開始する場合，クラッチトルク出力誤差を検出するためには過渡的なクラッチ入力トルクの減少量を精度よく推定する必要がある。そこで，式(6)の関係からクラッチトルクのみを出力軸トルクから推定することが望ましい。

このような背景から本研究では新たなセンサの追加なく，クラッチトルク出力誤差を補償し，イナーシャショックの無い波形を安定して実現することを目的として，

(1) 既存の回転センサ信号からの変速中の車体加速度波形の推定

(2) その推定波形によるイナーシャショックの評価を基にして，車体加速度波形を目標波形に近づけるクラッチトルクの学習補正

をおこなう。

3. クラッチトルク学習制御

3.1. 制御概要

クラッチトルクと走行抵抗の関係式は式(7)で示される。

$$T_{out} = T_{rl} + J_v \cdot \dot{\omega}_v \quad (7)$$

ここで出力軸トルクが目標値となる場合を考えると,

$$\hat{T}_{out} = T_{rl} + J_v \cdot \hat{\dot{\omega}}_v \quad (8)$$

$$T_{out} - \hat{T}_{out} = J_v \cdot (\dot{\omega}_v - \hat{\dot{\omega}}_v) \quad (9)$$

式(6)より,

$$T_{con} - \hat{T}_{con} = J_v \cdot (\dot{\omega}_v - \hat{\dot{\omega}}_v) \quad (10)$$

$$J_v' = J_v / (i_{on} \cdot i_f) \quad (11)$$

となるので,

$$\Delta T_{con} = J_v' \cdot \Delta \dot{\omega}_v \quad (12)$$

となる.

Nomenclature

T_{rl} : Road load torque [Nm]

J_v : Vehicle inertia [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

$\dot{\omega}_v$: Output shaft angular acceleration [rad/s^2]

$\hat{T}_{out}$: Target output torque [Nm]

$\hat{\dot{\omega}}_v$: Target output angular acceleration [rad/s^2]

$\hat{T}_{con}$: Target clutch output torque [Nm]

ΔT_{con} : Output deviation of clutch torque [Nm]

$\Delta \dot{\omega}_v$: Deviation of output angular acceleration [rad/s^2]

よって, Fig. 2 に示すように, クラッチトルク出力誤差は, 走行抵抗の影響を受けることなく, 車体慣性質量と出力軸角加速度すなわち車体加速度の目標波形と実波形の偏差から求めることができる.

この関係を利用して, 本研究のクラッチトルク学習制御では Fig. 3 (a) のように, クラッチ入力トルクに基づく F/F 制御の結果出力された車体加速度波形から, クラッチトルク出力誤差を検出する. そして, Fig. 3 (b) のように次回変速時の F/F 制御出力値を補正することで車体加速度波形を目標波形に近づけていく.

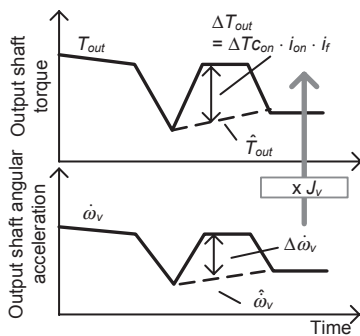


Fig. 2 Relation between output shaft torque and output angular acceleration deviation

3.2. クラッチトルク学習制御システムの構成

クラッチトルク学習制御システムの構成を Fig. 4 に示す.

制御システムはクラッチ入力トルク推定に基づく F/F 制御部と, 車体加速度波形評価部および学習補正クラッチトルク算出部で構成する.

3.2.1. F/F 制御部

F/F 制御部には Fig. 1 で示した制御概念から, クラッチ入力トルク推定値に基づきトルク相, イナーシャ相の目標とする車体加速度波形を実現するための, 開放, 締結側双方の必要クラッチトルクを算出する.

3.2.2. 車体加速度波形評価部

車体加速度波形評価部では, 車体加速度波形の推定をおこない, 推定波形を基にクラッチトルク出力誤差の評価値を算出する.

車体加速度波形の推定は, 既存のカウンタシャフトの回転ピックアップからのパルス信号を基におこなう.

回転ピックアップからのパルス信号周期から回転数を算出し, 微分処理をおこなうことで角加速度を算出する. しかし, 単純に微分処理をおこなうだけでは, パルス検出に用いる変速ギヤの振動に伴うノイズ等により, 出力軸トルクの変動量を評価するのには不適となる. 本研究では, 実車で計測した変速中の出力軸トルク波形および車体加速度

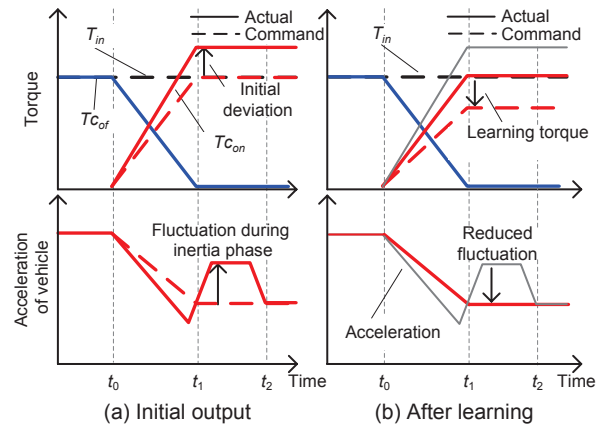


Fig. 3 Concept of learning control for reducing fluctuation of longitudinal acceleration during inertia phase

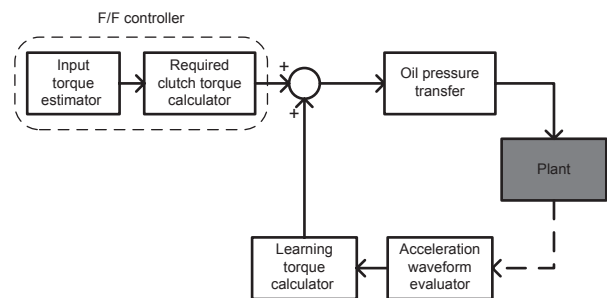


Fig. 4 System diagram of clutch torque learning control for experiment

波形の周波数特性を基に、変速中のトルク変動量を検出することに適したローパスフィルタを設定した。そして微分処理して得られる角加速度をそのローパスフィルタに透過させることで車体加速度波形推定値を得る。

Fig. 5 に式 (7) の関係から加速度波形推定値を出力軸トルクに換算した結果と、実測した出力軸トルク波形の比較を示す。実測トルク波形に対して推定波形が同様の傾向を示すことから、推定波形を用いてイナーシャショックの評価が十分におこなえると考えた。

また、イナーシャショックの無い車体加速度波形を実現するためには、トルク相終了点すなわちイナーシャ相初期での締結側クラッチトルクとクラッチ入力トルクを一致させることが重要となる。イナーシャ相初期での締結側クラッチトルクがクラッチ入力トルクに対して過多の場合、式 (2)、式 (3) の関係からトルク相での引き込みトルクが増加する。また式 (4) の関係からイナーシャ吸収トルクが発生する。この引き込みトルクの増加量とイナーシャ吸収トルクの発生量がイナーシャショックの増大につながる。よって、学習制御の対象をイナーシャ相初期のクラッチトルク出力誤差として、それにより発生する車体加速度波形推定値の変化量を評価する。

Fig. 6 にイナーシャ相初期評価値の算出手法を示す。トルク相の車体加速度波形推定値の最小点と変速終了後の車

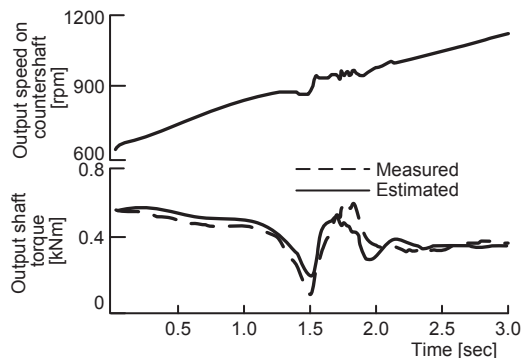


Fig. 5 Comparison of measured and estimated output shaft torque

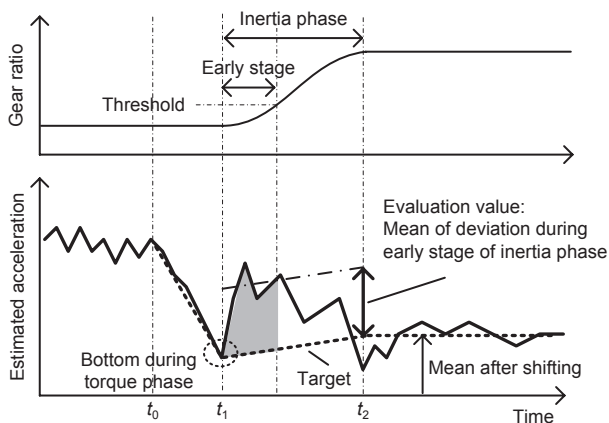


Fig. 6 Evaluation of deviation during early stage of inertia phase

体加速度波形推定値を直線的につなぐ波形を目標波形として設定する。そして、あるギヤレシオの変化率に達成するまでをイナーシャ相初期区間として、車体加速度波形推定値と目標波形の偏差の平均値をイナーシャ相初期評価値とする。

3.2.3. 学習補正クラッチトルク算出部

学習補正クラッチトルクは、イナーシャ相初期評価値をその収束目標値と大小比較し、前回学習補正クラッチトルクへの加減算により積算量として算出する。学習1回当たりの加減算量は固定量でおこない、クラッチトルク出力誤差の最大値に対して目標の収束回数で除算した値を設定する。

4. 実機確認

4.1. 実験条件

実験は実車走行でおこない、実験条件は以下のように設定した。

- (a) 変速モードは、変速前後の駆動力差が大きく変速ショック商品性が課題となる1-2アップシフトとした。
- (b) クラッチ入力トルク条件を限定するため、アクセルペダル開度も一定値とし、あらかじめ設定されているシフトマップにしたがい、同じ変速ポイントでの学習を繰り返した。

4.2. 加速度波形推定による評価の妥当性

加速度センサにより計測した車体加速度と、前述した車体加速度波形推定値のそれぞれからイナーシャ相初期波形評価値を算出した結果を Fig. 7 に示す。

それぞれのイナーシャ相初期波形評価値に相関がみられることから、車体加速度波形推定値が加速度センサの代替として十分に機能を果たすことが確認できた。

4.3. クラッチトルク学習の進行と収束性

F/F 制御値に対して、初期のクラッチトルク出力誤差を +40 Nm 与えた場合の学習結果を Fig. 8 に示す。

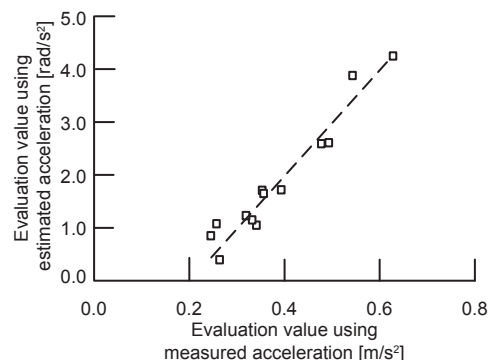


Fig. 7 Comparison of evaluation value using measured and estimated acceleration

収束の目標学習回数は 20 回として、学習一回当たりの加減算量を設定した。また、クラッチトルク出力誤差が +10 Nm 相当となる値を収束の目標値とした。

学習初期 A 点 (Fig. 9) では、クラッチトルク出力誤差のため、クラッチトルクによるイナーシャトルク吸収で回転変化が開始しイナーシャショックが発生した。学習

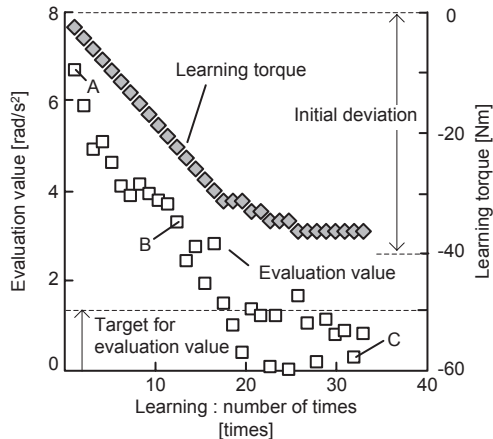


Fig. 8 Results of clutch torque learning control

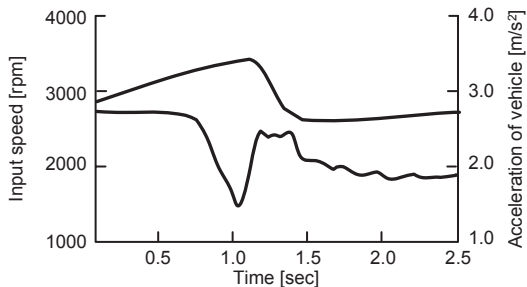


Fig. 9 Input speed and acceleration at A

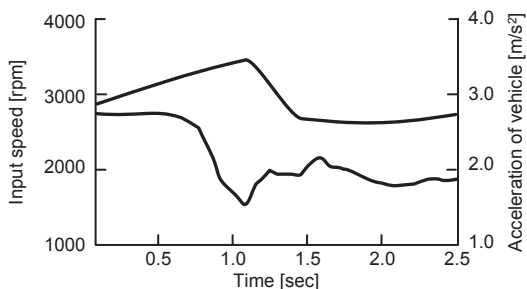


Fig. 10 Input speed and acceleration at B

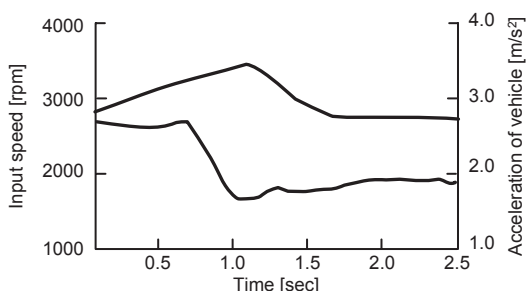


Fig. 11 Input speed and acceleration at C

過渡 B 点 (Fig. 10) では、A 点に対してクラッチトルクの学習がおこなわれ、イナーシャショックの減少が確認できた。学習収束後 C 点 (Fig. 11) では、クラッチトルクによるイナーシャ吸収はおこなわれず、イナーシャショックの発生はなく、目標波形への収束が確認できた。この結果から、クラッチトルク出力誤差をおおよそ 10 Nm の範囲に収束させることができ、したがって車体加速度波形推定を用いたクラッチトルク学習制御により、イナーシャショックの無い変速ショック波形を安定して実現できることがわかった。

また Fig. 9 から Fig. 11 での入力軸回転に着目すると、学習収束に伴いイナーシャ相時間が 0.2 sec 延長している。これはクラッチトルク学習のみをおこなっているため、クラッチ入力トルクの減少量が初期設定状態のままであり、式 (4) の関係から入力軸回転変化が遅くなったためである。イナーシャ相時間が延長すると、間延び感となり商品性の低下や、発熱によるクラッチ耐久性への影響が懸念される。そのため、クラッチトルクの学習補正の分、クラッチ入力トルクの減少量も同時に学習することで、イナーシャ相時間の目標時間への収束も可能となると考えられる。

5. まとめ

新たなセンサの追加なく、アップシフト時の商品性を向上させるため、

- (1) カウンタシャフト回転センサ信号に微分処理および適切なフィルタ処理をおこなうことで変速時の車体加速度波形推定値を得た。
- (2) その推定波形を基にイナーシャ相初期区間でのクラッチトルク出力誤差を評価する手法を構築した。
- (3) 評価結果からクラッチトルク出力誤差を補正し、イナーシャショックの無い車体加速度波形を安定して実現する学習制御手法を開発した。

参考文献

- (1) 自動車技術会:自動車技術ハンドブック、＜第 4 分冊＞設計 (パワートレイン) 編, p.246-248(2005)
- (2) Tokura,T., Asami,T., Hasegawa,Y., Sugimura,T., Kono,K., Aoki,K.: Development of Smooth Up-Shift Control Technology for Automatic Transmissions with Integrated Control of Engine and Automatic Transmission, SAE Paper, 2007-01-1310(2007)
- (3) Najork,R., Steinberg,I.: The GETRAG PowerShift® Transmission 6DCT470 (TC-SST) of Mitsubishi Lancer Evolution and Ralliart, JSAE No.05-08 Symposium, p.38-43(2008)

- (4) Minowa,T., Ochi,T., Kuroiwa,H., Liu,K.: Smooth Gear Shift Control Technology for Clutch-to-Clutch Shifting, SAE Paper, 1999-01-1054(1999)
- (5) 射場本正彦, 内田信, 黒岩弘, 箕輪利通, 佐藤和彦: タービンセンサを用いないトルクフィードバック方式変速過渡制御, 自動車技術会前刷集, No.954, p.57-60(1995)

■ 著 者 ■



亀田真太郎



稲川 靖