

モータアシストAMTの駆動力制御における 路面勾配の影響に対する考察

藤井 毅 内田 利之 堀 洋一

A review for Influence of Gradient upon Driving Force Control of Motor-Assisted AMT

Fujii Takeshi, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori (Tokyo University)

The power density of super capacitors gets increasing but still less energy capacity than the other conventional batteries. On this paper, Motor-assisted AMT system is proposed as one of the applications of them on cars with hybrid system. Influence of gradient upon driving force control is evaluated and provision against it is proposed.

キーワード：ハイブリッド、キャパシタ、AMT、モータ、トルク、アシスト

Keywords：Hybrid, Capacitor, Automated Manual Transmission, Motor, Torque, Assist

1. はじめに

自動車の歴史において、特にその創成期においては幾多の電気自動車が存在した。しかし、少なくとも現状において、電気自動車は一部の特殊用途の車両にのみ用いられるに留まっている。その理由の一つが主に航続距離や動力性能の面で、内燃機関を搭載する自動車を上回ることができなかったことである。しかし、近年の地球環境の保護に対する関心の高まりや石油価格の高騰をうけ、自動車の燃費性能向上や排気性能向上に対する市場の要求が高まり、電気自動車の効率の良さや排気のクリーンさが見直されるようになってきた。そこで、一台の自動車に内燃機関と電気モータという二種類の駆動機関を搭載し、内燃機関駆動の自動車と電気自動車の双方の良いところを引き出そうというコンセプトの、いわゆるハイブリッド自動車の研究・開発が現在盛んに行われている。

一方で、近年の材料技術やパワーエレクトロニクス技術の向上により、蓄電要素の一種であるキャパシタの大容量化が著しく進展し、自動車の駆動電源として用いることができるレベルにまで達してきた。キャパシタは従来の化学電池と比較して、蓄えられるエネルギーの総量は小さいものの、瞬時に大エネルギーを放出することが可能である。そのためハイブリッド自動車の駆動電源として大容量キャパシタを用いることで、内燃機関とキャパシタの互いの特徴を相補し、より性能の高いハイブリッド車両を成立させることができるのではないかと期待されている⁽¹⁾。

筆者らは本システムの制御法と性能について、さまざまな検討を行ってきた。本研究では、路面勾配が提案する駆

動力制御や充放電制御に及ぼす影響を考察し、それらに対する策を提案する。

2. システムの構成

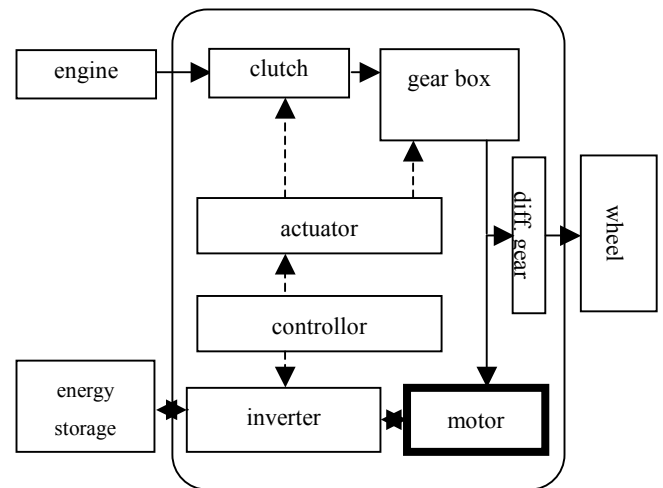


図1 モータアシストAMT構成図

Fig. 1. Construction of motor-assisted AMT.

本研究で提案するモータアシストAMTは、ギアボックスの出力軸の後位に、変速中のトルク遮断を補償するためのモータを取り付けるというシステムである⁽²⁾。その構成を図1に示す。

本システムの場合、エンジンのトルクが変速機構により遮断されている間も、モータが単独で出力軸を駆動するこ

とができるため、変速前後で連続した加減速を行うことができる。同時に、エネルギー回生においては、変速状態に寄らず、たとえニュートラル状態であっても減速時のエネルギー回収も行うことが可能である。

このようなアプリケーションを前提とすると、モータを駆動する電源には、変速中という短い時間（1秒程度）に大出力を放出することができるという仕様が要求される。そこで本研究では、このシステムの電源にキャパシタを使用することを想定した検討を行う。

3. オブザーバ演算による駆動力・充放電制御手法

前章で紹介したようなモータアシスト AMT を実現する場合、ドライバの加減速要求に応える駆動力制御と、エネルギー効率を高めるための充放電制御の両立が必要不可欠である。筆者らはこれを簡便かつ精度よく行うために、トルクオブザーバを用いた制御手法を提案してきた^[5]。そのトルク制御構成を図2に示す。

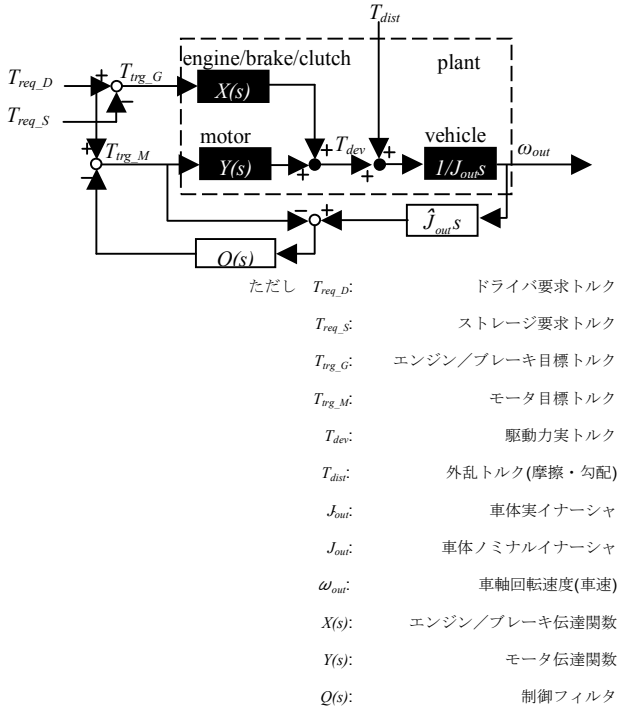


図2 外乱トルクオブザーバの構成

Fig. 2. Construct of disturbance torque observer.

ここで、ドライバ要求トルク T_{req_D} とは、アクセルペダルやブレーキペダルの踏み込み量から計算される加速要求トルクであり、ストレージ要求トルク T_{req_S} とは、ストレージデバイスの放電深度から計算される充放電要求トルクである。キャパシタをエネルギーストレージデバイスとして利用することで、放電深度をその電圧より推定することを想定している。

このとき制御入力である T_{req_D} 、 T_{req_S} および外乱 T_{dist} から加速度 ω_{out} への伝達関数は、(1)のようにあらわされる。

$$\dot{\omega}_{out} = \frac{Y + (1-Q)X}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{req_D} - \frac{(1-Q)X}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{req_S} + \frac{(1-Q)}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{dist} \quad (1)$$

仮にクラッチが切り離されて $X=0$ となってしまったとすると、(1)式は(2)のようにあらわされる。

$$\dot{\omega}_{out} = \frac{Y}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{req_D} + \frac{(1-Q)}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}FY} T_{dist} \quad (2)$$

$F(s)$ はローパスフィルタなので定常的には1であることを考えると第2項も0になる。すなわち(2)式は、エンジントルクがクラッチなどにより遮断されたとしても、車体加速度はドライバ要求トルクに追従するということを示している。

また、応答の違い $X(s)$ とハイパスフィルタに相当する $(1-F(s))$ の積を0と看做すると、(1)式はさらに簡略化され、

$$\dot{\omega}_{out} = \frac{Y}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{req_D} \quad (3)$$

と書き直すことができる。これは、ドライバのトルク要求に対する車体の加速度応答がモータの伝達関数 $Y(s)$ のみに依存するということを示している。一般にエンジンの応答よりも電気モータの応答のほうが十分高速であることから、本システムを適応することでモータアシストなしの場合に比べて加速応答を高めることができるということを示唆している。さらに摩擦や勾配による外乱 T_{dist} も打ち消され、外乱がない場合と同様の加速をすることを示している。

また、モータ出力トルク T_{trg_M} は(4)式のようにあらわされる。

$$T_{trg_M} = \frac{J_{out} - \hat{J}_{out}QX}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{req_D} + \frac{\hat{J}_{out}QX}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{req_S} + \frac{\hat{J}_{out}Q}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QY} T_{dist} \quad (4)$$

このことから、(2)や(3)と同様に考えると、モータのトルクはストレージ要求トルク T_{req_S} および外乱 T_{dist} の和にゆっくり追従し、クラッチが切り離されたときには第1項が現れ、車体の駆動力すべてをモータが負担するということを示唆している。

本提案を適応した車両の加速模擬波形を図 3 に示す。ただし勾配は 0 であると仮定している。モータトルクとエンジントルクが強調することにより、連続的な加速が実現できると同時に、エネルギーストレージデバイスであるキャパシタの充放電制御も狙い通りに行うことができるということが示されている。

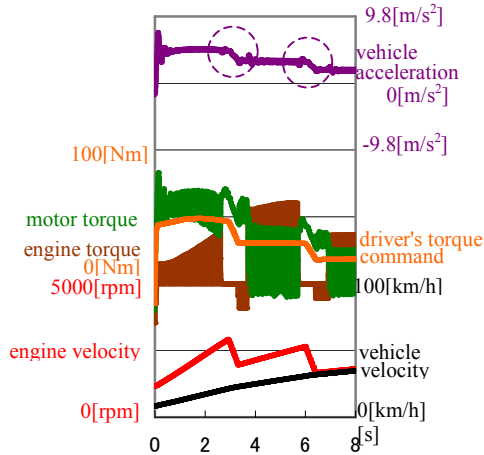


図 3 モータアシスト AMT 模擬走行波形①(平坦)
Fig. 3. Simulation result of driving ① (flat road).

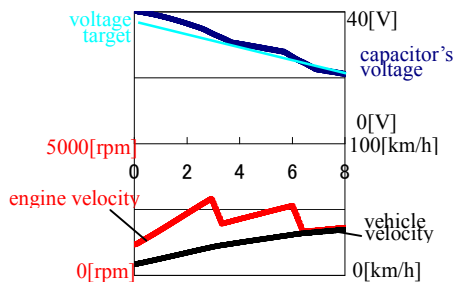


図 4 モータアシスト AMT 模擬走行波形①(平坦)
Fig. 4. Simulation result of driving ① (flat road).

4. 路面勾配による影響とその補正

(4)式ですでに述べているように、本ロジックを用いると、勾配などの周波数の低い外乱が負荷された場合、モータ出力トルク T_{trg_M} はモータのトルクはストレージ要求トルク T_{req_S} および外乱 T_{dist} の和にゆっくり追従し、総トルクは、モータの応答性の速さに依存して車両全体のトルク目標値 T_{req_D} に追従するので、ドライバはあたかも平坦路を走っているかのような加速を得ることができる。それは一方ではメリットとも考えられるが、反面エネルギー制御の面では目標の充放電量に追従しなくなることが意味しており、要求される性能が満たされなくなることが懸念される。

前章で示した例と同一条件の車両に、3%の勾配を登らせたことを想定した模擬走行波形を図 5、図 6 に示す。図 3 と同様の加速度波形を描いているが、モータの負荷が大きいため、キャパシタ電圧が目標に追従しなくなっている。

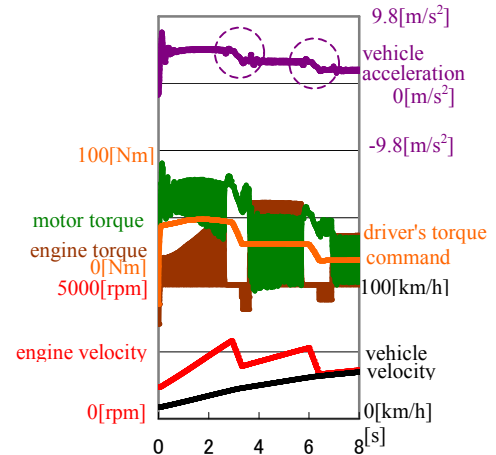


図 5 モータアシスト AMT 模擬走行波形②(登坂)
Fig. 5. Simulation result of driving ② (up hill).

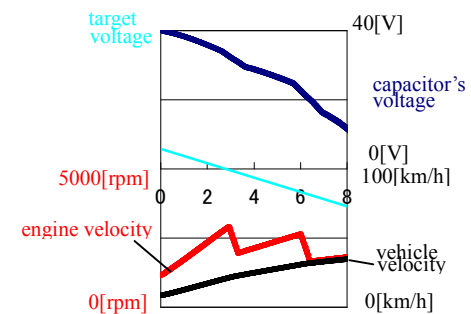


図 6 モータアシスト AMT 模擬走行波形②(登坂)
Fig. 6. Simulation result of driving ② (up hill).

これを解決するために、外乱の中から勾配などの比較的周波数の低い外乱を取り出す第 2 の外乱トルクオブザーバ $\hat{T}_{dist}$ を図 7 のように定義する。

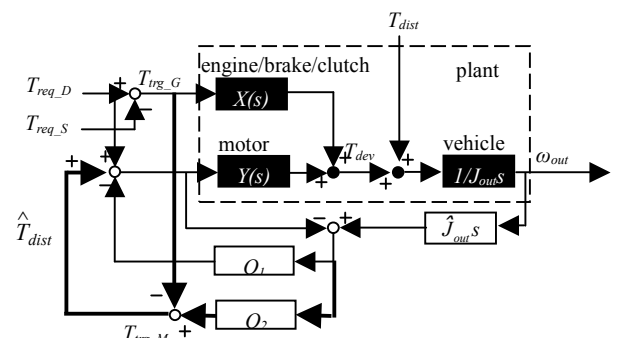


図 7 勾配補正外乱トルクオブザーバの構成
Fig. 7. Construct of disturbance torque observer with gradient adjustment.

ここで、 Q_2 は Q_1 よりも時定数の大きいローパスフィルタである。このような制御系を組んだ場合、 T_{req_D} 、 T_{req_S} および外乱 T_{dist} から加速度 ω_{out} への伝達関数は、(5)式のようにあらわされる。

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_{out} = & \frac{(1-(Q_1-Q_2))X}{J_{out}(1-(Q_1-Q_2))+\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)Y}T_{req_D} \\ & + \frac{Y-(1-(Q_1-Q_2))X}{J_{out}(1-(Q_1-Q_2))+\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)Y}T_{req_S} \\ & + \frac{(1-(Q_1-Q_2))}{J_{out}(1-(Q_1-Q_2))+\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)Y}T_{dist}\end{aligned}\quad (5)$$

この式は、 $Q_1 \rightarrow 1$ 、 $Q_2 \rightarrow 1$ とすると

$$\dot{\omega}_{out} \rightarrow \frac{X}{J_{out}}T_{req_D} + \frac{Y-X}{J_{out}}T_{req_S} + \frac{1}{J_{out}}T_{dist} \quad (6)$$

となることから、車体の加速度がドライバの要求トルクと外乱トルクの差に追従することを示している。

また、エンジンやモータなどのトルク要素の総トルクを意味する T_{req_D} は

$$\begin{aligned}T_{dev} = & \frac{(J_{out}-\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2))X}{J_{out}(1-(Q_1-Q_2))+\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)Y}T_{req_D} \\ & + \frac{J_{out}(1-X)+\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)X}{J_{out}(1-(Q_1-Q_2))+\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)Y}T_{req_S} \\ & - \frac{\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)}{J_{out}(1-(Q_1-Q_2))+\hat{J}_{out}(Q_1-Q_2)Y}T_{dist}\end{aligned}\quad (7)$$

と計算され、 $Q_1 \rightarrow 1$ 、 $Q_2 \rightarrow 1$ とすると $T_{dev} \rightarrow T_{req_D}$ となり、これがドライバ要求トルクに追従することがわかる。

Q_1 に $\tau=20[\text{ms}]$ 、 Q_2 に $\tau=2500[\text{ms}]$ の一次遅れフィルタを当てはめ、3%勾配を登坂することを走行波形を模擬した走行波形を図 7、図 8 に示す。

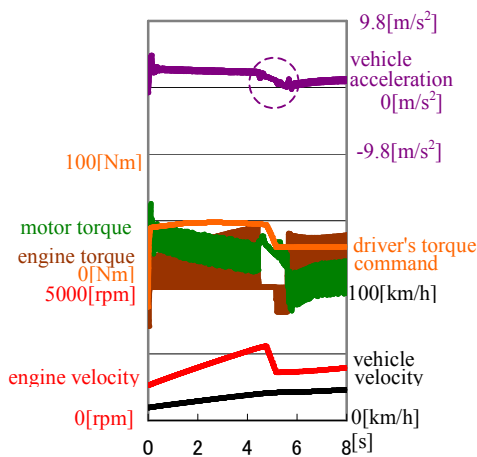


図 8 モータアシスト AMT 模擬走行波形③(登坂)

Fig. 8. Simulation result of driving ③ (up hill).

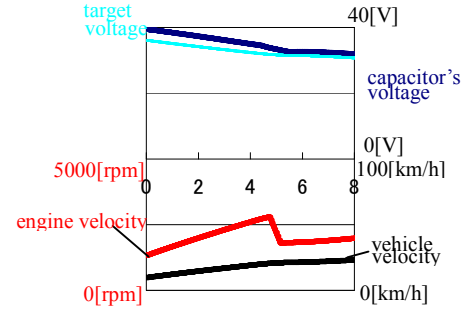


図 9 モータアシスト AMT 模擬走行波形③(登坂)

Fig. 9. Simulation result of driving ③ (up hill).

図 6 と比較するとわかるように、同じ勾配を想定した実験において、ストレージ電力を示すキャパシタ電圧が目標電圧に収束するように走行できている。これは第 2 の外乱オブザーバを用いて勾配に相当する外乱を補償することができるためである。一方で変速中の連続的な加速度も達成できている。これは変速自体が第 2 のオブザーバの時定数に比べて十分早いと、勾配外乱とみなされてしまう前に変速が終了するためである。

5. まとめ

キャパシタと内燃機関を組み合わせたハイブリッド自動車のシステムの一つとして、AMT との組み合わせを提案し、その成立性と駆動力の制御方法に対して検討を行った。

その結果、平坦な路面では駆動力と充放電の制御の両立が可能であることが確かめられたが、勾配路では勾配を打ち消すようなモータトルクを発生しようとしてしまうため、充放電制御が崩れてしまうことがわかった。

外乱の中から周波数の低い勾配成分を取り除くための第 2 のオブザーバを構築することで、勾配路を走行する場合においても駆動力と充放電制御の両立が行える見込みがあることが確認された。

今後は実験車両を製作してその効果を検証し、更なる性能の向上や問題点の解決を目指すことを目標としている。

文 献

- (1) 佐々木：「キャパシタハイブリッドバスシステムの開発(第 2 報)：キャパシタハイブリッドシステムの特徴・改善・可能性」，自動車技術会論文集，
- (2) 曾我：「モータ式オートメテッドマニュアルトランスミッションの開発」，自動車技術，Vol.58，
- (3) 藤井：「大容量キャパシタを用いたモータアシスト AMT の駆動力制御」，電気学会自動車研究会，VT07-04,2007/4
- (4) 藤井：「大容量キャパシタを用いた EV の効率的充放電制御の検討」，電気学会自動車研究会，VT07-12,2007/12
- (5) 藤井：「大容量キャパシタを用いたモータアシスト AMT の駆動力と充放電の統合制御」，電気学会産業応用部門大会，2-58,2008/8
- (6) H.D. Lee：「Advanced Gear Shifting and Clutching Strategy for a Parallel Hybrid Vehicle」，IEEE Industry Applications Magazine，2000/11.