

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

藤井 毅 内田 利之 堀 洋一（東京大学）

Driving Force Control of Motor-Assisted AMT with Super Capacitor

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

Abstract

The super capacitors have more power but less capacity than conventional batteries. Motor-assisted AMT system is proposed as one of the applications of them on cars with hybrid system. Constructing of the controller with disturbance torque observer logic can produce continuous acceleration without any additional sensors.

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. 序文

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、主に航続距離や動力性能の面で、当時の内燃機関を搭載する自動車を上回ることができなかつたため、次第に淘汰され、一部の特殊用途の車両にのみ用いられるようになっていった。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受け、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⁾。

本研究では、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と呼ばれる自動変速機との組み合わせを提案し、その成立性と制御方

法に対して検討を行う。

2. システムの構成

2.1 従来型 AMT⁽²⁾ AMTとは、古くから存在するマニュアル式トランスミッションに、モータやソレノイドなどのアクチュエータを付加することでシフト機構やクラッチ機構を自動化した変速機の総称である。その代表的な構成例を図1に示す。

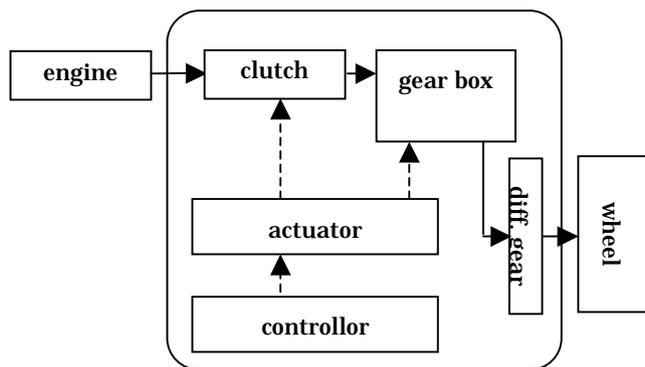


図1 従来型 AMT 構成図

Fig. 1. Construction of conventional AMT.

AMTは流体式トルクコンバータを用いず、クラッチ・ブレーキ類の摩擦要素も1枚（あるいは2枚）で済むため、本質的に効率の良い変速機であるとして、近年注目を集めている。

しかし、従来のマニュアルトランスミッションをただ自動化しただけでは、変速のためにクラッチを遮断してしまうと、エンジンの出力を駆動軸に伝えることができないという構造上の問題のため、連続的な加減速を行うことができない。

2.2 モータアシスト 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。その構成を図 2 に示す。

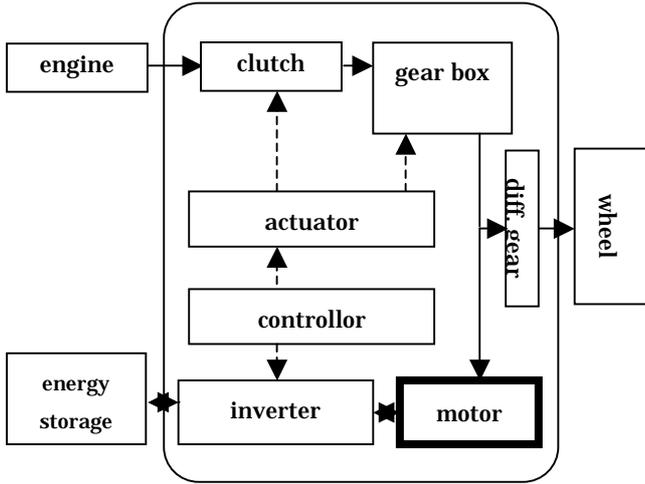


図 2 モータアシスト AMT 構成図

Fig. 2. Construction of motor-assisted AMT.

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. シミュレーションモデルの構築

モータアシスト AMT の基礎検討を行うため、計算機によるシミュレーションモデルを構築した。本章ではその計算方法を説明する。

3.1 ダイナミクスモデル 変速中である場合と変速中でない場合において、駆動トルクやイナーシャなどの運動状態が明確に分かれるため、場合分けを用いたダイナミクス解析を行う。

3.1.1 変速中以外の場合 直進方向のみを考え、簡単

のためタイヤと路面間の滑りはないものとする。このとき、変速中でない場合はエンジンと駆動軸は変速機により剛に結合されるので、全てをまとめて一つの剛体とみなすことが可能である。車体の質量を $M(\text{kg})$ 、タイヤの動半半径を r_{tire} 、タイヤの回転イナーシャを I_{tire} 、出力軸およびモータの回転イナーシャを I_{out} 、エンジンの回転イナーシャ I_{eng} をとみると、 N 速選択時の出力軸周り等価慣性イナーシャ $I(N)$ は以下のように表すことができる。

$$I(N) = (M \cdot r_{\text{tire}}^2 + 4 \cdot I_{\text{tire}}) \cdot \rho_{fd}^2 + I_{\text{out}} + I_{\text{eng}} / \rho(N) \quad \dots (1)$$

ただし、 ρ_{fd} : デファレンシャルギア減速比
(N): 変速機 N 段ギア減速比

したがって、出力軸の回転速度を $\dot{\omega}_{\text{out}}$ とおくと、運動方程式は以下のように記述することができる。

$$\dot{\omega}_{\text{out}} = (\rho(N) \cdot T_{\text{eng}} + T_{\text{mot}} + T_{\text{frc}}) / I(N) \quad \dots (2)$$

ただし、 T_{eng} : エンジン出力トルク
 T_{mot} : モータ出力トルク
 T_{frc} : 走行抵抗成分トルク

また、エンジン回転速度 ω_{eng} は、式(3)で与えられる。

$$\omega_{\text{eng}} = \rho(N) \cdot \omega_{\text{out}} \quad \dots (3)$$

3.1.2 変速中の場合 同じく直進方向のみを考え、簡単のためタイヤと路面間の滑りはないものとする。このときの出力軸周り等価慣性イナーシャ $I(0)$ は、以下のように表すことができる。

$$I(0) = (M \cdot r_{\text{tire}}^2 + 4 \cdot I_{\text{tire}}) \cdot \rho_{fd}^2 + I_{\text{out}} \quad \dots (4)$$

したがって、出力軸エンジンのクランクシャフト回転速度を $\dot{\omega}_{\text{eng}}$ とおくと、運動方程式は以下のように記述することができる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_{\text{eng}} \\ \dot{\omega}_{\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/I_{\text{eng}} & 0 \\ 0 & 1/I(0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{\text{eng}} \\ T_{\text{mot}} + T_{\text{frc}} \end{pmatrix} \quad \dots (5)$$

3.1.3 変速の判定 変速判定は、モデル内に構築された変速制御装置により管理する。仮想ドライバの操作するアクセルペダルの踏み込み量とダイナミクスにより演算される車速の大きさを引数として、組み込まれた変速線を元に変速すべきか否かを判定し、モデル内の変速機を切り替える。変速線の一例を図 3 に示す。

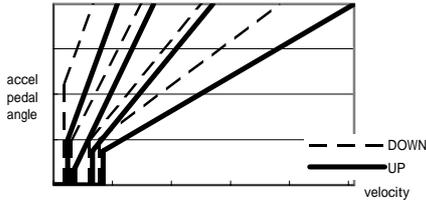


図3 変速線の例

Fig. 3. Example of shift schedule.

同時にこの変速制御装置の指示に従い、シミュレーションモデル内で使用するダイナミクスモデルを、<3.1.1>の1自由度モデルと<3.1.2>の2自由度モデルのいずれを使うべきかを判定させている。

3.2 電気回路モデル⁽³⁾ モータには円筒型の永久磁石同期モータを使うこと想定してモデル化を行う。このとき、回転子磁束方向を d 軸、それに直交する方向を q 軸と置き、回転座標系 d 軸、q 軸から見た回路方程式を立てると、式(6)、が成り立つことが知られている。

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r & -\omega_{out} \\ \omega_{out} & -r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} v_d \\ v_q - \omega_{out} \Phi_0 \end{pmatrix} \quad \dots (6)$$

- ただし、 i_d, i_q : d, q 軸方向電流
- v_d, v_q : d, q 軸方向電圧
- r : 電気子巻線抵抗
- L : 巻線インダクタンス
- Φ_0 : 永久磁石磁束

また、電力損失のない理想的なインバータを仮定すると、電源から放出するエネルギーとモータが消費するエネルギーが等しくなければならないことから、式(7)が成立する。

$$v_c i_c = P(v_d i_d + v_q i_q) \quad \dots (7)$$

- ただし、 i_c : 電源電流
- v_c : 電源電圧
- P : 同期モータ極数

本研究の場合、電源にはキャパシタを使用することを考えているため、「キャパシタ端子間電圧 v_c のダイナミクス」は i_d, i_q, v_c を用いて式(8)の形で表現することができる。

$$\dot{v}_c = \frac{i_c}{C} = \frac{N}{C v_c} (v_d i_d + v_q i_q) \quad \dots (8)$$

- ただし、 C : キャパシタ容量

最終的にキャパシタに充電/放電されるエネルギーを算出することが本研究の目的のひとつであるため、今回のシ

ミュレーションモデルでは、物理モデルである式(2)ないし式(5)の微分方程式と平行して、式(6)および式(8)の微分方程式も同時に演算する。

3.3 トルク発生要素モデル 次に本シミュレーションモデル内で使用されているトルク発生要素の説明を行う。システム概略を図4に示す。

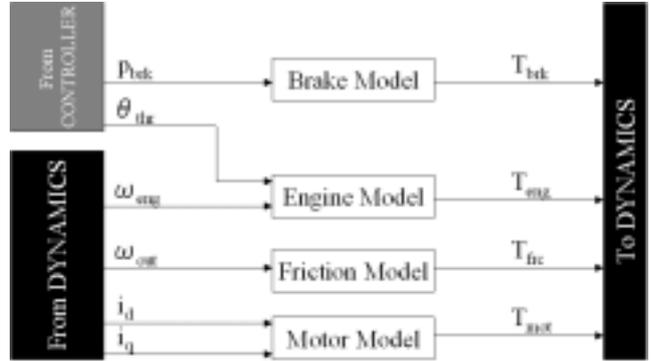


図4 トルク発生要素モデル概要

Fig. 4. Sketch map of the model of torque devices.

3.3.1 ブレーキモデル ブレーキは、コントローラから指令される目標ブレーキ油圧 p_{brk} のみを引数として、予め割り付けられた次元マップを補間することによりブレーキトルクが出力されるモデルとする。ただし、油圧指令に対する油圧応答の遅れを考慮して、無駄時間要素と一次遅れ要素を組み込む。

3.3.2 エンジンモデル エンジン、コントローラから指令される目標スロットル開度 θ_{thr} とダイナミクスから得られる ω_{eng} を引数とした二次元マップ補間により、エンジントルクが出力されるモデルとする。ブレーキモデルと同様に、スロットル指令に対する出力トルク応答の遅れを考慮して、無駄時間要素と一次遅れ要素を組み込む。

3.3.3 摩擦モデル 自動車は一般に空気抵抗やメカフリクションなどの、車両の速度に応じた抵抗を受ける。それらをモデル内で表現するために、車速の代用値である ω_{out} を引数として摩擦トルク T_{fr} を出力することのできる、摩擦モデルを準備する。

3.3.4 モータモデル 本研究では使用するモータに同期モータを仮定しているため、その出力トルクは以下の形で表される。

$$T_{mot} = P \Phi_0 i_q \quad \dots (9)$$

本モデルでも式(9)に従うものとして、ダイナミクスから得られる i_q を引数に T_{mot} を計算し、ダイナミクスに出力する。

3・4 コントローラモデル 続いて本シミュレーションモデル内で使用されているコントローラモデル内の各ブロックの説明を行う。まず全体の概略を図5に示す。

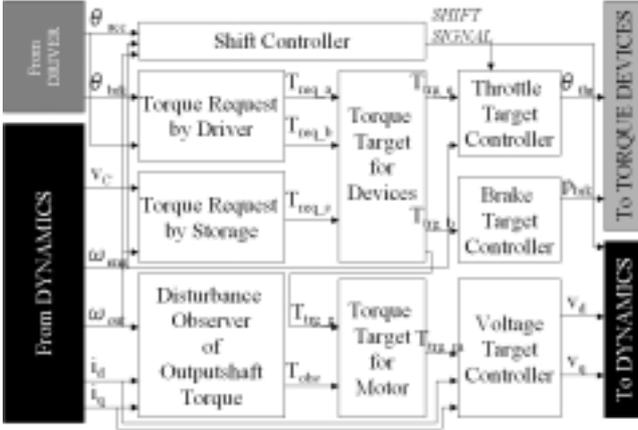


図5 コントローラモデル概要

Fig. 5. Sketch map of the model of the controller.

3・4・1 変速コントローラブロック 変速コントローラブロックは、3・1・3 で既に説明したように、ドライバモデルが出力するアクセル開度信号 θ_{acc} と、ダイナミクスより得られる車速信号(出力軸回転速度) ω_{out} をもとに、変速を判定し、ダイナミクスやコントローラの状態を切り替える信号を送信する。具体的には、

θ_{acc} と ω_{out} の状態から変速すべきであると判断された場合は、 $onshift_signal$ をアップシフト判定中は「1」、ダウンシフト判定中は「-1」にセットする。

目標の変速段を送信する $target_gp_signal$ を、変速の行き先となるギアポジションに設定する。

一定のタイムディレイをかけた後、トランスミッションがニュートラル状態であるとき「1」締結状態であるとき「0」となるように割り付けられた $neutral_signal$ を「1」にセットし、ダイナミクスをニュートラル状態に切り替える。

ω_{out} と θ_{eng} の比から、変速が完了したと判定された時点で、 $onshift_signal$ と $neutral_signal$ を「0」にセットする。

というアルゴリズムで変速を操作する。

3・4・2 ドライバ要求トルク演算ブロック ドライバモデルから出力される θ_{acc} とブレーキペダル踏み込み角度信号 θ_{brk} を引数として、それぞれ一次元マップ補間により、ドライバアクセル要求トルク T_{req_a} とドライバブレーキ要求トルク T_{req_b} を生成する。

3・4・3 ストレージ要求トルク演算ブロック ダイナミクスモデルで演算されている v_c と ω_{out} を引数とし、 ω_{out} からの一次元マップ補間により、ターゲットとなるストレージ電圧を定める。その値と v_c との差を PI 制御器に入力し、 v_c がターゲット電圧に追従するように、ストレージ要

求トルク T_{req_s} を出力する。

3・4・4 デバイス目標トルク演算ブロック T_{req_a} と T_{req_b} 、 T_{req_s} を元にエンジン向け目標トルク T_{trg_e} 、ブレーキ向け目標トルク T_{trg_b} 、車両全体目標トルク T_{trg_g} を生成する。具体的には、

$T_{req_b} = 0$ の場合 (ブレーキオフ)

$$\begin{cases} T_{trg_e} = \\ \min(T_{req_a} - T_{est_e_max}, \max(T_{req_a} - T_{est_e_min}, T_{req_s})) \\ T_{trg_b} = T_{req_b} (= 0) \\ T_{trg_g} = T_{trg_e} + T_{trg_b} \end{cases} \quad \dots (10)$$

ただし、

$T_{est_e_max}$: eng におけるエンジントルクの最大値

$T_{est_e_min}$: eng におけるエンジントルクの最小値

$T_{req_b} < 0$ の場合 (ブレーキオン)

$$\begin{cases} T_{trg_e} = T_{req_a} \\ T_{trg_b} = \min(0, \max(T_{req_b}, T_{req_s})) \\ T_{trg_g} = T_{trg_e} + T_{trg_b} \end{cases} \quad \dots (11)$$

という演算をする。

3・4・5 出力軸トルク外乱オブザーバブロック⁽⁴⁾ 変速中にモータが補償すべきトルクの大きさを推定するために、外乱オブザーバを用いる。ダイナミクスで演算されている i_d 、 i_q 、 ω_{out} を元に、外乱トルク T_{obs} を式(12)のように評価する。

$$T_{obs} = P\Phi_0 i_q - I(N)\dot{\omega}_{out} - T_{fric}(\omega_{out}) \quad \dots (12)$$

この式の右辺にはエンジントルクやブレーキトルクの項が含まれていないため、それらの成分は「外乱」として T_{obs} の中に含まれる。

3・4・6 モータ目標トルク演算ブロック 3・4・3 で得られた車両全体目標トルク T_{trg_g} と、3・4・5 で得られた外乱トルク T_{obs} を元に、 T_{trg_m} を式(12)のように定める。

$$T_{trg_m} = T_{trg_g} + T_{obs} \quad \dots (13)$$

これにより、モータ・エンジン・ブレーキの各トルク出力デバイスの総トルクは、変速状態などの如何によらず、車両全体のトルク目標値 T_{trg_g} に追従する。

3・4・7 スロットル制御ブロック スロットルに関しては、変速中以外はエンジントルク成分を T_{trg_e} に追従させながらも、変速中は変速先のエンジン回転に θ_{eng} をあわせな

ければ変速が成立しないので、以下のシフト信号を用いて以下の 3 パターンに場合分けをし、それぞれの状態でスロットル制御を行う。

変速中でない場合($onshift_signal = 0$)

ダイナミクスにおいて演算されている eng と自分自身の出力信号である thr を元に推定エンジントルク成分 T_{est_e} を計算する。そして、この T_{est_e} が T_{trg_e} に追従するように、PI 制御器により thr を制御する。

変速中であるがニュートラルでない場合

($onshift_signal = 0$ and $neutral_signal = 0$)

のちの変速に備え、ニュートラルにしたときのトルク段差がなくなるように、 T_{est_e} が 0 に追従するように、PI 制御器により thr を制御する。

変速中でありニュートラルである場合

($onshift_signal = 0$ and $neutral_signal = 1$)

エンジン回転が目標の変速比での回転数に一致するように、 out と $target_gp_signal$ から目標となるエンジン回転 trg_e を計算する。そして、この trg_e に eng が追従するように、PI 制御器により thr を制御する。

3.4.8 ブレーキ油圧制御ブロック 3.3.1 で使用したブレーキ油圧 - ブレーキトルク変換マップを逆利用し、 T_{req_b} を元に p_{brk} を生成する。

3.4.9 モータ指令電圧制御ブロック 式(5)より、(i_d, i_q)を制御するためには、それぞれ ($v_d, v_q - 0 out$)を制御すればよいことがわかる。また、モータ出力トルクは式(8)より、 i_q に比例することがわかる。したがって、ダイナミクスにおいて演算されている (i_d, i_q) を引数にとり、これらがそれぞれ ($i_q/P_0, 0$) に追従するように PI 制御器を設計する。得られた制御入力 q 軸項に、 $0 out$ を加えることで、最終的に (v_d, v_q) を出力する。

4. シミュレーションの結果

3.で説明したシミュレーションモデルを用いて、パワーアシスト AMT に関する検討を行う。

4.1 シミュレーション条件 本シミュレーションで使用する主な車両条件を表 1 に示す。

表 1 シミュレーション条件
Table 1. Simulation condition.

Max Engine Power	220[kW]	C	5[F]
Weight	1700[kg]	r	0.1[]
Tire radius	0.325[m]	L	40[mH]
F/D ratio	3.9	o	0.8[Wb]

4.2 従来型 AMT の仮想実験 まず比較のため、トルクアシストを行わない従来型 AMT に相当する条件で仮想実験を行った。図 6 はアクセル開度 50[%]の条件における、加速中の模擬走行波形である。

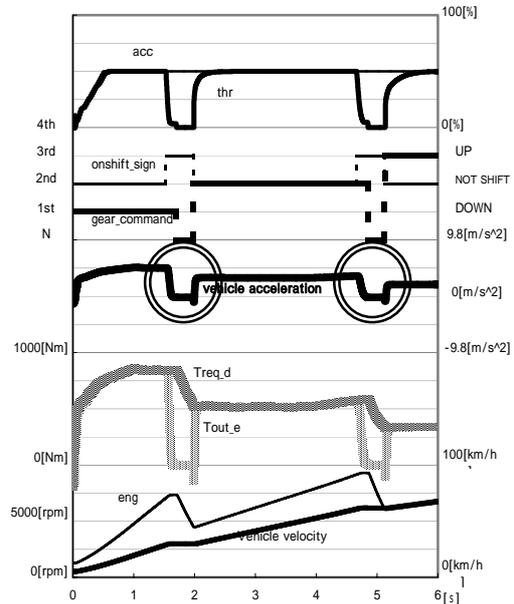


図 6 従来型 AMT 模擬走行波形

Fig. 6. Simulation result of driving the car with the conventional AMT.

想像されるとおり、変速中にエンジンのトルクが遮断されてしまうため、ドライバがアクセルペダルを一定に踏んでいるにもかかわらず、時刻 1.5[s] ~ 2.0[s] 付近、および時刻 4.6[s] ~ 5.1[s] の付近で加速ができなくなり、不連続な加速になってしまうということが確かめられた。

4.2 モータアシスト AMT の仮想実験 次に、提案するモータアシスト AMT に相当する条件で仮想実験を行った。

図 7、図 8 はアクセル開度 50[%]、キャパシタ初期チャージ 300[V]の条件における、加速中の模擬走行波形である。

4.1 の実験時とは異なり、エンジンとモータが協調してドライバ要求トルクを生成するため、変速中にエンジントルクが遮断されても、車両は連続した加速を続けることができることがわかる。また、外乱オブザーバを用いてエンジンの出力軸トルク成分を推定しながら補償することで、クラッチセンサやエンジントルクセンサのようなセンサ情報を用いていないにもかかわらず、連続した加減速を実現することが可能であることが示された。

図 9、図 10 はブレーキ踏み込み量 30[%]、キャパシタ初期チャージ 100[V]の条件における、時速 100[km/h]からの減速走行模擬波形である。減速時も、ブレーキトルクを外乱オブザーバにより推定しながらモータによる電力回生を行うことで、ブレーキ油圧等のセンサ情報を用いなくても、

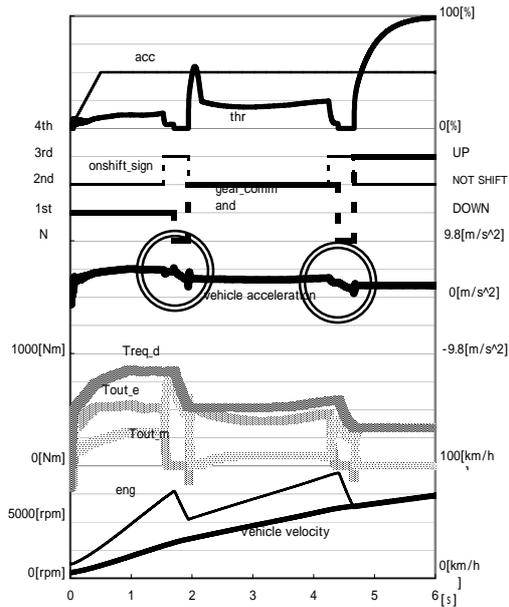


図7 モータアシストAMT 模擬走行波形 (加速)

Fig. 7. Simulation result of driving the car with the motor-assisted AMT (acceleration).

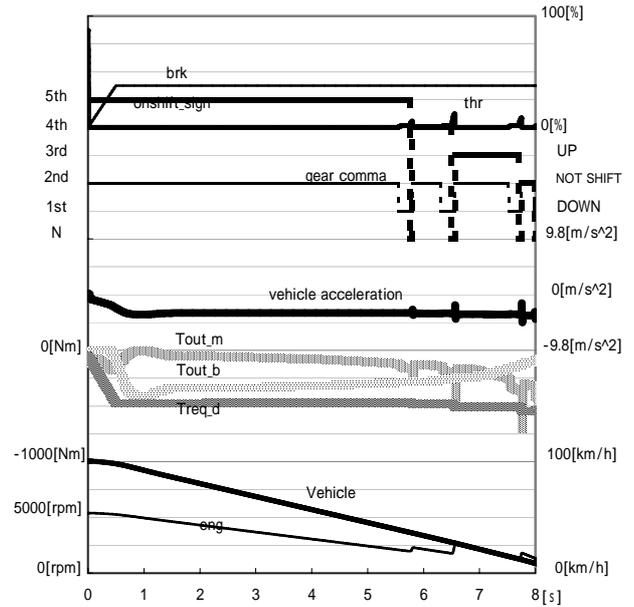


図9 モータアシストAMT 模擬走行波形 (減速)

Fig. 9. Simulation result of driving the car with the motor-assisted AMT (deceleration).

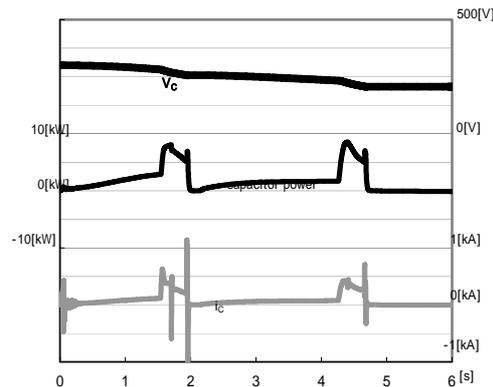


図8 モータアシストAMT キャパシタ電流波形 (加速)

Fig. 8. Simulation result of electric current with the motor-assisted AMT (acceleration).

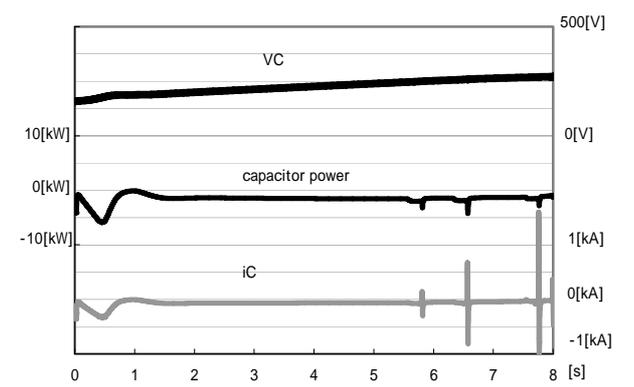


図10 モータアシストAMT キャパシタ電流波形 (減速)

Fig. 10. Simulation result of electric current with the motor-assisted AMT (deceleration).

キャパシタへの充電を管理しながらドライバの要求どおりの減速度を生成できるということが示された。

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、その成立性と制御方法に対して検討を行った。実現可能な容量のキャパシタでもそれが成立するということを示した。外乱オブザーバを構成してエンジン出力やブレーキトルクを推定することにより、追加センサなしでもドライバ要求トルクに追従した連続的な加減速が得られることを示した。

文 献

- (1) Sasaki: "Development of Capacitor Hybrid System for Urban Buses (Second Report) : Characteristics and Possibility of Capacitor Hybrid System", Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.33, No.3 (20020715) pp. 179-184
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, Vol.33, No.3 (20020715) pp. 179-184
- (2) Soga: "Development of a Motor-Type Automated Manual Transmission", Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.58, No.9 (20040901) pp. 62-67
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, No.9 (20040901) pp. 62-67
- (3) 松瀬:「電動機制御工学」,電気学会 (2007.2)
- (4) 河村:「現代パワーエレクトロニクス」,数理工学社 (2005.4)