Exact Model Matching制御による
機関・AT・負荷系の加速性改善*山本和久*¹ 守田栄之*² 瀧山武*²Improvement of the Acceleration Performance of
Engine-AT-Load System by an Exact Model Matching Control.

Kazuhisa YAMAMOTO, Shigeyuki MORITA and Takeshi TAKIYAMA

The "drive by wire concept" is the most promising means for a control system of the automobile engine power train in the near future. In this concept system, the accelerator pedal is not connected by a mechanical "cable" or "linkage" but connected with the throttle valve by an electrical "wire". With an adaptation of the concept system, several useful controls such as traction control, fuel optimal control and cruising control are expected to become possible. Reported here is the improvement of automobile acceleration performance using the control theory called exact model matching method or model following method under a background of the concept. Experiments were carried out using a sham "automobile" system constructed with a 4-cycle gasoline engine, automatic transmission and DC dynamometer which were connected with an on-line computer system for measurement and control. The expected results were obtained both theoretically and experimentally.

Key Words: Automobile, Gasoline Engine, Computer Control,
Drive by Wire, Exact Model Matching,
Acceleration Performance

1. 緒 言

近い将来の自動車の動力系統制御系において Drive by Wire という方式が有力である。これは現用のようなアクセルと機関スロットル弁が直接'索'で結合されている方式ではなく'信号線'で結合されコンピュータ制御によりスロットル弁やさらには変速機変速比などが操作される方式で、車速制御、駆動力制御、燃費最適化制御など種々のメリットを可能にする。

本研究はこのようなDrive by Wire の背景のもとに行なったもので動特性改善、具体的にここでは自動車の加速性をExact Model Matching(以下EMM) またはModel Following と称される制御理論で向上させようと試みたものである。

対象とする'自動車'は4気筒987CCガソリン機関とその固有のオートマチック・トランスミッション(以下AT)及び負荷の直流動力計で模擬したが、これには計測制御用コンピュータがオンライン結合している。そして EMM法適用を主眼とする初期の研究段階として

次の方針で行なった。(i)ATのトルクコンバータモデルは最適制御のための無段変速機への移行予定を勘案して簡易モデルとする。(ii)このため今回の運転域は比較的狭い範囲とする。(iii)ただし(i)の移行後を考えて機関、動力計の非線形性は運転域が拡大しても対応可能にしておく。(iv)本関係の研究⁽¹⁾での系構成はトルク要求型のものが多いが、アンチスキッド制動系との連携を考えここでは車速要求型の閉ループ系構成とする。

以下に使用記号を示す。これ以外はその都合断る。

f : 対象系モデル総合摩擦係数	[Nms]
g_a : 機関吸入空気重量	[Kg/s]
J : 対象系モデル総合慣性モーメント	[Nms ²]
n_e : 機関回転速度	[s ⁻¹]
$n_e' : n_e r_n R_n R_w$	[s ⁻¹]
n_v : 終減速機出力軸回転速度	[s ⁻¹]
R_n : AT・減速機速度比	[—]
R_w : 終減速機速度比	[—]
r_n : トルクコンバータ速度比	[—]
r_e : トルクコンバータトルク比	[—]

* 平成2年3月24日 関西支部第65回講演会において講演、原稿受付 平成2年5月18日。

*¹ 准員、本田技術研究所 (〒351-01 和光市中央1-4-1)。 *² 正員、大阪市立大学工学部 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)。

T_e : 機関発生トルク	[Nm]
T_v : 機関出力軸トルク	[Nm]
θ : スロットル弁絞り開度	[rad]

両結果を示しているが、 T_e に一例を示すように細かい軸系固有振動が現れている方がexp.で、そうでない方がsim.である。

2. 対象系モデル

EMM閉ループ系設計上、またシミュレーションで種々あらかじめ検討するために図1の点線内に示す対象系モデルを作成した。図の積分器 $\int_2$ は機関スロットル弁を駆動するパルスモータで、吸気系で θ と n_e により吸気量 g_a が決定する。今、空燃比、点火時期などの燃焼パラメータを一定とすると g_a に応じた T_e が発生する。これらの間の係数は運転域などによって変る非線形特性を呈し、式(1)に一例を示す実験式を演算周期 τ 毎に解き対応している。

$\theta = 0.305 \pm 0.04$ の場合

$$g_a = 9.48 \times 10^{-6} n_e + 6.10 \times 10^{-3} \dots \dots \dots (1)$$

図の積分器 $\int_1$ は機関・AT・負荷のすべての可動部を含む一次遅れ系のもので、変速比 R_n によって f_n などは大幅に変化するが同様に演算対処される。 r_n 、 r_e はトルクコンバータであるが前述の理由で一般の二軸モデル⁽²⁾でなしに簡易型である。演算、制御の周期 τ は125msとこの非線形対応のために少し遅いが今後ソフト、ハード両面での高速化を考えている。

全体として主要部のみを動的要素とした低次元モデルであるが機関可動部による時定数が他に比して圧倒的に大きいので非線形対応を適確に行なうことによって充分な解析精度が得られる。図3(a)は本モデルを離散化、シミュレートしたもの(sim.)と、同一条件で実機運転を行なった結果(exp.)の一例で、モデルにない軸系固有振動の挙動を除き比較的良好な一致が得られている。なお図3、図4共、 R_n を除きsim.とexp.の

3. 規範モデルとEMM閉ループ系

EMM法は望ましい時間応答の規範モデルをまず決定し、対象系がこの応答特性を有するように閉ループ化する方法である⁽³⁾。規範モデルとして本研究では図2に示す対象系と同型の構造とした。係数 b はEMM法が線形理論であるので対象系非線形性に依りて変化させる。係数 a は主題の動特性を決定するわけで望ましい特性に決めるわけであるが、対象系の有する応答性上の制約があるのは無論である。

ところで現用自動車でもドライバーが最大加速を望む場合ステップ入力では一度はアクセルを最大開度まで踏み込み増速に伴ってアクセルを徐々に戻し要求の定常車速に一致させる(始めから要求定常車速に応じたアクセル開度のステップ入力なら加速は悪い)。

この最大加速度近傍の値が対象系の制約上限で、これ以上のものは望めない。本研究では開ループで θ 最大開度とほぼ同等のステップ入力実験を複数回行ない係数 a を決定したが、その時の加速は図3(b)のA部の立ち上がりにはほぼ等しい。

次にEMM閉ループ系構成について述べる。図1の対

図2 規範モデル

図1 対象系モデル(点線内)とEMM閉ループ系(全体)

象系は物理モデルの記述であるが、式(2)の変換行列 Q を用いてこれを可制御正準形に変換すると式(3)。

(4)を得る。ここで α, β は対象系モデルより式(5)。(6)である(可制御正準形での状態量などを x などで記す)。

$$Q = \frac{1}{\beta} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \alpha & \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$y = [r_n R_m R_w \beta \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\alpha = -\frac{f}{J} - \frac{1}{J} r_n r_t (R_m R_w)^2 \frac{\partial T_v}{\partial n_v} - \frac{1}{J} \frac{\partial T_e}{\partial g_a} \left(\frac{\partial g_a}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{J} \frac{\partial T_v}{\partial g_a} \left(\frac{\partial g_a}{\partial \theta} \right)_{n_v} \quad (6)$$

この開ループ系を状態フィードバックゲインベクトル K 、フィードフォワードゲイン K により閉ループとする。このとき入力を u_1 とすると操作量 u は式(7)となり、閉ループ系状態方程式などは式(8)。(9)となる。

$$u = -\hat{r}_1 x_1 - \hat{r}_2 x_2 + K u_1 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\hat{r}_1 & \alpha - \hat{r}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K \end{bmatrix} u_1 \quad (8)$$

$$y = [r_n R_m R_w \beta \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

この閉ループ系時間挙動と規範モデルの時間挙動を一致させるために式(8)の系行列と規範モデルの可制御正準形の系行列を等しいと置き式(10)を得る。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\hat{r}_1 & \alpha - \hat{r}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)と変換行列 Q を用いて物理モデルでのフィードバックゲイン f_1, f_2 を求めると

$$[f_1 \ f_2] = [\hat{r}_1 \ \hat{r}_2] Q = (a + \alpha) [\alpha/\beta \ 1] \quad (11)$$

またフィードフォワードゲイン K は対象開ループ系の分子と規範モデルのそれを等しいとおいて

$$K = \frac{J \cdot b}{\left(\frac{\partial g_a}{\partial \theta} \right)_{n_v} \cdot \frac{\partial T_e}{\partial g_a}} \quad (12)$$

図1の全体はこのようにして構成した EMM 閉ループ系を示す。

4. 実機運転結果

以上述べた EMM 閉ループ系をオンラインコンピュータにより実現し実機運転を行なった。また同様のモデルシミュレーションを行なった。図3(b)に結果の一

(a) 開ループ系
インディシャル応答

(b) EMM閉ループ系
インディシャル応答

図3 開ループ系、EMM閉ループ系挙動比較

図4 EMM閉ループ系ランパ応答

例を示す(Drive by Wireコンピュータにより速度型入力 u_1 のインパルスを加える)。図3(a)は開ループ系インディシャル応答で第2章で対象系のモデル同一例としても用いたが、本制御を施さない対象系自体の応答である。なお図3(b)と同一の定常車速での運転条件で、比較のために縦軸スケールも合わせている。両図を比較考察するに(i)本制御を施した EMM閉ループ系の場合は同一入力 u_1 であるにもかかわらず微分動作のような挙動が θ , g_a に生じている(図3(b)のB部)。(ii)これにより車速の立ち上がりは格段に向上している(図3(b)のA部)。(iii)加速後の定常車速は EMM閉ループが自動的に θ を調整するので同一となる(図3(a)と(b)のC部)。というように所期の挙動を得ることができた。図4は EMM閉ループ系にランプ入力を加えた場合の結果の一例である。自動車は緩加速も当然必要で EMM 閉ループ構成のためにこの性能が阻害されてはならない。本ランプ入力運転はこれを調べたもので、開ループ系への同一ランプ入力の応答と比較してほぼ同一の時間挙動で、それなりの緩加速運転が可能である。シミュレーション演算の数値を詳細に検討すると本加速度的場合でも EMM閉ループ系の方が若干の加速度増加が認められるがプロット出力では区別不能で開ループ応答の図は略した。

ただし入力加速度を大にするにつれて EMM閉ループ出力の加速度は開ループ系のそれより一層増加するがドライバーはすぐにこの特性に慣れると考えている。図3(b)、図4共に実機運転と同一条件での EMM閉ループ系シミュレーション結果も示すが良好な一致が得られている。次にAT変速機シフトアップ時の EMM閉ループ系挙動を図5に示す。加速時にシフトアップが生じることは当然考えられ、この場合大きなノイズが系に加わることになる。ところで図3(b)のB部のような挙動は Drive by Wire 構成の開ループ系に直列に微分要素を付加することで得られるが、これは種々のノイズを強調して実用上無理であろう。EMM法はこのような微分法ではないのでノイズによる乱調はないと考えたが念のため実機で調査したわけである。図はインディシャル応答中に3速($R_n=1.00$)から4速オーバードライブ($R_n=0.694$)へシフトアップさせたもので n_v などに変速ノッチが見られるが、3速時中も4速時中も図3

図5 シフトアップ時の挙動

(b)と同様の出足で EMM閉ループが順調に作動し、かつ乱調などの動きは認められなかった。

5. 結 言

以上 EMM制御理論を機関・AT・負荷系に適用して出足制御を試み、上述のように所期の目的を達成するとともに、次の結論を得た。

- (i) AT変速機シフトアップ動作が生じても全く異常なく所期の加速性改善性能が得られる。
- (ii) シミュレーションモデルは開ループ系、EMM閉ループ系共実機同定が良好で今後の検討に有力な手段が得られた。

文 献

- (1) Danno Y., et al, SAE Paper, 890760 (1989)
- (2) Kolwicki J. A., SAE Paper, 820393 (1982)
- (3) たとえば、市川、計測と制御, 26-11, (1987), 51