

feature article

エンジン制御モデルベース開発の先進技術

Advanced Model-based Development Techniques Applied to Automotive Engine Management Systems

於保 茂 Shigeru Oho

青野 俊宏 Toshihiro Aono

鈴木 邦彦 Kunihiko Suzuki

勝 康夫 Yasuo Sugure

高性能・高信頼システムの開発効率を改善する手法として、MBDが多様な領域に広がりつつある。日立グループは、自動車エンジン制御においてもMBDを適用しており、制御対象と制御アルゴリズムのモデル化、ECU実装の検証技術などの手法がある。また、開発プロセスの各フェーズで非実機開発を検討している。エンジンクランク機構モデルを用いた失火検出アルゴリズム開発、燃焼モデルを用いたモデルベース適合、およびPILSを用いたエンジンノック検出の演算解析などもMBDによる開発技術である。

1. はじめに

今日、組込み制御システムは交通、産業、医療、家電など幅広い分野に応用されている。こうした制御機器では環境対応や安全性向上のため、性能・機能・信頼性のさらなる高度化が求められている。この結果、制御ソフトウェアが大規模・複雑化し、製品開発の長期化とコスト増大が共通の課題となってきた。

自動車機器分野では、MBD (Model-based Development: モデルベース開発) 技術を用いた開発効率改善が早くから検討されてきた。日立グループでも各種の組込み制御機器の開発にMBD技術を積極的に導入している¹⁾。MBDではシステム要素のモデル化が必須である。

ここでは、エンジン制御システム開発のMBDにおける事例として、機構モデル、燃焼モデル、およびPILS (Processor-in-the-Loop Simulation: マイクロコンピュータモデル) 応用の最新の研究成果について述べる。

2. MBD技術の進展

MBDとは、従来の実験中心の開発からシミュレーションを用いた非実機開発への転換である。構造、熱、流体、電磁気などの分野では、シミュレーションに基づく設計解析が広く普及している。組込み制御の設計ではこうした物理系だけでなく、制御アルゴリズムやコントローラ処理系も取り扱うため、固有のモデル化技術が必要である。

組込み制御分野で用いられているMBD各種手法を図1に示す。同図では製品の開発プロセスをVサイクルで表している。このVサイクルの上流は基本設計であり、機能・

性能を達成する。下流は実装設計であり、基本設計で得られた制御アルゴリズムをECU (Electronic Control Unit: 電子制御ユニット) に実装する。また左側は開発設計工程、右側は検証工程を意味する。

自動車エンジンなどの制御対象と制御アルゴリズムをモデル化するMILS (Model-in-the-Loop Simulation) 手法は、今日、最も普及しているMBD手法であり、開発ツールとしてMATLAB/Simulink^{※1)}が知られている。MILSの後段階では、制御ソフトウェアにCコードを用いるSILS (Software-in-the-Loop Simulation) や、汎用コントローラで制御アルゴリズムを実験検証するRPT (Rapid Prototyping) が用いられている。またMILSからのCコードの自動生成も普及しようとしている。ECU実装の検証技術

※1) MATLAB、およびSimulinkは、米国The MathWorks, Inc.の登録商標である。

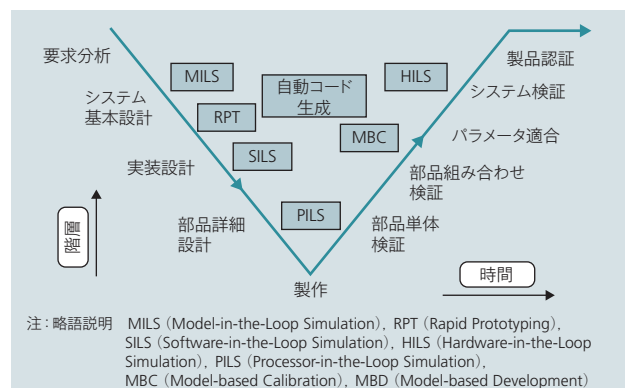


図1 組込み制御のMBD (モデルベース開発) 手法

MBDは開発の全工程で導入が検討されている。制御設計だけでなく、電子制御ユニット実装やパラメータ適合などにも応用が進みつつある。

としてはHILS (Hardware-in-the-Loop Simulation) も広く使われている。

MBD手法は上記にとどまらず、開発プロセスの各フェーズで非実機開発が検討されている。ここでは日立グループでの最近の検討事例について述べる。

まずエンジンの失火検出方式の開発に用いたMILS手法として、エンジン機構系のダイナミックモデル化について述べる。また、エンジン適合(制御パラメータの最適化)ではMBC (Model-based Calibration: モデルベース適合)手法が近年、活発に検討されている。日立グループはエンジン燃焼の物理モデルに基づいた適合手法を提案している。さらに、実装設計でもMBDの適用が種々検討されており、ここでは時間制約の厳しいエンジンノック検出処理を取り上げ、PILSの応用例を示す。

3. 機構モデルの応用:失火検出

エンジンコントローラの役割には、エンジンの動作を診断する機能も含まれる。気筒内の燃料と空気が正常に燃焼したかを判定する失火検出は診断の一つである。

エンジンクランク軸系の概略を図2に示す。

気筒内の爆発によってピストンは押され、コネクティングロッドを介してクランク軸を回転させる。失火が起こると回転速度が落ち込む。これを利用すれば、一定角度回転する時間が長くなったら、失火が起きたと判定できる。失火の検出性能は、その角度の幅に依存する。エンジン機構系のモデルを活用してこの幅を最適化し、失火検出領域を高回転に広げた事例について以下に述べる。

機構モデルには、図3に示すばねマス系のモデルを用い

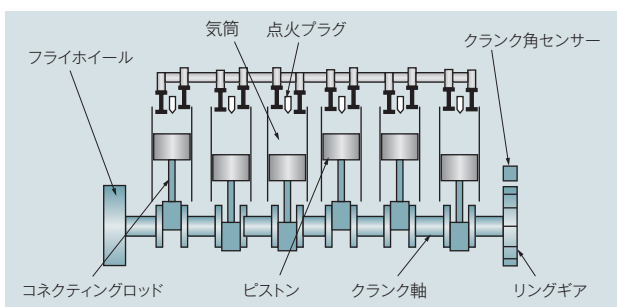


図2 エンジンクランク軸系の概略

気筒内の爆発エネルギーはコネクティングロッド、クランク軸を介してリングギアに伝わるため、その回転変動から失火を検知する。

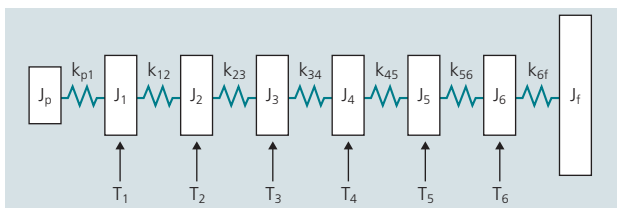


図3 エンジンクランク軸の機構モデル

気筒をマス、気筒間をばねと考え、クランク軸弾性の影響を解析する。 $J_1 \sim J_6$ は六つの気筒の慣性に対応し、 J_p は失火検出プレート、 J_f はフライホイールに対応する。添え字付き k は、ばね定数である。

た。このモデルで第1気筒失火の下、エンジン回転数を1,500 rpmから6,000 rpmまで操作したときの、リングギアの回転速度を計算した結果を図4に示す。

ここでは、約4,000 rpmまでは失火による影響が現われているが、それを過ぎると、クランク軸のねじり振動が増大し、失火による影響が埋もれてしまうことがわかった。

そこで、クランク軸のねじり振動の影響を打ち消して、失火による影響を効果的に抽出する方法を検討する。図4を周波数解析すると、ねじり振動の共振周波数は300 Hz付近にあることがわかる。ねじり振動が最も深刻なのは、共振周波数とエンジンの点火が一致したとき、すなわち6,000 rpmのときである。そこで、エンジンの点火間隔でクランク軸のねじり振動を平滑化してこの影響をキャンセルし、失火による回転変動のみを抽出する。

エンジンが6,000 rpmで毎サイクル第1気筒が失火しているときのクランク軸の回転速度を、クランク角 90° に相当するフィルタと、点火間隔である 120° に相当するフィルタのそれぞれに通したときの結果を図5に示す。

これにより、点火間隔でクランク軸の角速度をフィルタリングすると、ちょうどクランク軸のねじり振動が平滑化されて失火による影響が現われることがわかり、失火検出の適用範囲を6,000 rpmまで広げることができた²⁾。

4. 燃焼モデルの応用:エンジン適合

エンジン制御システム開発の最終段階にあたる適合工程では、実機を対象として、燃費・出力・排気といったエンジン性能指標が、開発の最上流工程で定義されたシステム

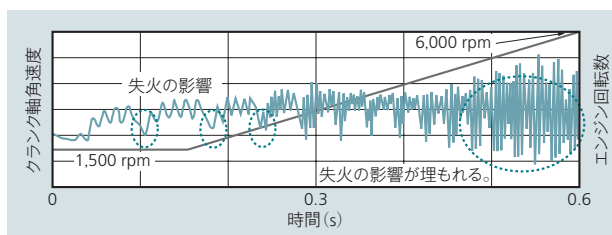


図4 機構モデルによって計算したクランク軸の角速度

回転数が低いうちは失火の影響が現れるが、回転数が4,000 rpmあたりを超えるとクランク軸のねじり振動に埋もれる。

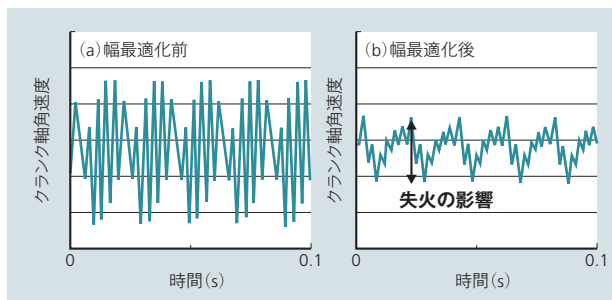


図5 クランク軸の回転速度を平滑化した結果

ねじり振動の周期に合わせたフィルタによりその影響がキャンセルされ、失火の影響が見える。

要求仕様を満足するように、マップ作成や制御ロジックに含まれる定数の調整が行われる。

近年のエンジンシステムには、直噴インジェクタ、可変バルブ、ターボ過給機などのアクチュエータが複数搭載される傾向にある。アクチュエータの制御量とエンジン性能との因果関係は強い非線形性を呈し、また制御パラメータ間にも強い交互作用の影響が見られる。適合工程では、複雑な多入力多出力システムを前提とした多目的最適化問題を扱う必要があり、従来の実機を用いた手作業による適合では、開発期間やコストの増加といった問題があった。

このような背景から日立グループは、シミュレーション技術や最適化アルゴリズムなどの数理的手法を駆使したMBC手法の導入を推進している。MBC手法は、実機適合工数の削減だけでなく、パラメータ間の要因効果の把握により、制御の最適化レベル・ロバスト性向上にも寄与する。日立グループにおいて開発したMBC手法³⁾について、可変バルブを搭載したガソリンエンジンの適合工程を事例として以下に述べる。

開発した適合手法では、まず、物理モデルによって制御対象であるエンジンを模擬し、代表点にて取得した実機データに基づき、上記物理モデルを適合する。これを用いて実機を代替して机上適合を行う。さらに、物理モデルに基づいてエンジンの入出力関係をデータベース化し、これを多元高次多項式で近似する(図6参照)。

エンジン挙動を模擬する物理モデルの構築にあたって、サイクルシミュレーション技術を開発した。サイクルシミュレーションとは、エンジンのガス交換過程や燃焼過程で生じる現象を、熱流体力学や燃焼理論を応用して、物理モデルにて詳細に記述し、吸排気管やシリンダ内物理量のダイナミクスをクランク角度刻みで予測する解析手法である。開発したサイクルシミュレータは特に可変バルブが筒内吸気量や乱流状態に与える影響、ガソリンの反応メカニ

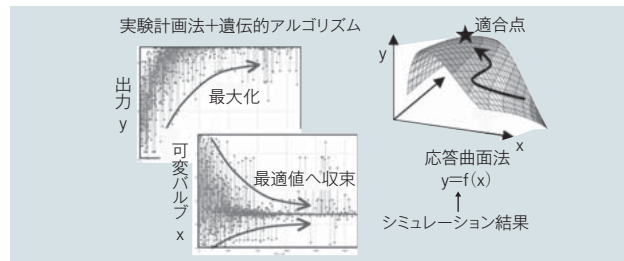


図7 最適化ツールとの連成による可変バルブ適合事例
全開時の出力が最大となる可変バルブ制御量を、遺伝的アルゴリズムに従って自動探索させる。最適値に収束する様子を確認することができる。

ズムを考慮したノック発現時期、一酸化炭素・窒素酸化物などの有害排出ガス濃度の予測など、独自にモデル構築することによってエンジン適合問題で考慮すべきパラメータを網羅した点特徴である。

可変バルブの適合問題に対しては、このシミュレータと最適化ツールとの連成による机上適合環境を構築した。すなわち、実験計画法と応答曲面法とを用いてシミュレーション点数を極力抑え、遺伝的アルゴリズムによる最適値探索速度の向上で、制約条件下でも複数の目的変数の同時最適化を早期に実現できる仕組みを可能にした(図7参照)。

可変バルブエンジンシステムに、従来のマップ制御をそのまま適用すると、マップの大規模化によるメモリ容量増大がECU搭載性悪化の要因となる。開発手法では、大規模化したマップを高次項や交互作用項といった非線形項を含む多元高次多項式で近似して、メモリ容量の低減を行った。近似にあたっては、ロバスト最小自乗法による近似対象データの重み付けや、ステップワイズ法による多項式中の有意項の取捨選択で、近似モデルの精度向上、演算負荷低減とロバスト性向上の両立を図った。

5. PILS(マイクロコンピュータモデル)の応用:ノック検出

PILSの応用例として、デジタルノック制御のCPU (Central Processing Unit) 負荷率の評価について以下に述べる。

デジタルノック制御とは、自動車エンジンの早期着火により、エンジン内部の金属音や振動が発生するノックという現象の有無を検出し、検出した場合は点火制御を少し遅らせることで、ノックを抑制する制御である。特にノック検出の制御では、ノック信号の周波数分析のためのFFT (Fast Fourier Transform) 演算が含まれており、この演算の処理負荷が高いことは知られているが、従来は定量的な解析はできなかった。そこで、PILSを活用したCPU負荷率の定量的な解析手法を、デジタルノック制御を含めた自動車エンジン制御システムに適用した(図8参照)⁴⁾。

自動車エンジン、点火バルブなどのアクチュエータ、センサー、スロットルなどの物理モデルは、MATLAB/

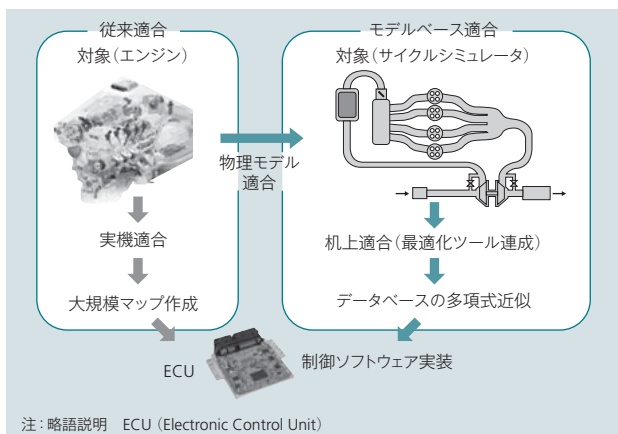


図6 エンジンモデルベース適合 (MBC) の流れ
開発したMBC手法ではサイクルシミュレータを対象として机上適合を行うため、従来手法に対して実機試験点数の削減が可能である。

Simulinkを用いてモデル化している。一方、CPUコア、A/D (Analog/Digital) 変換機、タイマーなどのマイクロコンピュータの主要な構成要素はCoMET^{※2)}を用いて記述している。2種類の異なるモデルは協調シミュレーションによって連動する。一方、デジタルロック制御を含むエンジン制御のアルゴリズムは、シグナルフロー線図で作成し、自動コード生成によってオブジェクトコードとなっている。このコードを仮想CPU上で走らせれば、実装レベルでの制御ソフトウェアおよび制御システムの挙動を検証できる。例えば、図8に示すように、協調シミュレーション結果から得られるCPU内部情報を用いて、関数ごとの処理時間を解析し、最終的に「デジタルロック処理」のようにソフトウェアの機能単位でのCPU負荷率を定量的に算出することができる。

このように、PILSと制御対象モデルとの協調シミュレーションにより、制御ソフトウェアの量産コードレベルでの詳細評価が可能となる。従来から、実機ハードウェアでのマイクロコンピュータの動作検証はエミュレータが使われてきた。しかし、マイクロコンピュータの内部動作を外部から完全に把握するのは困難である。PILSを用いれば、命令コードの実行状況が可視化でき、原理的に観測の遅れはない。マイクロコンピュータの動作に影響を与えることもなく、動作タイミングの詳細な解析には理想的である。

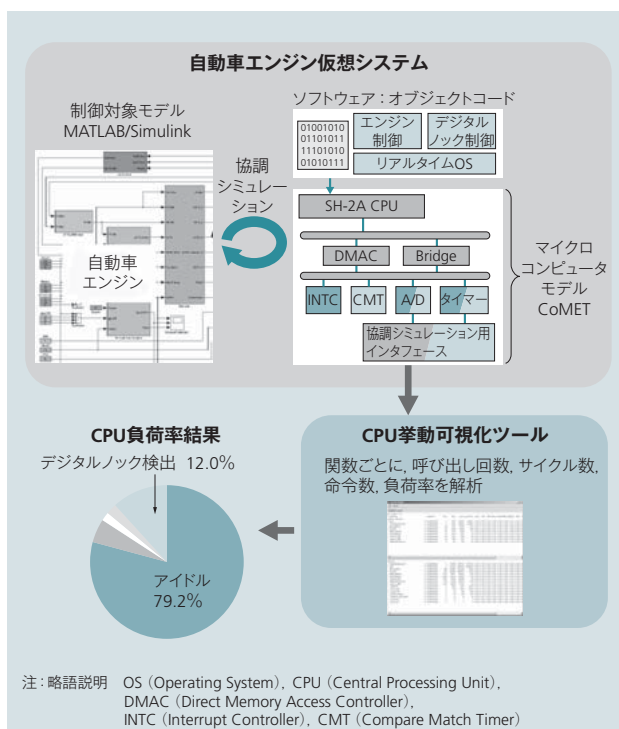


図8 マイクロコンピュータモデル (PILS) を使用したエンジン制御のCPU負荷率評価

制御対象 (自動車エンジン) のMATLAB/Simulinkモデルと、マイクロコンピュータのCoMETモデルとの協調シミュレーションを行うことで、マイクロコンピュータの内部情報を可視化でき、CPU負荷率を定量的に解析した。

また、コントローラモデルを用いたMBDの別の利点は、ハードウェアと並行したソフトウェアの開発である。ハードウェアの完成を待たずしてソフトウェア開発やシステム検証ができる。さらには実在のハードウェアを前提とせずに、制御システムの検討が種々可能となる。

6. おわりに

ここでは、エンジン制御システム開発のMBDにおける事例として、機構モデル、燃焼モデル、およびPILS応用の最新の研究成果について述べた。

制御や計測アルゴリズムを開発する際のモデル活用 (MILS) はすでに実用段階である。一方、MBCやPILSの応用は産業界全般を見てもまだ導入の初期段階にある。今後、MBDは製品開発の全領域に広がると考えられ、日立グループはこれを積極的に推進していく予定である。

※2) CoMET, およびロゴは、VaST Systems Technology Corporationの登録商標または商標である。

参考文献

- 成沢, 外: 制御システムの高度化・高信頼化を支えるモデルベース開発技術, 日立評論, 91, 5, 426-429 (2009.5)
- T. Aono, et al.: Misfire Detection Method Robust against Crankshaft Vibration and Acceleration, Proc. 2005 IEEE Conf. on Control Applications
- K. Suzuki, et al.: A Model-Based Technique for Spark Timing Control in an SI Engine Using Polynomial Regression Analysis. SAE paper No.2009-01-0933 (2009.4)
- Y. Sugure, et al.: Virtual Engine System Prototyping with High-Resolution FFT for Digital Knock Detection Using CPU Model-Based Hardware/Software Co-Simulation. SAE paper No. 2009-01-0532 (2009.4)

執筆者紹介



於保 茂

1980年日立製作所入社, 中央研究所 組込みシステム基盤研究所 所属
現在, 電子機械系の計測・制御・組込み技術の研究開発に従事
博士 (学術)
IEEE会員, SAE会員, 自動車技術会会員, 計測自動制御学会会員, 電子情報通信学会会員



青野 俊宏

1992年日立製作所入社, 機械研究所 車両システム研究部 所属
現在, 自動車機器の制御の研究開発に従事
計測自動制御学会会員



鈴木 邦彦

2003年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御第三研究部 所属
現在, 自動車用エンジン制御システムの研究開発に従事
博士 (工学)
SAE会員, 自動車技術会会員, 日本機械学会会員



勝 康夫

1999年日立製作所入社, 中央研究所 組込みプラットフォーム研究部 所属
現在, 組込みマイコン応用モデルベース開発技術の研究開発に従事
SAE会員