

人工知能を 組み込む

エンジン制御システム開発の新たな可能性

最新のエンジン制御ユニット（ECU）には、計算能力を高めるために新世代の高性能システムオンチップ（SoC）が搭載されています。それらのデバイスには、予想できない機能追加や顧客からのオンデマンド要件への対応に備えたオンボードリソースが搭載されています。Infineon と ETAS は Ford の研究部門と協力し、従来の制御戦略の限界に対する救済策として、データ駆動型のモデリングアルゴリズムを ECU 上で直接実行させる、という手段の有効性を実証しました。

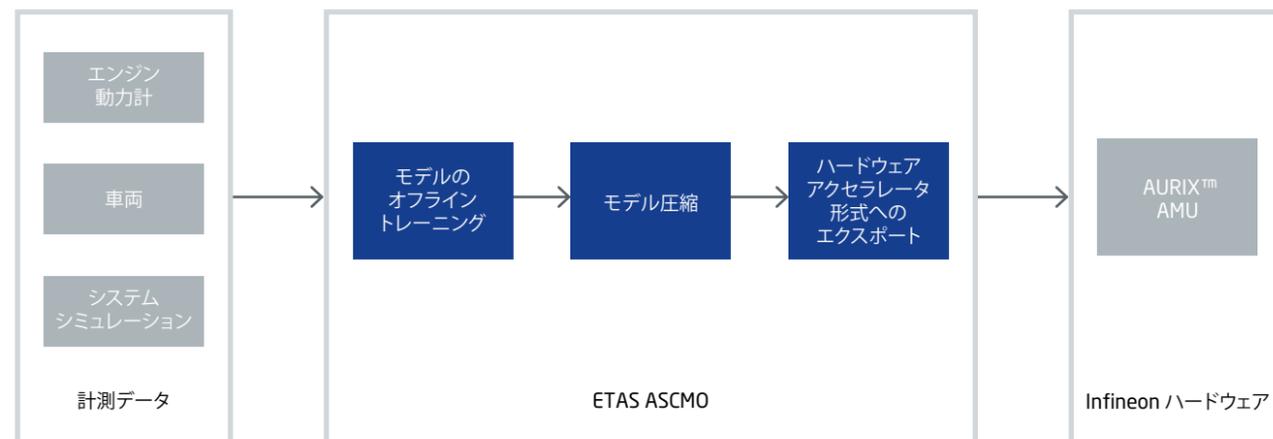
排ガス規制は厳しさを増し、ハイブリッド車や自動運転などの新技術が複雑化していく昨今、エンジン管理システムにはますます高度な制御機能が必要となってきました。ECU に実装された従来の制御ロジックや仮想センサがさまざまな条件下で望ましいエンジン挙動を得るために使用する適合マップの入力は、最大でも2次元までに限定されていました。さらに高次元の関係性を表すには、マップの出力を別の適合変数と組み合わせる必要があります。しかし ECU コアが同時に処理できる入力パラメータは2つだけです。今後の ECU 制御の要件や開発サイクル内で必要となる適合作業を考えると、マップベースのアプローチを適用できる範囲は限られてしまいます。そしてその救済策となり得るのが「データ駆動型モデル」です。従来のマップベースのアプローチでは多次元や非線形の挙動を十分な精度で得られない場合、データ駆動型モデルがそれに取って代わるものになれる可能性があります。

データ駆動型のシステム同定 – ETAS ASCMO

データ駆動型のモデリングは、物理システムの入出力挙動を方程式を使って近似的に表現するものです。さまざまな動作条件下で収集した測定サンプル内の代表的な1組から、モデルのパラメータセットが推察されます。ETAS ASCMO はベイズモデリング法的一种であるガウスプロセスを使用して、忠実度の高いデータ駆動型モデルを生成します。モデル作成は自動的に行われ、ユーザーによるパラメータ設定作業は不要です。

このツールは、基礎となる原理についての知識は必要なく、類似する他のデータ駆動型ソリューションと同等またはそれ以上のモデル精度を得ることができます。このモデルを組み込み環境に実装する際には、ETAS ASCMO のモデル圧縮機能により、リアルタイム処理への影響は最小限に抑えられます。

図1：データ駆動型モデルからハードウェアアクセラレータへの流れ



Infineon のハードウェアアクセラレータ、Advanced Modeling Unit (AMU)

複雑なデータ駆動型モデリングアルゴリズムをマイクロコントローラベースのアーキテクチャに実装しようとすると、いくつかの制約に直面します。しかし、Bosch の知的財産を活用して開発されたハードウェアアクセラレータ「Advanced Modeling Unit (AMU)」は、中央処理装置 (CPU) を演算から解放する浮動小数点コプロセッサで、重要なアプリケーションのパフォーマンスを向上させます。

Infineon の TriCore™ AURIX™ TC3x マイクロコントローラに搭載された AMU には、ETAS ASCMO モデルの実行に必要な指数関数演算 (放射基底関数 RBF など) をソフトウェアや CPU リソースなしで行うハードウェアロジックが実装されています。RBF の応用先として仮想センサ演算を例にとると、メインの TriCore™ CPU にソフトウェアを実装した場合に比べ、30 倍を超えるハードウェアアクセラレーションを達成しています^[1]。

アプリケーションにおける ETAS ASCMO と AMU

従来の開発手法では、モデル開発はシステム物理学と基本的なエンジニアリング原理に基づいて行われます。一般的にモデルは、システムのタイプごとに作成され、複数のアプリケーションで再利用されますが、開発プロセスの一環としてモデリングが行えるよう、システムを十分に理解できるだけの大量のデータが収集されます。ここでは、複数の異なるアプリケーションが同一のモデルを使用し、適合によってその差異点が調整されます。

ETAS ASCMO と AMU によるソフトウェア開発は、そのような従来の手法とは異なります (図1)。ソフトウェア開発時には、特定の出力に影響する可能性がある入力だけを同定すればよく、入力と出力の具体的な関係の定義は必要ありません。ETAS ASCMO は、エンジンダイナモや計装車両で計測したデータを使用して、オフラインでモデルのトレー

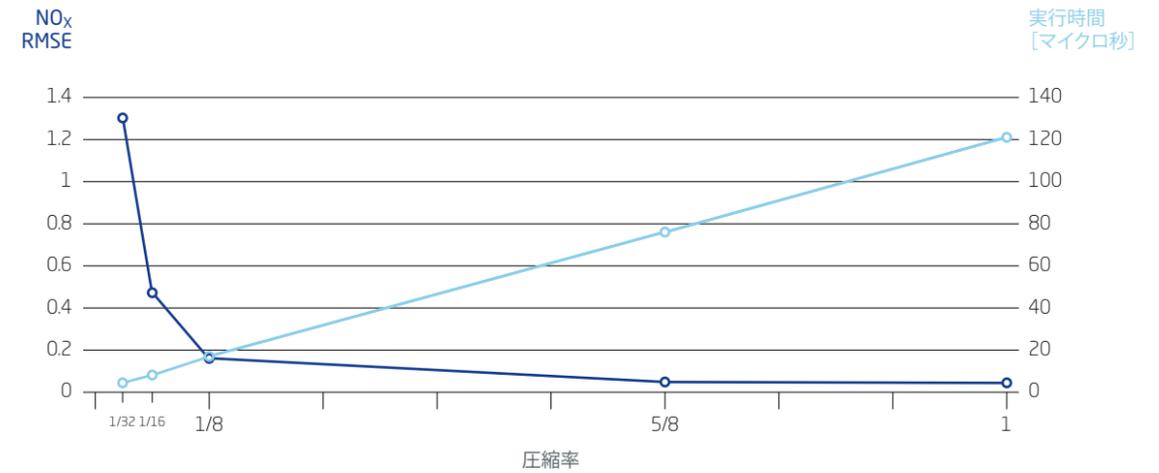


図2：NOx 値の結果の例

ニングと評価を行います。トレーニングデータの量とモデル圧縮率には、実行時間、メモリサイズ、出力精度とのトレードオフの関係があります。統計的尺度に基づくモデル精度の検証も ETAS ASCMO で行え、十分な出力精度が得られた時点で、モデルを AMU データ形式にエクスポートし、ECU ハードウェア内に展開します。

応用例と性能解析

非生産目的の例として、エンジンの NOx 排出量を求めた結果が図2です。非圧縮モデルの AMU 実行時間は約 120 マイクロ秒でした。図2から得られる結論の1つは、モデルの圧縮率と実行時間との間には線形の関係があるということです。斜めの線の勾配は入力データ数に依存します。もう1つこの図から分かるのは、モデルの圧縮と二乗平均平方根誤差 (RMSE) との間に非線形のトレードオフの関係があるということです。圧縮係数を大きくする (この例では 1/8 未満に圧縮する) と RMSE は極端に上昇します。このように、モデルサイズを小さくするほど実行時間は短くなりますが、元のモデルの挙動は維持され、精度が極端に低下することはありません。実際の圧縮率は、個々のアプリケーションの RMSE 要件に応じて決定します。

各文献にも、ETAS ASCMO と Infineon による AMU のその他の応用例が記載されています。たとえば、体積効率と排気再循環 (EGR) のモデリングに関して^[2]、この新しいアプローチが量産ソフトウェアの開発にいかに関与したかがエビデンスとともに示されています。

まとめ

ECU の機能が複雑化と共に採用されるようになってきたデータ駆動型モデリングは、必要な時間と労力の総量を削減する一方で、品質を向上させ、アプリケーションの明確

な理解に役立っています。ETAS ASCMO においてクリック1つで生成された精密な挙動モデルは、Infineon AURIX™ AMU によって、ECU のメインコアに大きな影響を及ぼすことなく実行されます。このように AMU のハードウェアアクセラレーション機能と ETAS ASCMO のモデル圧縮機能は、データ駆動型モデルを効率よく ECU に実装するための鍵となっています。

執筆者

- Chinh Nguyen 氏**, Ford Motor Company
システムオンチップ・車載コンピュータ担当リサーチエンジニア
- Tobias Gutjahr**, ETAS Inc.
プログラムマネージャ
- Adam Banker 氏**, Ford Motor Company
パワートレイン制御担当リサーチテクニカルエキスパート
- Dona Burkard 氏**, Ford Motor Company
車載コアソフトウェアマネージャ
- Klaus Scheibert 氏**, Infineon Technologies AG
Infineon 自動車マイクロコントローラ搭載 PT&xEV アプリケーションのシステムアーキテクチャチーム上級主任
- Atila Bulmus 氏**, Infineon Technologies North America Corp.
パワートレイン担当システムアプリケーションエンジニア
首席主任

この記事は^[1]で公開された調査結果を要約したものです。

参考文献

- ^[1] Nguyen, C., Gutjahr, T., Banker, A., Burkard, D., Scheibert, K., Bulmus, A. Hardware Supported Data-Driven Modeling for ECU Function Development. SAE Technical Paper 2020-01-1366, 2020.
- ^[2] Nork, B. and Diener, R. AMU-Based Functions on Engine ECUs. In: International Conference on Calibration Methods and Automotive Data Analytics, Expert Verlag, 2019.