

feature article

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

Model Based Development Processes for Advanced Control and Reliable Systems

成沢 文雄 Fumio Narisawa

佐藤 真也 Shinya Sato

安島 俊幸 Toshiyuki Ajima

守田 雄一郎 Yuichiro Morita

組込みソフトウェアの品質確保と開発効率向上を実現するうえで、ブロック線図をベースにしたモデル作成、シミュレーション、コード生成を行うツールの進化などにより、モデルベース開発手法の適用が現実的になってきている。これらを実際の組込みシステムの製品開発に適用するためには、ソフトウェアの構造化などによるプラットフォームの整備とともに制御対象である機構やモータ、インバータのモデル化が不可欠である。日立グループは、制御ソフトウェア実装ノウハウを基本ソフトウェアとして構造化し、一貫した入出力単位「パワー」を用いて、機構、電機、制御という複数の異なる物理系から成る複合モデルの協調設計・検証技術を開発した。

1. はじめに

現在、地球温暖化の問題がますます顕在化してきており、CO₂など温室効果ガスの排出量削減に向けて、電力、交通、製造などの社会・産業インフラシステムの省エネルギー・燃費向上が求められている。そのため、これらのシステムに組み込まれる制御ソフトウェアの大規模化・複雑化が進んでいる一方、センサーで検知した情報を演算処理し、アクチュエータを駆動するソフトウェアを、限られた開発期間中にいかに効率的に開発するかが大きな課題となっている。

日立グループは、幅広い分野に向けて地球温暖化対策のための省エネルギー、燃費向上技術の研究開発に取り組むとともに、質の高い製品を適時に提供するために、基盤技術の一つとして、生産性と高品質化を両立する組込みソフトウェア生産技術の研究開発に取り組んでいる。

ここでは、開発時の手戻りを最小化するアプローチとして、制御系シミュレーションモデルをベースに、制御ソフトウェアを開発するモデルベース開発 (MBD: Model Based Development) 手法への日立グループの取り組みと適用事例について述べる (図1参照)。

2. 制御ソフトウェア開発の課題と施策

制御ソフトウェアを開発するための従来からの典型的なプロセスは、要求仕様を基に制御設計、ソフトウェア開発、検証・適合のフェーズを経て開発するものであり、一般に「V字プロセス」と呼ばれる (図2上参照)。制御設計者による設計の結果である仕様書を、次のソフトウェア開発工程で参照してソフトウェアを作成し、ECU (Electronic

Control Unit: 電子制御装置) に組み込んだうえで動作の検証を行う。このため、制御設計の工程でつくり込まれた不具合は、検証・適合工程で初めて検出・修正されることとなり、手戻りが大きく、開発効率向上を阻害する大きな要因となっていた。

そこで、モデルベース開発を導入して開発の効率向上を図った (図2下参照)。モデルベース開発は、制御アルゴリズムと制御対象の物理現象をモデルとして記述し、物理現象に基づいた設計を行うことが特徴であり、MATLAB/Simulink^{※)}などの設計ツール上でブロック線図と呼ばれる記述を用いる。設計対象である制御アルゴリズムとともに制御対象をモデル化し、MILS (Model in the Loop Simulation) と呼ばれるシミュレーション手法によって即座に動作を確認し、制御設計工程での検証が可能のため、設計内容の修正に伴う手戻りを大幅に削減することができる。

さらに、近年、このモデルから、製品開発に適用可能な性能と品質のソースコードの自動生成が可能となっており、従来は人手によってコーディングしていた工数と人手ミスの検証・修正の時間も削減することが可能となった。

このようなモデルベース開発を実際の製品開発プロセスとして実現するためには、設計手法やツールの導入だけでなく、以下の確立が必須である。

- (1) 組込みソフトウェアの構造化
- (2) 制御および制御対象のモデル化

日立グループで構築した組込みソフトウェア構造化とモデル化の実現方式について次に述べる。

※) MATLAB/Simulinkは、The MathWorks, Inc.の登録商標である。

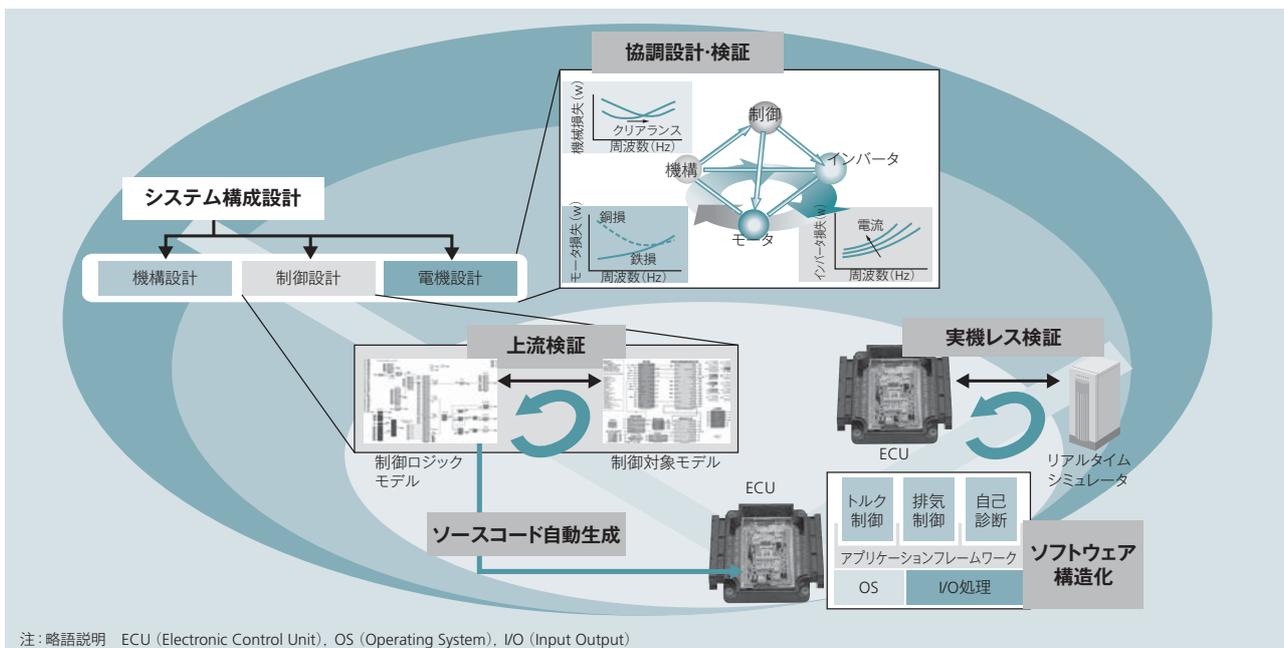


図1 モデルベース開発プロセスの全体像
 制御ロジックと制御対象をモデル化し、上流工程で検証を行うことがモデルベース開発の特徴である。さらに制御ロジックモデルは機構、電機モデルと協調した設計・検証、モデルからソフトウェアのソースコード自動生成、リアルタイムシミュレータによる実機レス検証がそれぞれ可能となり、上流工程から下流の検証工程までの開発効率を向上する。

3. ソフトウェアの構造化

3.1 ソフトウェアプラットフォーム

モデルベース開発の特徴である生産性の向上を実際の組み込みソフトウェア開発のプロセスとして生かすためには、信頼性の維持・向上が不可欠である。特に制御システムを構築するためのソフトウェアには、演算処理を常に一定の

時間内に終わるためのリアルタイム性の保証が必須であることから、これを実現するソフトウェアの構造化とフレームワーク化によってプラットフォームを構築した(図3参照)。

組み込みソフトウェア全体をアプリケーションソフトウェアと基本ソフトウェアの二つに分離した構造とし、このうち基本ソフトウェアはリアルタイムOS (Operating System), 入出力処理および通信処理を行うミドルウェアから構成した。アプリケーションソフトウェアには標準インタフェースを定義することにより、アプリケーションソフトウェアの再利用性を向上するとともに、インタフェースの最適化によって、現行のECUに搭載可能なメモリ容量を実現している。

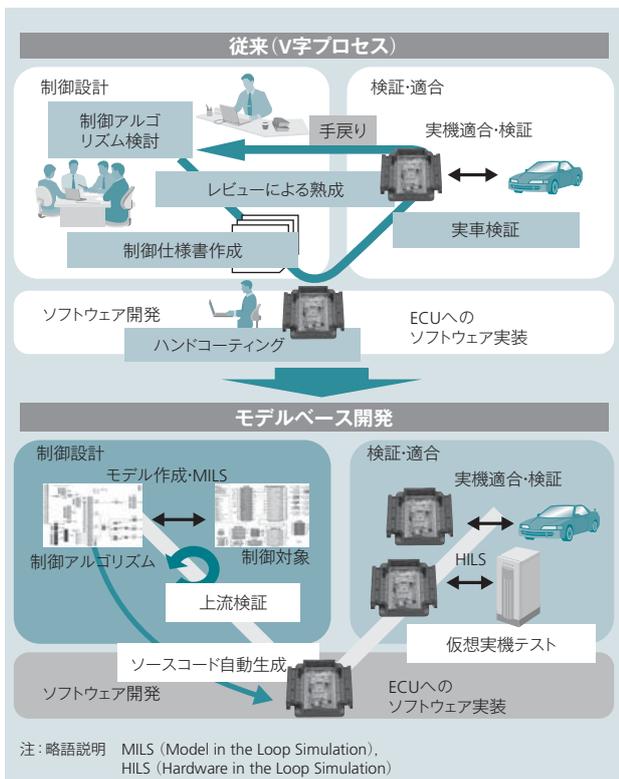


図2 モデルベース開発プロセス
 制御アルゴリズムと制御対象をともにモデル化することで、検証の手戻りの大幅な削減が可能となる。

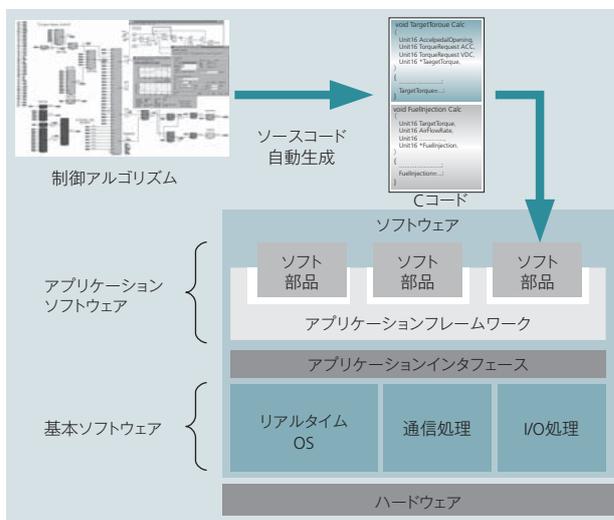


図3 ソフトウェアの構造化
 アプリケーションと基本ソフトウェアの分離、リアルタイム性を実現するフレームワークにより、ソースコード自動生成を効果的に活用した。

3.2 アプリケーションフレームワーク

アプリケーションソフトウェアを統合する際、従来はソフトウェア設計者が制御の内容や部品どうしの接続を設計者とすり合わせながら統合していたが、ソースコード自動生成を活用して開発効率を向上するためには、生成されるソフトウェアを一定の手続きで統合する仕組みが重要である。このため、ソフトウェア部品を定型化して標準的なインタフェース規約を設けるとともに、制御モデル上の部品間の接続関係を解析・抽出してリアルタイムOS上に配置するツールを開発し、全体をフレームワークとして統合した。これにより、制御モデルからソースコード自動生成を経て組込みソフトウェアを統合するまでの一連のプロセスをシームレスに実現し、ソフトウェアの開発期間を短縮した。

4. 制御・制御対象のモデル化と適用事例

モデルベース開発の活用によってさまざまな効果が得られるが、典型的な事例として、自動車エンジン制御アルゴリズムの検証に活用した事例と、メカニズム、電機、ソフトウェアの協調設計の実現方法および圧縮機システム開発への活用例について以下に述べる。

4.1 自動車エンジン制御

日立グループは、自動車エンジンの制御開発にモデルベース開発を導入しており、自動車に関するシミュレーション技術やパラメータ適合のノウハウを基に、制御対象の高精度なモデル化を推進し、MILSなどに活用している。一例として、MT (Manual Transmission) 車対応発進時トルクアシスト制御へのMILS適用事例について述べる。

上記制御は、複雑な操作が要求されるMT車の発進時に、電子制御スロットルによるエンジントルクの自動調整を実施して、ドライバーの発進操作をアシストするものである。クラッチ締結に伴うエンジン回転数の落ち込みを最小とするために、電子制御スロットルを操作する制御アルゴリズムを考案し、MATLAB/Simulinkを用いてモデル化を行った(図4左参照)。一方、制御対象であるMT車両に関しては、エンジン側と駆動系側それぞれについて連立運動方程式を導き、同じくMATLAB/Simulinkによってモデル化を実施した(図4右参照)。

両モデルを結合したMILS環境下で、制御アルゴリズムの机上検証と熟成を重ね、最終的に十分なトルクアシスト効果が得られることを確認した(図5上参照)。なお、後に実施した実車試験では、MILS評価とよい一致を見せており(図5下参照)、実車適合期間の短縮が可能となった。

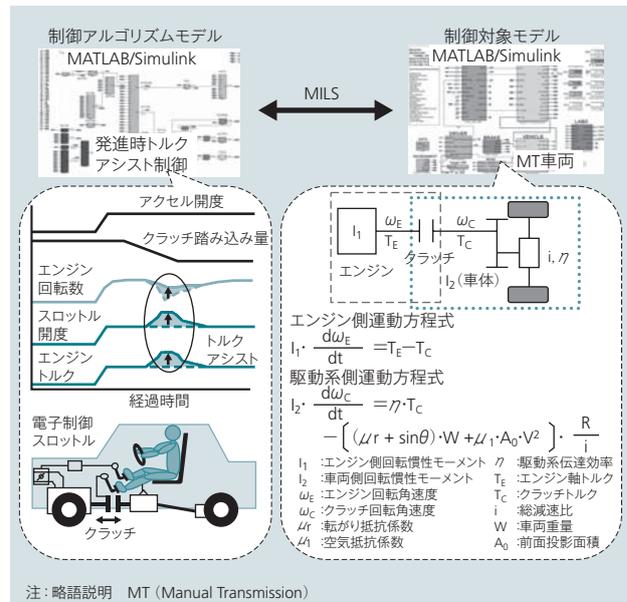


図4 発進時トルクアシスト制御へのMILS適用

制御アルゴリズムと制御対象(MT車両)をMATLAB/Simulinkにてモデル化し、MILS環境でアルゴリズムの上流検証を実施した。

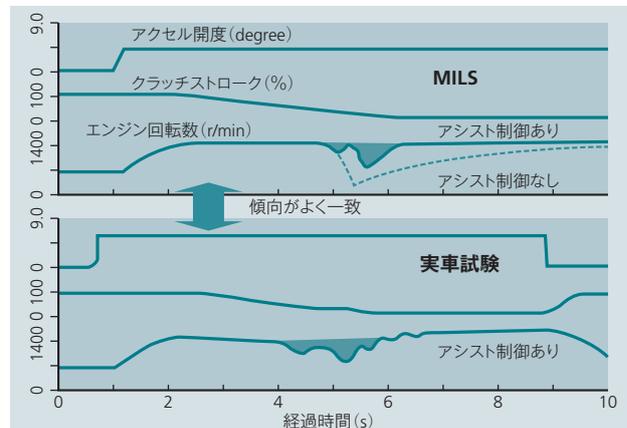


図5 発進時トルクアシスト制御の性能検証 (MILS/実車)

トルクアシスト制御の性能評価を、MILSと実車試験にて実施したところ、定量的にもよく一致した結果が得られた。

4.2 システムの協調設計・検証

次に、異なる物理系から成る協調設計・検証システムを構築し、高効率なモータを適用した圧縮機の検証に適用した例について述べる。

4.2.1 製品システムの一貫シミュレーション

圧縮機システムの制御アルゴリズムや組込みソフトウェアの妥当性と品質を机上検証するためには、製品システム全体の物理現象を精度よく再現できる一貫検証環境が不可欠である(図6参照)。

従来から、製品システムを構成する機構やモータおよびインバータなどの各コンポーネントでは、有限要素法をはじめとする詳細な設計データを活用した独自カスタムモデルを構築することは可能であったが、製品のシステム全体を一貫検証する場合、電圧やトルクおよび熱といった複数の異なる物理量と同時に、制御アルゴリズムを取り扱う必要があり、全体の挙動を検証する際の実用上のハードルと

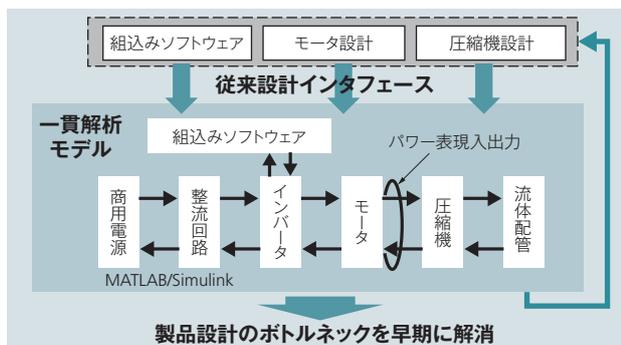


図6 機構・モータ・制御一体シミュレータの概要

各コンポーネントのモデル入出力をパワー表現し、制御アルゴリズムを含んだ製品システム全体を一貫解析することで、製品設計におけるボトルネックを早期に解消する。

なっていた。

日立グループは、各モデルの入出力単位を「パワー」で表現統一し、既存のモータ、インバータ、機構の設計資産を接続するシミュレータを構築することで、各コンポーネント間で発生するエネルギーの流れを矛盾なく解くことを可能とした。このパワーで表現されたモデルを用いて、制御アルゴリズムと同一のシミュレーション環境で製品システム全体が検証できるようになった。

これらの技術構築により、製品設計のボトルネックを早期に発見し、短期間で各コンポーネント設計にフィードバックする製品開発プロセスを確立した。

4.2.2. 製品システムと組込みソフトウェアのチューニング

製品システムの検証では、基本性能の確認とともに、組込みソフトウェアのパラメータチューニングがある。組込みソフトウェアのパラメータチューニングに適用する場合、より高精度な解析が必要であり、各コンポーネントにおける飽和現象などの非線形特性と損失および初期状態を再現可能なモデルによって、制御に対する外乱を実現することができる。

また、組込みソフトウェアの制御パラメータ調整による製品システムの挙動の一つであるモータ電流波形の確認により、安定性が向上しただけでなく、モータ停止位置を解析条件として制御外乱を与えたときの影響も検証が可能となった（図7参照）。

このように、実機が存在しない設計初期の段階においても制御パラメータのチューニングが可能となり、組込み制御システムの性能や品質の向上に貢献している。

5. おわりに

ここでは、開発時の手戻りを最小化するアプローチとして、制御系シミュレーションモデルをベースに、制御ソフトウェアを開発するモデルベース開発手法への日立グループの取り組みと適用事例について述べた。

今後ますます環境への配慮が求められる制御システムの

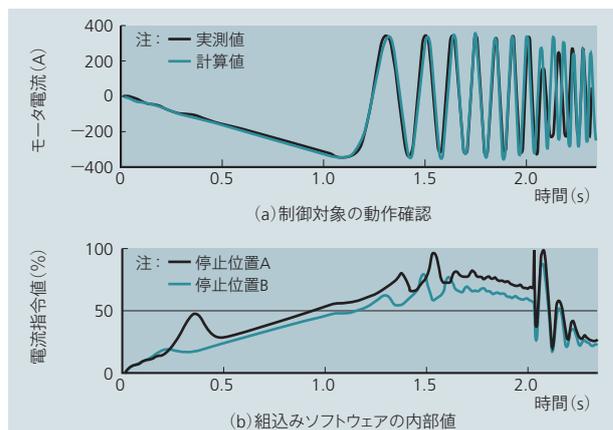


図7 製品システムにおける組込みソフトウェアの検証

組込みソフトウェアの制御パラメータによるシステムの挙動と、モータ停止位置条件の違いによる制御外乱の影響を検証した。

中核を担う組込みソフトウェアには、品質と開発効率の両立がいつそう求められる。

日立グループはモデルベース開発手法をさまざまな製品に展開するとともに、制御モデル、プラントモデルを資産として活用することで、組込みシステムの品質と開発効率を向上させ、質の高い製品をタイムリーに提供していく考えである。

参考文献

- 1) K. Yoshimura, et al.: A Development Method for Object-Oriented Automotive Control Software Embedded With Automatically Generated Program From Controller Models, SAE Paper No. 2004-01-0709 (2004.3)
- 2) 佐藤, 外: 自動車制御ソフトウェア開発技術の動向, エンジンテクノロジー, vol.9, no.2, 45~50 (2007)

執筆者紹介



成沢 文雄

1996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, 組込みソフトウェアのプラットフォーム開発に従事
情報処理学会会員, ACM会員



佐藤 真也

1993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, 自動車エンジンの制御アルゴリズム開発に従事
電子情報通信学会会員, 自動車技術会会員



安島 俊幸

1984年日立製作所入社, 日立研究所 インバータイノベーションセンタ 所属
現在, 電機システム解析技術開発に従事
電気学会会員



守田 雄一郎

1993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, 組込み制御システムの研究開発に従事
工学博士
電気学会会員, 電子情報通信学会会員