シミュレーション駆動アプローチによるマイクロEVの研究開発

白石 洋一*

Research and Development of Micro-EV by Using Simulation Driven Approach

Yoichi SHIRAISHI*

*群馬大学 (〒373-0057 群馬県太田市本町 29-1)

*Gunma University (29-1 Hon-cho Ohta, Gunma 373-0057)

1. はじめに

電気自動車 (EV: Electronic Vehicle) の実用化については、自動車メーカーと研究機関において、さまざまなアプローチが行われている。われわれの研究室は、2009 年より群馬大学次世代電気自動車 (EV) 研究会 (以下、EV 研究会)¹⁾に所属し、地元企業と共同でマイクロEV、などの研究開発を行っている。その後、2013 年 1 月には、マイクロEVを含む超小型モビリティと呼ぶカテゴリが国土交通省で新設され²⁾、その認定制度に沿って実用化を目指している。

主に市販の部品を組み立てることで、経験がなくてもEVを開発することが可能であると言われた時期もあったが、認定制度を考慮すると、自動車開発の経験が必要条件と考えられる。EV 研究会には地元の自動車関連企業が所属し、自動車のハードウェアとしては、既に図1に示すEVを開発して、一部実用化している。EVの実用化では、モータ、バッテリー、などを制御するための組込みシステムであるECU (Electronic Control Unit) が非常に重要であり、われわれの研究室では、EVに必要なECUを研究開発している。

EVに必要な組込みシステムを図2に示す。現在、これ

らすべての組込みシステムを研究開発中である^{3)~5)}。以下では、特に超高性能モータ制御の研究開発におけるシミュレーション駆動アプローチについて述べる。

2. モータ駆動制御と電源システム

EVにおいて、最も重要な電源系とモータ駆動制御システムの構成を図3に示す。本システムは、モータ制御、ワイヤレス給電制御、およびキャパシタとバッテリーからなるハイブリッド電源制御システムにより構成される。EVでは、発進時に必要な大電力の供給、モータの回生発電電力[†]回収⁵⁾、および短時間の頻繁な充電を効率的に取り扱う必要がある。ハイブリッド電源におけるキャパシタを、バッテリーとモータ、およびワイヤレス給電の間のバッファとして位置づけ、バッテリーの寿命を短縮する急速充放電を防止する⁴⁾。

組込みシステムの開発では、ハードウェア (HW) とソフトウェア (SW) の両方とそれらの協調動作を最適化する必要がある。開発したシステムの実験においても、実験用のHWとSWの両方の開発が必要である。以下では、現在、得られている一部の実験結果について述べる。

図1. マイクロEVと8輪バス

図2. マイクロEVにおける組込みシステム

図3. モータ駆動制御と電源システムの構成

3. シミュレーション駆動アプローチとモデルベース手法

3.1 シミュレーション駆動アプローチ

シミュレーション駆動 (SD: Simulation Driven) アプローチと従来のシミュレーションアプローチの相違は、シミュレータに対象のどこまでを含めるかにある。従来のシミュレーションは、回路、電磁界、流体、など、対象の単一の振る舞いをシミュレートするアプローチである。一方、シミュレーション駆動は、対象全体をシミュレートすることを目的とする^{6),7)}。例えば、自動車の ECU 開発のためのシミュレーションでは、タイヤ、エンジン、トランスミッション、ブレーキ、などを結合した自動車 1 台をプラントの振る舞いとして記述し、さらに制御システムの振る舞いを記述して結合する。したがって、回路、電磁界、メカニズム、など、複数種類のシミュレータが必要になり、さらにそれらの連成が必要になる。

3.2 モデルベース手法

SD アプローチにおいて、プラント全体、すなわち自動車 1 台の振る舞いすべてをゼロから正確に記述し、シミュレータを開発することは、現実的には不可能に近い。そのため、モデルベース手法が提案され、実用化されてきた。モデルベース手法は、モデルベース設計／開発 (MBD: Model Based Design/Development) と呼ばれることが多く、自動車の ECU の設計／開発では必須となっている。われわれは、さらにモデルベース解析 (MBA: Model Based Analysis) を含め、これらをモデルベース手法と呼び、シミュレータをもとにした非破壊検査⁸⁾、脳、循環器系の疾患診断^{9),10)} に応用している。

MB (Model Based) アプローチでは、図 4 に示す Rapid Prototyping (RPT) を利用することで、シミュレータを高速に実行することができる。本来、Rapid Prototyping はコントローラを構成する HW がいない場合に、コントローラ上で実行するモデルが実際のプラントを制御可能かどうか検証するための処理である。図 4 の上段は、左側の、シミュレータを Simulink で記述したダイアグラムから C コードを

図 4. Rapid Prototyping におけるモデルの実行

自動生成して、PC、EWS 上でシミュレータを実行する方法を示している。シミュレータの開発者はコーディングをする必要がない。図の下段は、このダイアグラムを Rapid Prototyper と呼ぶ装置上にダウンロードして、専用 HW により、高速に実行する方法を示している。特に、入出力の実行は PC、EWS に比べて非常に高速である。

4. モータ制御システム

SD アプローチによるモータ制御システムの開発について述べる。図 5 に、われわれが EV の研究開発で使用しているモータを示す。このモータは、ソーラカーレースなどにも使用される汎用的なモータである。定格出力は、国交省の認定制度の基準から 300 W とし、インホイールモータ[†]として 1 車輪に 1 個ずつ装着する。このモータを駆動するためのコントローラをモデル化し、MBD によってコントローラの基本動作の検証結果について述べる。

4.1 モータ制御システムのモデリング

EV におけるモータの制御機能は、アクセル開度に応じて決定されるモータの回転数を高精度に制御することにある。従来の自動車と同様に、アクセル開度に比例してモータの回転数を決定する。モータには走行環境における負荷がかかることから、実際の回転数は指定した回転数になるとは限らない。したがって回転数の制御においては、モータの実際の回転数をフィードバックした PI (Proportional and Integral) 制御が必要である。

図 6 はモータ制御システムの最上位階層を示す Simulink によるブロックダイアグラムである。コントローラは 4 ブロックから構成され、モータを示すプラントモデルは右上のブロックである。これらのブロック内にはさらに複数のブロックが含まれる。ブロック間の矢印は、信号の流れを示す。

プラントモデルを図 7 に示す。ここでは Simulink ライブラリに登録されているブロックを使用してプラントを記述している。インバータの入力「In1」は、MOSFET のスイッチングパターンを表す 6 次元 0-1 ベクトルである。すなわち、3 相信号それぞれの high と low を表すベクトルである。

項目	仕様
種類	3相ブラシレス同期モータ
形式	アウターローター型
マグネット	フェライト
構成	12極 - 18スロット
結線方式	スター結線
定格出力	300 W
最高回転数	9400 rpm
巻線仕様	Φ1.0 × 2.7T × 6並列

図 5. EV に使用しているモータ

図6. モータ制御システム (最上位階層)

図7. プラントモデル

“MOSFET Inverter” はモータの回転を制御する3相信号をスイッチング回路用に生成するブロックである。モータは“Permanent Magnet Synchronous Machine”ブロックによってモデル化している。現在、電磁界シミュレーションをもとに、実際に使用しているモータを高精度にモデル化しつつあり⁵⁾、完成後に入れ換える予定である。このブロックの出力、“Out1”はモータのロータの位置を示すホールセンサICの信号である。図7の下方にあるSCOPEブロックを含む部分は、シミュレーションの途中経過のパラメータ値を出力するために挿入している。

図8にコントローラモデルを示す。ここでは既存のフィードバック制御アルゴリズムを使用している。モータの出力であるホールセンサICの信号をもとに、“Decoder”ブロックにおいて次の3相制御信号の0-1パターンを生成する。3相ブラシレス同期モータのスイッチングパターンを表1に示す。例えば、ホールセンサICのU相、V相、W相の各信号が0, 0, 1の時、U相、V相、W相の各信号のhigh側とlow側のスイッチングのON (1)とOFF (0)は、出力信号の対応する欄に示すように決定する。

“estimate Speed”ブロックでは、ホールセンサICの信号

図8. コントローラモデル

表1. 3相制御信号の出力パターン

ホールセンサ IC			出力信号					
U	V	W	UH	UL	VH	VL	WH	WL
0	0	1	0	0	0	1	1	0
0	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	1

から現在のモータの回転数を計算する。“Control Speed”ブロックでは、与えられた回転数と、この回転数の差をもとにPI制御アルゴリズムによって3相制御信号に与えるデューティ比を求める。“PWM Generator”ブロックでは、3相制御信号の0-1パターンとデューティ比から信号0と1の継続時間を求めて、プラントへの入力、すなわちコントローラの出力とする。

4.2 実機によるモデルの妥当性検証

モデルの機能と精度を検証するために、実機との比較は必須である。以下では、3節で示したモータ制御システムモデルをRapid Prototyperと呼ぶ汎用HW上で実行し、実際のモータの制御機能を実現しているかどうか、どの程度の精度で制御可能かどうかを検証する。この検証フェーズをRapid Prototypingと呼び、この検証でモデルの制御仕様が満たされたことを確認後、HW/SW分割処理を経てコントローラのHWとSWの開発を行う。

実機によるモデル検証のための環境を図9に示す。モデルの実行には、エー・アンド・デイ社のAD5435¹¹⁾を使用した。ここで、図の制御基板にはモータ制御用マイコンが搭載されており、実際のモータ制御ではこのマイコンに制御プログラムをダウンロードして実行する。今回、3節で作成したモデルをPCからAD5435にダウンロードして実行し、コントローラの出力を制御基板の回路に直接与えて

図9. Rapid Prototyping 環境

図11. ホールセンサ IC 信号の比較

図10. U相制御信号の比較

図12. デューティ比の変更

モータを制御する。制御基板上のモータ制御用マイコンは使用しない。電源電圧は17Vとする。検証の方法は、次のとおりである。

モデルのシミュレーション時には、AD5435経由でPC上のGUIに図7で示したSCOPEブロックの出力結果が表示される。この結果と、モデル実行時の信号、などを示すオシロスコープ上の実機の計測結果を目視により比較する。FET制御信号、回転数、ホールセンサICの信号など各種信号の状態を確認する。

4.2.1 モータ制御信号

モータ制御信号の検証を行う。U相のhigh (UH) と low (UL) の信号に関して、モデルのシミュレーション結果と実機の測定結果の比較を行った。結果を図10に示す。本来、デューティ比はアクセル開度に比例させて求めるが、ここではデューティ比を25%として与えている。横軸は時刻で、5ms/DIV、縦軸は電圧で、2V/DIVである。この図に示すように左のシミュレーション結果と右の実測結果は一致している。

4.2.2 ホールセンサ IC の信号

モータのロータの位置を示すホールセンサICの信号を比較する。図11に結果を示す。横軸は時刻で10ms/DIV、縦軸は電圧で0.5V/DIVである。信号パルスの間隔と電圧は一致しているが、実機の測定結果では波形のhigh側が変形している。この原因は、ホールセンサICの信号をA/D変換する際に、電流を制限するために抵抗を入れていることが原因であり、モデルと実機の不一致ではない。

4.2.3 デューティ比の変更

コントローラとモータを組み合わせ、デューティ比を動的に変化させてモータの回転数が追従するかどうかの検証を行った。結果を図12に示す。初期のデューティ比を10%とし、5秒後に20%に変更した。

図に示すように、モータの回転数は仕様通り260から620rpm/secに変化した。現状では、回転数が変化するまでに要する約0.5秒間をシミュレーションで求めることができず、今後の課題である。そのためには、損失を含めたモータのより精密なモデリング⁵⁾が必要であると考えられる。

5. おわりに

EVにおいて最も重要なモータの制御を対象として、シミュレーション駆動アプローチについて述べた。現在、モータモデルの精度向上を行っており、今後、さまざまなモータの制御に適用して行く予定である。

(2014.8.19- 受理)

文 献

- 1) “群馬大学次世代EV研究会,” <http://www.ccr.gunma-u.ac.jp/ EV/>
- 2) “超小型モビリティについて,” http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr1_000043.html
- 3) U. F. Siddiqi, Y. Shiraishi, and S. M. Sait: “Muti-Objective Optimal Path Selection in Electric Vehicles,” Artificial Life and Robotics,

Vol. 17, No. 1, pp. 113–122, October 2012

- 4) 小林康博, 辰野昭司, 高橋修司, 茂木和弘, 白石洋一:
“DSPによるキャパシタ・バッテリー・ハイブリッド電源制御
用組込みシステム,” 第57回自動制御連合講演会, 2014年
11月
- 5) 嶋村裕樹, 白石洋一, 茂木和弘, 小林康博, 古賀誉大, 中
本英治, 内田 潤, 東藤隆志: “モデルベース開発手法によ
る超小型モビリティ用モータモデリング,” 第57回 自動
制御連合講演会, 2014年11月
- 6) “MATLAB 数値計算言語,” [http://www.mathworks.co.jp/
products/matlab/](http://www.mathworks.co.jp/products/matlab/)
- 7) “ANSYS SCADE System,” [http://www.ansys.com/Products/
Simulation+Technology/Systems+&+Multiphysics/Systems+
&+Embedded+Software/ANSYS+SCADE+System](http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Systems+&+Multiphysics/Systems+&+Embedded+Software/ANSYS+SCADE+System)
- 8) S. Takahashi, K. Mizunuma, A. Horiguchi, K. Motegi, and Y.
Shiraishi: “Simulation based Defect Estimation of Metal Pole by
analyzing Hammering Sounds,” SICE 2014, September 2014
- 9) K. Wang, M. L. Steyn-Ross, D. A. Steyn-Ross, M. T. Wilson, J.
W. Sleight, and Y. Shiraishi: “Simulations of pattern dynamics for
reaction-diffusion systems via SIMULINK,” BMC Systems
Biology 2014, 11 April 2014
- 10) S. Takahashi, K. Sakawa, Y. Shiraishi, and H. Miyashita:

“Modeling, Simulation and Parameter Estimation of the
Cardiovascular System by using Model Based Approach,” SICE
2013 Annual Conference, pp. 493–500, September 2013

- 11) “DSP (計測・制御・シミュレーション) ハードウェア,”
エー・アンド・デイ, [http://www.aandd.co.jp/adhome/
products/dsp/dsp-hardware/ad5435-main.html](http://www.aandd.co.jp/adhome/products/dsp/dsp-hardware/ad5435-main.html)

† 用語解説

回生発電電力: 電源入力を変換して駆動回転力として出
力しているモータに対して, 逆に軸回転を入力して発
電機として作動させ, 運動エネルギーを電気エネル
ギーに変換して回収または消費する際に得られる電力。
インホイールモータ: 車輪のハブ内部に装備された電気
モータ。

著者紹介

白石洋一 (しらいし よういち)

1981年, 東工大大学院修了。同年, (株)日立製
作所中央研究所入所。1993年, 群馬大学工学部に
移動。研究分野は, 人工知能, 組合せ最適化手
法, 組込みシステム開発手法を含み, これらを半
導体設計, 電気自動車, マルチコプタ, 医療, 非
破壊検査, などへ応用している。JIEP, 電子情報
通信学会, 情報処理学会, 応用数理学会, 日本森
林学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会,
IEEE, ACM, 各会員。