

車載電子モジュール用プラットフォームの開発（第4報）

3 制御対象のモデリング手法と車載通信テンプレートの構築

倉本丈久, 大賀 誠, 宮野忠文, 長谷川浩治

Development of the Innovative Platform for the electronic module using vehicle applications (4th Report)
The method for Plant modeling and construct for in-vehicle network system template

KURAMOTO Takehisa, OHGA Makoto, MIYANO Tadafumi and HASEGAWA Koji

The MBD (Model Based Development) is a de facto standard development method in the automotive industry, specially electrical equipment. For MBD, it is necessary to create models of plants and controllers. However plants, those are made on a trial basis, have unknown modeling parameters. This paper provides plant model designing methods of physical modeling and system identification. We applied these methods to BLDC (Brushless Direct-Current) motor. In result, it becomes confirmed that these methods can be designed BLDC motor model to be like actually.

On the other hand, a modern automobile may have as many as tens of ECU (electronic control units). Therefore, in-vehicle network system is becoming crucial platform technology for the automotive industry. In this study, we constructed in-vehicle network system template using CAN bus that is a vehicle bus standard designed to allow ECU to communicate with each other within a vehicle.

キーワード: モデルベース開発, MATLAB/Simulink, 物理モデリング, システム同定, 車載通信, CAN

1 緒 言

自動車の環境, 安全, 快適性などの機能向上のため, 自動車部品の駆動を電子部品でサポートする技術が進展している。特に, 近年はハイブリッド車や電気自動車の普及によって, 車載部品のエレクトロニクス化が進んでいる¹⁾。

エレクトロニクス化された車載部品(車載電装品)は, モータなどの動力源と, それを制御するコントローラで構成されるが, この開発の効率化や品質向上を目的として, モデルベース開発(Model Based Development)の導入が進んでいる。モデルベース開発には, 動力源やコントローラのモデル化が必要であり, 動力源として試作モータを用いる場合などは, 制御対象となるこれらのパラメータを明らかにする必要がある。

また, 車載電装品は, ECU (Electronic Control Unit) と呼ばれるコントローラが搭載されており, センサ及び他の ECU からの情報や指令を受けて車載電装品の制御を行っている。現在の自動車には, 数十個の ECU が搭載されていることから, これら ECU 同士を接続し情報の送受信を行う車載ネットワークシステムの重要性が増している。そのため, 車載電装品は, 車載ネットワークへの接続と情報の送受信を考慮して開発を行う必要がある。

そこで本報告では, 車載電装品の動力源として用いられることの多いブラシレス DC モータについて, そのモ

デル化を物理モデリングとシステム同定手法によって行う方法を示すとともに, 車載を想定したネットワークを CAN (Controller Area Network) プロトコルを用いて構築し, ネットワーク経由でのモータ制御を可能としたことについて述べる。

2 制御対象のモデリング手法

モデルベース開発とは開発対象となるシステム(制御対象及びコントローラ)を記述したモデルを仕様として定義し, そのモデルを拠り所とした設計・検証で開発を進める手法である。対象とするシステムや目的に応じてさまざまなモデリングの手法が存在するが, 車載部品の制御系を設計する場合, 一般に制御対象であるシステムを数学モデルで表現する手法が用いられる²⁾。

この数学モデルを構成する方法は, 次のように分類される。

(1) 物理モデリング

対象を支配する物理法則(運動方程式, 回路方程式など)を基にモデリングを行う手法。

(2) システム同定

対象とする動的システムの入出力データの測定値から, ある目的のもとで, 対象と同一であることを証明できるような, なんらかの数学モデルを作成する手法。

対象を支配する物理法則が既知である場合は物理モデ

リングが可能であるが、物理法則が未知である場合や、複雑なシステムである場合は、システム同定によって対象のモデル化を図る必要がある。本報告では、ブラシレス DC モータを対象として、物理モデリング及びシステム同定をそれぞれ次に示す手順で実施した。

(1) 物理モデリング

- ① MATLAB/Simulink/SimPowerSystems によるモータモデル作製
- ② 実測定によるパラメータ決定

(2) システム同定

- ① 同定実験の設計と実験
- ② データの前処理
- ③ システム同定
- ④ モデルの妥当性評価

3 ブラシレス DC モータのモデリング

ブラシレス DC モータは、DC モータと同じような特性を持ちながら、整流子を持たず、整流子の代わりに半導体スイッチを含む駆動回路によって駆動するモータである³⁾。整流子がないことから、長寿命などの利点を持ち、車載電装品や家電製品などに用いられる。本報告では、モータの各種データが公開されている MAXON 社のブラシレス DC モータ (商品名 EC モータ : 型番 167176) を対象に物理モデリング及びシステム同定を行った。このモータのデータシートを表 1 に示す。

表 1 MAXON EC モータ (167176) データシート⁴⁾

項目	パラメータ
公称電圧 (V)	12
公称電圧時の無負荷回転数 (rpm)	10,300
公称電圧時の無負荷電流 (mA)	886
端子間抵抗 (Ω)	0.134
端子間インダクタンス (mH)	0.0266
トルク定数 ($mN \cdot m/A$)	11.0
ロータ慣性モーメント ($g \cdot cm^2$)	85.0
回転数/トルク勾配 (rpm/ $mN \cdot m$)	10.5
永久磁石磁極ペア数	1

3.1 物理モデリング

本報告で取り扱う制御対象はブラシレス DC モータであり、その物理法則は機械系法則 (ニュートンの第 2 法則) 及び電気系法則 (キルヒホッフの法則) などにより表すことができる。MATLAB/Simulink のツールボックスである SimPowerSystems には、このブラシレス DC モータの物理法則をモデル化したものが用意されているため、これを利用してモデリングを行った。ブロック図を図 1 に示す。

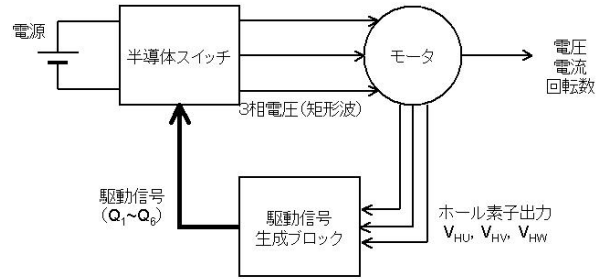


図 1 モータ駆動モデルのブロック図

モデルを用いて駆動シミュレーションを行うためには、誘起電圧定数、端子間抵抗などモータのパラメータが必要となる。このため、端子間抵抗及び端子間インダクタンスを LCR メータ、ロータを回転させた時に端子間に発生する誘起電圧をオシロスコープで測定した。その結果を表 2 及び図 2 に示す。DC モータの場合、誘起電圧はモータの回転数に比例すると見なせるため、図から、誘起電圧定数 K_e は $1.2626 (V_{peak-L-L}/Krpm)$ と計算できる。これらのパラメータと、図 1 のモデルを用いることで、モータのシミュレーションが可能である。

表 2 端子間抵抗及び端子間インダクタンス測定結果

パラメータ	実測値
端子間抵抗 (Ω)	0.2
端子間インダクタンス (mH)	0.017

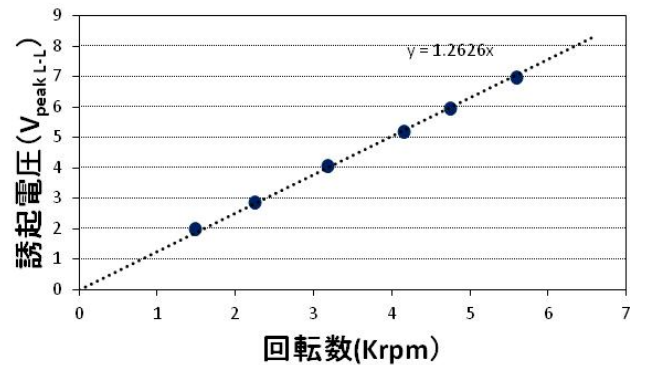


図 2 誘起電圧測定結果

3.2 システム同定

ブラシレス DC モータの伝達関数を、システム同定により求めた。まず、同定試験の設計であるが、モータの回転数を電圧で制御するシステムを想定して、入力としてモータの印加電圧 (PWM 駆動) の duty 比、出力として回転数を設定し、印加電圧の duty 比を正弦波状に変化させた場合の回転数を測定した。実験は MATLAB/Simulink 及びリアルタイムシミュレーション環境である xPCtar

get を用いて時間経過とともに周波数が増加する正弦波信号（チャープ信号）作成し、これをモータ駆動回路に duty 比として入力した時のモータの回転数を MATLAB/Simulink に取り込む方法で行った。実験系を**写真 1**、結果を**図 3**に示す。

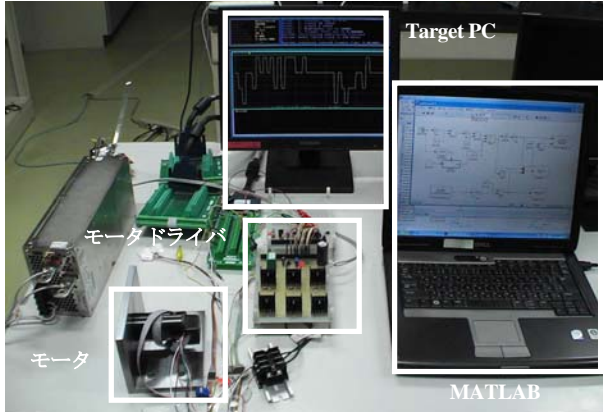


写真 1 システム同定 実験系

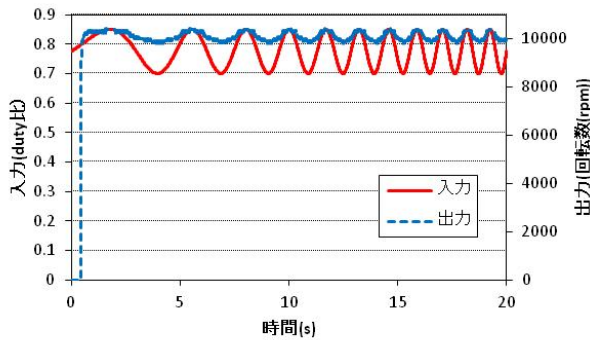


図 3 システム同定実験結果

この結果をもとに、MATLAB の制御系設計/信号処理ソフトウェアである System Identification Toolbox を用いてシステム同定を行った。まず、**図 3**の入出力データについてデータの切り出し、フィルタリングなどの信号処理を行い、処理後のデータを System Identification Toolbox に入力した。その入出力データに対して、式(1)で示す 2 次遅れ系を伝達関数 $G(s)$ として設定し、Toolbox を用いて係数の推定を行った。推定結果を**表 3**に示す。

$$G(s) = \frac{K_p}{(1+T_{p1} \cdot s)(1+T_{p2} \cdot s)} \dots\dots(1)$$

表 3 システム同定 推定結果

パラメータ	推定結果
K_p	12999
T_{p1}	0.032467
T_{p2}	0.001

3.3 各モデルのシミュレーション結果

物理モデル及びシステム同定モデルを用いてモータの起動時におけるシミュレーションを行った。また、比較のため、3.1 節で作製した物理モデルと**表 1**のパラメータを用いたシミュレーション及び実際にモータを駆動させた場合のモータの回転数の測定を行った。結果を**図 4**に示す。図から、物理モデル、システム同定モデルの結果は、実測結果と良く似た結果となっており、物理モデル、システム同定モデルとも、このモータの挙動をよく近似出来ていることが分かる。従って、この物理モデルまたはシステム同定モデルを用いて制御系設計が可能である。

なお、今回用いたモータドライバ用 IC は、モータがセンサレス駆動に移行し 480 度回転した後からデータ出力が開始されるため、起動直後のモータの回転数実測値は 0rpm となっている。

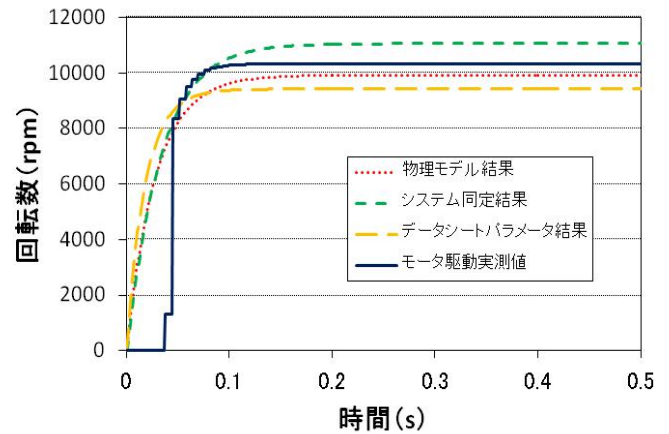


図 4 シミュレーション結果

4 試験的車載ネットワークの構築

4.1 CAN とは

現在の車載ネットワークに主に使われている規格として、CAN がある。この規格は、1986 年にドイツの電装機器メーカーであるロバート・ボッシュ社によって開発されたシリアル通信プロトコルで、ISO で標準規格化されており、車載機器のほか、FA(Factory Automation)、船舶、産業機械など多方面で導入されている⁵⁾。

CAN 通信の概略仕様を**表 4**に示す。CAN 通信には、接続された機器にマスタ/スレーブといった区別はなく、バスが空いていればどの機器も送信を開始出来る通信方式である。これは、どの機器からでも通信が開始できる一方、バスが塞がっていると、バスが空くまで通信が出来ないという特徴を持つ。また、CAN 通信のバスは一般的に 2 線式の差動信号で構成されるためノイズに強い、CAN バスにつながるすべてのユニットがエラーを監視するためエラー検出能力が高いなどの利点がある。

表4 CAN通信の概略仕様

項目	仕様
伝送方式	半二重シリアル通信
ネットワーク トポロジー	バス型 (マルチマスタ)
アクセス制御方式	CSMA/NBA
同期方式	調歩同期+位相補正
データ長	最大8バイト
符号化方式	NRZ方式+ビットスタッフ
最大通信速度	1Mbps (ISO11898) 125kbps (ISO11519)

4.2 CANを用いた試験的車載ネットワークの構築

試験的車載ネットワークとして、通信プロトコルにCANを用い、車載電装品に見立てたブラシレスDCモータの駆動制御を行う試験環境を構築した。その機能仕様を表5に、構成図を図5に示す。

表5 車載通信テンプレート 機能仕様

実現する機能	動作概要
モータの起動	duty比を85%に設定する モータON
モータ回転数増加	ボタン押下ごとにduty比を 現在値から1%増加させる (最大値85%)
モータ回転数減少	ボタン押下ごとに duty 比を 現在値から 1%減少させる (最小値 25%)
モータの停止	duty 比を 0%に設定する モータ OFF

駆動用ドライバ⁹⁾により駆動し、モータドライバへの入出力ボードからモータ駆動電圧 duty 比の指令を受け、モータが駆動するとモータの回転数を出力するように設計した。作製した試験環境を写真2に示す。ユーザインタフェース基板上のボタンを押すことにより、モータの起動、モータ駆動電圧 duty 比の増減、モータの停止が可能であり、開発したモータドライバをCAN経由で他のECUから制御するなどの試験に利用出来る。

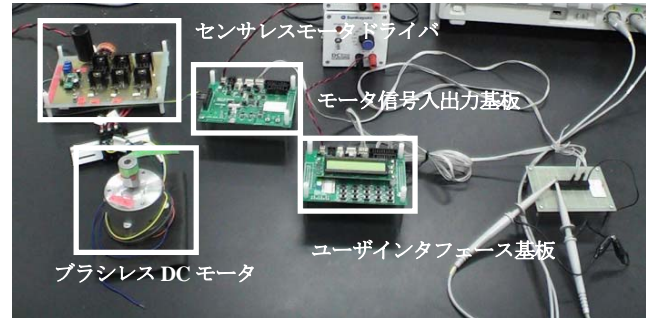


写真2 車載ネットワーク試験環境

5 結 言

ブラシレス DC モータのモデル化を、物理モデリング及びシステム同定を用いて行い、シミュレーションした結果、実際のモータの挙動とほぼ一致する結果が得られた。このことから、制御対象の詳細パラメータが不明な場合でも、物理モデリング及びシステム同定を行うことにより制御対象をモデル化でき、シミュレーションやコントローラ設計などを効率的に行うことが出来る。

また、試験的車載ネットワークとして、モータドライバを介してモータの駆動、制御をCAN通信により行える環境を構築した。

今後はこのシステムをモデルケースとして、実際のブラシレス DC モータのコントローラ設計や、開発を行う機器の車載通信試験に活用する。

文 献

- 1) 広島県：ひろしまカーエレクトロニクス戦略, 2008
- 2) 足立：制御のためのシステム同定 東京電機大学出版局, 1996
- 3) 見城：使いこなす DC モータ技術 日刊工業新聞社, 2008
- 4) MAXON：ECモータ データシート
- 5) 五十嵐・佐藤・玉城：CAN 入門講座 電波新聞社, 2006
- 6) 倉本他：広島県西部工技研究報告, 54(2011), 33

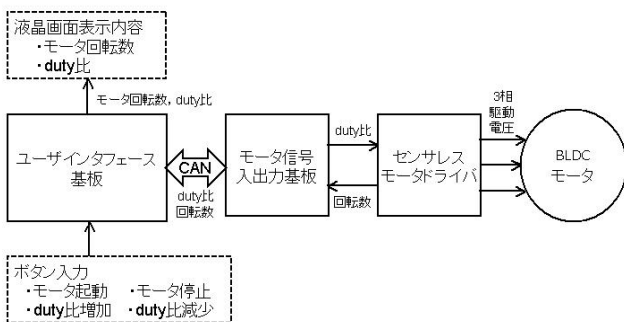


図5 車載通信テンプレート構成図

ユーザインタフェース基板及びモータドライバへの入出力基板として、(株)北斗電子のCAN搭載ボード HSB8C23F-E1 及び HSB8C23F-E2 を用いた。このボードにはルネサステクノロジ製マイコン R8C が搭載されており、CAN のほか、LIN を用いた通信が可能となっている。今回は、これらの基板間をCANで接続した。駆動対象となるブラシレス DC モータは、前年度作製したセンサレス