

# CRAMASモータボードの開発

Development of CRAMAS Motor Board

山	崎	剛	Takeshi Yamasaki
久	井	茂幸	Shigeyuki Hisai
樋	口	崇	Takashi Higuchi
大	石	伸彰	Nobuaki Ohishi



## 要 旨

近年、自動車の電子化にともないモータ制御の需要が高まっている。最近のモータの特徴は、高度な制御が求められることと、大電流を扱うことである。したがって、モータの制御開発においては、実機試験による危険性や大規模設備の保有を回避するため、シミュレータによる動作検証が益々重要となってきた。

CRAMASは、富士通テンが独自に開発したシミュレータである。現在では、自動車業界各社での開発プロセス改革のソリューションとして幅広くご活用いただいている。今回、私たちは、モータ制御需要の高まりに対応するため、新たにCRAMAS用モータボードを開発し、業界トップクラスの精度を有するモータシミュレーションの製品化に成功した。

## Abstract

In recent years, the demand for motor control has been rising due to the computerization in vehicles. Recent motors require an advanced control system and must handle high current flow. Therefore, in terms of motor control development, verification of motor-controllers through a simulator system has become more important to avoid dangers involved in actual vehicle testing, and having to prepare large scale facilities for this purpose.

CRAMAS is a unique simulator developed by FUJITSU TEN. It is now being widely utilized in the automotive industry as a solution in their development process. Now we have succeeded in developing a new CRAMAS Motor Board in response to increased demands in motor control systems and succeeded in producing a motor simulator with the highest class precision in the industry.

1

はじめに

1.1 モータ制御需要の高まり

近年、自動車の電子化にともないモータ制御の需要が高まっている。従来、パワーウィンドやサンルーフなどボデー分野で搭載数を伸ばしてきたモータは、自動車の基本機能である“走る・曲がる・止まる”の分野に進出し、その数をさらに伸ばしている(図-1)。“走る”機能に関しては、動力源をモータとする電気自動車やハイブリッド車(以下、HV)が実用化されている。次に、“曲がる”機能では、電動パワーステアリングから始まり、さらに人のステアリング操作に介入し、車線逸脱を防止するレーンキーピングアシストも実用化されている。これらのように基本機能で使われるモータの特徴は、ボデー系のモータに比べ高度な制御が求められることと、大電流を扱うことである。したがって、モータ制御システムの開発においては、実機試験による危険性や大規模設備の保有を回避するため、シミュレーションによる動作検証が益々重要となってきている。

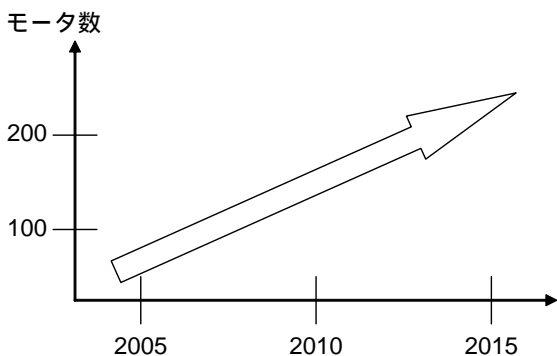


図-1 自動車1台あたりのモータ数 (予想)  
Fig.1 Number of motors per vehicle (estimate)

1.2 CRAMAS

CRAMASは、富士通テンが独自に開発したシミュレータである。



図-2 CRAMAS外観  
Fig.2 External view of CRAMAS

CRAMASは、制御対象となるシステムの動作を実時間で模擬できるのが最大の特長であり、一般にはHILS (Hardware in-the-loop Simulator) に分類される。当初は、自社のECU (Electric Control Unit) 検査用のツールとして活用していたが、現在では、自動車業界各社での開発プロセス改革のソリューションとして幅広くご活用いただいている。CRAMASを活用したソリューションの導入により、制御システムの開発から各種ECUの機能・性能評価まであらゆる工程をデスク上で効率よく実施できるようになり、開発期間短縮やコスト低減に効果があることが確認されている。

今回、私たちは、モータ制御需要の高まりに対応するため、新たにCRAMAS用モータボードを開発し、業界トップクラスの精度を有する高精度モータシミュレータを実現した。本稿では、この開発内容及び成果について述べる。

2

モータシミュレーションの特長

2.1 高精度シミュレーション

シミュレーションの精度とは、制御対象となる実機をいかに忠実に再現できるかである。精度が高くなれば、実機との挙動差が少なくなり、シミュレータの利用可能分野が広がる。しかしながら、精度を向上させるためには、シミュレータの演算処理能力を飛躍的に向上させる必要があるため、自動車業界向けシミュレータの価格帯での実現には、限界がある。したがって、演算処理能力の向上に頼るのではなく、モータシミュレーションをハードマクロとソフトの協調制御にするという独自の方法でその開発に成功した。

2.2 複数モータの同時シミュレーション

HVをはじめ、複数のモータが同時に制御されているシステムは多く存在する。モータシミュレーションをモータ毎に順次実行した場合、モータの個数に応じてモデル演算部の処理性能を上げていかなければならないが、その向上には限界がある。したがって、今回開発したモータボードでは、複数モータのシミュレーションを並列実行する方式を採用した。したがって、使用するモータの数に合わせてモータボードの枚数を増やすことで1モータシステムと同等の高精度シミュレーションが可能である。

2.3 その他機能

制御開発での実用性を高めるため、モータボードには以下の機能を追加した。

<モータボードの新機能>

- ・モータ中性点基準の相電圧計測機能
- ・IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) に流れる素子電流計測機能
- ・インバータのDC電流計測機能

**3 モータボードについて**

3.1 システム構成

CRAMASは、対象となるシステムに応じて、オプションボードを組み合わせることにより、あらゆるシステムに柔軟に対応できる方式を採用している。オプションボードには、自動車用の特殊な信号を取り扱うCOREボード（詳細4章）や各種通信ボードが存在する。

モータボードは、CRAMAS用のオプションボードとして提供される。モータボードの最大の特長は、ボード内でモータシミュレーションを完結できることである。システムの構成例は、図-3の通りである。この例では、エンジン制御開発用のシミュレータにモータ制御の機能を追加している。このように、CRAMASの空きスロットにモータボードを追加することで、容易にモータシミュレーションの機能追加が可能となる。

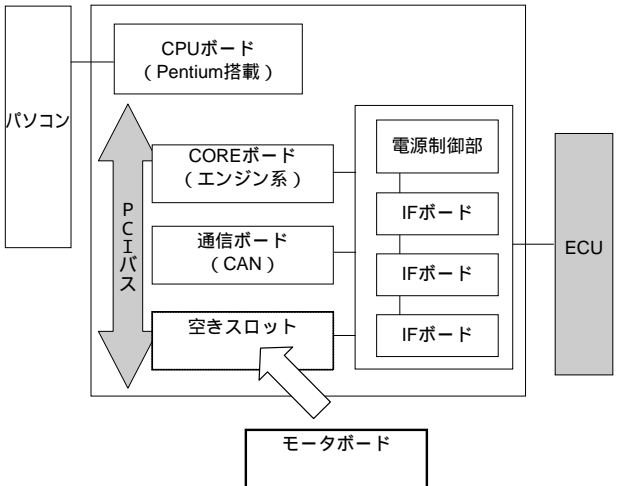


図-3 モータボード追加  
Fig.3 Additional implementation of the Motor Board

3.2 ハードマクロとソフトの協調制御

シミュレーションの高精度化・並列処理を実現するため、モータボードでは、ハードマクロとソフトの協調制御という技術を導入した。ソフトはデータを順次処理するのに対し、ハードマクロは複数の入力信号を瞬時に回路演算しソフトが解釈できるデータに変換する役割を担う。一方、ソフトが書き換え自由なのに対し、ハードマクロは一般的

には実装後は変更ができない固定回路となる。CRAMASでは、ハードマクロをFPGA (Field Programmable Gate Array) に実装することでバリエーション展開や仕様変更にも柔軟に対応できるようにしている。

モータボードは、「CORE-Xボード」にモータモデルを実装したものである。「CORE-Xボード」については4章で、モータモデルのモデリングについては5章で解説する。

**4 「CORE-Xボード」について**

モータシミュレーション高精度化の鍵となるハードマクロとソフトの協調制御を実現するため、今回新たに「CORE-Xボード」を開発した。このボードは、COREボード・シリーズのフラグ・シップとして位置付ける製品である。



図-4 モータボード外観  
Fig.4 External view of the Motor Board

4.1 COREボードについて

COREボードとは、CRAMASの活用用途に応じて必要なインターフェースを短期間で実現するため、マイコンと大規模FPGAを組み合わせせたボードである。

4.2 COREボード（既存品）

既存のCOREボードでは、図-5に示すようにマイコンやFPGAなど複数のデバイスを組み合わせて、必要な機能を実現している。ソフトはマイコンに実装され、ハードマクロはFPGAに実装されるが、ハードマクロとソフトの協調制御においては、その間のデータ通信速度が重要である。通常の場合、デバイス間の通信速度はデバイス内通信に比べ1/10以下と遅く、これがシステムのボトルネックとなる。現在のCOREボードは、マイコンとFPGA3個の合計4つのデバイスで構成されているため、モータシミュレーションのように大規模なモデルをハードマクロとソフトで協調制御するシステムではボトルネックによる性能低下を避けられない。

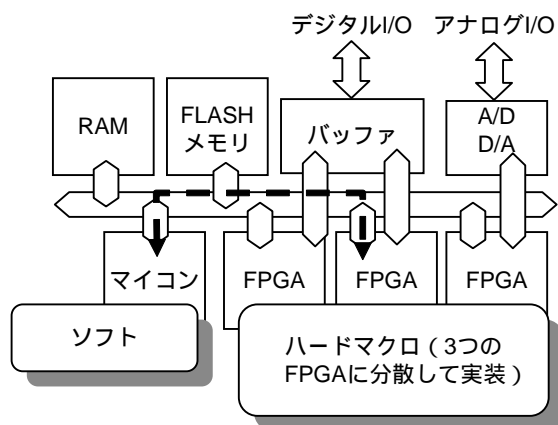


図-5 COREボード (既存品)  
Fig.5 CORE Board (released product)

#### 4.3 「CORE-Xボード」

「CORE-Xボード」の特長は、CPU内蔵型超大容量FPGAを新たに採用したことである。

図-6に示すようにCOREボード(既存品)に比べ高速なマイコンや大容量のFPGAを全て1つのデバイスに収めることができる。その結果、ハードマクロとソフトが高速なデバイス内通信でつながることでモータシミュレーション高精度化の障害となるシステムのボトルネックが解消された。また、FPGAの容量が増えたことで、実装効率ではハードウェア記述言語に劣るものの、設計効率を上げる手段として期待される高位合成ツールの導入を実施した。高位合成とは、ソフト業界で主流であるC言語などを使ってハードマクロを設計する技術であり、ハードマクロとソフトの協調制御に適した設計手法であるため、今後も活用の範囲を広げていきたい。

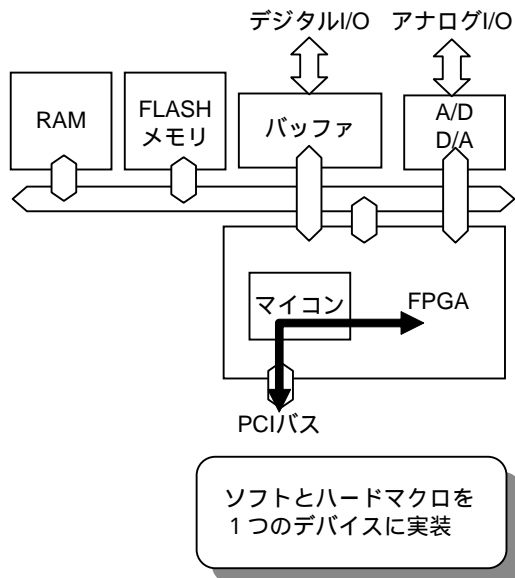


図-6 CORE-Xボード  
Fig.6 CORE-X Board

さらに、「CORE-Xボード」にはサブボードを取り付けられるスロットを採用した。これにより、ハードマクロに必要な物理インターフェースの搭載が、サブボードのみの開発で実現可能となった。その他にも、CAN (Controller Area Network) などの標準的な通信機能を追加することも可能である。

将来的には、ハードマクロ設計やサブボードでの物理インターフェース設計をユーザが自由に行えるようにしていくことを検討中である。

## 5

## モデリング

従来、モータモデルはソフト実行を採用していたため、処理速度向上に限界があり、複数モータの並列処理の実現が難しいという問題があった。そこで今回は並列処理や高速演算を実現するため、主要回路を「CORE-Xボード」にハードマクロ化して実装している。実行時に変更が必要な箇所については、ソフト実装することにより、バリエーション展開や仕様変更にも柔軟に対応できる構成をとっている。

### 5.1 インバータのモデリング

従来、インバータモデルは演算周期毎のIGBTスイッチングの組合せから出力電圧ベクトルを推測し、三相電圧を算出する平均化モデルを採用していた。図-7にその概要を示す。

ただし、実際のインバータでは、各相で直列に接続された2つのIGBTが同時オンすることによる直流電源短絡を防止するデッドタイム制御(短絡防止制御)による影響を受けるため、特に低回転域においてモータ電流波形が乱れトルクリップルが発生してしまう。直列のIGBTのOFF/OFF論理を無視する平均化モデルではこのデッドタイムによる影響を模擬できないため、デッドタイム補償アルゴリズム検証等では精度不足である。

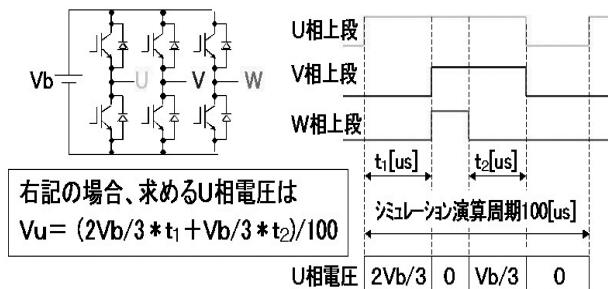


図-7 インバータ平均化モデル  
Fig.7 Inverter time-mean model



今回、デッドタイムの影響を模擬するために各IGBTを理想スイッチでモデル化した。直流電源仮想中性点基準の相電圧は、上段IGBTオン時には $V_b/2$ となり、下段IGBTオン時には $-V_b/2$ となる。また、上下段IGBTがオフになるデッドタイム時の相電圧は、相電流の極性により電流 $<0$ 時には上段のダイオードが導通するので $V_b/2$ となり、同様に電流 $>0$ 時には $-V_b/2$ となる。(図-8)

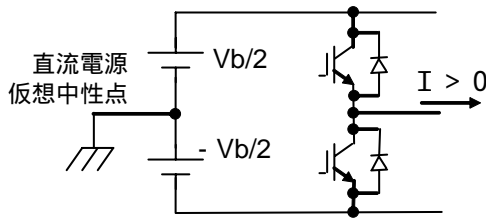


図-8 インバータ理想スイッチモデル  
Fig.8 Inverter ideal-switch model

さらにインバータ損失等を模擬する場合、デバイス特性モデルが必要となるため、より高精度なシミュレーション能力が求められる。今後、回路シミュレータとCRAMASの連携・連成を視野に入れ、さらなる高精度化に取り組んでいく予定である。

### 5.2 モータのモデリング

モータは電気的特性と機械的特性で大別することができる。電気的特性の電圧-電流変換ブロックは、高速演算を必要とし、それ自体変更が少ないことから、この部分はハードマクロ化することとした。一方、トルク-回転数変換ブロックは、機械的特性のためソフト処理で実現でき、かつ適用システムに合わせた変更が必要なため、MATLAB/Simulinkで記述しソフト実行する協調制御の構成をとった。ここではハードマクロ化したモデルに関して述べる。

モータモデルは、電圧方程式(1)に基づいたdq軸座標モデルを採用した。

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R+pL_d & -L_q \\ L_d & R+pL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \lambda \end{pmatrix} \dots (1)$$

ここで $V_d \cdot V_q$ はd軸・q軸電圧、 $R$ は電機子抵抗、 $p$  ( $=d/dt$ )は微分演算子、 $L_d \cdot L_q$ はd軸・q軸インダクタンス、 $\omega$ は角速度、 $i_d \cdot i_q$ はd軸・q軸電流、 $\lambda$ は電機子鎖交磁束である。

dq軸座標モデルにおいて、インダクタンス等のパラメータを一定値として扱った場合、高調波成分の影響を模擬できないため、シミュレーション精度に問題が生じる。

そこで、パラメータは変数として扱えるようにした。変数パラメータの設定には、パターン信号編集機能が便利である。例えば、図-9のように、インダクタンスの回転子位置依存性をマウスのプロット操作で作成することで、容易にパラメータの設定が可能である。

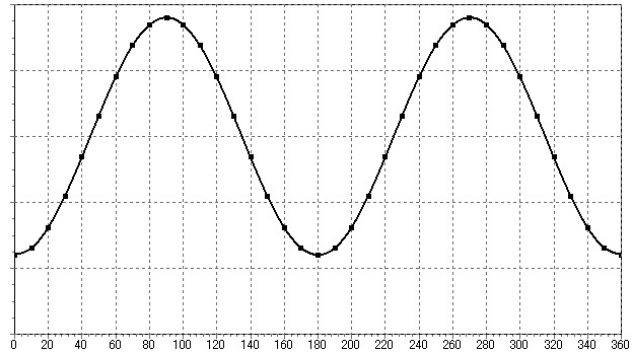


図-9 パターン信号編集機能  
Fig.9 Pattern signal edit window

ただし、モータ構造や鉄心等の材質特性による影響を厳密に模擬するためには、詳細モータモデルが必要となる。今後、電磁界シミュレータとCRAMASの連携・連成にも取り組んでいく。

## 6

### シミュレーション結果

実際にシミュレーションを行った結果をまとめる。

#### 6.1 高精度化

デッドタイムの影響は、三相電流波形において0A付近の歪みとなって現れる。これは低回転域において顕在化する。

実機データ及び新旧モータシミュレーションの比較結果を図-10に示す。従来品はインバータモデルが平均化モデルであったため、この歪みを模擬することができなかったが、今回開発した高精度シミュレーションにおいてはこの歪みを再現している。

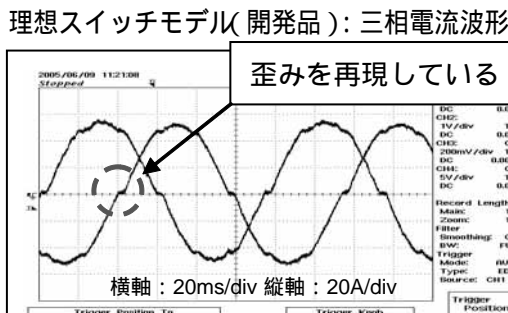
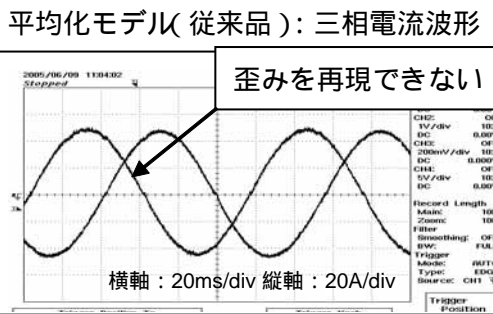
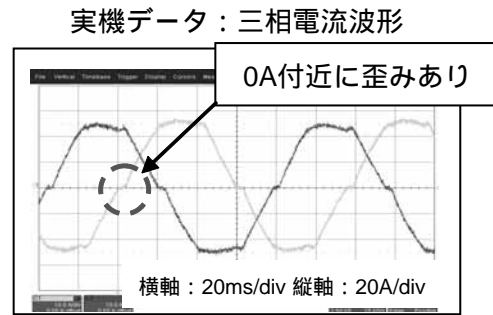


図-10 デッドタイムの影響  
Fig.10 Dead time effect

## 6.2 機能拡張

実機では計測不可能なモータ中性点基準の相電圧を計測する機能も追加した。図-11に相電圧や相電流の計測例を示す。

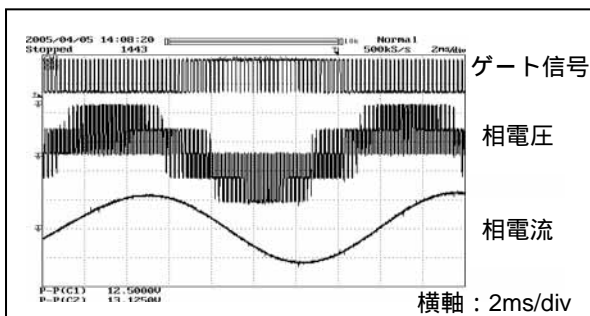


図-11 相電圧計測例

Fig.11 Example measurement data for phase voltage

さらに、インバータU相V相W相の各上下段のIGBTに流れる素子の電流を計測する機能も新たに追加した。これにより、フェイルセーフアルゴリズム検討(ゲート駆動信号故障等)での、シミュレータ活用が期待できる。例えば、CRAMASのGUI(Graphical User Interface)上からゲート故障発生箇所を任意に設定し、故障発生時の素子電流の挙動を実時間で見ることができると、実機では危険が伴う評価が容易に行えるようになる。素子の電流を計測した波形を図-12に示す。

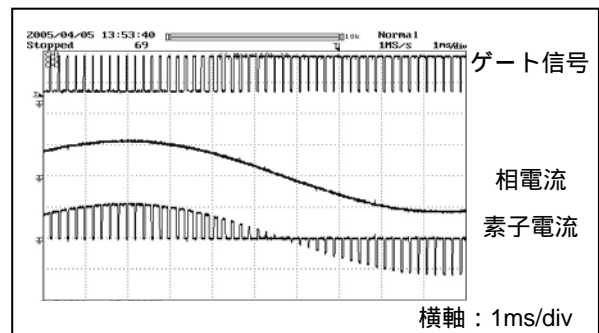


図-12 素子電流計測例

Fig.12 Example measurement data for element current

このように、モータシミュレーションを活用することで大電力を扱うことなく実機のない環境で、HV等モータ制御の検討・検証ができる。

最後に、最新のセンサレス制御にも対応できるようにインバータのDC電流計測機能も追加した。制御の概要を図-13に示す。この機能は、インバータ過電流保護用のシャント抵抗に流れる電流を模擬するものであり、ECUはこの信号をもとにアルゴリズムにて三相電流を生成する。この機能により、電流センサレス制御によるコストダウン検討におけるシミュレータ活用が可能となる。

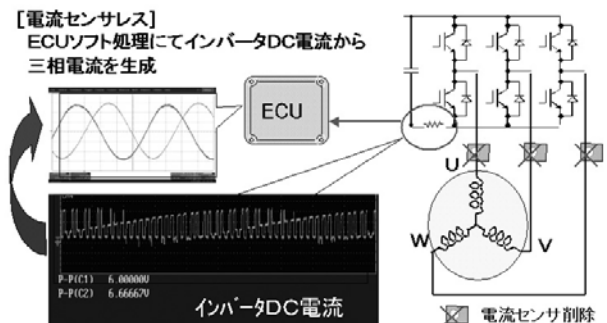


図-13 電流センサレス制御

Fig.13 Sensorless current control

以上の新機能により、モータ制御システム開発に使えるモータシミュレータを実現した。

7

終わりに

今回の開発により高精度なモータシミュレータの製品化に成功した。図-14にモータシミュレータの外観を示す。

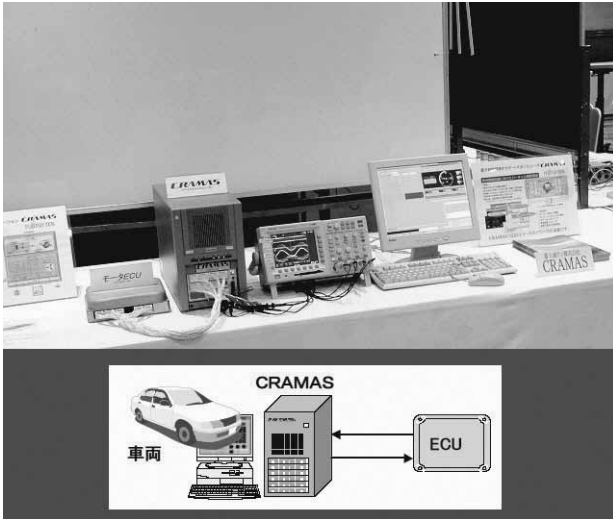


図-14 モータシミュレータ外観  
Fig.14 External view of the motor simulator

自動車関連分野では、モータの採用数が増加傾向にあり、モータシミュレーションを活用するシーンも増えていくと思われる。市場では、モータの小型化・高速化が進み、モータ制御の高度化が加速すると予想されるため、我々はシミュレーションの精度をさらに向上させていく取り組みを継続していく。

参考文献

- 1) 小笠原悟司「パワーエレクトロニクスシミュレーション技術の現状と課題」モータ技術シンポジウム, C5-1-1-10, (2005)
- 2) 木全政弘「リアルタイムシミュレータとモータ制御への応用」モータ技術シンポジウム, C5-2-1-8, (2005)
- 3) 木全政弘, 伊瀬敏史, 小笠原悟司「リアルタイムシミュレータ」平成16年電気学会産業応用部門大会, No.1-S11-4, Vol.1, pp.81-84, (2004)

登録商標

「CRAMAS」は富士通テン株式会社の登録商標です。

筆者紹介



山崎 剛  
(やまさき たけし)

1983年入社。以来、エンジン制御およびボデー制御ECUの開発に従事。営業技術を経て、現在、事業本部 ソリューション事業部 CRAMAS技術部部长。



久井 茂幸  
(ひさい しげゆき)

1991年入社。以来、自動車用電子機器の開発及び開発支援ツールの開発に従事。現在、事業本部 ソリューション事業部 CRAMAS技術部に在籍。



樋口 崇  
(ひぐち たかし)

1996年入社。以来、自動車用電子機器の開発及び開発支援ツールの開発に従事。現在、事業本部 ソリューション事業部に在籍。



大石 伸彰  
(おおいし のぶあき)

1990年富士通関西デジタルテクノロジー入社。通信処理装置用ASIC及び機器開発に従事の後、2001年に転籍。以来、自動車用電子機器の開発支援ツールの開発に従事。現在、事業本部 ソリューション事業部に在籍。