

シミュレーションによる メカトロニクス機器ファームウェア開発の革新

Simulation-Based Process Innovation of Firmware Development for Electromechanical Products

近藤 浩一 星野 享 本橋 聖一

■ KONDO Koichi ■ HOSHINO Susumu ■ MOTOHASHI Shoichi

メカトロニクス機器は、メカニズム、ファームウェア、電気回路が一体化した複雑なシステムである。特に、ファームウェア設計は、設計下流段階での後戻り作業と関連が深く、設計期間短縮や品質の確保にもっとも影響が大きい。効率的な設計のためには、上流設計から実装設計に到る各フェーズでシミュレーションによる機能検証を行いつつ、設計を段階的に詳細化することが望ましい。そのためのシミュレーションツールとしてVisualMech™を開発・商品化し、様々なメカトロニクス製品の設計に適用している。マッサージチェア開発での適用例では、設計の上流段階での仕様のシミュレーションによるチェックなどにより、設計の後戻りを大幅に削減することができた。

An electromechanical product is a complicated system comprising a mechanism, firmware, and an electrical circuit. Rework in the later design stage often has a close relationship with the firmware design. Improvement of firmware design therefore has a strong impact, shortening the design process and enhancing product quality. Efficient product development can be achieved in terms of iterative design refinement and simulation-based verification from the early concept design stage to the later detailed design stage.

Toshiba has developed the VisualMech™ simulation tool to facilitate such design processes, and applied it to various products. In massage chair development, for example, we have substantially reduced rework by early-stage simulation-based reviews of firmware specifications.

1 まえがき

ロボット、コピー機などに代表されるメカトロニクス機器は、メカニズム(以下、メカと略記)、ソフトウェア、電気回路(LSI)が一体化して機能を実現する組込みシステムである。近年、組込みシステムの機能はますます高度化、複雑化しており、その設計にあたっては三要素のバランスのとれたシステム設計が重要となってきた。更に、開発期間の短縮、品質向上、コストダウンといった要求は強くなる一方であり、複雑な設計を効率的に行うために、抜本的に設計のやり方を見直す必要に迫られている。われわれは、年々その開発量が増加しているソフトウェア設計、電気設計などの視点から、まずファームウェア(メカを制御するソフトウェア)の設計革新に注目した。ファームウェア設計革新を実現するために、上流設計から実装設計に到る各フェーズでシミュレーションによる機能検証を行いつつ設計を段階的に詳細化するスパイラル設計手法を実現するためのシミュレーションツールVisualMech™を開発し、各種メカトロニクス製品の設計に適用している。

ここでは、シミュレーションツールの概要とともに、マッサージチェア開発に実際に適用した例について述べる。

われわれが提案するメカトロニクス製品の開発フローを図1に示す。

設計最上流のシステム仕様の検討フェーズでは、システム

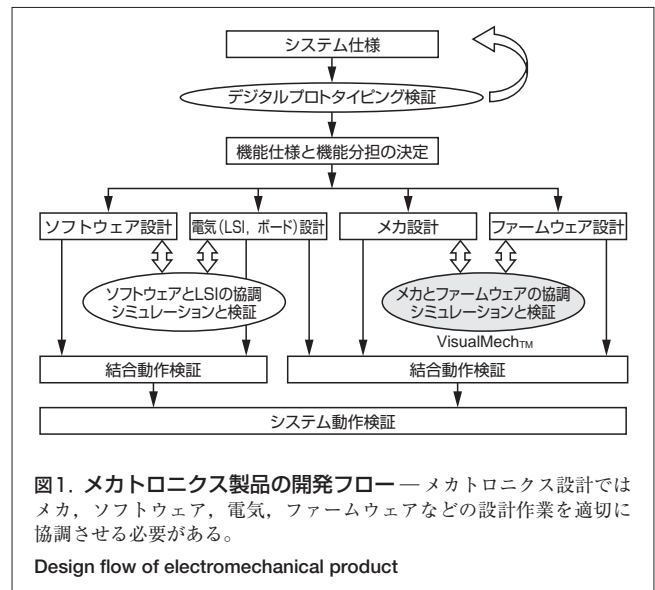


図1. メカトロニクス製品の開発フロー—メカトロニクス設計ではメカ、ソフトウェア、電気、ファームウェアなどの設計作業を適切に協調させる必要がある。

Design flow of electromechanical product

の動作検証や最適な機能分担の探索検討を行うために、デジタルプロトタイプにより、シミュレーションができる環境が求められる。例えば、簡易CG (Computer Graphics)・CADデータを用いてメカの動作シミュレーションが行えるといったことが重要である。機能仕様を決定した後はメカ、ファームウェアなどそれぞれの設計が並行して進められるが、常に設計者どうしの協調作業が可能な環境が望まれる。例えば、ファームウェア担当者は必要なときにメカの設計

データをもとにシミュレーションを行いファームウェアのデバッグを行えることが重要である。VisualMech™は、パソコン(PC)環境で動作するメカシミュレータとファームウェア設計ツールを統合した開発支援シミュレーションツールである。

このシミュレーションツールの実現により、ファームウェア設計とメカ設計両者の生産性と品質向上に次のような効果が期待できる。

- (1) メカの完成前に実機レスでファームウェアの仕様検証やデバッグができる
- (2) 実機では困難な異常時対応のファームウェアのテストを容易にできる
- (3) 実機結合試験ではメカの不具合、及びメカとファームウェアの最終調整に集中できる

2 シミュレーションツール VisualMech™

2.1 概要

VisualMech™は、メカのシミュレータとして機能する機構シミュレータとダイナミクスシミュレータ、及びファームウェア開発環境 VisualSpec™とから構成される。

図2に示すように、VisualSpec™はファームウェアの設計ツールとして用いる。ソフトウェア作成支援とともに、シミュレーションによってファームウェアの動作の検証を行うことができる。

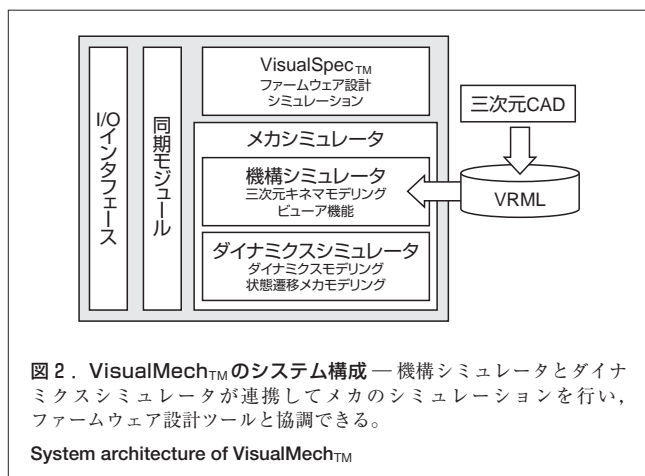


図2. VisualMech™のシステム構成 — 機構シミュレータとダイナミクスシミュレータが連携してメカのシミュレーションを行い、ファームウェア設計ツールと協調できる。

System architecture of VisualMech™

制御対象であるメカは、形状や機構の構成などの幾何情報に基づきモデル化される要素と、加・減速や振動などダイナミクスとしてモデル化される要素に大別される。機構シミュレータは三次元CADデータ表示機能に、三次元空間での機構の位置と姿勢の計算機能や部品間の幾何学的干渉チェック機能などの機構シミュレーション機能を付加したものである。三次元CADなどで作成された形状データは、

VRML (Virtual Reality Modeling Language)と呼ばれる汎用データ形式を経由して機構シミュレータに読み込む。ダイナミクスシミュレータは、連立微分方程式によりメカの挙動のモデルを記述する。機構シミュレータとダイナミクスシミュレータを目的や対象に応じて効果的に組み合わせることにより、メカのモデル化が容易になるとともに、ビジュアルな検証を行うことができる。更に同期モジュールを介して、VisualSpec™と機構シミュレータとダイナミックシミュレータから構成されるメカシミュレータを連携させて動作させ、PC上でファームウェアとメカの動作を合わせて検証することが可能になる。

制御回路などの電気系ハードウェアやファームウェアが用意できた状況においては、VisualSpec™に代わって、実機のファームウェアを入出力(I/O)インタフェースを介してメカシミュレータに結合することができる。これは、HIL (Hardware-In-the-Loop)シミュレーションと呼ばれ、メカの試作機完成前に電気系ハードウェアとファームウェアの動作の検証を行うことができる。

2.2 機構シミュレータ

幾何情報に基づくメカの機構シミュレータは、三次元CADなどで定義した形状データを読み込み、回転、スライド、カムなどの機構の関係をGUI (Graphical User Interface)ベースで定義する機能を持つ。例えば、モータの出力軸の角度がいくつになったら機構はどのような姿勢をとっているか、などの検証ができる。また、三次元形状データに基づく干渉チェック機能も備えており、例えば搬送される紙がフォトセンサを通過して、センサがオン/オフ切り替わる動作などを、フォトセンサの光軸と紙の干渉問題としてシミュレーションする機能を持つ。

ファームウェアと連携させてシミュレーションを行う場合には、機械の詳細な細部の形状は不要なことが多い。干渉チェックなどシミュレーション時間の短縮のためには、必要なレベルのシミュレーションの正確さを確保できる範囲で、形状はできるだけ単純化することが望ましい。そこで、機構シミュレータでは、読み込んだ形状データを円筒、円すい、平面、球などの低い次数の代数方程式で表現できる曲面の集合に近似する機能を持つ。これにより、干渉チェックが高速化できるほか、抽出された円筒面を参照することで、部品の軸や穴を容易に参照することが可能になる。

2.3 ダイナミクスシミュレータ

ダイナミクスのモデル化には、常微分方程式による記述を用いる。機構シミュレータは幾何学的な情報だけを扱うので、時間軸上でどのような挙動をするかについては一切扱うことができない。一方、微分方程式によるモデル化は、複雑な形状情報を扱うことはできないが、時間軸上での挙動をコンパクトに記述することができる。メカトロニクス機器の制御

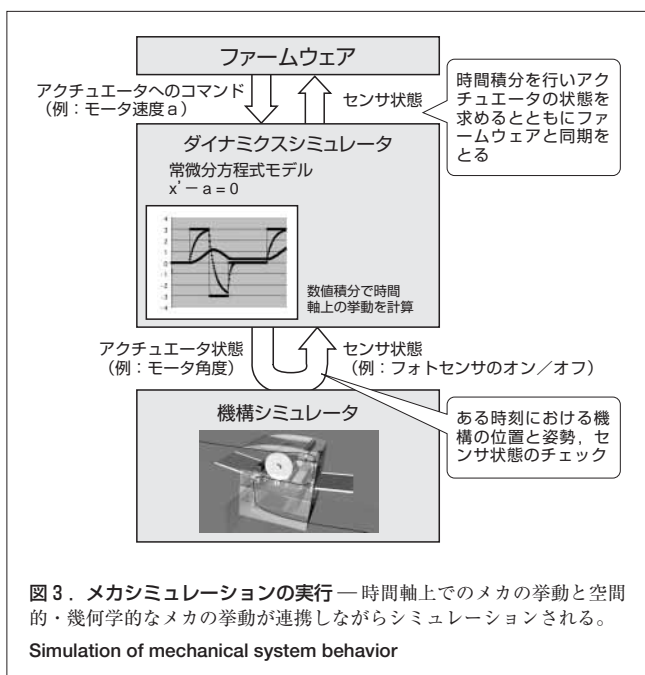
を考えた場合、制御用ファームウェアとメカのタイミングの問題は極めて重要であり、時間を考慮できる微分方程式による記述は不可欠である。そこで、微分方程式に基づくモデルを、制御ファームウェアと機構シミュレータの間に位置付け、制御ファームウェアはモータなどアクチュエータに制御コマンドを送り、時間軸上でのモータ出力軸の回転角度の変化を算出し、適切な時間間隔で機構シミュレータを呼び出して幾何学的なチェックを行うようにした。

例えば、一定速度や一定加速度で駆動されるモータの挙動は、モータ出力軸の1次微分や2次微分をファームウェアからの指令値と一致させればよい。一定速度駆動のモータは、出力角度を x と置けば速度 (x') が定数 (a) と一致する等式としてモデル化できる。

$$x' - a = 0 \quad (a \text{ は指定された速度})$$

アクチュエータへのファームウェアからのコマンドは a の値であり、これによりモータ回転角の時系列はダイナミクスシミュレータで計算される。更に一定のサンプリングタイムごとに、その時点でのモータ回転角を求め、機構シミュレータを起動することにより、例えばフォトセンサの光軸がいずれかの物体で遮られていないかどうかを干渉チェック機能で確認する。この結果はダイナミクスシミュレータを介して、ファームウェアに通知される。このような一連のデータのやりとりを模式的に示したのが図3である。

しかし、メカトロニクス制御の観点で考えると、単純な微分方程式によるモデル化では不十分な点が残る。制御対象であるメカの挙動はファームウェアからのコマンドによって変化する。このような状況に対応するために、ハイブリッドモデリングと呼ばれる考え方にに基づき、容易にモデルを作成



できるプログラミング言語としてDCML™ (Dynamics Constraint Modeling Language) ⁽¹⁾ が提供されている。

2.4 制御仕様モデルシミュレータ

VisualSpec™を用いることにより、制御ソフトウェアの上流の設計段階からツールを用いた設計作業を行うことができ、かつシミュレーションをベースとしたラピッドプロトタイプングを行うことができる。VisualSpec™は、システム記述言語であるSpecC ⁽²⁾ に基づいており、次のような特長を持っている。

- (1) 同一言語で機能仕様レベルのモデルと詳細設計レベルのモデルを記述できる。
- (2) 機能とコミュニケーションを分離して記述できる。
- (3) 階層構造記述ができる。
- (4) リアルタイム制御システム必須の並列・同期処理の記述ができる。

SpecCに基づいたVisualSpec™は、システムLSIのシステムレベル設計を念頭において開発されてきたが、メカトロニクス制御システムの設計においても非常に有効である。

3 マッサージ機器開発への適用

メカトロニクス機器の設計プロセス革新活動の一つとして、東芝テック(株)で製品化しているマッサージチェアの制御ファームウェア開発にVisualMech™を適用した。図4は、今回の業務革新プロジェクトの対象とした製品である。

3.1 マッサージ機器開発における課題

マッサージチェアは、近年非常に多機能となってきており、多くのマッサージモードを複雑に遷移させながら、数多くのアクチュエータを適切なタイミングで駆動する必要がある。しかし、マッサージ効果の高い適切な駆動パターンを得るには数多くの試行錯誤は避けることができず、多くの機構制御用ファームウェアの仕様変更が起きていた。特に、設計の上



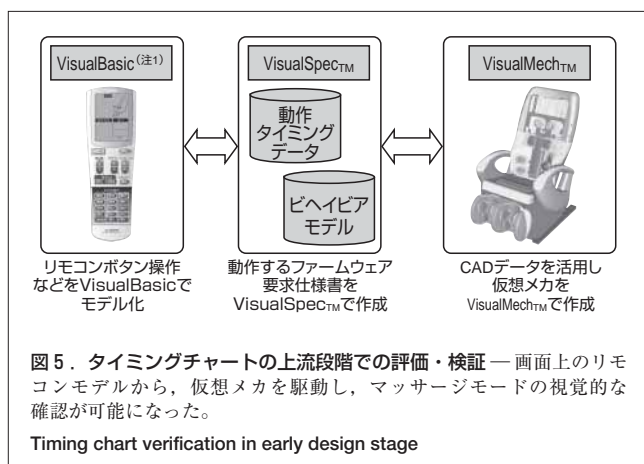
流段階では、仕様書に記述したモード遷移図やアクチュエータ駆動タイミングでは、どのようなマッサージ動作になるか商品企画部門や顧客に直感的に理解できないため、かなり開発作業が進んでから仕様変更される場合があった。設計上流段階で駆動タイミングの妥当性を検証することができれば、開発の後戻りを大幅に減らせる可能性がある。

また、マッサージチェアのように複雑なメカを持つ製品においては、メカの試作機の完成が制御ボードなど電気系やソフトウェア系の試作品より遅れてしまうことが多い。しかし、最終的なファームウェアのチェックには、メカや制御ボードなどをすべて連携させなければならず、メカの試作機が完成するまで、ファームウェアのチェック作業に着手できないという問題点がある。これは設計開発期間短縮に大きな障害になっていた。

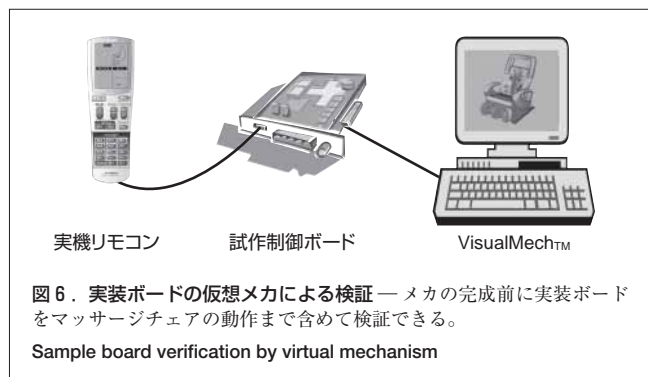
3.2 業務プロセス革新への取り組み

ファームウェア要求仕様書のなかで、もっとも重要で、かつ変更要求の多いのが動作タイミングチャートである。タイミングチャートのシミュレーション環境での評価・検証を行うため、動作タイミングチャートから VisualSpec™ 用のデータファイルを作成し、ファームウェア要求仕様書の動作モード遷移図を VisualSpec™ のビヘイビアモデルの形式でモデル化した。その結果、図5に示すように、PC画面上のリモコンモデルから、三次元CADデータの仮想メカをファームウェア要求仕様に沿った形で駆動することができるようになった。三次元グラフィックスによって動作を視覚的に確認することが設計上流段階で可能になり、マッサージモードの視覚的な確認によりファームウェア仕様を早期に検証することが可能になった。これにより、ファームウェア仕様を検証したうえで実装ファームウェアの開発に着手でき、設計の後戻りを大幅に削減することができた。

また、下流の設計検証の段階においては、図6に示すよう



(注1) VisualBasicは、米国 Microsoft Corporationの米国及びその他の国における登録商標。



に、試作制御ボードと実機リモコンを用いて、試作制御ボードに接続された仮想メカモデルを動作させた。従来は制御ボードにロジックアナライザを接続して、入出力信号の波形を調べることで検証を行っていたが、実際のマッサージチェアの動作まで含めて試作レスで確認が可能になった。更に、メカの異常動作やばらつきまでを含めた検証が可能となり、開発期間の短縮や品質向上につなげることができた。

4 あとがき

メカトロニクス製品の設計期間短縮と品質向上を達成するためのシミュレーションツールとその適用例を紹介した。このツールは東芝グループ内で適用されるとともに、(株)インターデザイン・テクノロジーから商品化されている。実際の設計への適用を通して、更に機能強化を進め、設計の高度化と効率化に貢献していきたい。

文献

- (1) Kondo, K., et al. Use of hybrid models for testing and debugging control software for electromechanical systems. IEEE/ASME. trans. Mechatronics, to be published.
- (2) Gajski, D.D., et al. SpecC: Specification Language and Methodology. Kluwer Academic Publishers, 2000.



近藤 浩一 KONDO Koichi, D.Eng.

経営企画部参事, 工博。
研究開発センター在籍時に設計支援技術の研究開発に従事。精密工学会, ACM会員。
Corporate Strategic Planning Div.



星野 享 HOSHINO Susumu

東芝テック(株) 秦野工場 第三技術部グループ長。
家電製品の電気回路の開発, 設計業務に従事。
TOSHIBA TEC Corp.



本橋 聖一 MOTOHASHI Shoichi

(株)インターデザイン・テクノロジー。
VisualMech™の開発・販売に従事。
InterDesign Technologies, Inc.