

シミュレーションを活用したメカトロニクス制御ソフトウェアの設計革新

Innovation of Mechatronics Control Software Design Based on Simulation

本橋 聖一 堺 浩 吉田 充伸

■ MOTOHASHI Shoichi ■ SAKAI Hiroshi ■ YOSHIDA Mitsunobu

メカトロニクス製品に組み込まれる制御ソフトウェアの重要性は日々増大しており、ソフトウェアの性能や品質が製品の競争力を左右するようになってきた。したがって、旧来の開発スタイルを脱却し、仕様設計から実装設計に到る各段階でシミュレーション技術を活用した、革新的な設計手法が求められている。

(株)インターデザイン・テクノロジーが東芝の協力を得て開発してきた、仮想メカトロニクス シミュレータを活用した制御ソフトウェアの開発手法は、種々の製品開発に適用され実用的な段階に入ってきており、フロントローディングを実現する重要な革新技術の一つとなっている。

The control software for electromechanical products has become increasingly important, with its performance and quality greatly influencing the competitiveness of the product. It is therefore necessary to improve on the conventional development process by utilizing innovative simulation technologies at each stage from the specifications review to the implementation phase.

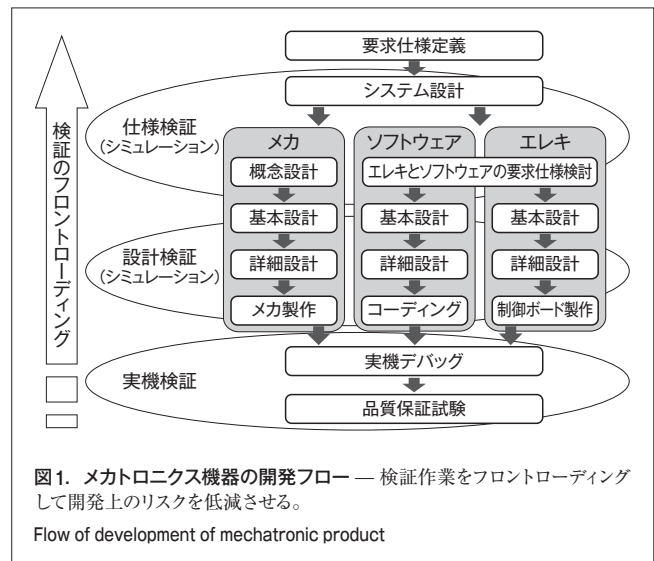
InterDesign Technologies, Inc., in cooperation with Toshiba, has developed a virtual mechatronics simulator for control software development. It has reached the practical stage and been applied to the development of various products. A method of control software development using the simulator is one of the key improvement techniques to realize front-loading of the process.

1 まえがき

メカトロニクス機器は、機械（以下、メカと記す）を電子回路（以下、エレキと記す）やソフトウェアで制御するシステムである。コンピュータの発達に伴って制御機能のソフトウェア化が急速に進み、同一のハードウェアであっても、ソフトウェアの仕様変更や追加などで機能の拡張を容易に行えるようになってきた。そのような背景の下、ソフトウェアは製品の高機能化に伴って大規模・複雑化してきており、従来の開発手法では品質確保と開発効率の両面で限界にきている。

従来の開発プロセスでは、ソフトウェアはシステム全体の要求仕様に基づき開発をスタートし、メカやエレキなどの実機が完成した段階で実機デバッグと呼ばれる確認作業に取りかかる。したがって、システム設計によりメカ及びエレキ、ソフトウェアに配分された仕様に不整合やインタフェース上の問題があっても、この段階に至るまで発見されにくい。また、開発途中で仕様変更が発生することは多々あるが、変更された一部の仕様システム全体として整合性がとれているかを確認する手段がない。設計仕様と設計結果の確認が実機デバッグのフェーズで初めて行われ、不具合が多く発生すると修正に多大なリソースを必要とし、場合によっては仕様や設計の見直しといった大きな後戻りのリスクがある。

東芝グループは、開発フローの各段階でシミュレーションを活用して検証作業を繰り返しながら設計を詳細化していくス



パイラル開発手法を提案し、その実現のためにシミュレータを開発して、種々の製品開発に適用してきた。シミュレータを活用した開発フローを図1に示す。

2 制御ソフトウェア開発のフロントローディング

2.1 ソフトウェアの実機レス シミュレーション

検証のフロントローディング化のためには、実機レスの開発手法が必須である。仕様検討の段階では、シミュレーションを

繰り返し行って仕様の検討と検証を行う必要がある。そのため、制御仕様やメカ仕様を抽象度が高いモデルで表現することが必要となる。制御モデルは汎用的なC言語や上流CASE (Computer Aided Software Engineering) ツールを活用してモデル化を行い、メカモデルはスケルトンレベルのCAD (Computer Aided Design) データに基づく仮想メカを活用することが望ましい。

設計検証の段階では、実際にコーディングされたソフトウェアをメカの詳細設計結果と組み合わせて確認を行う必要がある。しかし、このときは実機の制御基板やメカは製作中であるため、実機のソフトウェアが動作する開発環境や汎用的なパソコン(PC)上でマイコンの動作を模擬する環境(命令セットシミュレータなど)と仮想メカを組み合わせたシミュレーションが必要となる。

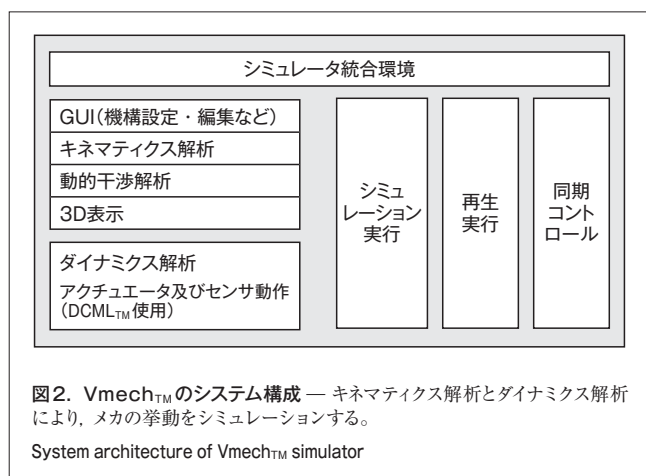
このように、シミュレーションを活用したスパイラル開発では、上流から下流に至る各段階でのソフトウェア開発環境と仮想メカを組み合わせた実機レス開発環境が求められる。

2.2 高速仮想メカロボニクスシミュレータ Vmech™

種々のソフトウェア開発環境と接続してシステム検証を行うための仮想メカシミュレータ VisualMech™を開発し、制御ソフトウェアの実機レス開発を行ってきた⁽¹⁾。

このシミュレータは、3次元(3D)CADデータからデジタルプロトタイプを作成するものであるが、近年CADシステムやPCの性能向上によりデータの大規模化が進んでおり、よりいっそうのデータ圧縮率と実行速度の向上が求められていた。

これらの要望に応えるため、次世代の高速仮想メカロボニクスシミュレータ Vmech™を開発した。Vmech™では、ラティステクノロジー社のXVL^{®(注1)}(eXtensible Virtual world description Language)技術を組み込み、3D-CADデータを大幅に軽量化することで仮想メカのシミュレーションを格段に高速化した。シミュレータの構成を図2に、画面イメージを図3に示す。



(注1) XVLは、ラティス・テクノロジー(株)の登録商標。

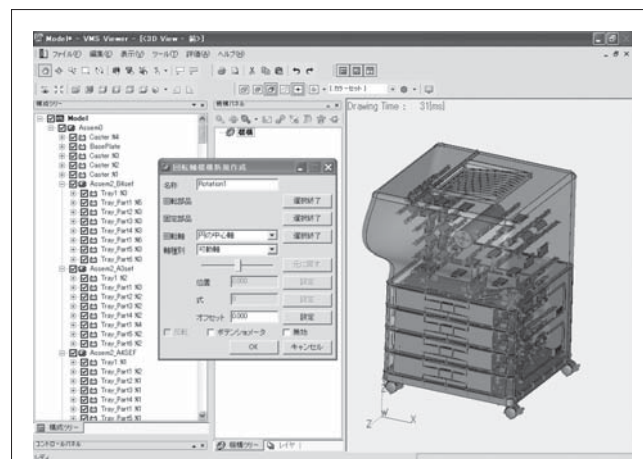


図3. Vmech™の画面表示例 — 機構設定時の画面と3D形状の表示例である。

Example of Vmech™ simulator display

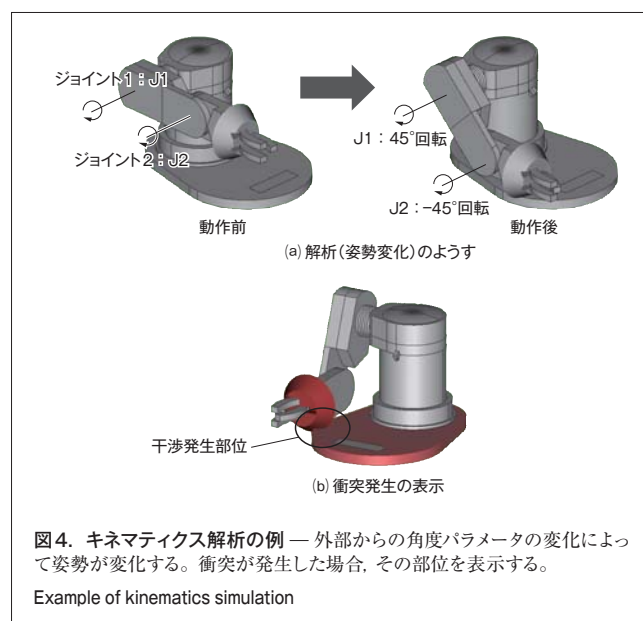
3 メカのデジタルプロトタイプング

3.1 キネマティクスモデリング

Vmech™では、回転軸やスライド軸、カムなどの機構要素を3D-CADデータに定義することによりキネマティクス解析(機構解析)を行う機能が備わっている。この機能は、GUI(グラフィカルユーザーインターフェース)から入力される幾何学的な拘束条件を基に、キネマティクス解析エンジンを実装することで実現している。また、動作時の干渉解析機能により、衝突など不正な干渉を高速に検知することが可能である。キネマティクス解析と干渉検知の例を図4に示す。

3.2 ハイブリッドシステムモデリング

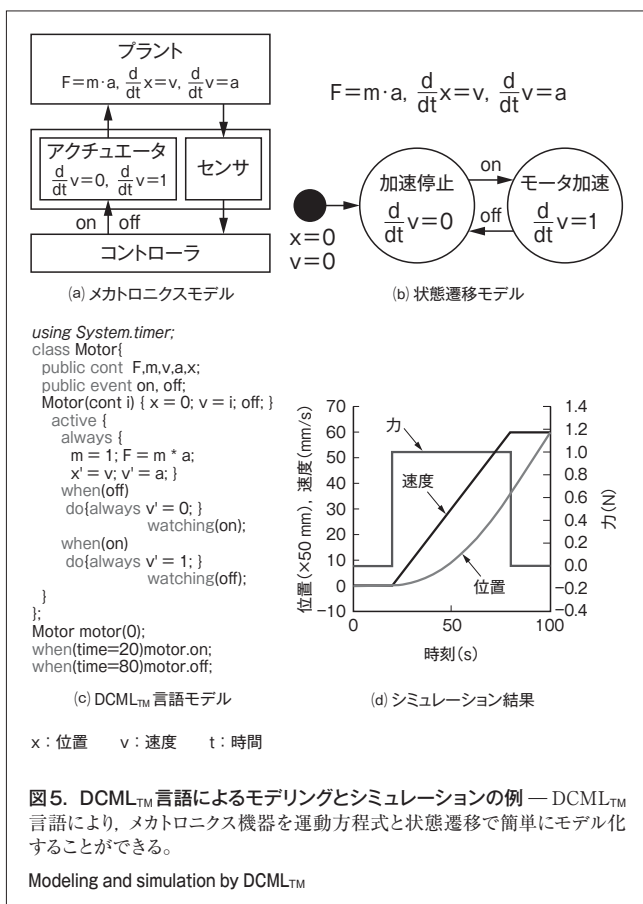
仮想メカシミュレータの機構要素のモデリング機能を拡張し、



より汎用的な物理現象のシミュレーションを可能にするのがハイブリッドモデリング技術である。ハイブリッドモデリング技術は、通信など外部からのイベント（離散的事象）とモータの挙動（連続系事象）が混在するメカトロニクスシステムなどを、運動方程式と状態遷移でモデル化する手法である。東芝グループは、ハイブリッドシステムを簡潔に記述し高速にシミュレーションできる、モデル記述言語DCML_{TM} (Dynamics Constraint Modeling Language)を開発した⁽²⁾。

DCML_{TM}言語は、オブジェクト指向言語が持つカプセル化(encapsulation)機能により、簡単なモデルを組み合わせてより高度なモデルを作成することができる。メカトロニクスモデル例及びその状態遷移モデルと、これをDCML_{TM}言語で記述した例及びそのシミュレーション結果を、それぞれ図5(a)~(d)に示す。従来、微分方程式を含む運動方程式を計算するには数値計算可能な形に離散化する必要があったが、DCML_{TM}言語では、 $F=m \cdot a$ のような運動方程式を直接記述することができる。ここで、Fは力、mは質量、aは加速度を示す。またwhen文やdo~watching文などの制御構文を用いて、状態遷移モデルを簡潔に記述することができる。

DCML_{TM}言語モデルのシミュレーション実行は、モデル中に記述されている運動方程式の有効と無効をシミュレーション時刻に沿って制御することで実現している。



4 メカ・エレクトロニクス・ソフトウェア協調シミュレーション

4.1 ソフトウェア開発プラットフォームとの連携

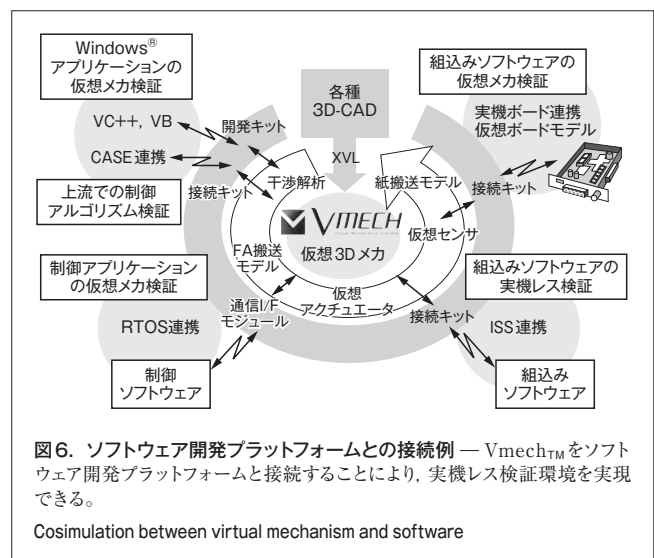
メカ・エレクトロニクス・ソフトウェア協調シミュレーションとは、高速仮想メカトロニクスシミュレータ環境とソフトウェア開発プラットフォームとの間をなんらかの方法で接続し、制御ソフトウェアのデバッグや検証を行うことである。

メカトロニクス製品は、小型プリンタから大規模FA (Factory Automation) 装置に至るまで広範囲であり、対象とするCPUもPCベースのものから8ビットマイコンまでそのメーカーも様々である。更に、基本ソフトウェア (OS) 環境もWindows[®](注2)ベースからVxWorks^(注3)やμITRON (μIndustrial The Real-time Operating system Nucleus) などの汎用RTOS (Real Time OS), メーカーオリジナルOS, OSレスまであり、ソフトウェア開発プラットフォームは多岐にわたっている。

代表的なソフトウェア開発プラットフォームとの接続例を図6に示す。

上流での制御アルゴリズム検証すなわちCASEツールとの連携では、CASEツールで自動生成されたアルゴリズムと抽象化した入出力コマンド関数を経由し、仮想メカとの接続を行う。また、命令セットシミュレータ (ISS) 連携では、ISSが持つ外部ツール接続機能を用いて、仮想メカとの接続を行う。

実機ボード連携検証では、試作ボードレベルで共有メモリ用のASIC (用途特定IC) を実装し、高速シリアル通信を用いるなどの方法で仮想メカ環境との接続を行う。RTOS連携の場合には、RTOSの持つTCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) ドライバ機能を活用した通信インタフェースモジュールを経由し、仮想メカ環境との接続を行う。



(注2) Windowsは、米国Microsoft Corporationの米国及びその他の国における登録商標又は商標。

(注3) VxWorksは、米国WindRiver Systems, Inc.の商標。

これらは、デバッグを行う対象制御ソフトウェアの規模と目的、すなわち対費用効果に応じ、カスタマイズした接続環境を構築している。

4.2 ワーク搬送のシミュレーション事例

従来のFA装置における仮想メカシミュレーションでは、ロボットのアームを動作させることは可能であったが、対象物（以下、ワークと呼ぶ）を搬送する機能については難しい制約があった。これは、ワークそのものがハンドと結合して動作しているのか、台に置かれた状態（台との結合）でいいのかという、動作仕様が重要なためである。

Vmech™では、ワークに対して台やハンドとの結合関係を定義し、ワークと部品（台やハンド）の動的干渉チェック機能をトリガにして、その結合関係を切り替える状態遷移条件を定義できるようにしている。状態遷移条件の定義例を図7に示す。

ロボット制御ソフトウェアのシミュレーションにより、ワークが搬送先の台に搬送されるようすを図8に示す。

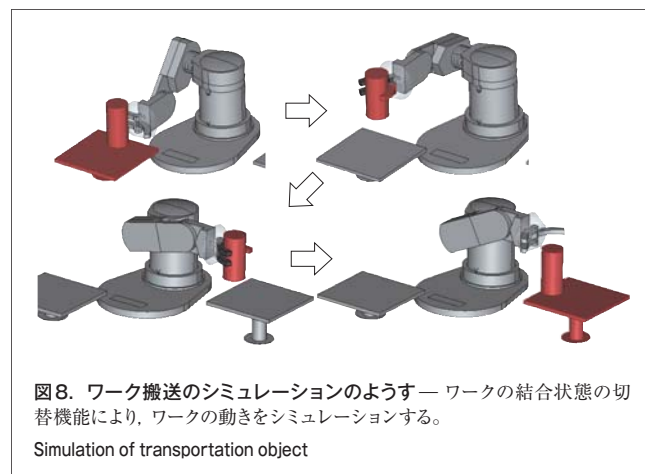
ロボットの制御ソフトウェアではアームとハンドを制御し、ワークとハンドの干渉をセンサ条件にして、ワークをつかんだことを認識してアームを持ち上げる。次にワークを搬送し、ワークと搬送先の台とが干渉することで、ワークをハンドから離す。

Vmech™では、ワークとハンドが干渉すると、図7に示す状態遷移条件で定義したワークとハンドの結合状態を有効にする。その結果、ハンドがワークをつかんで結合し動作するようになる。次にワークを搬送し、ワークと搬送先の台との干渉をトリガにしてワークを搬送先の台と結合する。すなわち、ワークは搬送台に置かれたことになる。

異常系のシミュレーションを行う場合には、ワークが持ち上がらない定義や、途中でワークが落下（ワークを非表示で模擬）

図7. ワークの結合状態を切り替える状態遷移条件の定義例 — ワークの動作シナリオをGUIベースで設定できる。

Graphical user interface for setting state transition conditions of transportation object



する定義を行うことで、制御ソフトウェアの検証を行うことができる。

5 あとがき

メカトロニクス制御ソフトウェア開発のフロントローディングを実現する手法とシミュレータの例を述べた。このシミュレータを活用した開発手法は、東芝グループ内外で実際の製品開発に適用され、成果を上げている。

今後更に機能強化を進め、設計の高度化と品質向上に貢献していきたい。

文 献

- 1) 近藤浩一, ほか. 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. 東芝レビュー. 60. 1, 2005. p.60-63.
- 2) Kondo, K.; Yoshida, M. Use of hybrid models for testing and debugging control software for electromechanical systems. IEEE/ASME Trans. Mechatronics. 10. 3, 2005, p.275-284.



本橋 聖一 MOTOHASHI Shoichi

(株)インターデザイン・テクノロジー パーチャルメカトロニクス事業部 VMソリューショングループ部長。メカトロニクス機器シミュレータの開発・販売・ソリューション事業に従事。InterDesign Technologies, Inc.



堺 浩 SAKAI Hiroshi

東芝ソシオシステムズ(株) システム・インテグレーション推進部 第一システム・ソフトウェア担当参事。組込み要素技術及びアプリケーションソフトウェアの開発に従事。日本機械学会会員。Toshiba Social Automation Systems Co. Ltd.



吉田 充伸 YOSHIDA Mitsunobu

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務。設計支援技術の研究・開発に従事。日本機械学会、情報処理学会会員。Mechanical System Lab.