

# Scilab/Scicos を活用したローコスト HIL シミュレータの構築と メカトロ機器開発への適用

道総研工業試験場 ○浦池隆文, 北大院 金井理, 旭川高専 戸村豊明

## 要旨

汎用 PC と拡張 I/O ボードにより構成されるハードウェアに、リアルタイム Linux と Scilab/Scicos 等のフリーソフトウェアを組み合わせることで、低コストな HIL(Hardware In the Loop)シミュレータを構築した。また、フィードバック制御を含むメカトロニクスシステムの代表例である倒立振子の設計・製作へ適用する事で、メカトロ機器開発の効率化に有用である事を確認した。

## 1. 緒言

航空・宇宙や自動車関連の分野では、HILS(Hardware in the Loop Simulation)と呼ばれる、リアルタイムシミュレーションを軸とした開発環境の利活用が進み、機構系と制御系を含むメカトロ機器開発の効率化が図られている。しかし、先端的分野で用いられる HILS システムは、専用に設計された計算機やソフトウェアが用いられているため非常に高価であり、広くに一般用いられているものではない。

そこで本研究では、汎用的に用いられるハードウェアと、無償で利用可能なソフトウェア (OS・数値演算ツール等) を活用する事で、低コストな HILS システムの構築を試み、倒立振子をモデルとした開発サイクルへ適用する事で有用性の確認を行った。

## 2. HIL シミュレータの構築

### 2.1 メカトロ機器開発と HILS

メカトロ機器開発の一般的な流れと HILS について図 1 に示す。機構系と制御系は、仕様の検討と、これに基づいた設計 (仮想試作) が行われた後、実機の製作および制御プログラムの実装が行われる。その後両者を統合した試験により、システムとしての総合的な性能評価が行われる。しかし実機による試験で不具合が生じた場合、設計変更や再試作には多くの労力とコストが発生する。そこで、設計段階での機構系もしくは制御系的一方をシミュレーションモデルとし、他方に実機を用いて相互に接続した HILS による検証を行う事で、実機試験を行う以前に様々な機構や制御アルゴリズムの検討および不具合の早期発見が可能となる。

### 2.2 構築したシステムの概要

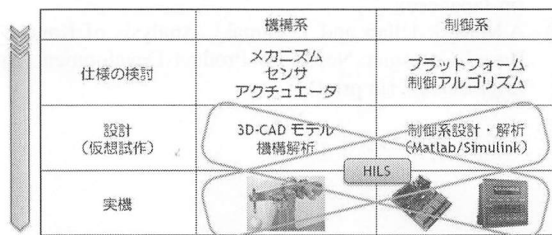


Fig.1 メカトロ機器開発と HILS

HILS 向けシミュレータに求められる要素としては、大きく分けて次の3点が挙げられる。

- ① 実機に相当するセンサ信号や制御信号等の入出力機能を持つハードウェア
- ② シミュレーションの対象となる機構やアルゴリズムのモデル化と数値演算を行うソフトウェア
- ③ ①のハードウェア上で②の演算を実時間で実行するためのリアルタイム OS

これらを考慮して図 2 に示すシミュレータを構築した。さらに 3D-CAD による機構部の設計データを活用したシミュレーションモデルの作成法についても検討した。

### 2.2.1 ハードウェア

本シミュレータのハードウェア部は、一般的に用いられるデスクトップ PC と、PCI 接続の拡張 I/O ボードにより構成した。I/O ボードは NI (National Instruments) 製 PCI-6229 (A/D32ch, D/A4ch, DIO48ch, カウンタ 2ch の入出力を持つ複合タイプ) を使用した。

### 2.2.2 ソフトウェア

本シミュレータで使用するソフトウェアは、Linux カーネルのリアルタイム拡張である RTAI をベースとし、商用の数値演算システムである Matlab/Simulink と同様な機能を持つ Scilab/Scicos, および I/O ボードによる信号入出力を制御する Comedi 等、全てフリーソフトウェアを採用した。

### 2.2.3 シミュレーションモデルの作成

制御系のシミュレーションモデルは、Scicos ブロック線図により直観的に作成する事が可能である。同様に機構系のシミュレーションモデルもブロック線図により作成する必要があるが、微分方程式で表される機構系の運動をブロック線

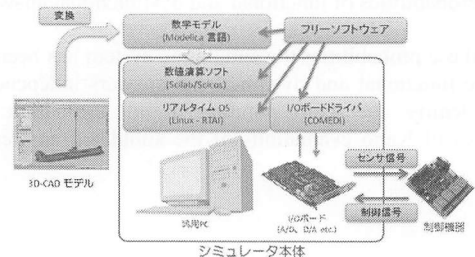


Fig.2 構築した HIL シミュレータ

図で置き換える事は、部品点数が多くなる程困難な作業となる。そこで本シミュレータでは、Scicos の機能拡張ブロックとして用意されている Modelica と呼ばれる物理モデリング言語を用いてモデル化を行う。Modelica によれば、機構系の部品やリンク関係に相当する「Body」や「Joint」が予めライブラリとして用意されており、これらを適宜組合せて行くことで、機構全体を表現する事が可能である。

### 2.2.4 3D-CAD による機構設計データの活用

機構系の設計には 3D-CAD を用いるのが一般的であるが、Modelica によるシミュレーションモデルを作成する際に必要となる設計データは、各部品の質量や慣性モーメント、および重心位置を表す「質量特性」と、各部品がどのように接続されているかを表す「合致」に関する情報である。今回 3D-CAD として SolidWorks (Dassault Systems 社) を用いたが、同 CAD では API によりこれらの情報を取得可能であることから、同 API を利用したプログラムを作成し、得られた情報を Modelica モデルのパラメータ設定に用いた。

## 3. 倒立振子の設計・製作と制御試験

### 3.1 倒立振子のモデル

図 3 に倒立振子の 3D-CAD モデルと Modelica モデルを示す。(a)3D-CAD モデルでは、ベース上の台車がタイミングベルトを介して AC サーボモータにより駆動され、振り回転軸は自由に回転出来る構造となっている。サーボモータ内蔵のエンコーダと振り回転軸に取り付けたエンコーダにより、台車位置と振り回転角が測定される。同様に(b)Modelica モデルでは、ベース、台車、振子の部品 (Body) が、スライド機構と回転軸 (併せて Joint) により接続されている。スライド機構に駆動力が入力され、位置センサ、回転センサにより得られる値を出力する構造となっている。

### 3.2 制御アルゴリズムの検討と制御シミュレーション

振子の倒立制御は、状態フィードバック制御によることとした。実機倒立振子では、台車速度と振り回転角速度を直接センシングすることが出来ないため、オブザーバを併用した

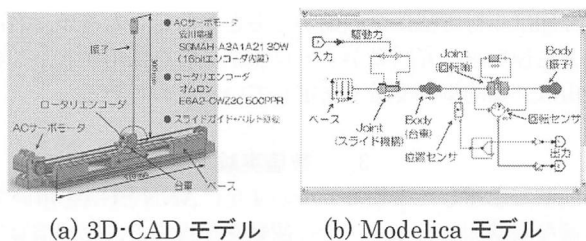


Fig.3 倒立振子の 3D-CAD モデルと Modelica モデル

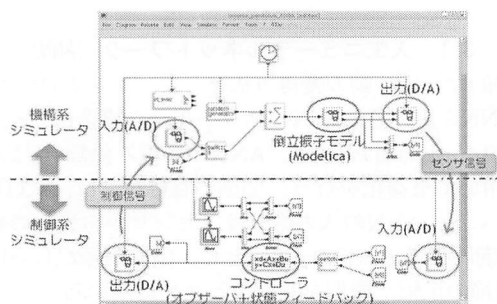


Fig.4 制御アルゴリズムの検討

制御アルゴリズムの設計を行った。上述の Modelica モデルと制御アルゴリズムを Scicos 上に実装し、シミュレーションを行うことでフィードバックゲイン等の調整を行った。この際に用いた Scicos ブロック線図を図 4 に示す。線図は、上部の倒立振子モデルのシミュレーションを行う部分と、下部の制御アルゴリズムのシミュレーションを行う部分に分けられる。両者の入出力信号は、I/O ボードの A/D および D/A コンバータを介して接続されている。このように機構系と制御系のシミュレータを I/O ボードを介して独立させることで、次に述べる実機制御への移行を容易にしている。

### 3.3 制御試験

以上の様にして機構系と制御系の設計を経た後、図 5 に示す倒立振子試験機を製作し、制御試験を行った。コントローラは、図 4 下部の制御系シミュレータに、実機における制約 (台車の移動可能範囲やモータの過

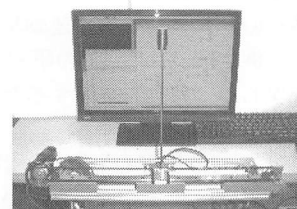
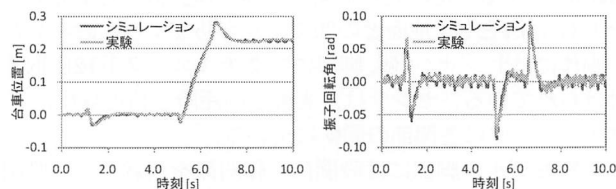


Fig.5 倒立振子試験機

負荷防止) を考慮したアルゴリズムを追加したものをそのまま使用した。これは図 1 で機構系が実機、制御系がシミュレータの場合の HILS (i.e. Rapid Control Prototyping) に相当する。シミュレーション結果と実機による試験結果の比較を図 6 に示す。試験内容は、倒立状態から 1.5s 経過した時点で台車に瞬間的な外力を作用させ、5.0s~6.5s の間に台車を 0.22m 移動させた時の挙動を確認する内容となっている。また、図 6 のシミュレーションでは、同定結果に基づいた実機固有の摩擦と、エンコーダ分解能に応じた振り回転角の離散化を行ったモデルが組み込んである。(a)台車位置、(b)振り回転角ともに、シミュレーションと実機で非常に良く一致しているのがわかる。両者とも定常状態で振動的な挙動を示しているが、これは主にエンコーダの分解能に依存した結果である。以上より、今回構築したシミュレータが、実機制御を目的とした機構系の挙動確認、および制御系の設計に非常に有用である事が示された。



(a) 台車位置 (b) 振り回転角  
Fig.6 シミュレーションと実機試験の比較

## 4. 結 言

本研究では、次のような結果を得た。

- (1)汎用的な PC と I/O ボード、およびフリーソフトウェアを組み合わせることで、ローコストな HIL シミュレータを構築した。
- (2)シミュレーション結果と倒立振子実機制御結果の比較から、高精度なシミュレーションが可能であることを確認した。