

# フリーソフトを活用したローコストHILシミュレータの開発

浦池 隆文, 多田 達実

## Development of Low-Cost HIL Simulator using Free Software

Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA

### 抄 録

自動車や航空・宇宙等の先進的なメカトロニクス分野では、モデルベース開発におけるHILS（Hardware In the Loop Simulation）と呼ばれる手法の利活用が進み、設計・開発の効率化が図られている。近年急速にメカトロニクス化が進む一次産業向け機械装置等の分野にも適用可能なHILSシステムの実現を目的として、汎用PCとI/Oボードで構成されるハードウェアに、リアルタイムOSや数値演算システム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シミュレータ（リアルタイムシミュレータ）を構築した。3D-CADで設計した機構モデルを解析用のシミュレーションモデルへ変換する手法について検討するとともに、構築したシミュレータの機能の検証事例として、倒立振り子試験機の設計・製作、およびロボットマニピュレータの制御シミュレーションに適用することで、制御アルゴリズムの検討やパラメータ調整に有効であることを確認した。

**キーワード：**メカトロニクス, モデルベース開発, リアルタイムシミュレータ, HILS

### Abstract

In an advanced mechatronics field for the car, aircraft and space-robotics etc., the use of HILS (Hardware In the Loop Simulation) advances in the Model-based development. And the efficiency of the design and development have been improved. In this study, Low-Cost HIL-simulator (Real-Time simulator) that can be used to develop the general machinery was developed with combination of hardware and free software such as general-purpose PC, I/O boards, real-time OS and math system. And the technique of conversion from the mechanism-model which was designed by 3D-CAD to the simulation-model was developed. To verify the functionality of the developed HIL-simulator, the control simulation of robotic manipulator and the design of inverted pendulum were performed. It was found to be effective for study of control algorithm and adjustment of control parameters.

**KEY-WORDS :** Mechatronics, Model-based Development, Real-Time simulator, Hardware In the Loop Simulation

## 1. はじめに

自動車や航空・宇宙等の分野では、HILS（Hardware in the Loop Simulation）と呼ばれる、機構系と制御系を統合したシミュレーション技術の利活用が進み、開発サイクルの短縮や付加価値向上の面でその有用性が明らかとなっている。しかし、先進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信号入出力インターフェイスが用いられているため非常に高価で、かつその運用には高度な専門知識

を要することから製造業全般に広く適用さ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）を有効に活用する事で、低コストで簡便なHILシミュレータ（リアルタイムシミュレータ）の構築を試み、倒立振り子およびロボットマニピュレータ（垂直多関節ロボット）の設計・制御に適用することで機能の検証を行った。

事業名：経常研究

課題名：機械装置のリアルタイム制御シミュレーション技術に関する研究

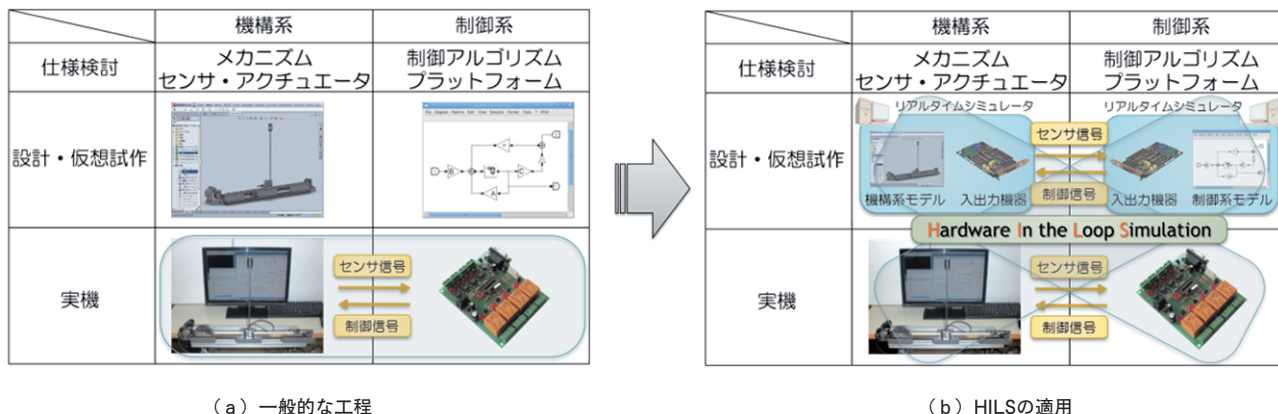


図1 メカトロ機器の開発とHILS

## 2. HILSについて

### 2.1 メカトロ機器の開発とHILS

HILSとは、実システムを動作させているのと同様なフィードバック信号の入出力が可能なリアルタイムシミュレータを用いることで、設計・仮想試作段階のモデルと実機を融合した評価・検証を行う設計手法であり、試作や設計変更等にかかる工数とコストの大幅な削減が期待できる。

いわゆるメカトロ機器における一般的な開発工程とHILSの適用について図1に示す。機構系および制御系は先ず仕様の検討を行い、メカニカルCADや制御系設計CADによる設計・仮想試作が行われる。その後、実機の製作・制御プログラムの実装等を行い、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の評価と検証が行われる（図1(a)）。しかし実機による試験の結果、何らかの不具合が発見された場合、設計変更や再試作には多くの労力とコストが発生することとなる。そこで図1(b)に示す様に、機構系と制御系の両者をシミュレータとして接続する、もしくは機構系か制御系の一方をシミュレータとし、他方を実機として、図中のたすき掛けのように接続したHILSによる検証を行う事が出来れば、最終的な実機システムによる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り、開発効率の向上が図られる。

### 2.2 HILシミュレータ（リアルタイムシミュレータ）の構成

HILSによる設計・検証では、実機と接続可能なリアルタイムシミュレータをいかに構築するかが重要なポイントとなる。シミュレータに求められる要件としては、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

自動車などHILSの適用が進む分野では、②としてMatlab/Simulinkと呼ばれるソフトウェアがほぼ業界標準として用いられ、①と③については解析の対象や規模に応じた独自のシステムが用いられている。しかしこれら商用のシステムは最低でも数百万円以上と非常に高価である。

## 3. 低コストHILシミュレータの構築

汎用的に用いられるハードウェアと、無償で利用可能なフリーソフトウェアを組み合わせることで、図2に示すリアルタイムシミュレータを構築した。さらに3D-CADによる機構系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。以下にその概要を示す。

### 3.1 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 (CPU: Intel Core i7 2.66GHz) 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) 社製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。

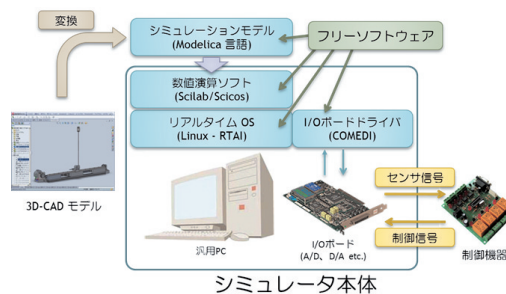


図2 構築したリアルタイムシミュレータ

### 3.2 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、全て無償で利用可能なものを用いた。

#### 3.2.1 ubuntu9.04

Linuxカーネルと多くのソフトウェアから構成されるOSの一つ。他のLinuxOSと比較して、後述するソフトウェア類をインストールする際に必要な追加パッケージの多くがあらかじめ用意されており、比較的スムーズな環境構築が可能である。

#### 3.2.2 RTAI (Real Time Application Interface)

イタリアのDIAPM (Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale-Politecnico di Milanoミラノ工科大学航空宇宙工学部) が中心となり開発されているLinuxカーネルのリアルタイム拡張モジュール。最新の2.6系Linuxカーネルは、標準でも1msまでのリアルタイム処理が可能であるが、本モジュールを組み込む事で $\mu$ sオーダーでの確実なリアルタイム処理が可能となる。

#### 3.2.3 Scilab/Scicos

フランスのINRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique フランス国立情報学自動制御研究所) が中心となり開発されている数値演算システムであり、商用のMatlab/Simulinkと同等の機能を持ち、Scicosブロック線図による直観的な制御アルゴリズムの記述が可能となっている(図3参照)。また前述のRTAIと組み合わせる事で、ブロック線図で表されたアルゴリズムを、リアルタイム処理に必要なCプログラムへ自動的に変換することができる他、次に述べるComediに対応したブロックを配置することで外部機器との信号入出力が可能である。

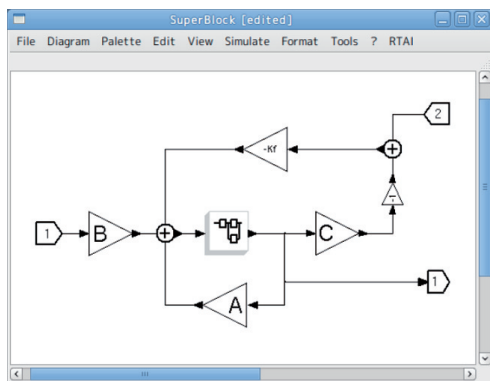


図3 Scicosブロック線図の例  
(状態フィードバック制御で用いられるオブザーバ)

#### 3.2.4 Comedi (Linux Control and Measurement Device Interface)

今回使用したNI社製のI/Oボードだけでなく、30社近くの製品に対応したドライバ群であり、各製品に対応したモジュールをLinuxカーネルに組み込むことで、製品毎の差異を吸収し、共通のインターフェイスによる使用が可能となる。

### 3.3 シミュレーションモデルの作成

以上より、実時間での処理と外部機器との信号入出力が可能なシミュレータ本体が構成される。シミュレーションの際には、Scicosブロック線図でシミュレーションの対象となるモデルを作成し、これを実行する。Scicos自体が制御アルゴリズムの記述に適しているため、制御系のシミュレーションモデルを作成するのは容易であるが、機構系のシミュレーションモデルの作成に関しては、微分方程式で表される機構の運動をモデル化しなければならず、Scicos標準ブロックの組み合わせだけで記述するのは大変困難な作業となる。そこでここでは、3D-CADで設計した機構の、部品毎の接続関係や質量特性に関する情報を活用し、Modelica言語と呼ばれる物理系モデリング言語を用いた機構系シミュレーションモデルの作成について述べる。

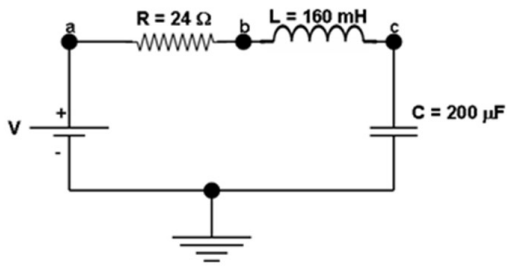
#### 3.3.1 Modelica言語によるシミュレーションモデルの表現

Modelica言語とは、EUのITEA2 (Information Technology for European Advancement) プロジェクトにおいて、Modelica Associationにより開発・公開されているオブジェクト指向のモデリング言語である。Modelica言語によれば、微分方程式で表される物理系(電気・機械・油圧・熱・流体等)のモデル化を行う事が可能であり、数式による表現の他、グラフィカルなエディタ内でModelica標準ライブラリと呼ばれる予め定義された構成要素を接続していくことでモデリングすることが可能である。図4に、RLC回路をモデルとして、標準ライブラリおよび数式による表現の例を示す。

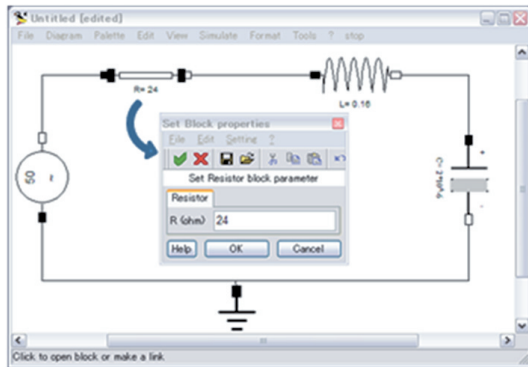
Modelica言語自体は、その言語仕様と標準ライブラリが規格として定められているものであり、モデル作成用のエディタやシミュレーションを行う際の実行環境が別途必要となる。今回構築したシミュレータにおいては、一部機能に制限があるもののScicos上でModelica言語が利用可能である。

#### 3.3.2 3D-CADにより設計した機構の情報取得とシミュレーションモデルへの反映

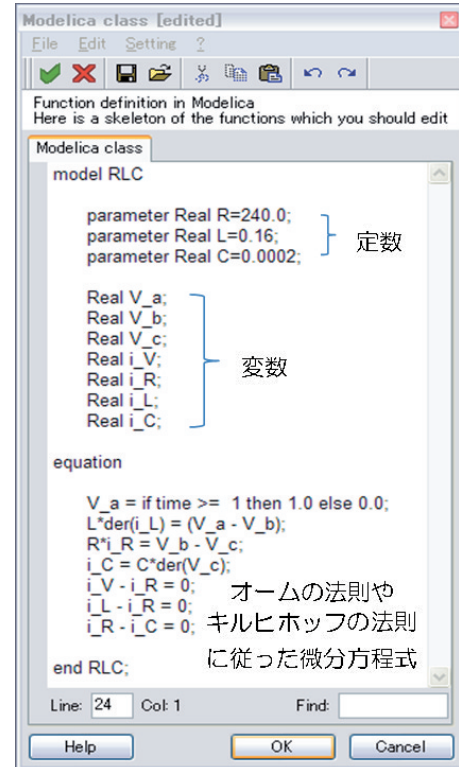
本研究では、機構系設計用3D-CADとしてSolidWorks (Dassault Systems社)を用いた。Modelica言語で機構をモデル化するには、3D-CADにより設計したモデルに含まれる各部品の質量や慣性モーメント、および重心位置を表す「質量特性」と、各部品がどのように接続されているかを表す「合致」に関する情報が必要となる。



(a) 物理モデルの例 (RLC回路)



(b) 標準ライブラリによる表現と定数の設定



(c) 方程式による表現

図4 Modelicaによる物理モデルの例

Scicosに対応したModelicaモデルの作成環境として、Coselicaと呼ばれるツールボックスが提供されている。これに用意されている機構系要素は、主に「Body」と「Joint」と呼ばれるもので、これらを組み合わせることで機構全体が表現される。CAD上で設計したモデルの各部品が「Body」に相当し、これに「質量特性」を設定する。また、CAD上で設定した「合致」の組み合わせにより、部品間の相対的な運動を表す「Joint」が定義される。例えば、凹形と凸形の断面形状を有する2つの部品間で、凹凸が組み合わさるよう直行する2平面を互いに一致させる合致を設定した場合、部品間の運動は部品長手方向への並進運動に制限され、これは並進一自由度を表す「Prismatic Joint」となる。他に回転一自由度を表す「Revolute Joint」等があるが、CAD上で設定した「合致」により拘束される自由度を解析することで、対応する「Joint」を見出す事が可能である。本研究ではSolid Worksが提供しているAPI (Application Programming Interface) を用いたプログラムを作成し、3D-CADモデル内からModelicaモデルの作成に必要な「質量特性」および「合致」に関する情報を得た。

#### 4. HILシミュレータの適用

前章で構築したHILシミュレータについて、実際のメカトロ機器開発を想定した例として倒立振り子試験機的设计・製作、

およびロボットマニピュレータの制御に適用し、HILS用ツールとしての有用性について検討した。

#### 4.1 倒立振り子試験機的设计・製作

倒立振り子は比較的簡単なメカニズムで構成されているが、フィードバック制御系の制御アルゴリズム検証に良く用いられる例題である。SolidWorksによる機構系的设计とScicosによる制御系的设计を行い、この段階で両者をリアルタイムシミュレータ上に実装してパラメータ設定等を行った。その後、機構系の実機を製作し、制御系シミュレータと接続して制御試験を行い、设计の妥当性について検討した。

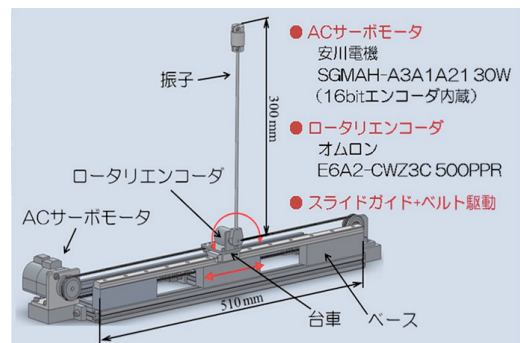


図5 倒立振り子の3D-CADモデル



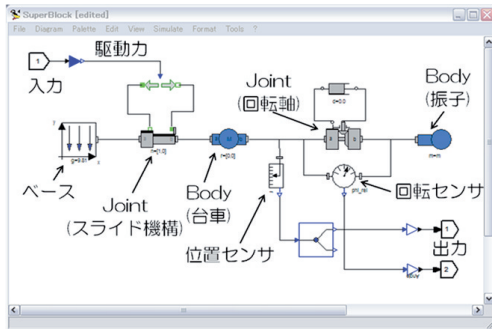


図6 倒立振子のModelicaモデル

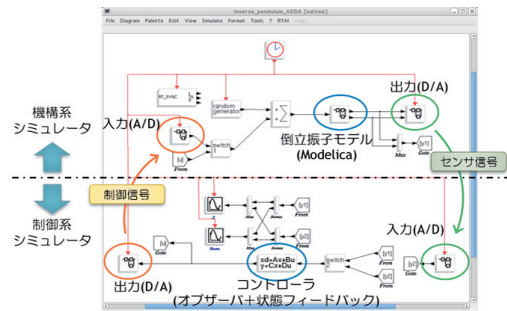


図7 倒立振子のシミュレーション

#### 4.1.1 機構の3D-CADモデル

図5にSolidWorksを用いて設計した3D-CADモデルを示す。機構は大きく3つの要素により構成される。

- ①スライドガイドを含むベース
- ②スライドガイド上で水平方向に駆動される台車
- ③ロータリエンコーダを軸として台車に回転支持される振り子

ベース上の台車は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、振り子回転軸は自由に回転することができる。サーボモータ内蔵のエンコーダと振り子回転軸に取り付けたエンコーダにより、台車位置と振り子回転角が測定され、これらの測定値をもとにサーボモータへの駆動指令を適切に与えることで、振り子の倒立状態を維持することを目的としている。

#### 4.1.2 機構のシミュレーションモデル (Modelica)

図6に倒立振子のModelicaによるモデルを示す。倒立振子の場合部品点数が少ないため、運動方程式や拘束条件をもとにした微分方程式を得ることは比較的容易であるが、ここではModelica標準ライブラリを用いてシミュレーションモデルを作成した。図より3D-CADで設計したモデルと同様に、ベース、台車、振り子の各部品 (Body) が、スライド機構と回転軸 (Joint) により接続されている様子がわかる。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が出力される。各BodyおよびJointに対する初期設定では、SolidWorksのAPIを用いたプログラムを作成し、これにより得られる設計情報を反映させた。

#### 4.1.3 制御アルゴリズム

振り子の倒立制御は、状態フィードバック制御によることとした。倒立振り子の状態フィードバック制御では、台車の位置と速度、振り子の回転角と回転角速度の計4つの入力をもとに、これらに適切なフィードバックゲインを掛けて足し合わせた値を駆動指令として出力する。しかし実機倒立振り子では、台

車速度と振り子回転角速度を直接センシングすることが出来ないため、オブザーバと呼ばれる補償器を併用した制御アルゴリズムの設計を行った。

#### 4.1.4 制御シミュレーション

前述の倒立振り子モデルと制御アルゴリズムをScicos上に実装し、制御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パラメータ調整を行った。このとき用いたScicosブロック線図を図7に示す。線図は、上部の機構系シミュレーション (倒立振り子モデル) を行う部分と、下部の制御系シミュレーション (コントローラ) を行う部分の二つに分けられる。両者の入出力は、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。機構系のシミュレーションでは、制御系からの制御信号がA/Dにより入力され、計算の結果得られる台車位置と振り子回転角のセンサ信号がD/Aにより出力される。制御系シミュレーションではA/Dにより得られるセンサ信号をもとに制御信号が計算され、D/Aにより出力される。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。

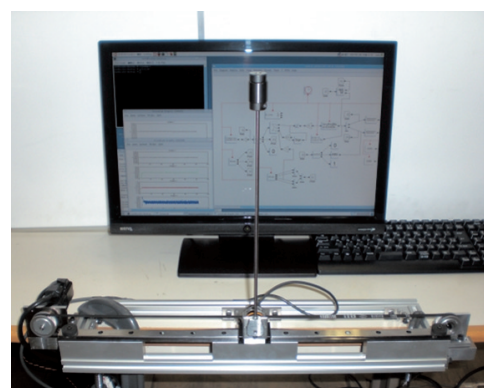


図8 倒立振り子試験機

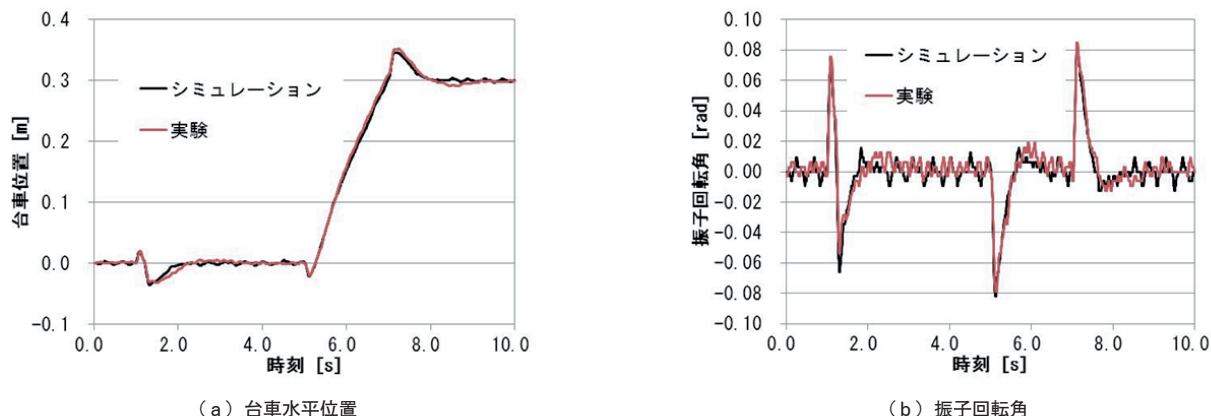


図9 シミュレーションと実験結果の比較

#### 4.1.5 制御試験

3D-CADによる設計とシミュレーションによる制御アルゴリズムの検討を行った後、図8に示す倒立振り試験機を製作した。図7のブロック線図のうち、下部の制御系シミュレーション部分をもとに、実機における制約（台車の移動可能範囲・モータの過負荷防止）を考慮したアルゴリズムを追加したコントローラを、I/Oボードを介して試験機と接続して制御試験を行った。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9に示す。制御においては、振子の倒立状態を維持したまま台車水平位置の目標値を変化させ、それに対する追従性を比較した。制御開始から5秒間の目標値を0.0mとし、5秒から7秒の間で目標値を0.3mに変化させた。また制御開始から1秒後に、台車水平方向にインパルス状の外乱信号を与えた。シミュレーションにおいては、実機スライドガイド部や振り回転軸の摩擦係数の測定結果、および離散値として出力されるエンコーダの角度分解能を反映させている。図9より、台車水平位置と振り回転角のそれぞれについて、シミュレーション結果と実験結果が非常によく一致しているのがわかる。また、図9(b)においては、振り回転角測定用エンコーダの分解能が低いことに起因する振動的な挙動が、実験と同様シミュレーションにおいても観測されている。以上より、本研究で構築したリアルタイムシミュレータが、機構系実機の挙動を模擬するシミュレータとして利用することが可能であり、設計・仮想試作段階での検証ツールとして有効に機能することを確認した。

#### 4.2 ロボットマニピュレータの制御

前節で扱った倒立振り子は、平面内での並進と回転で表される二次元運動であったが、三次元空間内での運動の例としてロボットマニピュレータの制御に適用した例を以下に示す。

##### 4.2.1 機構のシミュレーションモデル

倒立振り子の場合と同様に、3D-CADでのロボットマニピュレータ機構系のモデリングを行った後、Modelicaによるシ

ミュレーションモデルの作成を行う。しかし、現段階においてScicos上で利用可能なModelica標準ライブラリには、三次元空間内での運動をモデリングする機能が備わっていないため、数式表現によるシミュレーションモデルの作成を行わなければならない。しかし、三次元空間内での運動は二次元平面内での運動と比較して非常に複雑な微分方程式で表され、機構の自由度が増すほど、手計算で解析モデルを求める事は困難となる。そこで、マルチボディーダイナミクスと呼ばれる理論にもとづいたPyMBsと呼ばれる運動解析ソフトに着目した。PyMBsによれば、機構を構成する部品や部品相互の接続状態を決められた手順で記述することで解析モデルが得られ、Modelica言語仕様に従った数式表現に変換することが可能である。これにより4軸の垂直多関節型ロボットマニピュレータのシミュレーションモデルを作成し、関節角度の制御シミュレーションによる制御パラメータの調整を行った。

##### 4.2.2 制御シミュレーションによる制御パラメータ調整

今回ロボットマニピュレータ実機による試験を行うには至らなかったが、前節の方法で作成したシミュレーションモデルに対して、全ての関節を正弦波状の目標角度で同時に駆動することを想定し、PD制御による関節角度制御を行った。図10にロボットマニピュレータの自由度および動作の様子を、

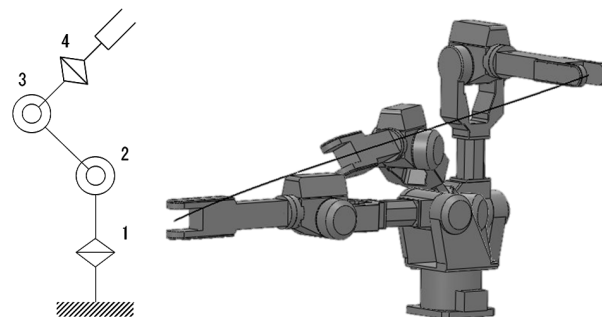


図10 ロボットマニピュレータの自由度と動作の様子

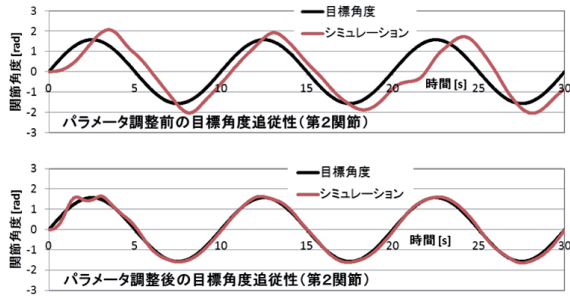


図11 制御パラメータの調整結果

図11に第2関節（アーム全体を上下させる関節）の制御パラメータ調整を行った結果を示す。パラメータ調整前においては、目標とする関節角度と比較して位相遅れを生じ、波形自体も正弦波とは異なる歪な形状をしている。これに対しパラメータ調整後のグラフによれば、動作開始直後に若干振動的な挙動が見られるものの、適切な制御パラメータが設定され、目標関節角度に対して精度よく追従していることがわかる。産業用ロボット等として応用されている垂直多関節型ロボットの関節はサーボモータにより駆動されており、制御パラメータの調整は実機による試行錯誤が一般的であるが、本シミュレータを用いることで事前の検討が可能であることを確認した。

## 5. まとめ

近年、一次産業向け機械装置もメカトロニクス化が進んでおり、装置開発を効率的・効果的に進める有効な手法として、機構系ばかりでなく制御系までを統合したシミュレーションを行うことが重要となってきている。実機を作成する以前に様々な機構や制御アルゴリズムの検討を簡便に行う事が可能となれば、試作・性能評価にかかる工数とコストの大幅な削減が期待できる。

今回構築したローコストHILシミュレータでは、倒立振り子をモデルとして平面内での並進と回転で表される二次元平面運動を、4関節の垂直多関節ロボットをモデルとして三次元運動を扱い、実機と同様の挙動を示すシミュレータとして機能することを確認した。また、フリーソフトや汎用的なハードウェアの組み合わせであるものの、商用のHILS向けシステムと同等の機能が実現され、制御アルゴリズムの検討や制御パラメータの設定において、設計・仮想試作段階で利用可能な検証ツールとして有用であることを確認した。

今回構築したシミュレータは、複数のソフトウェア上でデータをやりとりする必要があるため、ユーザビリティの面で改良の余地がある。今後適用事例を増やしていく中で、必要に応じた機能の追加等を行い、システムとしての完成度を高めていく予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院情報科学研究科の金井理教授、ならびに旭川工業高等専門学校の戸村豊明准教授より多大なご指導・ご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。