

Scilab を用いたロボットシミュレーションモデルの構築

牧 俊一^{*1}、酒井昌夫^{*1}

Development of Robot Simulation Model in Scilab

Shunichi MAKI^{*1} and Masao SAKAI^{*1}

Industrial Technology Division, AITEC^{*1}

ロボットの研究開発や学習用途に利用するためのシミュレーションモデルの開発を行った。開発は、無料で利用できるオープンソースの数値計算ソフトウェアである Scilab を用いて行った。Scilab のグラフィカルな開発環境である Scicos を用いてアクチュエータの視覚的なモデルを作成し、あわせてモデルのパラメータ調整を効率的に行うためのスクリプトファイルを作成した。シリアルロボットの動的なモデル設計を可能とする要素モデルを開発した。

1. はじめに

ロボットや自動車などのメカトロ機器は、製品仕様の複雑化によって、開発コストが問題視されてきた。近年、その解決手法として、モデルベース開発が注目されている。モデルベース開発とは、ハードウェアやソフトウェアで構成されるシステムをコンピュータ上に数式モデルとして表現し、シミュレーションによってそのモデルをテスト・検証することを開発工程に取り入れて、コストの低減、開発期間の短縮を図る開発手法である。

制御系のモデリングツールとして有名な数値計算ソフトウェアに MATLAB/Simulink (Simulink は MATLAB 上で動作するグラフィカルなモデリング環境) がある。MATLAB/Simulink は、大企業や大学において多数の導入実績があるが、製品の価格や利用者の人材育成費などのコストが高く、利用したくとも導入が難しいという企業の意見もある。

そこで本研究では、無料のオープンソースソフトウェアである Scilab¹⁾に着目した。Scilab は MATLAB と互換性のある諸機能、演算関数群を有しており、オープンソースの公開性や拡張性の高さを活かして、今後の発展が期待される高性能なソフトウェアである。本研究では、ロボットの研究開発に用いることができるいくつかのモデルを Scilab を使用して作成した。

2. 実験方法

2.1 実験環境

Scilab は、INRIA(フランス国立コンピュータ科学・制御研究所)で作成された数値計算パッケージである。多くの UNIX 系システムや Windows(9X/2000/XP)で動作し、

以下に挙げるような特徴を持っている。

- ・ netlib (数値計算のためのライブラリを多数配布している著名な国際サイト) などを使用した一定品質の数値計算ライブラリ群。
- ・ 関数や変数の独自定義、C や Fortran などの外部言語の呼び出し、MATLAB や Maple (数式処理システム) との互換機能など、高い拡張性。
- ・ MATLAB の Simulink に対応する Scicos というグラフィカルなモデリング環境。

本研究では、OS の利用度の高さを考慮して Windows 版の Scilab version4.0 を使用し、ロボットシミュレーション用開発モデルは直感的な設計が可能な Scicos で動作する GUI モデルとして作成した。以下、Scilab と Scicos を使ったモデリングの概要と本研究での役割について述べる。

2.2 Scilab でのモデリング

Scilab は、対象の数式モデル(伝達関数や状態方程式)を Scilab の画面上(図1)に直接入力することで作成する。作成したモデルに対する入出力、安定性の解析や制御パラメータの最適化のための処理手法などが多数コマンドとして用意されている。一連のコマンドをスクリプトファイルにまとめることで、バッチ処理をすることもできる。

Scicos の GUI モデルから Scilab のコマンドが利用可能なだけでなく、Scilab から GUI モデルに直接アクセスするコマンドが用意されており、本研究では、そのようなコマンドを利用してモデルのシミュレーションの効率化を図った。

^{*1}工業技術部 機械電子室(現基盤技術部)

```

Scilab (Linux) -> A [edit]
//Linear state-space transfer system
s1 =
STC1) (state-space system)
class A B C D x0 dt 1
STC2) = A matrix =
2. 0. 0.
0. 1. 0.
0. 0. 0.
STC3) = B matrix =
1. 0.
0. 1.
0. 0.
STC4) = C matrix =
1. -1. 0.
STC5) = D matrix =
0. 0.
STC6) = x0 (initial state) =
0.
0.
0.
STC7) = Time domain =

```

図1 Scilab 画面



図3 アクチュエータ

2.3 Scicos でのモデリング

Scicos は、ブロックダイアグラム（以下、ブロックと呼ぶ）を制御の流れにそってリンクで結合することで、制御モデルを設計することができるグラフィカルなモデリング環境である（図2）。Scicos を使ったモデリングは、Scilab 上で数式モデルを設計するよりも直感的に行えるだけでなく、連続系と非連続系が混在するシステムの設計に有効であり、ブロックとして用意された信号の入出力機能も豊富である。

本研究では既存のブロックを利用しつつ、ロボット開発のため GUI モデル（ブロック）を新規に作成した。

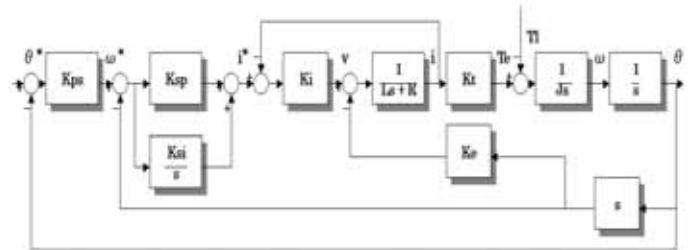


図4 制御ブロック図

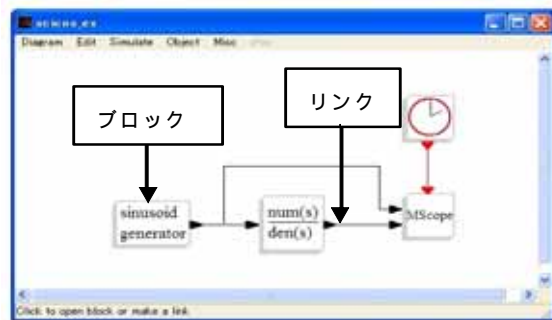


図2 Scicos モデル

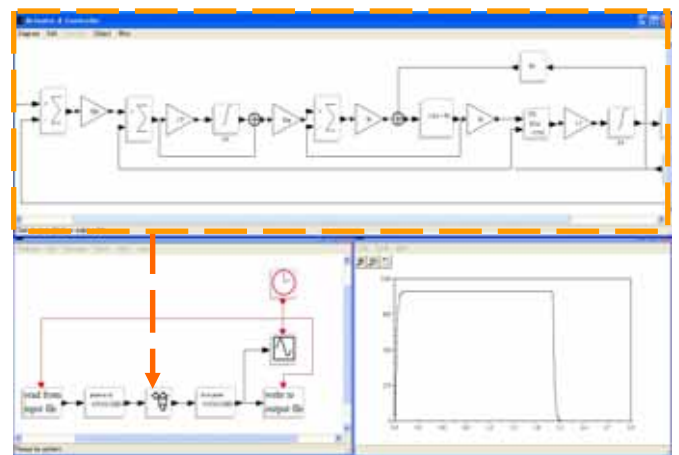


図5 作成した Scicos モデル

3 . 実験結果及び考察

3.1 アクチュエータモデルの作成

当研究所のリハビリ支援ロボットの開発で実際に使用しているアクチュエータの GUI モデルを作成した。アクチュエータはベース、ボールねじ、リニアガイドからなるリニアアクチュエータ（図3）で、パルス列入力タイプのコントローラで制御（PC を通じて制御パラメータの変更が可能）されており、上位コントローラによる位置決め制御が可能である。このアクチュエータに関する資料に記載されている制御ブロック図とパラメータを参照して、図4の制御ブロック図を設計しモデル化した²⁾ものを図5の上部に示す。また、各パラメータを表1に示す。

表1 モデルのパラメータ

Kps	位置比例ゲイン	L	等価直流機インダクタンス
Ksp	速度比例ゲイン	R	等価直流機抵抗
Ksi	速度積分ゲイン	Ke	等価直流機電圧定数
Ki	電流比例ゲイン	Kt	等価直流機トルク定数
Tl	負荷トルク	J	モータ軸換算イナーシャ

：位置 ：角速度 i：電流 v：電圧 Te：発生トルク

図5の破線で示したように、モデルは階層構造で表現できる。同図にはコントローラの仕様に応じたソフトウェア上の減速比や簡易な負荷トルクのモデルが追加しており、その動作シミュレーションの結果が、右下のグラフに示されている。図6は、アクチュエータモデルに対する一連のパラメータ調整手順を Scilab のスクリプトファイルとして作成し、実行した様子である。ダイアログによって入出力、制御パラメータの設定が行える。

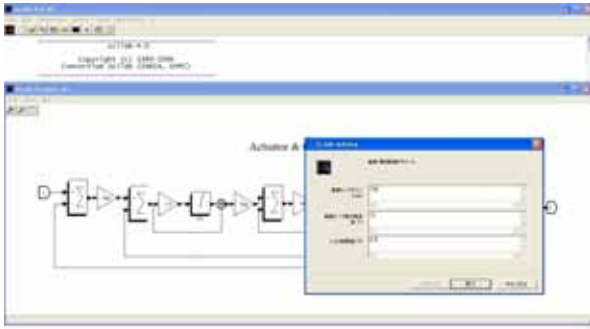


図6 ダイアログによるパラメータ調整

3.2 アクチュエータモデルの考察

図7は、実機とモデルとのステップ応答の比較結果である。入力には1000パルスのステップ入力である。実際には同図に示したように実機に与えるパルス入力は理想的なステップ入力にはならない。シミュレーションにおいても、実機と同様のパルス入力をモデルに与え、実機応答とモデル応答がほぼ一致する結果を得ている。

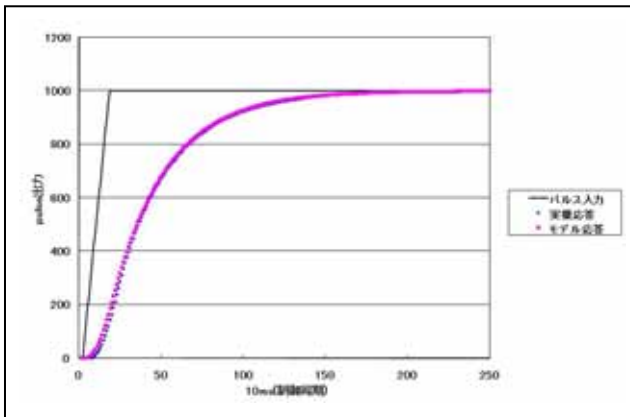


図7 ステップ応答比較

3.3 シリアルロボットの要素モデルの作成

シリアルロボットの機構を3つの要素（ベース、ジョイント&リンク、マニピュレータ）に分割してそのモデル化を行った。作成したモデル（以下、要素モデルと呼ぶ）を組み合わせるとシリアルロボットのモデルが構築できる。シリアルロボットの物理モデルを図8、作成したモデルとその入出力、設定すべきパラメータを表2に示す。ベースモデルに各関節の関節角、速度、加速度（以下、運動と呼ぶ）とマニピュレータにかかる外力を入力するとマニピュレータモデルから各関節に必要なトルクとマニピュレータの運動が出力される。モデル内部では各関節間の座標変換行列を計算して、ニュートンオイラー法による逆動力学計算を行っている。

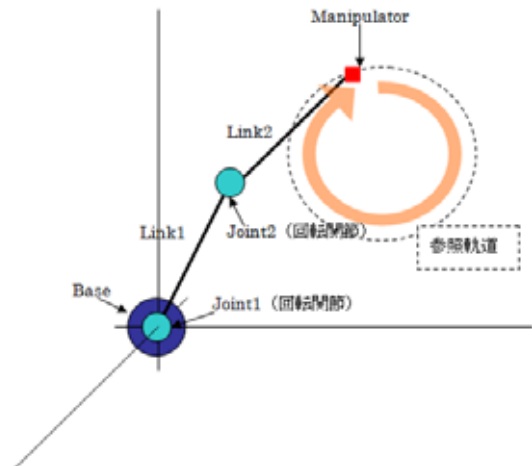


図8 シリアルロボットの物理モデル

表2 要素モデルと設定パラメータ

Robot Base モデル	
入力：運動（関節角、速度、加速度）・外力	
出力：インデックス(0)	
	Parameter
	Base 位置（絶対座標） Base 姿勢（絶対座標）
Joint&Link モデル	
入力：インデックス(K)	
出力：インデックス(K+1)	
	Parameter
	Joint 左座標（絶対座標） Joint 右座標（絶対座標） Joint 姿勢（絶対座標） 質量 慣性モーメント リンクの重心位置
Manipulator モデル	
入力：インデックス(N = 自由度)	
出力：関節トルク・マニピュレータの運動	
	Parameter
	Work の外力作用位置

このモデルを使用して作成した2自由度のシリアルロボットモデルを図9に示す。

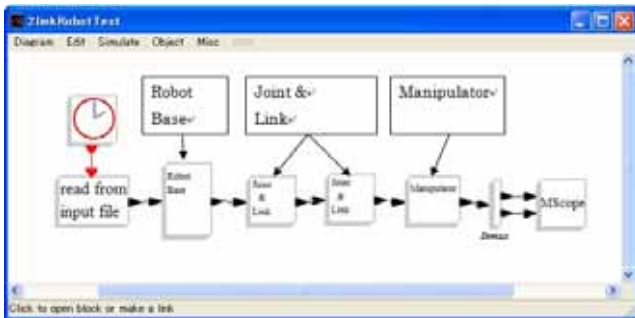


図9 2自由度ロボットのシミュレーションモデル

3.4 シリアルロボットの要素モデルの考察

図8の矢印で示す時計回りの円運動（マニピュレータ先端部が半径0.5mの円を2.5秒で移動する）をモデルに与え、パラメータ値として表3に示す値を設定し、逆動力学解析を行う場合、ラグランジュ法では次のような式を導ける。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 r_2 l_1 \cos \theta_2 + I_{zz1} + I_{zz2} & m_2 r_2^2 + m_2 r_2 l_1 \cos \theta_2 + I_{zz2} \\ m_2 r_2^2 + m_2 r_2 l_1 \cos \theta_2 + I_{zz2} & m_2 r_2^2 + I_{zz2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2 r_2 l_1 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \\ m_2 r_2 l_1 (-\sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1) + m_2 r_2 l_1 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

τ_1, τ_2 : 関節トルク

これをC言語によってプログラム化した。シミュレーションモデルのトルク出力の妥当性を検証するために、図9のシミュレーションモデルの出力（トルク）とC言語プログラムの出力の比較を行った結果が図10である。

表3 モデルのパラメータ

パラメータ	設定値
Link1の長さ l1	1 (m)
Link1の重心位置 r1	0.5 (m)
Link1の質量 m1	5.0 (kg)
Link1のZ軸周りの主慣性モーメント lzz1	0.3(kg・m^2)
Link2の長さ l2	1 (m)
Link2の重心位置 r2	0.5 (m)
Link2の質量 m2	5.0 (kg)
Link2のZ軸周りの主慣性モーメント lzz2	0.3 (kg・m^2)

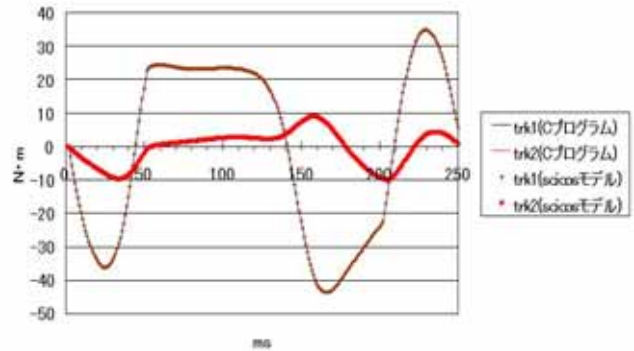


図10 2自由度ロボットのシミュレーションモデル

ここでtrk1は図8のjoint1で発生すべきトルク、trk2は同図のjoint2で発生すべきトルクである。

両者のトルク出力はほとんど差がなく良好な一致を示した。構築したシミュレーションモデルは妥当であると考えられる。

4. 結び

本研究の結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1)アクチュエータのGUIモデルを作成し、機能を検証した。本モデルと実機の動作は良く一致しシステム開発に有効であることを確認した。また、シミュレーションを効率的に行うためのスクリプトファイルを開発した。
- (2)逆動力学解析が可能なシリアルロボットの要素モデルを作成した。

このコンポーネントモデルは理論上、最大6自由度までのシリアルロボットの逆動力学解析が可能であるように作成したが³⁾、現時点では2自由度以上のモデルについては未評価である。今後、6軸での評価に加え拘束条件を設定できるようにしたり、トルク入力による運動解析が可能となるなどの機能拡張を目指す。また、インターフェース部の評価も含めて汎用的なモデルに発展させていきたい。

作成したモデルは今後のロボット研究開発において利用し、ToolBox（拡張機能）としてまとめていく予定である。

文献

- 1) STEPHEN L.CAMPBELL ほか：Modeling and Simulation in scilab/scicos, P12 (2003), Springer
- 2) 杉本英彦, 小山正人, 玉井伸三：AC サーボシステムの理論と設計の実際, P71 (2004), 総合電子出版社
- 3) 高野政晴：ロボットの運動学, P87 (2004), オーム社