

C-023

マルチボディモデルによる多関節ロボットアームのシミュレーション設計法 A Method of Simulation Design for The Articulated Robot Arm by Multibody-Model

佐藤 宏明[†]
H. Sato

高津戸 稔[‡]
M. Takatsuto

池田 千恵[‡]
C. Ikeda

柏葉 安兵衛[†]
Y. Kasiwaba

田山 典男[†]
N. Tayama

1. はじめに

今日、自動車や多数のアクチュエータを搭載したロボットなど、多くの制御システムにおいて電子制御は必要不可欠なものとなっている。そして、その要求される機能や性能は、ますます増加し複雑なものとなっている。これら電子制御は、システムが複雑、多様化していく中で、一つのシステム中に複数存在する場合が多く、相互に連携して動作している。そのため、それぞれの機能要素ごとの分離開発が複雑なものとなっている。また、開発の工程においては動作確認及び性能試験が行われ、問題があれば解決されるまでそれぞれの機能要素ごとに開発がフィードバックされる。そのため、時間や費用など膨大な開発コストが消費されており問題となっている。また、システムの複雑化が進めば進むほど、開発者の理解を超える挙動が出現し、解析を困難にしている。

例えば、自動車の開発においては、エンジンの出力制御や排気ガスの浄化、車体の姿勢制御など個々に電子制御が含まれている。これらは相互に信号の受け渡しを行い、通信をしながら協調して動作するように開発、調整が進められるため、完成までかなりの時間が費やされる。多軸のアクチュエータの開発においては、駆動モータの回転制御やボディの位置制御などに電子制御が用いられる。各々のボディ間の相互作用を的確に表現する微分方程式の解は複雑であり、それを制御プログラムとしてコーディングし利用する事は大変に難しい。

従来、シミュレーション環境による装置開発は、宇宙空間等のように装置の開発段階で実機を使用環境へ持ち込む事が困難である場合などで用いられてきた。筆者らは、試作機の作成・テストを行なう代わりに、リアルタイムシミュレーションを用いてシステム内での相互の関係を考慮した上で、機能要素の分離開発が可能となる電子制御システムの開発を提案してきた [1]。本稿では、多関節ロボットアームをシミュレーション対象(ターゲット)として、シミュレーションモデルを作成し、提案するリアルタイムシミュレーション実験装置上でこのロボットアームのシミュレーションを実行し、モデルの運動と制御対象の運動とを比較する。さらに、提案するリアルタイムシミュレーション実験装置の利用法について述べる。

2. リアルタイムシミュレーション装置

図1に本研究におけるリアルタイムシミュレーション装置の構成を示す。ターゲットは通常は(1)のパスで制御部(Controller)と接続され動作している。本研究では、Simulation Unit内にてターゲットのシミュレーションモデル(Simulation Object)を作成しする。

II.(2)のパスによってターゲットへの入出力信号をI/Oインターフェイスを通じてシミュレーションモデルと接続し、ターゲットの制御部からの信号によってSimulation Unit内のモデルを動作させる。この動作がターゲットと一致するようにモデルの設計パラメータを調整する。

III. ターゲットシステム内では動作不可能である動作をシミュレーションにさせることで、制御部への新しい機能の追加を検討することができる。

IV.(2)のパスに追加して、(3)のパスでSimulation Unitとターゲットを接続し、Simulation Unitを介して、制御部によってターゲットを制御する。ここでターゲットは、機能追加された信号によって制御され、IIIでシミュレーションが行った新しい機能を含めた動作を行う。

本稿では、多関節ロボットアームをターゲットとして、シミュレーションモデルをリアルタイムシミュレーション装置に実装し (I)、そのシミュレーションの動作とターゲットの動作がより一致するモデルの設計とパラメータの調整 (II) について述べる。

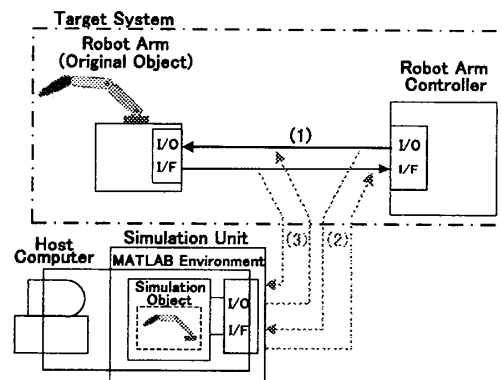


図1: リアルタイムシミュレーション装置

3. シミュレーションモデルの作成

3.1 ターゲットシステム

図2にターゲットシステムである多関節ロボットアーム(三菱電機製のMOVEMASTER EX RV-M1)を示す。5自由度垂直多関節型ロボットアーム、関節数5(J1~J5)、2つの胴体と4本の腕(剛体リンク)を有する。駆動方式は、DCサーボモータによる電気サーボ駆動を採用している [4]。

3.2 ロボットアームの構造の理解

図3はロボットアーム(RV-M1)の側面を表現した図である。RV-M1は図のようにJ1~J5の5つの関節を持ち、胴体部分および腕の部分が順番に関節によって連結される構造となっている。

これを図4のように簡略化して表現することにする。図中において、“—”は剛体リンク、“⊕”は剛体リンクそ

[†]岩手大学工学部

[‡]岩手大学大学院工学研究科

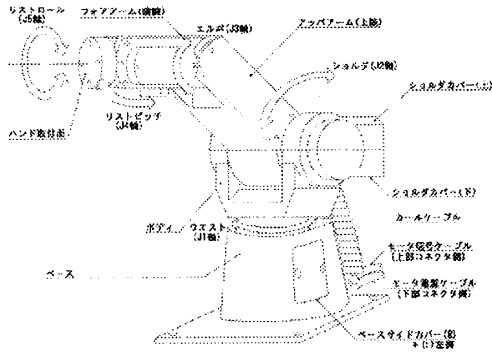


図2: 三菱電機製 MOVEMASTER EX RV-M1

それぞれの重心, "●"は剛体リンクを接続する関節 (ジョイント) をそれぞれ示している。

さらに図4から, このロボットアームは“剛体リンク (link)—関節 (Joint)”を一組の構成要素 (ボディ) として, その連結で表現できることが分かる。これを図に表すと図5のようになる。

図5において, base内“Ground”はロボットアームを置いている台を表している。link1~link5それぞれの“ArmBody1”~“ArmBody5”は剛体リンクを表現し, ロボットアームのそれぞれの腕に対応する質量, 長さ, 重心位置などの物理的なパラメータを持っている。値から設定した。“J1”~“J5”は関節を表現するブロックである, このブロックの中に剛体リンクを回転させるためのモーターやギヤなどの能動的な要素が含まれる。本稿のシミュレーションは, この関節ブロックに信号データが入力されることによって実行される。

3.3 関節ブロック J2

図6に図5の関節ブロック J2を表す。動作信号は“input”ブロックから入力される。“Servo Sys”ブロックはモータサーボ系の計算を行って, 関節の回転軸を動作させるための角変位, 角速度及び角加速度に変換し出力する。“revolute”ブロックは, 図5の“ArmBody1”と“ArmBody 2”と接続しており, “Servo Sys”ブロックで計算された角変位, 角速度及び角加速度によって“ArmBody1”と“ArmBody 2”の間の角度を回転させる。結果は, スコープブロック“Arm180J2”で表示され, ファイルに保存される。

図5の J2 以外の関節ブロックも同様のブロックが実装されて組み込まれている。

3.4 サーボブロック

図7に図6の“Servo sys”のサブブロックであるサーボブロックを示す。

このサーボブロックは RV-M1 の設計資料 [3] から定数を抽出し実装を行った。入力“In1”には RV-M1 の制御部から電圧信号が入力される。モータは1次遅れ要素 (時定数 $T_m[s]$), ローター慣性モーメント $J_m[kg \cdot m^2]$, フィードバック定数 K_e, D_m で表現され, 角変位 $\theta_m[rad]$ を出力する。

角変位 θ_m は減速ギヤに入力され, トルクへの変換 (定数 $K_g[Nm/rad]$) と増幅 (ギヤ比 N) が行われる。

減速ギヤの出力トルクが関節の回転軸を回転させて角変位, 角速度及び角加速度信号が計算される。

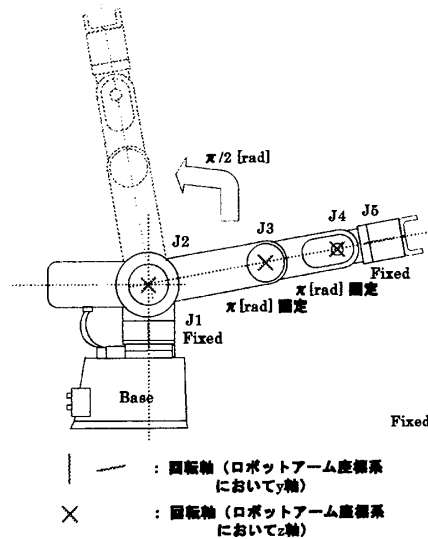


図3: RV-M1 の連結構造

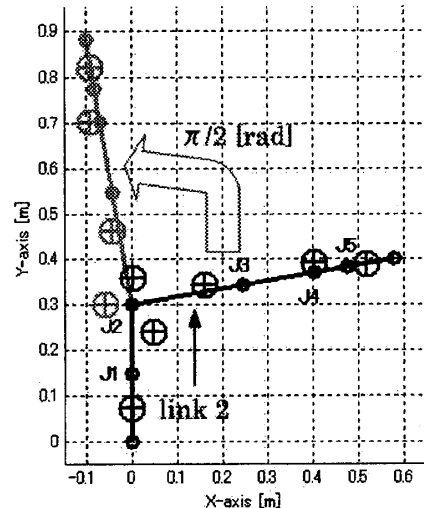


図4: 図3の簡略された表現

3.5 シミュレーションモデルの実装

以上のようなロボットアームのシミュレーションをプログラムする場合, いくつかの困難な問題が存在する。

まず, 図7の様な微積分要素を複数持つ系の伝達関数の導出やプログラム言語による実装は容易ではない。

さらに最も困難な点は, “多関節リンク機構の運動の解析”にある。リンクごとに異なる座標系の扱い, リンク間での運動量の授受, エネルギーの保存などを考えなければならない。さらに地上にあっては重力加速度やコリオリの力なども考慮しなくては行けない。これまでに行われてきたロボットの機構研究の成果 [5] から, いくつかの典型的な場合の解は得られているが, 一般化した場合のプログラミングには困難が伴うことが予想され, ターゲットに応じたプログラムの修正や拡張性にも乏しい。

本研究の目的はロボットのシミュレーションプログラムを作成することではなく, シミュレーションプログラムを利用した, ターゲットと制御装置とのリマッチング

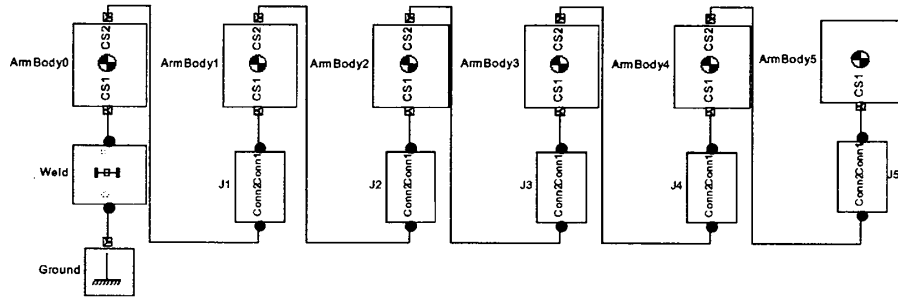


図 5: ロボットアームのマルチボディ表現

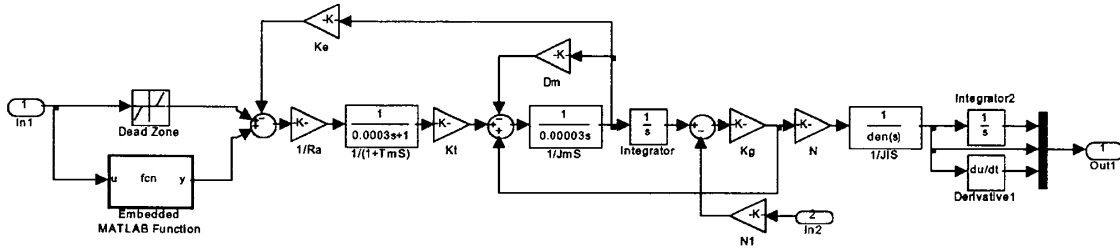


図 7: 関節のサーボブロック (Servo Sys)

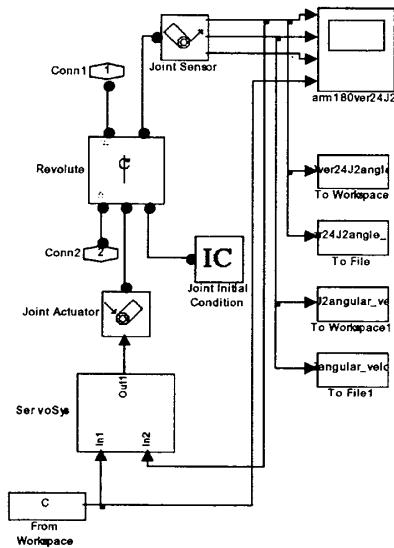


図 6: 関節ブロック J2

やりコンフィグレーションを行うことにある。したがってシミュレーションプログラムは少いプログラミング手順で必要な精度を得られることが望ましい。

そこで制御系のブロック記述に定評のある“MATLAB/Simulink 環境”で図7のサーボ系や関節の駆動部分の電気的表現を記述し、MATLAB/Simulinkの拡張 Toolbox である“SimMechanics”で関節や剛体リンク等の機械部分の記述を行った。ロボットアームの質量、リンク長、重心の位置等のパラメータは SimMechanics のブロックパラメータとして入力される。また、SimMechanics で重力ベクトルが保持され、リンク間の運動量やエネルギーの授受が逐次計算される [2]。

4. シミュレーションモデルとロボットアーム RV-M1 との比較

シミュレーションモデルとロボットアーム RV-M1 の比較として、図4に示す様に J1, J3, J4, J5 を固定し、J2 を $0 \sim \pi/2$ [rad] で稼働させた場合の動作を調べた。

RV-M1 の動作は、制御装置に入力されるフィードバックとして回転軸上に備え付けられているパルスエンコーダの信号から回転角速度を検出し、さらに積分を行って角変位を求めることで計測している。同時に、制御装置が J2 のモーターを駆動している電圧信号を計測してデータファイルとして保存し、これをシミュレーションの入力データとする。計測された RV-M1 の J2 駆動電圧信号を図8、J2 軸角速度を図9、角変位を図10に示す。

図8の J2 駆動電圧信号については、RV-M1 の制御装置が角速度が目標の値になるように PID 制御を行っている [3] ため、図9の角速度の波形と同じ様なパターンとなっている。区間 1~2[s] における等速運動の区間では電圧が細かく変動して、制御装置が等速制御を行っていることが分かる。また、区間 3~4.5[s] においてはアームの下降中に機械的な制動ブレーキが発生して制御装置の制御が乱れている。さらに区間 0~0.5[s]、区間 4~5[s] では水平で静止された状態にあるが、数 V の電圧が残っている。これはアームが重力に負けて床に落下を防ぐために制御装置に与えられた初期状態と考えられる。

以上のような制御装置の初期状態の存在は、シミュレーションモデルの作成とパラメータの調整を行う場合に注意が必要になる。水平静止区間でありながら駆動電圧が入力されてくれば、特に考慮していない場合、モデルは回転軸を加速させ運動を始めてしまう。

上記の水平静止状態における RV-M1 の特性を考慮した、シミュレーションモデルを作成した。先に示した図

7のサーボブロックにはすでに組み込まれている。入力“In1”の右“Dead Zone”, “fcn”がモータへの入力前に追加されている。このシミュレーションモデルを実行した波形を図9, 図10に示す。入力電圧信号は予めファイル化しておいたデータ(図7)をMATLAB環境にロードして用いた。

シミュレーションモデルとRV-M1の比較を比較すると、区間0~0.5[s], 4~5[s]の水平静止区間と、区間0.5~1.0[s], 2.5~3[s]の加速区間は大変良く一致している。区間1~2[s], 3~4[s]の等速制御の区間でシミュレーションは速度一定の状態を再現できていない。区間2.0~2.5[s], 4.0~4.5[s]の減速区間では図9の速度波形の傾きは良く一致していることから、その前の等速区間での速度のズレを改善すればより良い結果になると思われる。

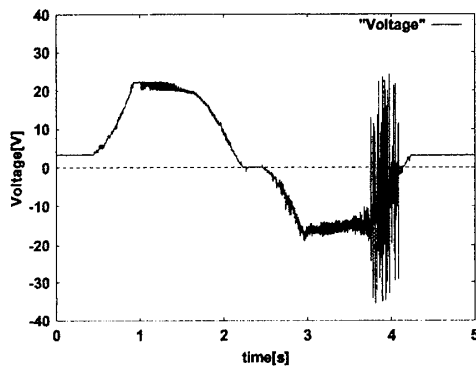


図8: J2 駆動電圧信号 (入力信号)

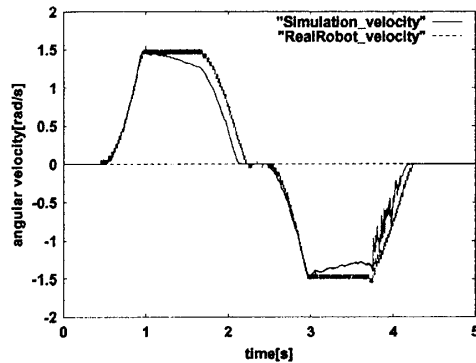


図9: 角速度 (RV-M1, シミュレーション)

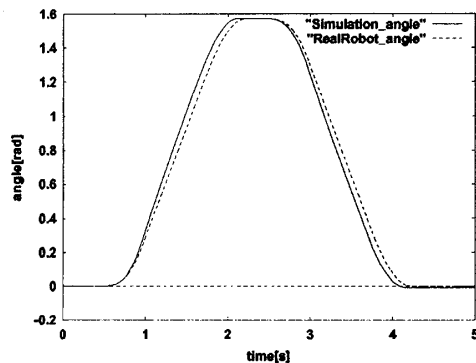


図10: 角変位 (RV-M1, シミュレーション)

5. リアルタイムシミュレーション装置の利用

近年、二足歩行の下肢や手機能の四肢を組み込んだ人型ロボットの開発が各所で活発であるが、その動作はぎこちなく、限定された条件下での動作になっている。これは、制御プログラムにおけるロボットの構成要素の物理的な理解が十分でないこと、構成要素間の連携が極めて複雑であることが原因に上げられる。

この問題を解決するためには、動作環境・条件を変えたテスト・改良が必要となるが、自ずとテスト回数や設定条件に限界がある。このような場合、本稿のリアルタイムシミュレーションによる“テスト→改良”の手法が有効となる。

6. おわりに

本稿において、筆者らが提案するリアルタイムシミュレーション装置の概要を述べ、この装置上で動作させる5自由度多関節型ロボットアームのシミュレーションの設計と作成について述べた。作成されたロボットアームのシミュレーションを動作させて実際のロボットアームの動作と比較を行った。シミュレーションの動作をより実物に近づけるために、初期設定電圧に対する応答のロジックを組み込むなどの変更が必要となった。リアルタイムシミュレーション装置の利用法について、人型ロボットの開発への導入の提案を行った。

今後は、今回の実験結果に見られた誤差についての検討を行う。

謝辞

本研究は、(財)実吉奨学金から平成15~16年度に研究助成を頂きました。関係者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 池田ほか, “多関節ロボットアームのリアルタイムシミュレーションによる運動の再現”, FIT2004 C-015(2004).
- [2] Giles D. Wood ほか, “Simulating Mechanical Systems in Simulink with SimMechanics”, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/>
- [3] 増田ほか, “ムーブマスター EX (RV-M1) の開発シミュレーション”, 日本ロボット学会学術講演会 3109(1987).
- [4] 三菱電機, “三菱電機マイクロロボット MOVEMASTER EX RV-M1 取扱説明書”, 三菱電機, 1991.
- [5] 有本卓, “システム制御情報ライブラリー ロボットの力学と制御”, 朝倉書店, 2002.

登録商標

MATLAB, Simulink, SimMechanics は米国 The Math Works. Inc. の登録商標