

高速パラレルリンクロボットを応用した ハイブリッドモーションシミュレーション

Hybrid Motion Simulation Using High-Speed Parallel Link Robot

多羅尾進* , 猪平栄一** , 内山勝**

Susumu Tarao* , Eiichi Inohira** , Masaru Uchiyama**

*一関工業高等専門学校 , **東北大学

*Ichinoseki National College of Technology, **Tohoku University

キーワード : ハイブリッドモーションシミュレーション (hybrid motion simulation) , インタラクション (interaction) , パラレルリンクロボット (parallel link robot) , インピーダンス (impedance) ,

連絡先 : 〒021-8511 岩手県一関市萩荘字高梨 一関工業高等専門学校 制御情報工学科
多羅尾進 , Tel.: (0191)24-4754 , Fax.: (0191)24-2146 , E-mail: tarao@ichinoseki.ac.jp

1. はじめに

近年、模擬的に様々な運動を発生させる技術のニーズが高まっている。これらを実現する手法を一般にモーションシミュレーションと呼ぶ。例えば、飛行機・ヘリコプタ等の実際のフライトに近い状態を体感できるフライトシミュレータが訓練等に使われるようになり、また、テーマパーク等では、その名もモーションシミュレーションと呼ばれるアミューズメント用装置が人気を集めている。

これらは、一般に目的とするある空間内における様々な運動をそれとは異なったある限定された空間内において模擬的に発生させるものである。一方、この概念を拡張して、日常では実現困難な運動をある制限の中において模擬的に発生させることも考えられる。この観点により宇宙開発では、早くからモーションシミュレーションが必要とさ

れ、実際に様々な手法で行われてきた。それらは、大きく分けて、計算機上に用意した動力学モデル(ソフトウェアモデル)を用いる手法、ある制限下で目的とする環境を物理的に準備してその中で実モデル(ハードウェアモデル)を用いる手法、ソフトウェアモデルとハードウェアモデルを組み合わせたモデル(ハイブリッドモデル)を用いる手法の三つに分類できる。

本稿では、微小重力環境など特殊な環境下での複雑な物体相互の干渉を伴う運動等を模擬する一手法として、新たなモーションシミュレーションを提案する。本手法は、ハイブリッドモデルを取り扱うハイブリッドモーションシミュレーション¹⁾を基にしており、実時間シミュレーション、実機のシミュレーションへの組込み等の機能を持つ。加えて、本シミュレータは、モデリングの柔軟性、

効果的なヒューマンインターフェース，さらにシステムの拡張性等を備えている．本手法の可能性を探るため，単純な構成のプロトタイプによって得られた実験結果に関する報告も報告する．

2. ハイブリッドモーションシミュレーション

ハイブリッドモーションシミュレーションは，運動模擬の対象となるシステム全体を実モデルと数値モデルとの組み合わせによりモデリングし，これらを相互にリンクしてリアルタイムに次ステップの運動を予測・呈示することによりシミュレーションを進めていく運動模擬手法である．この手法は，微小重力場における宇宙ロボットのターゲット捕獲作業等，物体間の複雑な干渉を伴う運動を模擬対象とする際に，ソフトウェアモデルの計算負荷の肥大化を抑制し，かつハードウェアモデルの時間的または空間的な制限を回避する一手法として期待できる．その概要を Fig. 1 に示す．

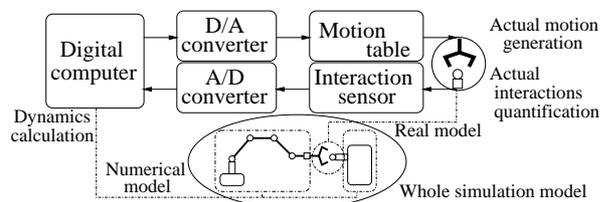


Fig. 1 Outline of hybrid motion simulation.

数値モデルの動力学計算により予測された次ステップの運動から実モデルの位置・姿勢を決定し，これを目標値としてモーションテーブルを制御することにより，リアルタイムに実モデルの運動を実空間に呈示する．これと同時に外部との干渉等によって実モデルに加わる力・トルク等，数値モデルの動力学計算に必要となる情報を検出し，これを数値モデルに入力することにより実モデルと数値モデルがリンクされる (Fig. 2 参照) ．

これまでに，ハイブリッドモーションシミュレー

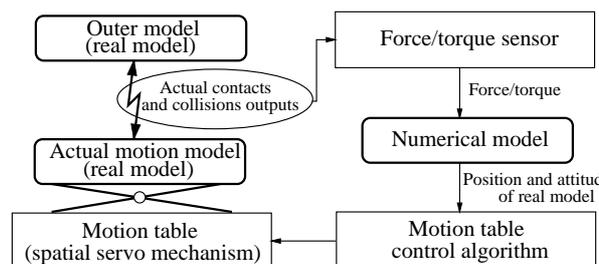


Fig. 2 Hybrid motion simulation flow diagram.

ションによる運動の模擬がいくつか行われてきた．例えば，井上らは，宇宙機のランデブ・ドッキングの運動模擬を行った²⁾．下地らは，浮遊するターゲットの宇宙ロボットによる捕獲作業の運動模擬を行った³⁾．Yoshida らは，微小重力環境におけるフレキシブルなベース上に搭載されたロボットの衝撃運動模擬を行った⁴⁾．

従来のハイブリッドモーションシミュレーションにおけるそれぞれの数値モデルと実モデルの構成比を考えると，概して，数値モデルの占める割合が小さいことが分かる．これは，デジタル計算部分の負荷を減らすためにアナログ的に演算を取り扱う部分を組み込むハイブリッドシミュレーションの本来の目的に基づいており，かつ実機の総合テスト等でその全体を実モデルとしてシミュレーションに組み込むことが望まれる場合には妥当な構成と言える．しかしながら，モデリングの際にデジタル計算機を用いてプログラム化できる部分が最小化されているため，モデリングの柔軟性，すなわち汎用性に欠ける．

これに対して，我々は，模擬対象の内，必要最小限の部分を実モデルとして，かつ残り全ての部分を数値モデルとして，これら両者を組み合わせてモデリングする新たなアプローチによるモーションシミュレーションを提案する．これには，高い帯域幅を備えたモーションテーブル，急速な処理能力の向上を遂げているデジタル計算機，およびそれに伴って充実してきたいくつかのソフトウェ

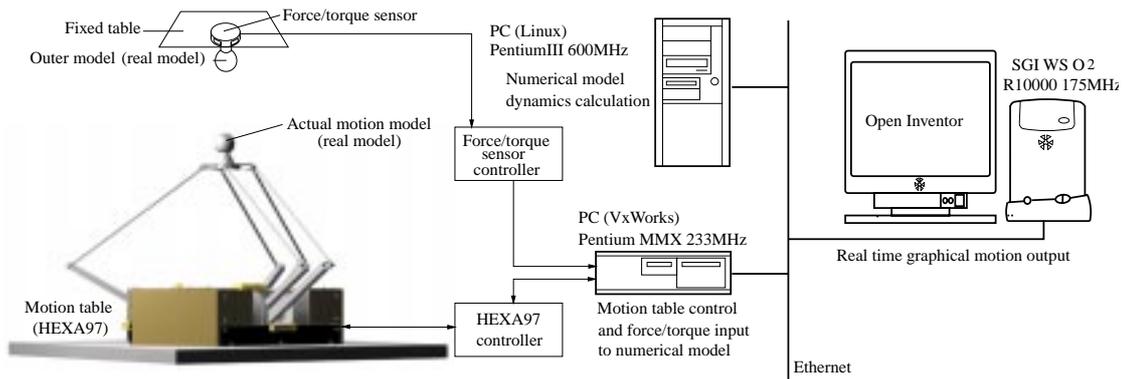


Fig. 3 Prototype hybrid motion simulation system

ア技術を応用して具現化する。

3. 実験システム



Fig. 4 Preliminary experimental system.

ここでは、二つの物体間の干渉を含む運動を模擬することを前提とし、前述したハイブリッドモーションシミュレーションを基にして、実時間シミュレーション、実機の組み込み等の機能を備えつつ、汎用性に富んだ適用範囲の広いモーションシミュレーションの実現を目指す。これに対応するため、モデリングに柔軟性を持たせることに加えて、効果的なヒューマンインターフェースおよびシステム自体の拡張性を確保することを念頭

にして、今回、モーションシミュレーションの実験システムを構築した。これに関し、以下で具体的に述べる。

3.1 シミュレータシステム

空間6自由度高速パラレルリンクロボット HEXA97⁵⁾をモーションテーブルとして応用したハイブリッドモーションシミュレーション実験システムの構成を Fig. 3 に示す。加えて、実験システムの外観を Fig. 4 に示す。

モーションシミュレーションの1ステップ毎に行う主な処理過程は、以下となる。

- 1) 模擬対象モデルに作用する外力/トルクを実モデル、モーションテーブルおよび力/トルクセンサを介して定量化する。
- 2) 数値モデルの駆動トルク、および上記で定量化された外力/トルクを入力として、これに対応した動力学計算を行う。
- 3) モーションテーブルとコンピュータグラフィックスを併用して上記の計算結果に対応した模擬対象モデルの運動を呈示する。

本実験システムは、3台のデジタル計算機(Linux PC, VxWorks PC および SGI O2 WS)、モーションテーブル(HEXA97)とそのコントローラ

および 6 軸力覚センサとそのコントローラ等を基本的な構成とする。Fig. 3 に示すように、3 台のデジタル計算機は、イーサネットで接続されている。

- Linux PC (OS を Linux とした PC/AT 互換機) は、数値モデルの運動制御を行い、その指令値と後述する VxWorks PC から受け取った外力/トルクの値に対応した動力学計算を行い次ステップの運動を予想する。さらに、その結果を VxWorks PC と後述する SGI O2 WS に送る。
- VxWorks PC (OS を VxWorks とした PC/AT 互換機) は、Linux PC から受け取った動力学計算に基づくモーションテーブルの位置・姿勢目標値に従ってモーションテーブルの運動を制御する。さらに、6 軸力覚センサから、コントローラを介してひずみデータを取得し、これを外力/トルクデータに変換した後、この外力/トルクデータを Linux PC へ送る。これらは、リアルタイムに制御される。
- SGI O2 WS (SGI 社製の O2 ワークステーション) は、動力学計算に基づいた模擬対象全体の運動をリアルタイムにコンピュータグラフィックスを用いて視覚的に表示する。この表示に必要なデータは Linux PC から受け取る。マンマシンインターフェースの観点から、数値モデルの運動が見えない従来のモーションテーブルのみによるシミュレーション結果の運動呈示では、不十分である。直感的な運動の理解を行うために本機能は必須であると考えられる。

ここでは、先に述べたように、モーションシミュレーションの対象として二物体間の干渉が含まれる運動を取り扱うため、二つの実モデルを用いる。それら二つの実モデルは、それぞれ対応する模擬対象の中から干渉時に外力/トルクがダイレクト

に作用する部分を適当に取り出したものである。二つの実モデルの内、一方は、モーションテーブルの出力リンクに、もう一方は、6 軸力覚センサを介してフィクストテーブル(地上に固定された架台)上に、それぞれ搭載される。例えば、宇宙ロボットの浮遊ターゲット捕獲作業の運動模擬を行う際は、捕獲に携わる宇宙ロボット先端のハンドおよび浮遊ターゲットの把持される部分のみを取り出して実モデルとする。このようにして構成した実モデルの一例を Fig. 5 に示す。

空間 6 自由度のモーションテーブルは二つの実モデル間の相対運動を呈示することができる。加えて、干渉時に発生する外力/トルクは、前述の 6 軸力覚センサ等によって定量化することができる。ここで、定量化された外力/トルクは、作用・反作用の法則より二つの実モデルそれぞれに作用する外力/トルクとして対応させることができる。実モデル以外は、全て数値モデルとして取り扱い、デジタル計算機の内部に構築される。このように実モデルと数値モデルを組み合わせたハイブリッドモデルを用いることで、模擬対象全体の運動をシミュレーションすることが可能となる。



Fig. 5 An example of two real model selection.

3.2 モーションテーブル

モーションテーブルには、空間 6 自由度高速パラレルリンクロボット HEXA97 を用いる。その外観を Fig. 6 に示す。HEXA97 は、その機構として、



Fig. 6 Appearance of HEXA97.

高速性に優れた HEXA 型パラレルリンク機構を適用している。これは 6 つの全く同等な要素連鎖で構成される。Fig. 7 に各部の名称を記す。各要素連鎖は、高出力・低摩擦ダイレクトドライブモータにフランジを介して第 1 リンク(アーム)を連結し、これに第 2 リンク(ロッド)をボールジョイントで連結したものであり、6 つ全てのモータはベースに固定され、6 つのロッドのターミナル側は、ボールジョイントで出力リンク(トラベリングプレート)に連結される。

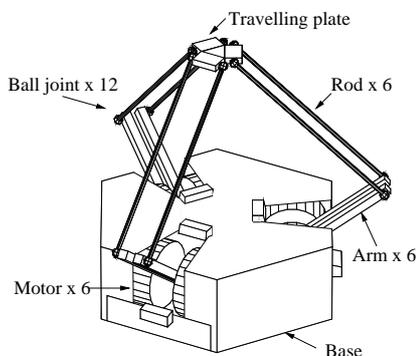


Fig. 7 HEXA mechanism.

この機構によってモーションテーブルは、全体の剛性を維持しながら可動部が軽量化され、極めて俊敏な空間 6 自由度の運動が実現できる。

Fig. 3 に示した HEXA97 コントローラは、先に述べた 6 つのモータに対応するモータドライバとパルスカウンタおよび D/A コンバータからなる。モータの回転角はモータ内蔵のレゾルバによって検出される。レゾルバから出力されたアナログ信号はモータドライバに取り込まれてデジタル信号に変換され、パルス列信号として出力され、パルスカウンタボードを介してメインコンピュータに取り込まれる。メインコンピュータは与えられた制御則にしたがって制御量を計算し、D/A コンバータを通してモータのトルク指令値をモータドライバに出力する。

3.3 多体系動力学

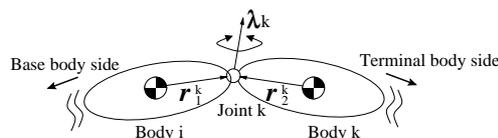


Fig. 8 Rigid body's connection parameters.

模擬対象システムの実モデルとしてモデリングされた以外の部分は、全て計算機上で動力学計算に用いられる数値モデルとしてモデリングを行う。このモデリング手法では、数値モデルの動力学計算負荷が増大するため、効率のよい動力学計算のアルゴリズムが必須となる。多体系を対象とした数値モデルの動力学計算には、今回、高速な動力学計算に適した $O(n)$ の Rosenthal の手法⁶⁾を用いる。

$$M\dot{u} + f = 0 \quad (1)$$

この手法は、部分速度・部分角速度を用いて、運動方程式 (1) の第 1 項(慣性項)、第 2 項(非線形項)を導く Kane の手法を基に、一般化速度 u

を状態変数に用いて、これを漸化的に計算することにより、計算の高速化を行っている。

この手法を用いて、いくつかのモーションシミュレーションが行われている。例えば、Banerjee は回転するベースから突き出されるフレキシブルなはりの運動のシミュレーションを行った⁷⁾。鈴木らは、人工衛星のパネル展開のシミュレーションを行った⁸⁾。

以下に、この手法における多体系力学の計算アルゴリズムを本シミュレーションに導入する際の要点を述べる。詳細は、文献^{6), 7), 8)}等を参照されたい。なお、ここでの模擬対象は、ボディ0(ベースボディ)からボディ n (ターミナルボディ)までが全て回転型の関節で連結されたベースフリーなシングルチェーンからなる多体系システムであると設定する。なお、多体系システムを構成する全てのボディは剛体とする。この多体系の内、任意の隣接するふたつの剛体に対して Fig. 8 に示すパラメータを用いて運動学的な関係を表す。模擬対象システムの状態変数として一般化速度 u を用いる。一般化速度 u として、ベースボディの重心における速度ベクトルの3成分 u_{01}, u_{02}, u_{03} とベースボディの角速度ベクトルの3成分 u_{04}, u_{05}, u_{06} および各関節の角速度 u_1, \dots, u_n を選ぶ。すなわち、

$$u = [u_{01} \ u_{02} \ u_{03} \ u_{04} \ u_{05} \ u_{06} \ u_1 \ \dots \ u_n]^T. \quad (2)$$

さらに、ボディ k ($k = 0, \dots, n$) に関してその重心の速度 v^k の時間微分、およびその角速度 ω^k の時間微分は、以下のように表せる。

$$\begin{bmatrix} \dot{v}^0 \\ \dot{\omega}^0 \end{bmatrix} = S_0 = [\dot{u}_{01} \ \dot{u}_{02} \ \dot{u}_{03} \ \dot{u}_{04} \ \dot{u}_{05} \ \dot{u}_{06}]^T, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}^k \\ \dot{\omega}^k \end{bmatrix} &= \sum_{j=0}^{k-1} \begin{bmatrix} v_j^k \\ \omega_j^k \end{bmatrix} \dot{u}_j + \begin{bmatrix} v_k^k \\ \omega_k^k \end{bmatrix} \dot{u}_k + \begin{bmatrix} a_t^k \\ \alpha_t^k \end{bmatrix}, \\ &= S_k + \begin{bmatrix} a_t^k \\ \alpha_t^k \end{bmatrix} \quad (1 \leq k \leq n), \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 a_t^k は、ボディ k 重心の加速度剰余項、 α_t^k は、ボディ k の角加速度剰余項、 v_j^k は、ボディ k

に対する u_j の部分速度、 ω_j^k は、ボディ k に対する u_j の部分角速度である。ボディ k に着目した運動方程式は、以下のように表せる。

$$M_k S_k + X_k = \begin{bmatrix} F_c^k \\ T_c^k \end{bmatrix}, \quad (5)$$

ここで、 F_c^k, T_c^k は、それぞれボディ k に隣り合うボディからボディ k に作用する未知の拘束力、トルクである。また、 M_k は、以下に示すものである。

$$M_k = \begin{bmatrix} m_k E & 0 \\ 0 & I_k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

ここで m_k, I_k は、それぞれボディ k の質量、慣性テンソルであり、 $E, 0$ は、それぞれ 3×3 の単位行列、零行列である。また、 X_k は、以下に示すものである。

$$X_k = \begin{bmatrix} m_k a_t^k - F^k \\ I_k \alpha_t^k + \omega^k \times (I_k \omega^k) - T^k \end{bmatrix}, \quad (7)$$

ここで F^k は、ボディ k の重心に働く外力、 T^k は、ボディ k に働く外トルクである。これら F^k, T^k は、ボディ k が実モデルを搭載したボディに相当するときのみ有効であり、3.1 で述べた6軸力覚センサによって測定され、定量化された外力/トルクデータに対応する。加えて、 ω^k, α_t^k および a_t^k は、Fig. 8 に示した運動学パラメータと各ステップにおける u の初期値を用いて漸化的に計算することができる。

ここまでの準備を基にして、さらに以下に示す前進処理1 → 後退処理 → 前進処理2のシーケンスを経て次ステップの \dot{u} が得られる。

- 1) 前進処理1: ボディ0からボディ n へ漸化的に M_k, X_k を求めていく。
- 2) 後退処理: ボディ n からボディ0へ漸化的に未知の拘束力 F_c^k と拘束トルク T_c^k を消去していく。
- 3) 前進処理2: ボディ0からボディ n へ漸化的に \dot{u} の各要素を求めていく。

なお、ボディ i によって関節 k を介してボディ k (i, k の表記は、Fig. 8 に従う) に加えられる関節トルク τ_k が、後退処理の際に必要となるが、これは、デジタル計算機内に設けた数値モデルの制御則に従って与えられる。

3.4 運動の呈示と外力/トルクの定量化

2 物体間の干渉問題を取り扱うため、運動方程式 (1) をそれぞれの物体 1, 2 について用意する。

$$M_{[1]}\dot{u}_{[1]} + f_{[1]} = 0, \quad (8)$$

$$M_{[2]}\dot{u}_{[2]} + f_{[2]} = 0 \quad (9)$$

3.3 に示した手法により $\dot{u}_{[1]}$, $\dot{u}_{[2]}$ を求め、設定した時間刻みで数値積分を実行して式 (8), (9) に従う次ステップにおける各物体ベースボディの重心位置・姿勢、関節角度を求める(これは、コンピュータグラフィックスのデータに使う)。さらに、これらを基にして、適当な座標変換等を行って実モデル間の相対位置・姿勢を求め、最終的にモーションテーブルの目標位置・姿勢 P_d を計算する。

本シミュレータの制御において、運動の呈示と外力/トルクの定量化に関連する箇所は、ブロック線図を用いて Fig. 9 のように表せる。Fig. 9 に

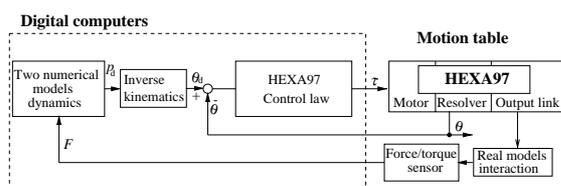


Fig. 9 Block diagram of the control law.

において、実モデル間の干渉が生じて出力リンクに外部との拘束が生じた場合に力/トルク F が生じる。これは、6 軸力覚センサによって計測され、3.1 に示した処理によって定量化され、3.3 に示した処理によって数値モデルに取り込まれる。

ここで生じる F は、式 (10) に示すようなモーションテーブルの持つバネ・マス・ダンパ特性、す

なわちインピーダンス特性に依存すると考えられる。これに関しては、4. 節において実験による検証を試みる。

$$F = M\ddot{P} + D(\dot{P} - \dot{P}_d) + K(P - P_d) \quad (10)$$

上式で M, D, K は、Fig. 9 に示す HEXA97 の制御則、およびモーションテーブルの機構によって決まる。なお P, \dot{P}, \ddot{P} はそれぞれ、Fig. 9 に示す目標値 P_d を入力した結果、出力リンクによって呈示される現在位置・姿勢、およびその一階、二階時間微分を表す。一方、ソフトウェアモデルのみで外部との干渉を含む運動を取り扱う際に、その外力/トルクを定量化する手法のひとつとして、干渉の生じる部分に仮想的にインピーダンス特性を設けることが行われるが、ここでの手法は、これをデジタル/アナログ的に行っていることに相当すると考えられる。

4. 運動模擬実験

3. 節で述べてきたモーションシミュレーション手法の可能性を探るため、ここでは、簡単な模擬対象を設定し、その運動模擬を実際に行う。

4.1 モデリング

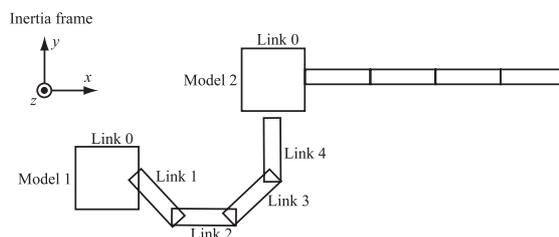


Fig. 10 Two numerical models.

模擬対象として、共通の構造からなるふたつの宇宙ロボット 1, 2 を設定する。これらは、剛体ベースと四つの剛体リンクによって構成されたフリーライニングロボットであるとする。ロボット 1, 2 それぞれにおいて各関節の回転軸は全て平行

とする。これらの内、数値モデルとして取り扱った部分およびその初期姿勢を Fig. 10 に表す。また、運動学パラメータおよび動力学パラメータに関して Table 1 に示す。動力学パラメータの内、各リンクの質量に関しては、ロボット 1 は、ベースが 50.0 [kg]、その他の四つのリンクは全て 10.0 [kg] とする。ロボット 2 は、ベースが 50.0 [kg]、その他の四つのリンクは全て 1.0 [kg] とする。

Table 1 Parameters of the numerical model.

Link No.	Length [m]		Moment of inertia [kgm ²]		
	$ r_1^k $	$ r_2^k $	$I_k[1, 1]$	$I_k[2, 2]$	$I_k[3, 3]$
0	–	0.5	20.0	20.0	20.0
1	0.5	0.5	0.3125	0.9896	0.9896
2	0.5	0.5	0.3125	0.9896	0.9896
3	0.5	0.5	0.3125	0.9896	0.9896
4	0.5	0.5	0.3125	0.9896	0.9896

一方、ロボット 1, 2 それぞれの一部を実モデル 1, 2 としてモデリングする。実モデル 1 (Table 2 参照) は、ロボット 1 のターミナルボディの先端の一部であると想定し、6 軸力覚センサを介してフィクストテーブルに搭載する。また、実モデル 2 (ジュラルミン板) は、ロボット 2 のベースボディの一部であると想定し、モーションテーブルの出力リンクに搭載する。

Table 2 Parameters of the real model 1.

Mass [kg]	Moment of inertia [$\times 10^{-4}$ kgm ²]		
	$I[1, 1]$	$I[2, 2]$	$I[3, 3]$
m			
0.288	2.425	2.425	0.9037

シミュレーションの初期条件として、慣性座標系においてロボット 1 は、適当な制御によって各関節を一定に保った状態で静止させる (Fig. 10 参照)。ロボット 2 は、各関節をフリーな状態にし

て一定の速度 0.01 [m/s] でロボット 1 に接近させる。以上のような条件の基で運動模擬を行った。

4.2 インピーダンス

3.4 で述べたように、本手法では、モーションテーブルの機構と制御に依存するインピーダンスを介して外力/トルクの定量化が行われていると考えられる。本実験におけるシミュレータの制御則を Fig. 11 に示す。今回は、比較的低速な運動を

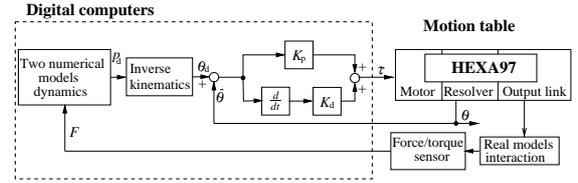


Fig. 11 Block diagram of the experimental control law.

取り扱っていることを考慮し、モーションテーブルの静力学的な関係がインピーダンスの決定に支配的だという考えの下に、以下のようなばね特性のみに単純化したインピーダンスを仮定する。

一般に、マニピュレータの出力リンクに作用する力/トルクを F 、その際の各アクチュエータの出力トルクを τ と表わすと、仮想仕事の原理より次式が成り立つ。

$$F\delta p = \tau\delta\theta \quad (11)$$

但し、 δp は、位置・姿勢の微小変位、 $\delta\theta$ は、アクチュエータの回転角の微小変位である。 δp , $\delta\theta$ はヤコビ行列を用いて

$$\delta p = J\delta\theta \quad (12)$$

と表わせる。式 (11), (12) を用いて F , τ の関係を整理すると次式を得る。

$$\tau = J^T F \quad (13)$$

制御則に関しては、 K_p が支配的として、単純に

$$\tau = K_p\delta\theta \quad (14)$$

として考える．以上より，式 (12), (13), (14) を用いることにより，次式を得る．

$$\mathbf{F} = (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{K}_p \mathbf{J}^{-1} \delta \mathbf{p} \quad (15)$$

4.3 実験結果

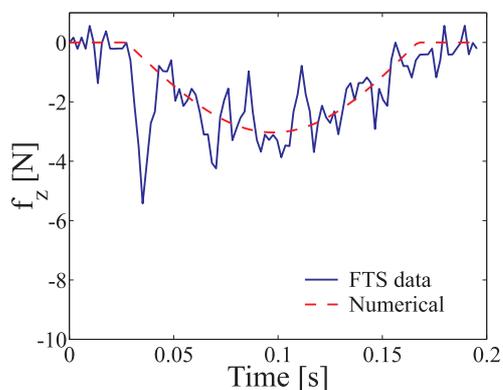


Fig. 12 $K_p = 200$ [Nm/rad].

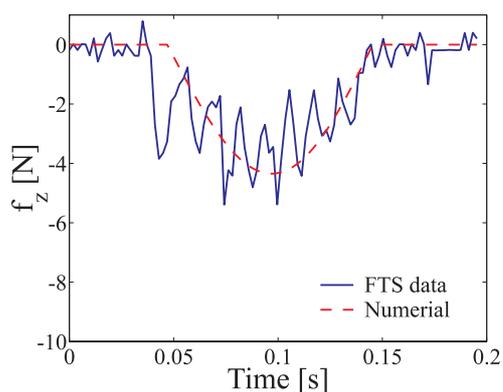


Fig. 13 $K_p = 400$ [Nm/rad].

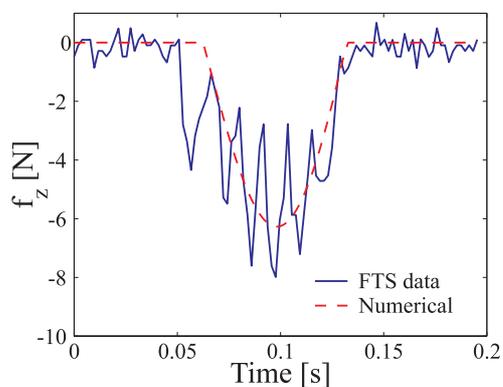


Fig. 14 $K_p = 800$ [Nm/rad].

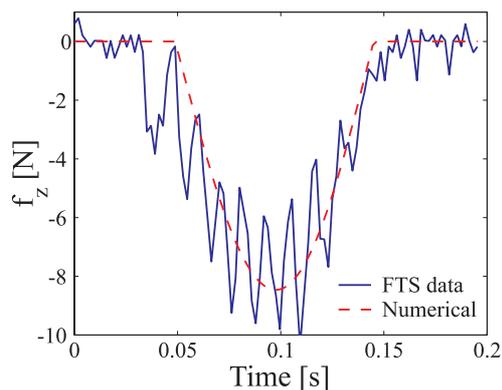


Fig. 15 $K_p = 800$ [Nm/rad] with different dynamics parameters.

4.1 に示したモデルと初期条件の下で実際に運動模擬実験を行った．Fig. 12, 13, 14 にそれぞれモーションテーブルの制御則における K_p を 200 [Nm/rad], 400 [Nm/rad], 800 [Nm/rad] とした際に定量化された外力/トルク F を示す．比較のため，干渉部に 4.2 で示したインピーダンスを持たせた数値モデルのみを用いて運動模擬を行った結果も併せて示した．またモデルの動力学パラメータを変更した際の影響を確認するため， K_p を 800 [Nm/rad] とした場合において各リンクの質量をロボット 1 は，ベースが 50.0 [kg]，その他の四つのリンクは全て 20.0 [kg] としてロボット 2 は，ベースが 100.0 [kg]，その他の四つのリンクは全て 1.0 [kg] とした (Table 1 に示したパラメータは共通のものを用いる) 運動模擬の結果を Fig. 15 に示す．さらに K_p を 200 [Nm/rad] とした場合の運動模擬の結果をコンピュータグラフィックスを利用して表したものを適当に抜粋して Fig. 16 に示す (ロボット間の干渉がはじめて起った時間を 0 [s] としている)．

これらのシミュレーションはモーションテーブルのサーボ周期，および動力学計算の時間ステップをそれぞれ 2 [ms] としてリアルタイムにて実行できた．Fig. 12, 13, 14 においてモーションテーブルのインピーダンス特性と干渉時に定量化された外力/トルクとの因果関係が明らかに見られる．

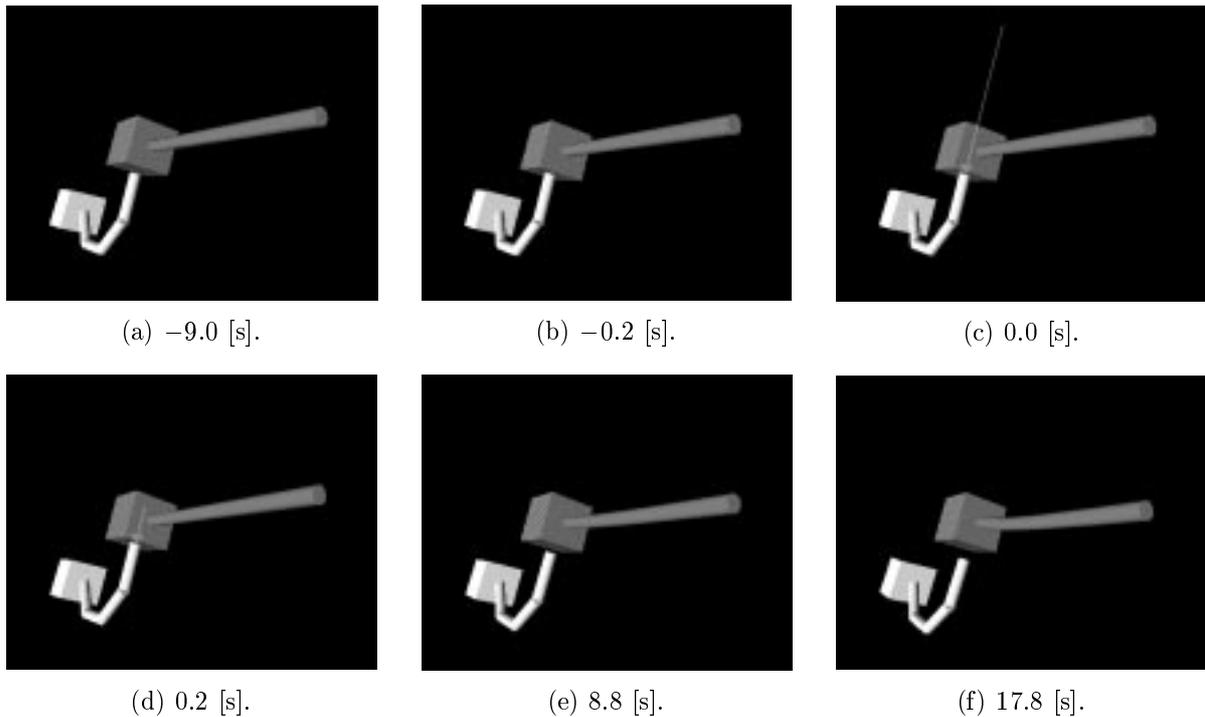


Fig. 16 Hybrid motion simulation outputs on computer graphics.

また, Fig. 14, 15 よりモデルの動力学パラメータの変更が干渉時に定量化された外力/トルクに反映されていることが確認できる.

5. おわりに

ハイブリッドモーションシミュレーションを基にした新たなモーションシミュレーション手法を提案した. ハイブリッドモーションシミュレーションの外力/トルクの定量化のメカニズムの仮定を行い, 実験によってその可能性を明らかにした. 今回構築した実験システムを用いてふたつのフリーフライング宇宙ロボット間の干渉を含む運動を時間ステップ 2 [ms] で実時間シミュレーションを行った.

今後は, モーションテーブルのインピーダンス特性と定量化される外力/トルクの間関係をさらに追求しかつこれを含めたモデル化の手法を確立していく. また, これを基にしてハイブリッドシミュレーション手法の威力が発揮される複雑なロボットのターゲット捕獲作業等を模擬対象としてシミュレーションを行う.

参考文献

- 1) 吉田和哉: 宇宙ロボットのための研究開発プラットフォーム, 日本ロボット学会誌, 14-1, 1000/1003 (1997)
- 2) 井上正夫, 中川潤, 有馬尚美: ドッキングダイナミクスシミュレータの開発, 計測自動制御学会論文集, 28-11, 1306/1313 (1992)
- 3) 下地治彦, 井上正夫, 稲葉典康, 若林靖史: パーシングダイナミクスシミュレータを用いた宇宙ロボットの挙動評価, 日本ロボット学会誌, 13-1, 127/133 (1995)
- 4) K. Yoshida, C. Mavroidis and S. Dubowsky: Experimental Results on Impact Dynamics of Spaceborne Manipulator Systems, Proc. of the 4th Int. Symp. on Experimental Robotics, Lecture Notes in Control and Information Science, 436/447 (1995)
- 5) 猪平栄一, 湯川修平, 秋間敏史, 内山勝: 超高速パラレルロボットの設計・開発・評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '98 講演論文集, 1AII-5 (1998)
- 6) D. E. Rosenthal: An Order n Formulation for Robotic Systems, J. Astronautical Sciences, 38-4, 511/529 (1997)
- 7) A. K. Banerjee: Order- n Formulation of Extrusion of a Beam with Large Bending and Rotation, J. Guidance, Control, and Dynamics, 15-1, 121/127 (1992)
- 8) 鈴木真二, 小島広久: 速度不連続を伴う三次元多体剛体の運動解析(第2報) Order- n の定式化の利用, 日本ロボット学会誌, 42-490, 686/691 (1994)