

双腕宇宙ロボット遠隔操作のための ハイブリッドシミュレーションシステムの設計

伊勢紘人 山崎峻一 西牧洋一 佐藤大祐 内山勝 (東北大学)

Design of a Hybrid Simulation System for a Dual-Arm Space Robot Teleoperation

*H. Ise, S. Yamazaki, Y. Nishimaki, D. Sato and M. Uchiyama (Tohoku University)

Abstract– We developed dual-arm experimental teleoperation system, and simulation system to simulate a micro gravity environment, and had a lot of experiments with that system. Our purpose of research is to establish a teleoperation technology in a micro gravity environment. To realize this, we combine teleoperation system and simulation system. In this paper, we describe the design of a hybrid simulation system for a dual-arm teleoperation system, and experiments of parallel robot, which is a motion table of a hybrid simulator.

Key Words: Hybrid simulation, Space robot, Teleoperation, Parallel robot, Frequency response bandwidth

1 はじめに

現在, 本格的な宇宙開発にともない, 軌道上において建設・組立・交換・保全などの作業を行う宇宙ロボットの活躍が期待されている. 実際, 国際宇宙ステーションの建設には多くの宇宙ロボットが使用されており, トラスの組立や実験モジュールの設置, ORU の交換などが行われている. また, 将来ロボットアームを用いて, ハッブル望遠鏡の修理作業を行うという計画もある.

このような作業の実現のために, 現在, 宇宙ロボット技術の研究が盛んに行われている. 本研究室でも, 地上からの遠隔操作技術の確立を目的とした遠隔操作実験システムを開発してきた. また, このような宇宙システムでは, 従来のロボットシステムよりも, 宇宙環境での安全性・信頼性が重要視される. そこで我々は, 微小重力環境を模擬するためのシミュレーションシステムを開発し, それを用いた様々な模擬実験を行ってきた.

上記の研究背景をもとにして, 本研究では, より実用的な, 微小重力環境における遠隔操作技術の確立を目的とする. そして, 本稿では, 微小重力環境を考慮した双腕遠隔操作実験システムを実現するために, 双腕宇宙ロボット遠隔操作のためのハイブリッドシミュレーションシステムの基本設計を行う. また, シミュレーションに大きな影響を与える, モーションテーブルについても検討する.

2 ハイブリッドシミュレーションシステム

2.1 ハイブリッドシミュレーション

ハイブリッドシミュレーションは, 地球上で微小重力環境を模擬する有用な方法のひとつである [1][2][3][4]. 実際に接触させる物体である実モデルと, コンピュータ上でシミュレーションを行う数値モデルの両者を用いてシミュレーションを行う方法であり, そのシステムは, 相対位置を実現するモーションテーブル, 力・トルクを取得する FT センサ, 計算を行うコンピュータによって構成されている. Fig. 1 に示したシミュレーションの手順は, 具体的には以下のようになっている.

1. 数値モデルの初期値から二物体の位置姿勢と相対位置を求める
2. モーションテーブルで相対位置を実現する

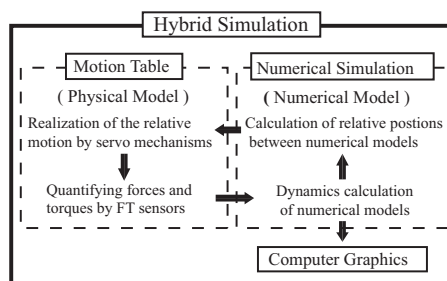


Fig. 1: Sequence of Hybrid Motion Simulation

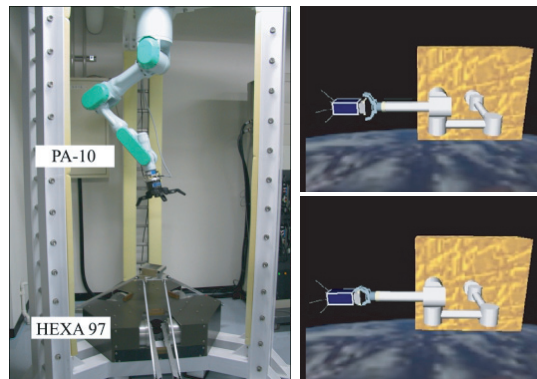


Fig. 2: Overview of Hybrid Motion Simulator

3. 実モデル同士が接触することによって作用する力・トルクデータをセンサで取得する
4. 力・トルクデータを用いて, 数値モデルの動力学計算を行い, 各モデルの位置姿勢, 相対位置を求める
5. 数値モデルの挙動を実時間で CG 描画し, 可視化する
6. シミュレーション終了時間でなければ, 2 に戻る

このように, 実際に実モデルを接触させることにより, 数値シミュレーションでは困難である多点接触や接触判定, 複雑な接触部のモデル構築を行うことなく, 微小重力環境下における接触および衝突模擬が可能となる.

2.2 現在のハイブリッドシミュレーションシステム

本研究室では Fig. 2 に示すようなハイブリッドシミュレータを開発し, 研究を行ってきた. このシステ

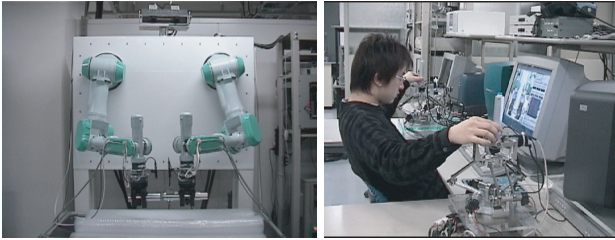


Fig. 3: Experimental Teleoperation System

ムでは、モーションテーブルを用いて物体の相対位置を実現するため、モーションテーブルには、周波数の低い動作から周波数の高い動作までを正確に模擬する広い周波数応答帯域が求められる。そこで、本研究室では Fig. 2 のようなパラレルマニピュレータとシリアルマニピュレータを併用したモーションテーブルを開発した。

パラレルマニピュレータである HEXA97 は、重いモータが全てベース部分に固定され、可動部が軽量であるため、応答性が良く手先精度が高いという特長をもつ。そのため、広い周波数応答帯域を持っており [2]、衝突の際に生じる高周波の振動を模擬しやすい。しかし、HEXA97 は可動範囲が小さい。そのため、応答性は劣るが可動範囲の広いシリアルマニピュレータ PA-10 と組み合わせて使用する。動作が小さく高周波の動きを HEXA97 が、動作が大きく低周波の動きを PA-10 が担当することにより、互いの長所を生かした、精度の良い多様なシミュレーションを実現できる。

これまで、このシステムを用いて以下のようなシミュレーションを行った [3][4]。

- 微小重力環境下で浮遊する 2 物体の衝突
- 小惑星探査衛星 MUSES-C のタッチダウン
- ドッキング機構を用いた衛星の捕獲
- チェイサ衛星に搭載されたハンドを用いたターゲット衛星の捕獲

3 双腕遠隔操作実験システム

遠隔操作技術の研究のため開発された双腕遠隔操作実験システムを Fig. 3 に示す。本システムはモデルベースなシステムであり、オペレータはコンピュータ内に構築された仮想環境を見ながら 2 本のアームを遠隔操作する。また、操作には 6 自由度小型ハプティックインタフェースを用いる。これまで以下のような基礎実験が行われてきた [5][6]。

- 通信時間遅れを考慮した、遠隔操作のためのオペレータ支援システムの開発
- 双腕協調作業による物体の捕獲
- 視覚を用いたトラスの組立

4 新システムの設計

4.1 新システム構築の目的

実際の宇宙開発において、新技術の運用を行う場合には、事前に地球上でその環境を模擬して動作試験を行い、作業実現性を検討しなければならない。本研究室において取り組んでいる双腕遠隔操作技術の確立においても、このような動作試験が必要である。

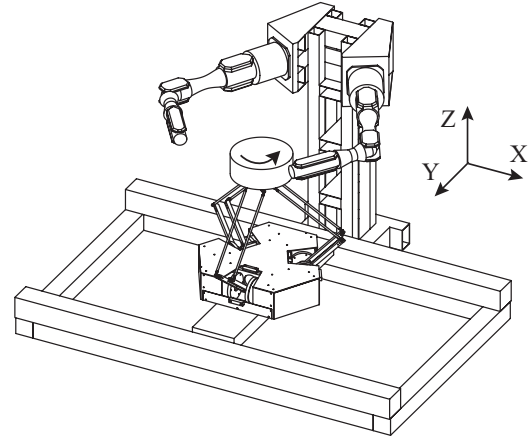


Fig. 4: Image of New Hybrid Simulation System

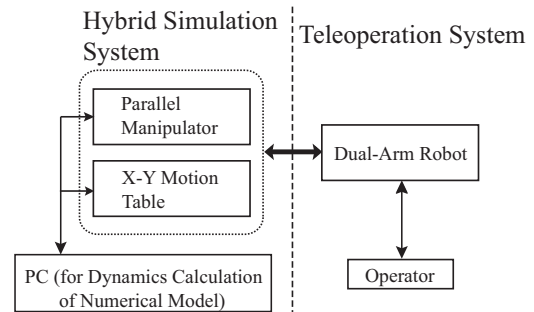


Fig. 5: Configuration of New System

したがって、本研究では、これまでに基礎実験を十分に積んできた、双腕遠隔操作実験システムと、ハイブリッドシミュレーションシステムを融合させ、宇宙空間での実用的な作業を想定した、新しい双腕宇宙ロボット遠隔操作シミュレーションシステムを構築する。新システムでは以下の実験を想定する。

- 双腕宇宙ロボットを用いたスピン衛星・大型の浮遊物体の把持
- 双腕宇宙ロボットを用いたトラスの組立
- ORU の交換など、慣性力が大きい物体の把持や移動

4.2 新システムの設計

先に述べた要求を考慮し、新システムの設計を行った。その構想図を Fig. 4 に、全体の構成を Fig. 5 に示す。Fig. 4 において、底部の長方形の部分は X-Y モーションテーブルであり、その上に HEXA 型パラレルマニピュレータが搭載されている。パラレルマニピュレータの手先には 1 軸の回転機構を取り付け、その先に力覚センサを介した実モデルを取りつける。オペレータは 2 本のアームを遠隔操作によって操作し、把持対象物を捕獲するなどの作業を行う。

新システムのモーションテーブルには、既存のハイブリッドシミュレーションシステムと同じように HEXA 型パラレルマニピュレータを用い、接触・衝突時に発生する振動を高精度で再現する。

さらに、可動範囲が小さいというパラレルマニピュレータの短所を補うために、パラレルマニピュレータの下に X-Y モーションテーブルを導入する。既存のシステムと同じように、振動のような周波数が高く小さ

Table 1: Degrees of Freedom of New System.

Parts		DOF
Hybrid Simulation System	Parallel manipulator	6
	X-Y motion table	2
	Revolving part	1
Teleoperation System	Arm	7×2
Total		23

い動作をパラレルロボットが担当し、周波数が低く大きい動作を X-Y モーションテーブルが担当することにより、互いの長所を生かし、精度の良い多様なシミュレーションを行うことができる。

また、今回はスピン衛星などを想定した回転物体の捕獲も行う。そのため、捕獲対象物を回転させる機構も導入する。具体的には、気象衛星の回転速度 100 [rpm] を目標とし、パラレルロボットのエンドエフェクタにモータを取り付け、Z 軸回りの回転を再現する。

以上よりこのシステムの自由度構成は Table. 1 のようになり、多自由度の複雑なシステムとなる。よって、互いの長所を生かせるような動作計画を行うことにより、精度の良いシミュレーションを行うことができる。

4.3 X-Y モーションテーブル

X-Y モーションテーブルは主に低周波数の大きな動作を担当する。そのため、遠隔操作システムのアームの届く範囲を全て移動でき、また、浮遊物体や衛星がアームに近づいたり、逆にアームから遠ざかる動きを再現するための動作速度が必要である。また、現在使用しているパラレルロボットは重量が 180 [kg] 程度あり、新システムではモーションテーブル上に回転機構や大きな把持対象物をのせるため、X-Y モーションテーブルの可搬重量として 200 [kg] が必要である。

これらの設計要求から、以下に示すような仕様の X-Y モーションテーブルを製作する。モーションテーブルの駆動にはボールねじと AC サーボモータを用いる。また、初期位置合わせ用に X 軸、Y 軸にそれぞれフォトセンサを取りつける。

可動範囲	: X 軸 1900 [mm] Y 軸 760 [mm]
最高速度	: 各軸 500 [mm/s]
可搬重量	: 最大 200 [kg]
ボールねじリード	: X 軸 36, Y 軸 25 [mm]
繰り返し位置決め精度	: 各軸 ± 0.05 [mm]
AC サーボモータ	: X 軸 3, Y 軸 0.85 [kW]

5 パラレルロボットの周波数応答実験

これまでのハイブリッドシミュレーションの研究では、モーションテーブルであるパラレルロボット HEXA97 には、軽量で小型な対象物を搭載し実験を行ってきた。しかし、新システムでは、重量があり、大型で慣性力の大きい対象物を用いた実験を想定している。このような対象物の変化は、高周波の動作を担当するパラレルロボットの動作制御に対して大きな影響を与えると考えられる。したがって、ここでは Fig. 6 に示すような、実際に想定される対象物を搭載した状態におけるパラレルロボットの周波数応答実験を行い、その結果から、対象物の変更によるモーションテーブルへの影

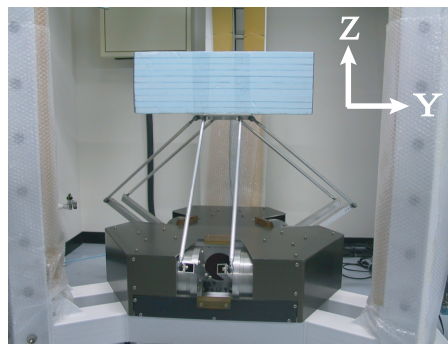


Fig. 6: Frequency Response Experiment with Large and Heavy Object

響を明らかにする。周波数応答実験の対象物としては、 $0.6 \times 0.2 \times 0.2$ [m]、質量 1.84 [kg] の直方体を用いる。この対象物をパラレルロボットの手先に取りつけた状態で、手先に Z 方向に振幅 10 [mm] の正弦波を与えた。その他の位置・姿勢に関しては 0 を与えた。また、実験データの計測は 10 [Hz] まで行った。これは、ハイブリッドシミュレータの精度が保てる範囲を、ゲイン ± 5 [dB] 以下、位相遅れ 30 [deg.] 以下と考え、その範囲を保てるのが 10 [Hz] と考えたためである。ただし、位置・姿勢が目標値と著しくずれた場合、制御不能と考えそこで実験を打ち切った。

5.1 トルク制御と速度制御における応答比較実験

現在、HEXA97 にはトルク制御と速度制御の二つの制御則を採用している。この二つの制御則を、取りつける対象物に合わせて適宜使い分けることでシミュレーションを行ってきた。トルク制御では、制御コンピュータは式 (1) に従って、目標トルク τ_{ref} をモータドライバに送り、モータドライバは、それをそのままモータへの指令値に変換して出力する。速度制御では、制御コンピュータが式 (2) に従って、目標速度 $\dot{\theta}_{ref}$ を算出し、モータドライバへ出力する。モータドライバでは PI 型のフィードバック制御が行われ、モータへの指令値を出力する。

$$\tau_{ref} = K_{pt}(\theta_d - \theta) + K_{it} \int (\theta_d - \theta) dt + K_{dt}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \tau_g \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_{ref} = K_{pv}(\theta_d - \theta) + K_{dv}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (2)$$

ここで、 K_{pt} と K_{pv} はそれぞれトルク制御と速度制御における比例ゲイン、 K_{dt} と K_{dv} は微分ゲイン、 K_{it} はトルク制御における積分ゲインである。また、 τ_g は重力に対する補償項、 θ_d は目標角度、 θ は現在角度である。

質量や形状が大きなモデルをのせた場合、どちらが有用であるか再検討するために、Fig. 6 に示す対象物をのせた状態で比較実験を行った。実験結果のボード線図を Fig. 7 に示す。実線が速度制御、破線はトルク制御を示す。この図より、速度制御の方が追従性が良く安定していることがわかる。これは、トルク制御ではモータドライバにおいてフィードバックを行っていないが、速度制御ではモータドライバにおいてフィードバックを行っているため、モータの角度誤差に強く、その分安定するためと考えられる。よって、以下の周波数応答実験では速度制御を用いる。

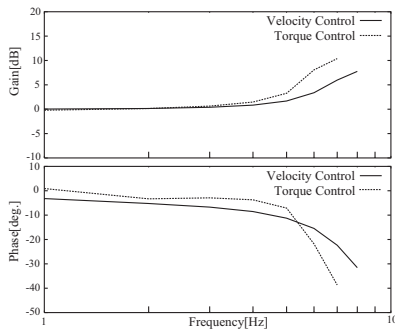


Fig. 7: Velocity Control and Torque Control with Object

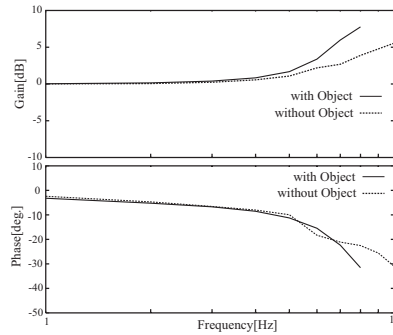


Fig. 8: Velocity Control with Object and without Object

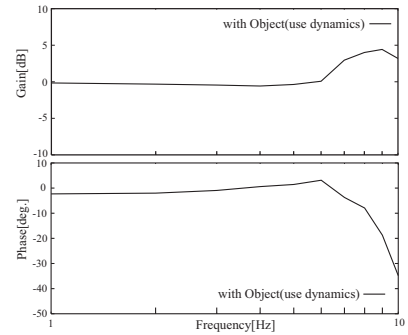


Fig. 9: Velocity Control using Dynamics with Object

5.2 対象物の有無による応答比較実験

速度制御に対する慣性力の影響を明らかにするため、Fig. 6 の対象物を手先に取りつけた場合と取りつけない場合で実験を行った。結果のボード線図を Fig. 8 に示す。実線は対象物を取りつけた場合、破線は何も取りつけていない場合である。この図より、対象物を取りつけた場合は何も取りつけない場合に比べ、ゲインが大きくなり、位相も遅れていることがわかる。また、図には示されていないが、対象物を取りつくと 9 [Hz] で、0 で一定であるはずの姿勢の偏差が非常に大きくなり、制御不能になってしまった。

以上の実験により慣性力が大きい対象物を取りつけた場合は、高い応答性をもつパラレルロボットの特徴を生かしきれておらず、モーションテーブルの役割を十分にはたせない可能性があることが明らかになった。これまで HEXA97 には軽量なモデルや小型なモデルをのせてきたため、慣性力による影響があまりなく、それらを考慮しないで制御を行ってきた。しかし、慣性力が大きい実モデルを搭載する場合、慣性力を考慮にいれた制御を行わなければならない。

5.3 簡易モデルを用いた動的制御による応答実験

慣性力を考慮に入れて制御を行うために、計算トルク法と簡易モデルを用いた動的制御 [7] を導入した。動力学計算より式 (3) に示すような、モータにかかるトルク τ のつり合いの式が求められる。

$$\tau = J(p(\theta), \theta)\ddot{\theta} + h(\dot{p}(\dot{\theta}, \theta), p(\theta), \dot{\theta}, \theta) + g(p(\theta), \theta) + V(\dot{\theta}) + F_e(p(\theta), \theta) \quad (3)$$

ここで、 $J(p(\theta), \theta)$ は慣性項、 $h(\dot{p}(\dot{\theta}, \theta), p(\theta), \dot{\theta}, \theta)$ は遠心・コリオリ項、 $g(p(\theta), \theta)$ は重力項、 $V(\dot{\theta})$ は摩擦項、 $F_e(p(\theta), \theta)$ は外力による力である。ここで今回の制御においては、重力項、摩擦項、外力による力は 0 としている。動的制御を行った場合の、モータドライバへの目標速度 $\dot{\theta}_{ref}$ は式 (4) のようになる。

$$\dot{\theta}_{ref} = K_v^{-1}\tau + \dot{\theta} + K_{p_v}(\theta_d - \theta) + K_{d_v}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (4)$$

ここで、モータドライバ内の速度フィードバック制御は P 型に変更しており、 K_v はモータドライバの速度ループ比例ゲインである。

また、この実験では目標値として正弦波ではなく余弦波を与えた。理由は、正弦波を与えると最初の立ち上がり時にモータ加速度が大きくなることによって慣性項の値がとて大きくなり、モータドライバの最大出力値を超えてしまったためである。そのため、最初

の加速がゆるやかな余弦波を与えて実験を行った。実験結果のボード線図を Fig. 9 に示す。図より、動力学を考慮した制御を行った場合、ゲインの増加、位相の遅れがともに小さくなり、10 [Hz] までシミュレーション可能範囲となる。これにより、新システムでも高周波成分を再現することができ、精度の高いシミュレーションを行うことができる。また、X 軸方向についても同様の実験を行い、その結果、Z 方向と同様にゲインの増加や位相の遅れなどが小さくなり、動的制御の有効性を確認することができた。したがって、動力学を考慮した制御を行うことにより、慣性力の影響を少なくすることができることが確認された。しかし、より高周波の動作を正確に行うにはさらに厳密な動的制御を行う必要がある。

6 おわりに

本稿では、ハイブリッドモーションシミュレータと遠隔操作実験システムを組み合わせ、新しいハイブリッドシミュレーションシステムの構想、設計について述べた。また、パラレルロボット HEXA97 の周波数応答についても実験を行い、適用する制御則についての検証を行った。今後は実際にシステム構築を行うとともに、X-Y モーションテーブルや HEXA97 の制御についてさらに検討を重ねる。

参考文献

- [1] 下地彦彦, 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ションを用いた宇宙ロボットの挙動評価, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.1, pp. 127-133, 1995.
- [2] T. Akima, S. Tarao, M. Uchiyama, Hybrid Micro Gravity Simulator Consisting of a High-Speed Parallel Robot, Proc. of 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 901-906, 1999.
- [3] 川辺洋, 内山勝, 高速無重力モーションシミュレータで実現される接触ダイナミクスの解析的評価, 日本ロボット学会第 19 回学術講演会予稿集, pp. 1143-1144, 2001.
- [4] 西牧洋一, 佐藤大祐, 内山勝, ハイブリッド型モーションシミュレータを用いた宇宙ロボットの遠隔操作実験システムの構築, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 1A1-L1-17.
- [5] 立原周一, 伊能寛, 近野敦, 内山勝, 双腕宇宙ロボットの遠隔操作実験システム, 日本ロボット学会 創立 20 周年記念学術講演会, 3F22.
- [6] 鷲野誠一郎, 佐藤大祐, 内山勝, 遠隔操作双腕ロボットによるトラス構造物部品接続実験, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集 1A1-L1-19.
- [7] 佐渡友哲也, 益川和之, 内山勝, 高速パラレルロボット HEXA の動的制御実験, 日本ロボット学会第 12 回学術講演会予稿集, pp. 791-792, 1994.