学術・技術論文

ハプティックインタフェースを用いた技術試験衛星 VII 型 搭載ロボットアームの遠隔操作

尹 祐 根^{*1} 御所園 敏 彦^{*2} 川 辺 洋^{*1} 木 南 匡 敬^{*1}
妻 木 勇 一^{*1} 内 山 勝^{*1} 小 田 光 茂^{*3} 土 井 利 次^{*2}

Teleoperation of Engineering Test Satellite VII Mounted Robotic Arm Using a Haptic Interface

Woo-Keun Yoon^{*1}, Toshihiko Goshozono^{*2}, Hiroshi Kawabe^{*1}, Masahiro Kinami^{*1},
Yuichi Tsumaki^{*1}, Masaru Uchiyama^{*1}, Mitsushige Oda^{*3} and Toshitsugu Doi^{*2}

In our previous work, we have proposed a mixed force and motion commands based space robot teleoperation system and a compact 6-DOF haptic interface to achieve an effective manual teleoperation. Until now, the effectiveness of this system and the haptic interface have been confirmed by the experiments in our laboratory. The most important features of this teleoperation system are a robustness against modeling errors and an ability to realize an operator's force at a remote site. In this paper, elements of this system and the haptic interface have been employed to teleoperate the 6-DOF manipulator mounted on the real space robot system ETS-VII. Surface tracking and peg-in-hole tasks have been executed to confirm the effectiveness of our system and the haptic interface. The results show that our space robot teleoperation system including the haptic interface has been able to execute these tasks in real space without any problems.

Key Words: ETS-VII, Space Robot, Model-Based Teleoperation, Haptic Interface, Force Feedback

1. は じ め に

現在, 多くの国の協力のもと国際宇宙ステーションの建設が進められている. このような宇宙構造物の建設には, 宇宙飛行士が船外に出て直接作業を行う船外活動が必要である. しかし, 宇宙飛行士を宇宙に運ぶためのコストは高く, 船外活動も多くの危険を伴っている. そこで, 宇宙飛行士の代わりに宇宙空間で作業のできる自律型宇宙ロボットの開発が求められている. 現在の技術レベルでは, ORU 交換作業などの定型作業であれば, 宇宙ロボットによる自動化が可能である. しかし, 宇宙飛行士に求められているような宇宙構造物の建設, 修理などの作業や事前に予期できない作業に対して柔軟に対応できる自律型宇宙ロボットを現在のロボット技術で開発することは非常に難しい. このため, ある程度の自律性を持った宇宙ロボットをオペレータが遠隔操作するという技術が重要となる. 特に, 有人打ち上げ技術を持たない日本にとって地上から軌道上の宇宙ロボット

を遠隔操作する技術を確立することは非常に重要である. そこで, 1997 年に宇宙開発事業団 (NASDA) により技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) が打ち上げられた [1]. ETS-VII には地上から遠隔操作できる 6 自由度のロボットアームと実験設備が搭載されており, 様々な実験が行われた [2]~[4].

地上から軌道上の宇宙ロボットを遠隔操作する場合に生じる大きな問題のひとつとして, 通信時間遅れがある. このため, オペレータは少し動かしては結果を見るムーブアンドウエイトと呼ばれる非効率的な操作を余儀なくされる. また, 接触作業においては, 通信時間遅れがあると力フィードバック系が不安定となり, 力情報を直接オペレータに提示することができない [5]. そこで, これらの問題を解決するためにモデルベース遠隔操作システムが提案されている [6]~[8]. これは, 地上のコンピュータ内に軌道上の宇宙ロボットおよびそれを取り巻く環境を模擬した仮想モデルを構築し, この仮想モデルを基に遠隔操作を行うシステムである. 力情報は仮想モデルを基に計算されるため, 大きな通信時間遅れがあっても安定に力情報をオペレータに提示することが可能である.

しかし, モデルベース遠隔操作では, 仮想モデルと実世界との間にモデル誤差が必ず発生するため, 従来の方法では作業を実現することが困難である. この問題に対処するために, 精度の良いキャリブレーション手法が提案されているが, モデル誤

原稿受付 2000 年 5 月 29 日

^{*1} 東北大学大学院工学研究科

^{*2} (株) 東芝

^{*3} 宇宙開発事業団

^{*1} Graduate School of Engineering, Tohoku University

^{*2} Toshiba Corporation

^{*3} National Space Development Agency of Japan

差を完全になくすことはできない [9] [10]. そこで、我々はモデル誤差が存在しても安全に作業を実現できる、力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムを提案している [11]. これは、目標力と目標運動を混合して指令値を生成することによりモデル誤差にロバストな特性をシステムに付加する方法である.

仮想モデルからの力情報をオペレータに提示するデバイスとして 6 自由度小型ハプティックインタフェースを独自に開発してきた [12]. これは、小型ながらも大きな作業領域と素早い運動を実現できるという特徴を有している.

力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムおよびハプティックインタフェースは、ネットワークで結ばれているため拡張性が高く、簡単に他のシステムに接続することができる.

本論文では、上述した力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムを実際の宇宙機システムである ETS-VII に適用するため、新たな制御システムを提案する. さらに独自に開発した 6 自由度ハプティックインタフェースをオペレータからの入力装置として組み込み、ETS-VII 上でならい作業とピン挿入作業をマニュアル操作で行い、本遠隔操作システムの有効性を検証する.

なお、地上実験では宇宙環境を厳密に再現できないため、様々な仮定のもとで実験を行わざるを得ない. また、実際の宇宙ロボットを遠隔操作する場合、オペレータに作用する心理的プレッシャーは、地上実験の場合と比べて大きく異なる. このように、実際の宇宙ロボットを使用した本実験は、実用的な宇宙ロボットの遠隔操作技術を確認するために必要な実験であり、地上実験では得ることのできない貴重なデータを得ることができた.

2. 実験システム

2.1 実験装置

実験システムは、軌道上系と地上系から構成されている. 全体図を Fig. 1 に示す. 軌道上系は、NASDA によって開発、運用されている ETS-VII とアメリカ航空宇宙局 (NASA) のデータ中継衛星 (TDRS) から構成されている. 地上系は、NASDA の衛星運用システムと Fig. 2 に示す我々が独自に開発したオペレータ支援システムから構成されている. オペレータ支援システムは、我々の提案している力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムの地上システムを ETS-VII に適用したものとマスターアームとして使用する 6 自由度小型ハプティックインタフェースから構成されている. オペレータ支援システムから生成されたコマンドは、NASDA の衛星運用システム、TDRS を経由して ETS-VII に送信される. 地上系と軌道上系を含む通信ループには往復で 6 秒程度の通信時間遅れが存在する. この通信時間遅れは、主に通信ネットワーク内の計算機間の通信に要する時間が蓄積して生じたものである. そのため、通信ネットワークの負荷の変動によって通信時間遅れも変動する [13]. この通信時間遅れの変動に対処するため、NASDA の衛星運用システム内では送受信データを通信時間遅れ以上の時間でバッファリングすることにより通信時間遅れを一定に保っている.

本実験システム構成の詳細を以下に述べる.

(1) タスクボード

ETS-VII には、Fig. 3 に示すタスクボード (TB) が搭

Fig. 1 Overview of the system

Fig. 2 The operator support system

Fig. 3 The task board

載されている. TB には、ならい面、ピン挿入用の穴などの実験設備が設置されている. 本実験では、ならい面と穴 2 を使用する. ならい面は正弦波形状を有しており全長約

Fig. 4 The slave arm on ETS-VII

300 [mm] である。図中の Σ_B は、アーム基部座標系を表している

(2) スレーブアーム

ETS-VII に搭載されているロボットアームをスレーブアームとして用いる。スレーブアームの外観を Fig. 4 に示す。図中の Σ_B は、アーム基部座標系を表している。スレーブアームは、全長約 2.4 [m] で、六つの回転関節を有している。アーム先端には、力覚センサと各種の実験操作ツールを把持するためのツール機構部が設置されている。本実験では、作業対象として TB を使用するため、ツール機構部には Fig. 5 に示すタスクボード操作ツールヘッド (TBTL) が取り付けられている。TBTL の先端には直径 18.0 [mm] のピンが取り付けられており、このピンと TB を用いて実験を行う。また、Fig. 4 に示すように、ツール機構部およびスレーブアームの第 1 関節には、それぞれ手先カメラと肩監視カメラが設置されている。

(3) グラフィックスコンピュータ

グラフィックスコンピュータには、SGI 社製の OCTANE SSI を使用する。グラフィックスコンピュータで表示するものを以下に示す。

- ソリッドモデルで表示されるスレーブアームの仮想モデル (仮想アーム)
- ソリッドモデルで表示される TB の仮想モデル (仮想 TB)
- ワイヤーフレームモデルで表示される ETS-VII に送信するスレーブアームの目標手先位置
- 仮想アームの手先位置と力の数値データ
- コマンド入力を行う GUI

Fig. 5 The task board handling tool

Fig. 6 3D graphics and GUI

Fig. 6 に実際の画面を示す。このようにソリッドモデルとワイヤーフレームモデルを用いる理由は 2.2 で述べる。仮想アームと仮想 TB は、NASDA が行った実験で得られたデータや設計図を基に作成されているため比較的高い精度を有している。これらのグラフィックスには、オペレータ支援技術として仮想ビーム、仮想グリップが導入されている [14] [15]。GUI は、ETS-VII に送信するコマンドの入力などに使用される。また、仮想モデル内では、オペレータは常に遠隔操作しやすい位置に視点を動かしたり、仮想モデルの拡大、縮小を自由に行うことができる。

(4) マスタアーム

本実験では、6 自由度小型ハプティックインタフェース [12] をマスタアームとして用いる。Fig. 7 にハプティックインタフェースの外観を示す。このハプティックインタフェースのグリップ部には力覚センサが取り付けられている。この力覚センサに加わる力を利用してハプティックインタフェース、仮想アーム、スレーブアームを操作する指令値を生成する。また、仮想モデルにおける視点の位置もこの力覚センサの値を用いて操作する。

(5) メインコンピュータ (VxWorks ターゲットコンピュータ)

マスタアーム、仮想アーム、スレーブアームを制御するコンピュータである。また、NASDA の衛星運用システムとの通信処理も行う。

Fig. 7 The 6-DOF haptic interface

(6) カメラモニタ

スレーブアームに取り付けられている手先カメラおよび肩監視カメラの映像を表示するモニタである。Fig. 2 のカメラモニタ 1, 2 にそれぞれ手先カメラと肩監視カメラの映像が表示される。

(7) テレメトリ表示端末

ETS-VII から送られてくるスレーブアームの手先位置、力などのテレメトリが数値で表示される端末である。なお、この端末に表示される情報は、ETS-VII で測定された時間から、片道分の通信時間遅れの影響を受けるため約 3 秒遅れた情報となる。ここで、テレメトリとは、遠隔測定で得たデータという意味であり、本論文では ETS-VII から送られてくるすべての情報を指している。

(8) ソフトウェア開発用コンピュータ (VxWorks ホストコンピュータ)

メインコンピュータのソフトウェアを開発するコンピュータである。

2.2 制御則

従来の力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムでは、オペレータが加えた力および仮想アーム、スレーブアームの運動情報を利用して手先速度指令値を生成することを特徴としている [11]。また、おのおののアームは非接触時と接触時の二つの制御則を持ち、これを自動的に切り替える機能を有している。しかし、本実験でスレーブアームとして用いる ETS-VII 搭載ロボットアームにおいては、ETS-VII 運用システム上の理由により手先速度を与えることは許されておらず、動作中に制御則を変更することも禁止されている。このため、従来の力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムの制御則を本実験にそのまま適用することはできない。そこで、マスターアームと仮想アームには従来通り手先速度を与え、スレーブアームにはコンプライアンス制御を行った上で、仮想アームの手先位置にオペレータの力に基づいた位置情報を加えた手先位置を指令値として与える制御システムを新たに提案し、導入する。なお、この制御システムは、従来の力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムの特徴であるモデル誤差に対するロバスト性とオペレータが加えた力をスレーブアームで実現できる特徴を有している。

なお、本実験では指令値として並進のみを与えており、姿勢

に関しては、初期姿勢を指令値とする。また、スレーブアームが非接触で動作する場合のスレーブアームに送信する位置指令には 50.0 [mm/s] の速度制限が課せられており、TB などに接触する場合には 2.0 [mm/s] の速度制限が課せられている。これらの制限は NASDA の衛星運用システム内で設けられており、オペレータから生成されるスレーブアームの手先位置指令値は NASDA の衛星運用システムによって常に監視されている。本実験の大半はスレーブアームが TB に接触しているため、実験中のマスターアーム、仮想アーム、スレーブアームに送信する指令値の最大手先速度は常に 2.0 [mm/s] に設定した。ただし、スレーブアームをローカルに制御している ETS-VII 搭載コンピュータ内では、接触、非接触にかかわらず常に最大手先速度が 50.0 [mm/s] に設定されている。

おのおののアームに対する指令値の制御則を以下に示す。

(1) マスターアーム

● 接触時

$$\dot{x}_m = k_f(f_{ref} - f_{va}) \quad (1)$$

● 非接触時

$$\dot{x}_m = k_v f_{ref} \quad (2)$$

$$f_{ref} = f_m + k_d(\dot{x}_{va} - \dot{x}_m) + k_p(x_{va} - x_m) \quad (3)$$

(2) 仮想アーム

● 接触時

$$\dot{x}_{va} = k_f(f_m - f_{va}) \quad (4)$$

● 非接触時

$$\dot{x}_{va} = k_v f_m \quad (5)$$

(3) スレーブアーム

$$x_s = x_{va} + \frac{f_m}{k_s} \quad (6)$$

ここで、 x_m はマスターアームの手先位置、 x_{va} は仮想アームの手先位置、 x_s はスレーブアームの目標手先位置、 $\dot{x}_m$ はマスターアームの目標手先速度、 $\dot{x}_{va}$ は仮想アームの目標手先速度、 f_m はマスターアームの力覚センサの値、 f_{va} は仮想反力、 f_{ref} はハプティックインタフェースのバックドライバビリティを保証するために位置の拘束を加えた力、 k_v は速度制御ゲイン、 k_f は力制御ゲイン、 k_p と k_d はそれぞれ f_{ref} のための位置ゲインとダンピングゲイン、 k_s はスレーブアームの剛性ゲインである。Fig. 8 に本実験システムのブロック線図を示す。

式 (1), (2), (4), (5) に示すように、オペレータの加えた力に基づいてマスターアームと仮想アームが動作する。そのため、オペレータには仮想アームの手先の運動と力がマスターアームを通じて提示される。また、マスターアームと仮想アームにおける接触時と非接触時の二つのモードは、仮想アームと仮想 TB との接触判定により自動的に切り替わる。

本遠隔操作システムでは、オペレータの手先力をスレーブアームで実現するため式 (6) に示すように仮想アームの手先位置に右辺第 2 項を付加している。スレーブアームがコンプライアンス制御されているため、式 (6) を用いることにより Fig. 9 に示すように、モデル誤差がなければ、スレーブアームは目標力を実現することができる。一方、モデル誤差がある場合は、正確な手先力が実現できないが、過大な力を発生することなく誤

Fig. 8 Control block diagram of the system

Fig. 9 Movement of the virtual arm and the slave arm

差を吸収することができる。このように接触時においては、スレーブアームの現在位置と目標位置が異なるため Fig. 6 に示すソリッドモデルとワイヤフレームモデルが必要となる。なお、一般にオペレータが加える力の変動周期は早いため、本方式をそのまま位置制御されているスレーブアームの指令値に適用するとアームが不安定な挙動を示すことが予想される。しかし、本システムでは、各アームの指令値に対する最大手先速度を $2.0[\text{mm/s}]$ に制限しているため大きな影響は受けない。

3. 実験内容

本実験では、人為的にモデル誤差を付加しない仮想モデルと人為的にモデル誤差を付加した仮想モデルを導入し、我々の提案する遠隔操作システムの評価を行う。人為的にモデル誤差を付加しない仮想モデルは、NASDA が行った実験のデータや設計図を基に作成しているため、比較的誤差は小さいものの幾何学的モデル誤差を含んでいる。一方、人為的にモデル誤差を付加した仮想モデルは、上記の仮想モデルに故意に比較的大きなモデル誤差を付加したものである。さらに、いずれのモデルも摩擦力を考慮していないため、動特性モデル誤差が含まれている。

本実験の内容を以下に述べる。

(1) ならい作業

Fig. 5 に示すスレーブアームの手先に取り付けられている TBTL のピンで、Fig. 3 に示す TB 上のならい面を使ったならい作業を行い、本遠隔操作システムの安全性と有効

性の評価を行う。また、仮想モデルには、人為的にモデル誤差を付加しない仮想モデルと付加した仮想モデルを用いて、本遠隔操作システムのモデル誤差に対するロバスト性も評価する。

オペレータは、ピンをならい面に接触させ、アーム基部座標系 z 軸方向に $-20[\text{N}]$ の力が発生するように押し付ける。そして、テレメトリで $-20[\text{N}]$ の力が確認できたところで、この力を維持したまま、ならい作業を行うことを要求されている。なお、ならい面は正弦波形状を有している。ならい作業で行う実験を以下に述べる。

●実験 1-1

人為的にモデル誤差を付加しない仮想モデル（仮想モデル 1）を用いた遠隔操作実験

●実験 1-2

アーム基部座標系 x, z 軸方向にそれぞれ $+10[\text{mm}]$ のモデル誤差を人為的に付加した仮想モデル（仮想モデル 2）を用いた遠隔操作実験

なお、実験 1-2 において、人為的にモデル誤差を付加したものと付加したモデル誤差の大きさは、事前にオペレータに知らせている。

(2) ピン挿入作業

スレーブアームの手先に取り付けられている TBTL のピンを TB 上の穴 2 に挿入した後、さらにそれを引き抜くピン挿入作業を行い、本遠隔操作システムの安全性と有効性の評価を行う。また、仮想モデルには、人為的にモデル誤差を付加しない仮想モデルと付加した仮想モデルを用いて、本遠隔操作システムのモデル誤差に対するロバスト性を評価する。

ピン挿入において、ピンが穴に入り、底に到達した後、アーム基部座標系 z 軸方向に $-5[\text{N}]$ 以上の力が発生することで、ピン挿入が完了したとみなす。そのため、オペレータは仮想モデル内でピン挿入が完了しても、スレーブアームで z 軸方向に $-5[\text{N}]$ 以上の力が発生したことをテレメトリで確認するまでマスターアームを押し続ける必要がある。

ピンの直径は $18[\text{mm}]$ であり、穴 2 の直径は $18.4[\text{mm}]$ である。ピンの初期位置は、穴の入り口の中心から、アーム基部座標系 x 軸方向に $+10[\text{mm}]$ 、 y 軸方向に $-18[\text{mm}]$ 、 z 軸方向に $+21[\text{mm}]$ ずらした地点である。

ピン挿入作業で行う実験を以下に述べる。

●実験 2-1

仮想モデル 1 を用いた遠隔操作実験

●実験 2-2

アーム基部座標系 x 軸方向に $+5[\text{mm}]$ 、 z 軸方向に $+10[\text{mm}]$ のモデル誤差を人為的に付加した仮想モデル（仮想モデル 3）を用いた遠隔操作実験

なお、実験 2-2 において、人為的にモデル誤差を付加したことは事前にオペレータに知らせているが、付加したモデル誤差の大きさは知らせていない。

オペレータが遠隔操作を行うオペレータ支援システムには Fig. 2 に示すように、一つのマスターアームと四つのディスプレイが用意されている。本実験ではスレーブアームの動作範囲が

非常に小さく、各関節やリンクが ETS-VII 上の実験機器に衝突することはない。そのため、オペレータが肩監視カメラを細かくチェックし、スレーブアームと ETS-VII 上の実験機器との衝突に注意する必要はない。そこで、本実験ではひとつのマスタアームと、グラフィックスディスプレイ、カメラモニタ 1、テレメトリ表示端末の三つのディスプレイのみ使用している。

4. 実験結果

4.1 ならい作業

実験 1-1 の結果を Fig. 10, 12, 実験 1-2 の結果を Fig. 11, 13 に示す。Fig. 10, 11 は、アーム基部座標系に対する各アームのピンの位置を示している。また、Fig. 12, 13 において、上段

Fig. 10 Surface tracking task without the artificial modeling errors

Fig. 11 Surface tracking task with the artificial modeling errors

Fig. 12 Surface tracking task without the artificial modeling errors

Fig. 13 Surface tracking task with the artificial modeling errors

のグラフは左からアーム基部座標系 x , y , z 軸における各アームのピンの位置, 下段のグラフは左からアーム基部座標系 x , y , z 軸方向における各アームの手先の力を示している。

Fig. 10 のピンの軌跡から仮想モデル 1 には, 数ミリ程度の幾何学的モデル誤差の存在が確認できる。また, Fig. 11 からは, 仮想モデル 2 において人為的に付加したモデル誤差の存在が確認できる。

各実験において, 時間の制約上片道だけのならない作業となった。そのため, Fig. 12, 13 の x 軸の位置が示すように, 実験 1-1 と実験 1-2 では, ならない作業開始点と終了点が反対となっている。しかし, オペレータはグラフィックス内で視点を移動させ, 実験 1-1, 実験 1-2 ともに, マスタアームを奥から手前に引き寄せるようにならない作業を行ったので, 実験 1-1 と実験 1-2 において, ならない作業開始点と終了点の違いがオペレータの操作感に影響を及ぼすことはない。

ならない作業中にオペレータの力が零になっているところがある。これは, オペレータがグラフィックス内の視点を操作していることを表している。本遠隔操作システムでは, スレーブアームの操作とグラフィックス内の視点の操作を一つのマスタアームで行っているため, 視点の操作時には式 (3), (4), (5), (6) で $f_m = 0$ とし, オペレータの加える力を零としているためである。この間, スレーブアームの目標手先位置は視点の操作を行う前の値を保持し続けている。

Fig. 12, 13 において仮想アームとスレーブアームの x , z 軸の位置が, ならない作業の前半で少し, 後半で大きくずれている。これは, ならない面形状, 各アーム間の相対関係, 各アームに設けられた速度制限および仮想モデルで摩擦力を無視したために生じた動特性モデル誤差に起因している。Fig. 14 にならない作業における仮想アーム, スレーブアーム, スレーブアームの目標手先位置の関係を示す。(a), (b), (c) はそれぞれ上昇過程, 視点変更, 下降過程である。上昇過程では, Fig. 14 (a) で示すようにスレーブアームの目標手先位置は, スレーブアームに作用する垂直抗力を大きくする位置にあるため大きな摩擦力が発生する。しかも, スレーブアームの動作方向の力が小さくなる位置でもある。視点変更中は, 仮想アームとスレーブアームの目標手先位置は固定されるが, スレーブアームは目標手先位置へと移動し続けるため Fig. 14 (b) で示すようにスレーブアームが仮想アームを追越していく。下降過程では, オペレータが加える力の大きさと方向が上昇過程と同じ場合, スレーブアームの目標手先位置とスレーブアームは Fig. 14 (c) に示すようにスレーブアームに作用する垂直抗力を小さくする位置にあり, その結果, 摩擦力が小さくなる。また, スレーブアームの動作方向の力が大きくなる位置でもある。一方, 上昇過程でスレーブアームに働く動作方向の力は, スレーブアームを 2.0 [mm/s] 程度で動かす大きさである。下降過程において, スレーブアームに働く動作方向の力は, 上昇過程で作用する力より大きくなり, スレーブアームは 2.0 [mm/s] 以上の速度で動作してしまう。これは, 仮想アームとスレーブアームの目標手先位置に対しては 2.0 [mm/s] の速度制限がかかっているが, スレーブアームに対する速度制限は 50.0 [mm/s] と大きいからである。この結果, スレーブアームと仮想アームとの位置誤差が大きくなっていく。

Fig. 14 Relationship between the virtual arm and the slave arm and the reference position

Fig. 12, 13 においてマスタアームに加えられた x 軸方向の力と大きく異なった力が, スレーブアームで発生している。これは, オペレータの心理的要因, マスタアームとスレーブアームの目標手先位置の速度制限およびならない面形状に起因している。まず, マスタアームについて詳しく述べる。ならない作業開始前, マスタアームには, 斜面上に各アームを停止した状態で z 軸方向に -20 [N] を保持するような力が各軸方向に加えられている。ならない作業開始時, オペレータは停止している各アームを移動させるため x 軸方向に力を加える。ここで, オペレータは大きな力を一気に加え動かそうとするため, マスタアームでは非常に大きな力が発生している。同じ現象が視点変更後の動作開始時にも起きている。また, オペレータは常に x 軸方向に過大な力を出し続けている。これは, マスタアームの動作速度が非常に遅いため, オペレータはつい過大な力を加えてしまっているからである。上昇過程および下降過程においてオペレータが加えた x 軸方向の力は, はじめは大きい徐々に減少している。これは, 最初に大きな力を加えたものの, この力が必要以上の力であることを理解し, 徐々に力を減らしているからである。さらに, マスタアームでは x 軸の同じ方向に力加えられている。これは, オペレータがならない作業を行うために, マス

タアームを x 軸に沿って一定の方向に押し続ける必要があるからである。次にスレーブアームについて Fig. 14 を使って詳しく述べる。上昇過程では、Fig. 14 (a) に示すようにスレーブアームのピンの右側がならい面と接触し、ピンは x 軸の負の方向の力でならい面を押し付ける。一方、下降過程では、Fig. 14 (b) に示すようにスレーブアームのピンの左側がならい面と接触し、ピンは x 軸の正の方向の力でならい面を押し付ける。したがって、スレーブアームで発生する x 軸方向の力の符号が、上昇過程と下降過程で反転する。また、ならい面が正弦波形状を有しているため、ならい面頂上付近ではピンが x 軸方向にならい面を押し付ける力が小さくなる。

Fig. 12 においてオペレータ、スレーブアーム共に目標力である z 軸方向 -20 [N] を実現している。Fig. 13 においてオペレータは z 軸方向の目標力を実現しているが、スレーブアームでは付加されたモデル誤差分だけ力が減少している。また、ならい作業の後半では、 z 軸方向のスレーブアームの力は、Fig. 12, 13 共に減少している。これは上述したように、下降過程ではスレーブアームが仮想アームより先に進むため、 z 軸方向の力が減少しているのである。

これらの結果より、実験 1-1、実験 1-2 においてならい作業を阻害するような大きな力も発生することなく作業を実現できたことが分かる。以上より、本遠隔操作システムのならい作業に対する有効性とモデル誤差に対するロバスト性が確認できた。

4.2 ピン挿入作業

実験 2-1 の結果を Fig. 15, 17、実験 2-2 の結果を Fig. 16, 18 に示す。Fig. 15, 16 は、アーム基部座標系に対する各アームのピンの位置を示している。また、Fig. 17, 18 において、上段のグラフは左からアーム基部座標系 x , y , z 軸におけるピンの位置、下段のグラフは左からアーム基部座標系 x , y , z 軸方向における各アームの手先の力を示している。

Fig. 15 のピンの軌跡から仮想モデル 1 には、数ミリ程度の幾何学的モデル誤差の存在が確認できる。また、Fig. 16 からは、仮想モデル 3 で人為的に付加したモデル誤差の存在が確認できる。

実験 2-1 では、Fig. 15, 17 に示すように仮想アームとスレーブアームの位置はほぼ同じであり、スレーブアームで過大な力も発生せず、以下に述べる手順でピン挿入作業をスムーズに実現している。

- (1) 0~25 [s]: 自由空間で仮想モデルの穴の直上まで移動する。
- (2) 25~50 [s]: ピンを挿入する。
- (3) 50~75 [s]: ピン挿入確認のためピンを z 軸方向に -5 [N] 以上押し付ける。
- (4) 75~100 [s]: ピンを引抜く。
- (5) 100~ [s]: 自由空間でピン挿入終了地点まで移動する。

実験 2-2 では、オペレータはモデル誤差が付加されていることは知っているが、モデル誤差の大きさは知らない。そのため、以下に述べるような慎重な操作を行っている。

- (1) 0~15 [s]: 自由空間で仮想モデルの穴の直上まで移動する。
- (2) 15~25 [s]: 仮想アームを仮想 TB の穴に少し挿入する。しかし、オペレータは、通信時間遅れ後の情報であるテレメトリ表示端末を見ることにより、スレーブアームで z 軸方

Fig. 15 Peg-in-hole task without the artificial modeling errors

Fig. 16 Peg-in-hole task with the artificial modeling errors

向の力が発生していることに気が付き、スレーブアームが穴に挿入されていないことを理解する。

- (3) 25~45 [s]: スレーブアームの穴の探索を始める。これは、式 (6) の右辺第 2 項 f_m/k_s を利用する。仮想アームを仮想 TB の穴に少しだけ挿入した状態で、マスターアームに x , y 軸方向の力を加え Fig. 6 で示すワイヤフレームモデルを動かし、探索を行う。このとき、仮想アームおよびマスターアームは穴に拘束されているため動きはほとんどない。探索中は、スレーブアームに z 軸方向の力が発生し続けるが、穴が見つければこの力が零になるので、スレーブアームの z 軸方向の力に注目しながら探索を行う。この探索の状況は Fig. 18 に示す各アームの各軸の位置および各軸方向の力の値から確認できる。
- (4) 45 [s]: オペレータは、スレーブアームの z 軸方向の力が零になる位置を発見し、穴の位置を決定している。
- (5) 45~65 [s]: スレーブアームの穴を発見したので、仮想アームを穴に挿入する。同時に、ワイヤフレームモデルも穴を発見した x , y 軸の位置を維持しながら動かし、スレーブアームを穴に挿入する。
- (6) 65~85 [s]: ピン挿入確認のためピンを z 軸方向に -5 [N] 以上押し付ける。
- (7) 85~125 [s]: ピンを引抜く。
- (8) 125~ [s]: 自由空間でピン挿入終了地点まで移動する。

Fig. 17, 18 において、ピンを引抜く際に仮想アームとスレーブアームの z 軸の位置に大きなずれが生じている。これはピン挿入確認のためスレーブアームで発生させた z 軸方向の -5 [N]

Fig. 17 Peg-in-hole task without the artificial modeling errors

Fig. 18 Peg-in-hole task with the artificial modeling errors

以上の力が零になることをテレメトリで確認せずにオペレータが仮想アームを引抜いたために生じたものである。

これらの結果より、実験 2-1 においては、小さなモデル誤差が存在する中、簡単にピン挿入作業を実現できたことが分かる。また、大きなモデル誤差がある実験 2-2 においても、オペレータの操作方法は複雑となるが、過大な力を発生することなくピン挿入作業を実現できたことが分かる。以上より、本遠隔操作システムのピン挿入作業に対する有効性とモデル誤差に対するロバスト性が確認できた。

5. お わ り に

本論文では、モデル誤差にロバストな力・運動混合指令型モデルベース遠隔操作システムを ETS-VII に適用するため新たな制御システムを提案し、これを実装した。本システムは、ハプティックインタフェースを通じてオペレータにスレーブアームの力と運動の情報を提示できるという特徴を有している。そして、仮想モデルに人為的にモデル誤差を付加しない場合と付加した場合において、ならい作業とピン挿入作業を軌道上で行っ

た。ならい作業においては、モデル誤差に関係なく作業を実現できた。ピン挿入作業においては、人為的にモデル誤差を付加しない場合は、簡単に作業を実現できた。一方、人為的にモデル誤差を付加した場合は、オペレータの操作方法が複雑になったが作業は実現できた。これらの結果より、本遠隔操作システムの有効性とモデル誤差に対するロバスト性が確認できた。

なお、本実験ではマスターアームを固定した力ジョイスティックと呼ぶ方法でも ETS-VII ロボットアームの遠隔操作を行っている。今後、本論文での遠隔操作方法と比較し、オペレータに作用する操作感の優劣について調査する。さらに、ETS-VII を用いた遠隔操作実験で得られた成果を基に、トラスの組み立てなど、より複雑な作業を実現について研究を進める。

参 考 文 献

- [1] M. Oda: "Space Robot Experiments on NASDA's ETS-VII Satellite," Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, pp.1390-1395, 1999.
- [2] S. Kimura, S. Tsuchiya, Y. Nagai, K. Nakamura, K. Satoh and H. Morikawa: "Teleoperation Experiments for Antenna Assembling Experiment on Engineering Test Satellite VII," Proc.

- of the Ninth Int. Conf. on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, pp.331-339, 1999.
- [3] K. Matsumoto, S. Wakabayashi, M. Nohmi, L.F. Penin, H. Ueno and T. Yoshida: "Truss Structure Tele-operation using ETS-7 Space Robot," Proc. of the Ninth Int. Conf. on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, pp.341-346, 1999.
- [4] K. Landzettel, B. Brunner, K. Deutrich, G. Hirzinger, G. Schreiber and B.M. Steinmetz: "DLR's Experiments on the ETS VII Space Robot Mission," Proc. of the Ninth Int. Conf. on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, pp.347-353, 1999.
- [5] W. R. Ferrel: "Remote Manipulation with Transmission Delay," IEEE Trans. on Human Factors in Electronics, HFE-6, no.1, pp.24-32, 1965.
- [6] 舘璋, 榊泰輔: "インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (I)—基本原理と伝送遅れへの応用—", 日本ロボット学会誌, vol.8, no.3, pp.241-252, 1990.
- [7] 神徳徹雄, 谷江和雄, 横井一仁, 藤川昭雄: "仮想環境におけるバイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションに関する基礎実験", 計測自動制御学会論文集, vol.28, no.6, pp.750-759, 1992.
- [8] 中里浩幸, 妻木勇一, 内山勝, リーファンテック: "地上モデルからの力フィードバックを用いた宇宙テレロボット実験", 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.489-492, 1992.
- [9] 大山英明, 常本直貴, 舘璋, 井上康之: "仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法", 日本ロボット学会誌, vol.12, no.2, pp.272-281, 1994.
- [10] W. S. Kim, D. B. Genney and E. C. Chalfant: "Computer Vision Assisted Semi-Automatic Virtual Reality Calibration," Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, pp.1335-1340, 1997.
- [11] 妻木勇一, 内山勝: "力・運動混合指令型モデルベース宇宙遠隔操作システム", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.64, no.626, pp.3901-3906, 1998.
- [12] Y. Tsumaki, H. Naruse, D. N. Nenchev and M. Uchiyama: "Design of a Compact 6-DOF Haptic Interface," Proc. 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, pp.2580-2585, 1998.
- [13] 小田光茂: "ETS-VII のミッション", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1055-1061, 1999.
- [14] 内山勝, 金田悟, 北垣高成: "宇宙ロボットの遠隔操作力制御システム", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.7, pp.849-856, 1991.
- [15] W.K. Yoon, Y. Tsumaki and M. Uchiyama: "An Experimental System for Dual-Arm Robot Teleoperation in Space with Concepts of Virtual Grip and Ball," Proc. of the Ninth Int. Conf. on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, pp.225-230, 1999.

尹 祐根 (Woo-Keun Yoon)

1972 年 1 月 13 日生。1996 年九州大学工学部動力機械工学科卒業, 1998 年同大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年東北大学大学院工学研究科博士課程後期 3 年の課程編入学, 1999 年同課程中途退学, 同研究科航空宇宙工学専攻助手, 現在に至る。双腕宇宙ロボットの遠隔操作の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

川辺 洋 (Hiroshi Kawabe)

1975 年 11 月 27 日生。1998 年九州大学理学部地球惑星学科卒業, 同年東京大学大学院理学研究科修士課程入学, 同年同課程中途退学, 1999 年東北大学大学院工学研究科博士課程前期 2 年の課程入学, 現在に至る。宇宙ロボット, 宇宙遠隔操作の研究に従事。

妻木勇一 (Yuichi Tsumaki)

1965 年 10 月 26 日生。1990 年東北大学工学部精密工学科卒業, 1992 年同大学大学院修士課程修了, 同年三菱電機 (株) 鎌倉製作所入社, 1994 年東北大学工学部機械航空工学科助手, 1999 年文部省在外研究員として JPL (NASA/Caltech) に滞在。現在, 同大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻助手, 博士 (工学)。テレロボティクスの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

小田光茂 (Mitsushige Oda)

1951 年 10 月 4 日生。1975 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。1977 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年宇宙開発事業団入社。人工衛星の姿勢制御技術の研究開発に従事。1987-1988 年英国ラザフォードアップルトン研究所客員研究員。帰国後宇宙ロボットの研究, および技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) プロジェクトに従事。1996 年工学博士 (東京工業大学)。計測自動制御学会, 日本機械学会等の会員。1999 年日本機械学会宇宙工学部門業績賞, 1999 年日本ロボット学会論文賞。2000 年東京工業大学大学院機械宇宙システム専攻客員教授。

(日本ロボット学会正会員)

御所園敏彦 (Toshihiko Goshozono)

1975 年 9 月 2 日生。1998 年東北大学工学部機械航空工学科卒業, 2000 年同大学大学院工学研究科博士課程前期 2 年の課程修了, 同年東芝株式会社に入社, 現在に至る。

木南匡敬 (Masahiro Kinami)

1976 年 10 月 3 日生。1999 年東北大学工学部機械航空工学科卒業, 同年同大学大学院工学研究科博士課程前期 2 年の課程入学, 現在に至る。ハプティックインタフェースを用いたヒューマンインタフェースの研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)

内山 勝 (Masaru Uchiyama)

1949 年 9 月 16 日生。1972 年東北大学工学部産業機械工学科卒業, 1977 年同大学大学院博士課程修了, 工学博士。同年東北大学工学部精密工学科助手, 1980 年同助教授, 1992 年同学部機械航空工学科教授, 1997 年同大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻教授, 現在に至る。ロボット工学の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

土井利次 (Toshitsugu Doi)

1966 年 11 月 7 日生。1990 年京都大学工学部精密工学科卒業。1992 年同大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了。同年 (株) 東芝入社。宇宙開発事業部にて, ETS-VII ロボット実験系の開発に従事。1998 年 6 月より 2000 年 2 月まで宇宙開発事業団に outward。現在に至る。

(日本ロボット学会正会員)