

技術試験衛星VII型 (ETS-VII) 搭載ロボットアームの 遠隔操作実験

Teleoperation Experiments using Engineering Test Satellite VII

○ 尹 祐根* , 御所園 敏彦* , 川辺 洋* , 木南 匡敬* , 妻木 勇一* , 内山 勝* ,
小田 光茂** , 土井 利次**

○ Woo-Keun Yoon* , Toshihiko Goshozono* , Masahiro Kinami* , Yuichi Tsumaki* ,
Masaru Uchiyama* , Mitsushige Oda** , Toshitugu Doi**

*東北大学 , **宇宙開発事業団

*Tohoku University, ** National Space Development Agency of Japan

キーワード : 宇宙ロボット遠隔操作 (space robot teleoperation), 技術試験衛星VII型 (Engineering Test Satellite VII), ハプティックインタフェース (haptic interface), 力帰還 (force feedback),

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 内山研究室
尹 祐根 , Tel.: (022)217-6973 , Fax.: (022)217-6971 , E-mail: yoon@space.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在 , 多くの国の協力のもとに国際宇宙ステーションの建設が進められている . この様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 , 宇宙飛行士を軌道上に運ぶためのコストは非常に高く , 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長期にわたって宇宙空間で作業のできる宇宙ロボットの開発が求められている . 特に , 軌道上のロボットを地上から遠隔操作することは , 宇宙に人を送る技術を持たない日本にとって非常に重要な技術である . 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

おりさまざまな実験が行われている^{2) 3) 4)} .

軌道上のロボットを地上から遠隔操作するには , 通信時間遅れが存在する . そのため , オペレータはリアルタイムでロボットを遠隔操作することができない . そこで , 予測モデルを導入することにより , リアルタイムで遠隔操作ができる環境を構築する . 予測モデルとは , 地上のコンピュータ内に構築された軌道上のロボット及びそれを取り巻く環境のモデルであり , このモデルをオペレータが操作する . 軌道上のロボットとコンピュータ内のモデルとの間には , モデル誤差が生じることが多い . このモデル誤差が存在する状況で遠隔操作を行った場合 , オペレータが予期しない過大な力が発生し , スレーブアームや作業環境を破壊することが考えられる . そのため , モデル誤差が存在

しても作業に悪影響を及ぼさないモデルにロバストな遠隔操作システムを構築する必要がある。

接触を伴う作業においてオペレータに接触時の力情報を提示することは、作業効率を高める上で有効であると考えられる。しかし、通信時間遅れが存在するため、宇宙ロボットに作用した現実の力をリアルタイムでオペレータに提示することはできない。そこで、予測モデルに基づいた予測の力情報をオペレータに提示するモデルベース遠隔操作システムを導入する。予測の力情報であるためオペレータはリアルタイムで力情報を得ることができる。力情報を提示する手段として、6自由度小型ハプティックインタフェースを開発した⁵⁾。このハプティックインタフェースをマスタアームとして用いることにより、オペレータは手の触覚で力情報を得ることができる。

本論文では、以上の内容を基に本研究室で構築してきた遠隔操作システムの有効性をETS-VIIを用いて検証する。特にハプティックインタフェースの操作性を評価する。

2. 実験内容

1) 力提示手法の有効性の確認

● 力感覚のキャリブレーション

ならい面にスレーブアームを接触させる。力の目標値を設定し、どの程度ハプティックインタフェースに力を加えれば目標値を達成できるかをオペレータに教示し、オペレータ自身が力に対するキャリブレーションをする。

● 力印加時の正確性の評価

オペレータにハプティックインタフェースからの力フィードバックのみで、指定した目標力を出してもらう。これにより、どのくらい正確に力を実現できるのかを確認する。同時に、マスタスレーブ間の

力印加特性の相関、オペレータの加えた力が正確にスレーブアームで実現できているかを確認する。

2) ならい作業時の操作性評価

指定された力を維持しながら、ならい作業を行う。オペレータはスレーブアームの姿勢を固定し並進のみを遠隔操作する。ハプティックインタフェースには2種類の操作モードが設定されているため、その操作モードの違いがならい作業に及ぼす影響を評価する。また、操作時には、オペレータにスレーブ側の位置と力の情報も提示する。

3) ならい作業時におけるモデル誤差の操作性に及ぼす影響の評価

モデル誤差が存在する状態で、指定された力を維持しながらならい作業を行う。モデル誤差がある場合、ハプティックインタフェースを通じて伝わる力情報に誤差が生じる。この誤差がオペレータの操作感に及ぼす影響を調査する。また、操作時には、オペレータにスレーブ側の位置と力の情報も提示する。

- モデル誤差を基部座標系Z軸（ならい面の上方）に+30 [mm]設定する。

- モデル誤差を基部座標系Z軸，X軸（ならい面の長手方向）に+10 [mm] ずつ設定する。

4) ペグ挿入時の操作性の評価

ペグインホルのタスク実行を通じて、ハプティックインタフェースによる力フィードバックの操作性への影響を調査する。オペレータはスレーブアームの姿勢を固定し並進のみで遠隔操作する。ハプティックインタフェースが有している2つの操作モードの違いがペグ挿入作業に及ぼす影響を評価する。オペレータにはスレーブ側の位置と力の情報も提示する。

5) ペグ挿入時におけるモデル誤差の操作性に及

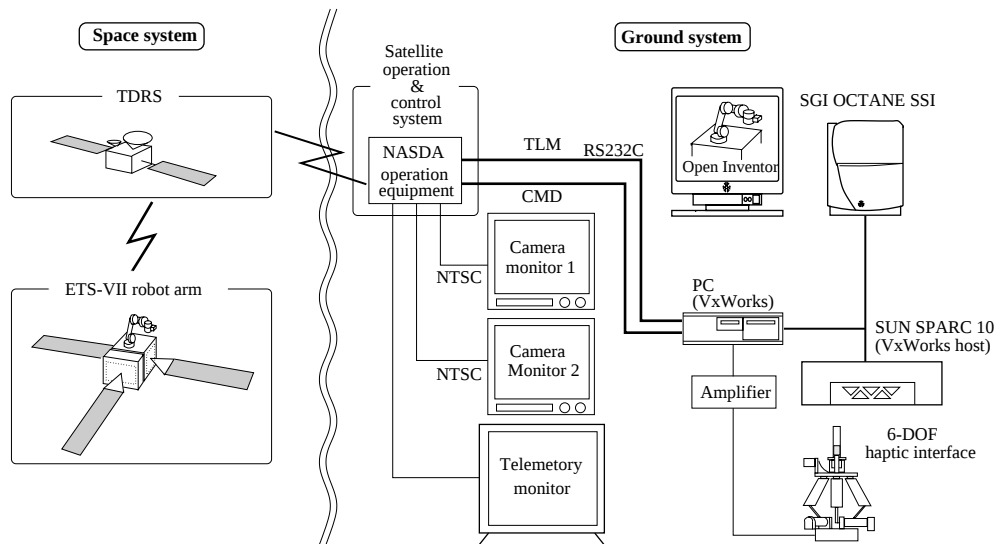


Fig. 1 Overview of the system.

ばす影響の評価

モデル誤差がある場合、ハプティックインタフェースを通じて伝わる力情報に誤差が生じる。この誤差がオペレータの操作感に及ぼす影響を調査する。また、ハプティックインタフェースが有している2つの操作モードの違いがペグ挿入作業に及ぼす影響を評価する。オペレータにはスレーブ側の位置と力の情報も提示する。モデル誤差の大きさはオペレータには知らせないで行う。

3. 実験装置

3.1 システム構成

本システムは、軌道上系と地上系から構成されている。概要を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である。地上系は、NASDAの衛星運用システムと内山研究室の宇宙ロボット遠隔操作システムから構成されている。本実験におけるシステム構成を以下に述べる。

1) ETS-VII搭載ロボットアーム

ETS-VIIに搭載されているロボットアームは、全長約2.4 [m]であり、6自由度を有している。対象物に接触時の最大手先速度は並進2.0 [mm/s]、回転 0.4 [deg/s]である。



Fig. 2 6-DOF haptic interface.

2) 6自由度小型ハプティックインタフェース

本実験で用いているマスタアームは、内山研究室で独自に開発した6自由度小型ハプティックインタフェースである。Fig. 2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。この力覚センサの値を利用して指令値を生成する。ハプティックインタフェースを利用してスレーブアームを操作する方法としては、マスタスレーブモード (M/Sモード) とジョイスティックモード (J/Sモード) がある。

● M/Sモード

ハプティックインタフェースとスレーブアームが同期して動くマスタスレーブ方式である。オペレータはスレーブアームの動作方向、提示される力の大きさとそ

の方向を直接的に感じることができる．

● J/Sモード

ハプティックインタフェースは動かさずに固定し，力覚センサの値により指令値を生成する方式である．ハプティックインタフェースが動かないため，オペレータはスレーブアームの動作方向を直接的に感じることができない．

3) メインコンピュータ (VxWorksターゲットコンピュータ)

ハプティックインタフェースからの入力信号を処理してコマンドを生成し，モデルベーストな予測シミュレーション処理を行う．同時に，システム全体，NASDAシステムとの通信処理も行うメインの計算機である．

4) グラフィックスコンピュータ

ETS-VIIのスレーブアームの予測位置とスレーブアームに送っている指令位置を3次元グラフィックスで表示する．また，オペレータ支援技術としてバーチャルビーム，バーチャルグリッパなどが導入されている^{6) 7)}．ディスプレイには，Fig. 3 に示すようなスレーブアームに対する各種コマンドやハプティックインタフェースのモード切り替えコマンドを入力するためのオペレータ支援GUIが置かれている．

5) ソフトウェア構築用コンピュータ (VxWorksホストコンピュータ)

VxWorksターゲットコンピュータにダウンロードするソフトウェアを構築する計算機である．

6) カメラモニタ

ETS-VIIの手先カメラ及び肩監視カメラ画像を表示するモニタである．表示周期はそれぞれ4 [Hz]，1 [Hz]である．

7) テレメトリ表示端末

ロボットの位置，力などの情報が表示される端末である．

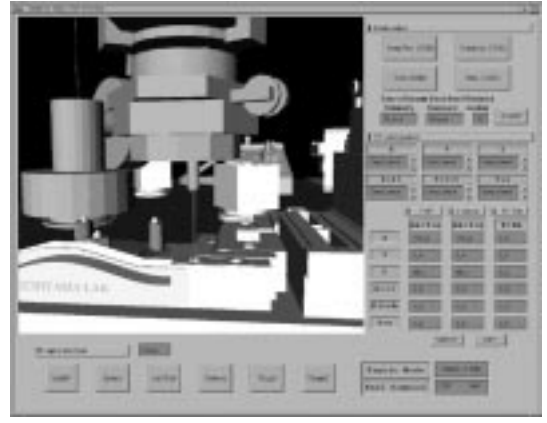


Fig. 3 Operator support GUI.

3.2 制御則

本実験システムにおいて，ハプティックインタフェースは速度制御，予測モデルは位置制御，ETS-VIIに送信するロボットアームの手先はコンプライアンス制御である．また，ETS-VIIに搭載されているスレーブアームはインピーダンス制御であり，自律的に制御されている．以下に各々の制御則を述べる．ただし，手先速度制限は 2.0 [mm/s] である．

1) ハプティックインタフェース

$$F_{ref} = F_h + k_d(V_{va} - V_h) + k_p(X_{va} - X_n) \quad (1)$$

非接触の場合，

$$V_h = k_v F_{ref} \quad (2)$$

接触の場合，

$$V_h = k_f(F_{ref} - F_{va}) \quad (3)$$

2) 予測モデル

非接触の場合，

$$V_{va} = k_v F_h \quad (4)$$

接触の場合，

$$V_{va} = k_f(F_h - F_{va}) \quad (5)$$

3) ETS-VIIに送信するロボットアーム

$$X_s = \frac{X_{va} F_h}{k_s} \quad (6)$$

なお， X_h はハプティックインタフェースの手先位置， X_{va} は予測モデルの手先位置， X_s はETS-VIIに送信するスレーブアームの手先位置， V_h はハプ

ティックインタフェースの手先速度, V_{va} は予測モデルの手先速度, F_h は力覚センサの値, F_{ref} は位置の拘束を加えた力, F_{va} は仮想反力, k_p は F_{ref} のための位置ゲイン k_d は F_{ref} のためのダンピングゲイン k_v は速度制御ゲイン, k_f は力制御ゲイン, k_s は ETS-VII に送信するスレーブアームのコンプライアンスゲインである。

4. 実験結果

4.1 力提示手法の有効性の確認

J/Sモード, M/Sモードで行った押し付け作業の結果を Fig. 4 (a) (b) に示す。

オペレータがハプティックインタフェースに印加した力を見ると, 平均押し付け力および標準偏差は, J/Sモードは 21.31 [N], 0.9400 [N], M/Sモードは 18.83 [N], 1.105 [N] となっており, いずれもほぼ 20 [N] の力を実現できている。これより, 人間の力感覚はキャリブレーションを行えば力の識別が可能となることがわかった。また, 力感覚を用いて力情報を提示する方法が有効であることが確認された。

J/Sモード, M/Sモードを比較すると, オペレータの加えた力に有意の差は認められない。そこで, 静的な押し付けにおいてマスタアームの動作方向を提示することは効果があるとは言えない。

オペレータが加えた力と実機が壁面を押し付けた力を比較すると, J/Sモードでは安定した状態が確認しづらいが, M/Sモードにおいては 17 ~ 18 [N] 付近で 3 [N] 程度のばらつきを持って落ち着いていることが確認できる。この結果によりオペレータが印加した力は実機でもほぼ実現できている。

4.2 ならい作業時の操作性の評価

Fig. 5 は J/Sモードでならい作業を行ったグラフであり, Fig. 6 は M/Sモードでならい作業を行ったグラフである。Fig. 5, Fig. 6 共に, (a) のグラフはスレーブアームから送られてきた力と位置の

データで, (b) のグラフはオペレータが加えた力と予測モデルの位置のデータである。

ならい作業の遂行時間は J/Sモード, M/Sモード どちらも約 100 [s] であり顕著な差はなかった。実験開始前の予想では M/Sモードのほうが動作方向を提示できるためよい結果が出ると予想したが, データからは優位差が確認されなかった。この原因として, 搭載系での手先速度制限により 2 [mm/s] を超える速度が出せなかったことに起因するものと考えられる。この手先速度制限のために, ハプティックインタフェースも非常に低速で動作しなければならず, M/Sモードの特徴である動作方向の提示が, 効率的に作用しなかったためと考えられる。しかし, Fig. 5, Fig. 6 に示されているように, オペレータが加えた力のデータには, J/Sモードと M/Sモードの間に, はっきりとした差が確認された。ならい面を上昇する際, M/Sモードと J/Sモードでの入力を比較すると, M/Sモードの方が安定している。これは, ならい面に沿って上昇する場合, オペレータは, 下方に力を発生させながら同時に引き上げを行わなければならない。この場合, ペグの動作方向が重要な役割を持つ。まず, 動作方向を提示できない J/Sモードでは, ペグを押し付けることによるペグの下降が, 予測モデルで視覚的に確認する以外にオペレータには伝わらない。しかし, 動作方向を提示できる M/Sモードでは, ペグの動作がハプティックインタフェースを通じてオペレータに提示されるために, オペレータは手の触覚により自然に力を調整することが可能になると考えられる。

4.3 ならい作業時におけるモデル誤差が操作性に及ぼす影響の評価

Fig. 7 はモデル誤差を基部座標系において Z 軸方向に +30 [mm] 設定した状態でならい作業を M/Sモードにより行ったグラフであり, Fig. 8 はモデル誤差を基部座標系において X 軸方向に +10 [mm],

Z軸方向に+10 [mm] 設定した状態でない作業を M/Sモード により行ったグラフである。Fig. 7, Fig. 8 共に、(a) のグラフはスレーブアームから送られてきた力と位置のデータで、(b) のグラフはオペレータが加えた力と予測モデルの位置のデータである。

モデル誤差が存在する環境下において、マスタスレーブシステムでは作業の実現が困難となる。しかし、本遠隔操作システムでは、いずれのモデル誤差においてもない作業を実現することができた。オペレータは、仮想環境の情報を主に使用しながらない作業を行うため、モデル誤差の影響分だけオペレータが加えた力が、実機側では減少していることが確認できる。

我々が提案したモデル誤差にロバストなマスタスレーブシステムは、従来のマスタスレーブシステムにおいて必要とされる位置による拘束をスレーブアームのコンプライアンス制御の分だけ弱めることによって、モデル誤差に対処している。そのため、オペレータが加えた力を実機で正確に発生させる、ということは必ずしも考慮されてはいない。そこで、制御に用いているゲインを適切に調整することによって目標とする位置と力のある程度実現していくことは可能である。しかし、ハプティックインタフェースを用いて遠隔操作を行う目的は、オペレータの動作を実機で再現することであり、一定力を正確に発生し続けることではない。したがって、モデル誤差の影響下でない作業を遂行できたことは、我々が構築したシステムがモデル誤差にロバストであることを示す材料になりうると思われる。

4.4 ペグ挿入時の操作性の評価

Fig. 9 はJ/Sモードによりペグインホールを行ったグラフであり、Fig. 10 はM/Sモードによりペグインホールを行ったグラフである。Fig. 9, Fig. 10 共に、(a) のグラフはオペレータが加えた力、(b)

はスレーブアームから送られてきた力、(c) のグラフはスレーブアームに送られた位置、(d) はスレーブアームから送られてきた位置のデータである。

ペグインホールのタスク遂行時間は、J/Sモード、M/Sモードとも、約 130 [s] と有為な差は認められなかった。しかし、送信した位置データを比べると、ペグ挿入中に明らかな差が生じている。ペグ挿入の終了時には、スレーブアームの力情報で基部座標系 Z 軸方向に 10 [N] の力を発生させるが、その際に、J/Sモード では Z 軸方向以外にも力が加わっている。その結果、送信した位置のデータに M/Sモード よりも大きなばらつきが生じている。これは、J/Sモード において動作方向を把握するのが M/Sモード に比べると困難なためと考えられる。つまり、M/Sモード では、動作方向をオペレータが把握できるため、ペグ底において、Z 軸方向にのみ力を発生させる事が容易にできたと考えられる。これは直接タスク遂行時間に影響を与えるものはないが、オペレータの操作の容易さなど、データとして表れにくい項目に対する指標となりうる可能性がある。

4.5 ペグ挿入時におけるモデル誤差が操作性に及ぼす影響の評価

Fig. 11 はモデル誤差が存在する環境下でJ/Sモードによりペグインホールを行ったグラフであり、Fig. 12 はモデル誤差が存在する環境下でM/Sモードによりペグインホールを行ったグラフである。Fig. 11, Fig. 12 共に、(a) のグラフはオペレータが加えた力、(b) はスレーブアームから送られてきた力、(c) のグラフはスレーブアームに送られた位置、(d) はスレーブアームから送られてきた位置のデータである。

設定されたモデル誤差をオペレータは認識していないため、オペレータは予測モデルが正確であると信じている状態で、ペグインホールを行った。ペグ挿入中に、スレーブアームから予期しない力

の情報が得られ、モデルに誤差がある事に気付く。その後、搭載系のペグ穴を探索し始めている。この探索時間の分だけモデル誤差がない場合と比べて、タスク遂行時間は長くなり約 155 秒となった。J/Sモード、M/Sモードによる大きな違いは認められなかった。

ペグ穴探索時において、オペレータは、スレーブアームの力情報を参考にするため、基部座標系 Z 軸の力が発生しなくなる点がすなわちペグの穴であると認識する。しかし、スレーブアームの力情報は、時間遅れがあるために、オペレータが力の消滅を確認したときには、すでにペグは穴を通過しており、反対側の縁に接触する。そのために基部座標系 X 軸方向にも力が発生しているのが Fig. 11, Fig. 12 (b) より確認できる。この時、ペグは予測モデルのペグ穴に挿入された状態を保っている。つまり、予測モデルのペグがペグ穴によって固定されていても、コンプライアンス制御分の位置のロバストを有しているため、実機のペグを予測モデルに拘束されずに操作する事が可能となっている。また、Fig. 11, Fig. 12 (c) のスレーブアームに送られた位置を見ると、予測モデルの穴の位置とも実機の穴の位置とも異なる値となっている。これは、時間遅れにより、オペレータが指令を与えずぎてしまったためと考えられる。また、モデル誤差分だけオペレータはハプティックインタフェースに余計に力を加えなければならずスレーブアームに送る位置指令にばらつきが生じ易い。このため、モデル誤差が大きい場合には、キャリブレーションなどによりモデル誤差を軽減させない限り、ハプティックインタフェースを用いることの有効性は薄れてしまうとも考えられる。

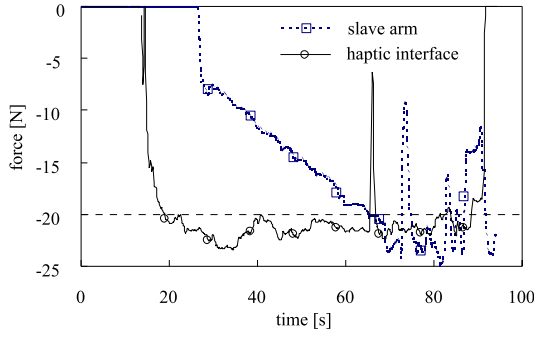
5. おわりに

ETS-VIIに搭載されたロボットアームをハプティックインタフェースで遠隔操作することにより、ハプティックインタフェースの操作性の評価を行っ

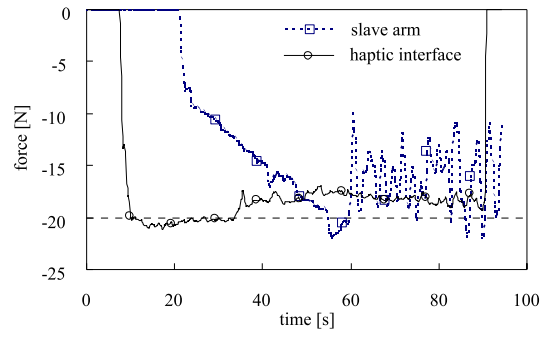
た。その結果、ハプティックインタフェースを使った力提示手法の有効性が確認できた。ならい作業において、オペレータの加えた力はM/Sモードの方が安定している。しかし、スレーブアームの動作には差がなかった。モデル誤差が存在する環境では、作業を実現することはできた。しかし、目標とする力を実現しながらの作業はできなかった。操作性にはあまり差がなかったため、評価するためには今後さらなるデータの解析が必要である。ペグ挿入においては、M/Sモードの方が正確にスレーブアームに位置指令を送っている。モデル誤差が存在する場合には、作業を実現することはできたが、操作性には明らかな差が認められなかった。正確に評価するためには、今後更なるデータの解析が必要である。

参考文献

- 1) M. Oda and T. Doi: Teleoperation System of ETS-VII Robot Experiment Satellite, Proc. 1997 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Grenoble, France, 1644/1650, (1997)
- 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. 9th Int. Conf. on Advance robotics, Tokyo, Japan, 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. 9th Int. Conf. on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, 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. 9th Int. Conf. on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, 347/353, (1999)
- 5) 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, Leaven, Belgium, 2580/2585, (1998)
- 6) 妻木 勇一, 内山 勝: 力制御型遠隔宇宙ロボット操作システムにおける仮想ビームを用いた予測表示の効果, 日本機械学会誌 (C編), **62**-601, 3603/3608, (1996)
- 7) W.K. Yoon, Y. Tsumaki and M. Uchiyama: An Experimental System for Dual-Arm Robot Teleoperation in Space with Concepts of Virtual Grip and Bal, The Ninth International Conference on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, 225/230, (1999)

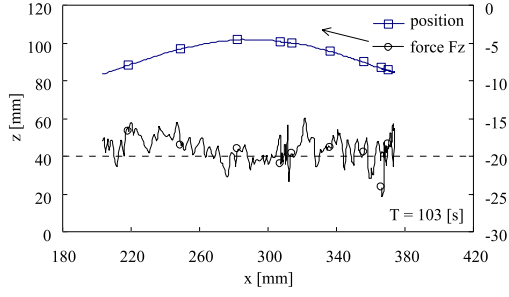


(a) Force joystick mode

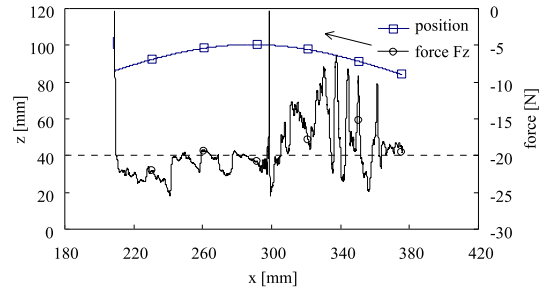


(b) Master-slave mode

Fig. 4 Press keeping task.

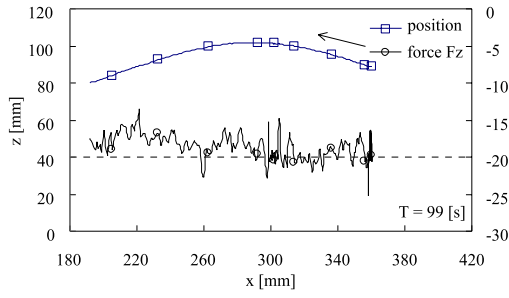


(a) Slave arm data

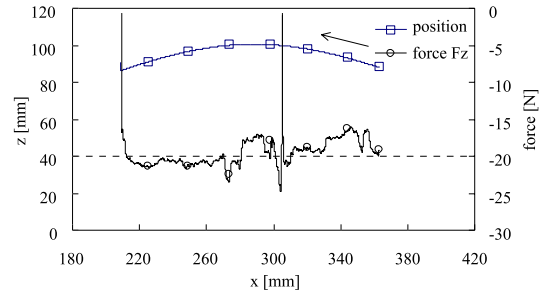


(b) Operator input data

Fig. 5 Constant force surface tracking task with force joystick mode.

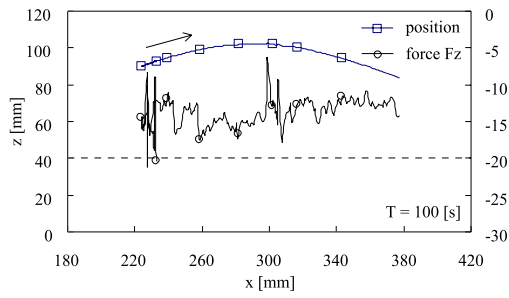


(a) Slave arm data

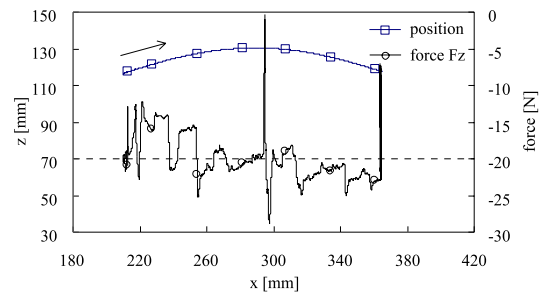


(b) Operator input data

Fig. 6 Constant force surface tracking task with master-slave mode.

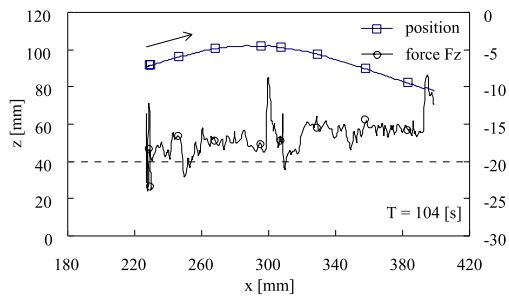


(a) Slave arm data

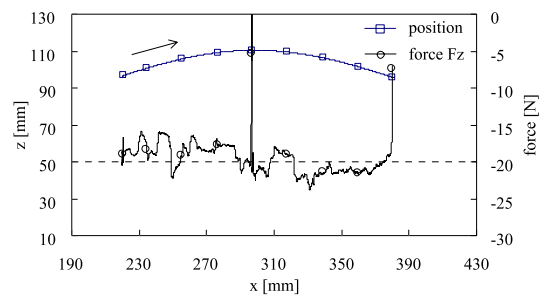


(b) Operator input data

Fig. 7 Constant force surface tracking task with master-slave mode under modeling error.

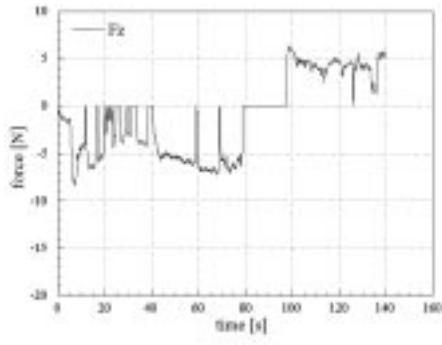


(a) Slave arm data

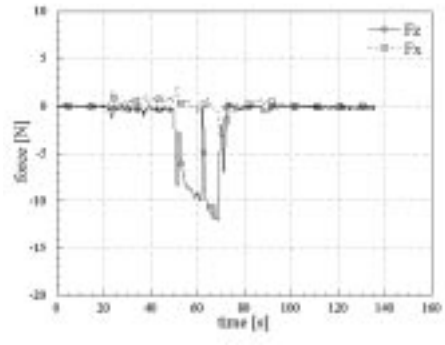


(b) Operator input data

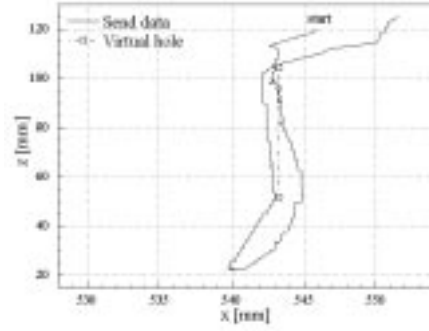
Fig. 8 Constant force surface tracking task with master-slave mode under modeling error.



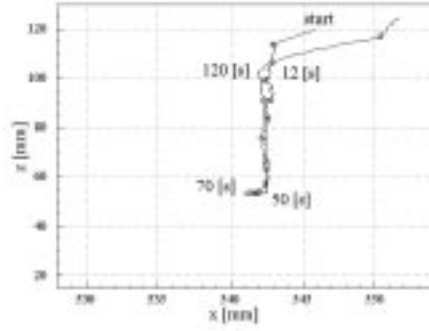
(a) Operator input data



(b) Slave arm data

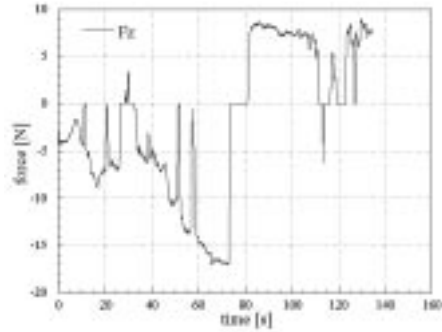


(c) Send position data

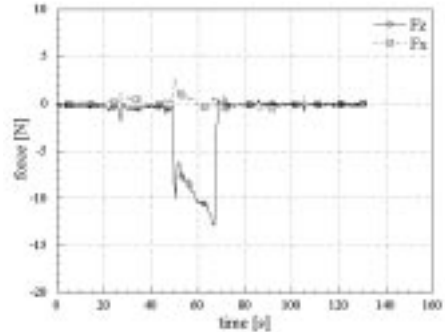


(d) Slave arm data

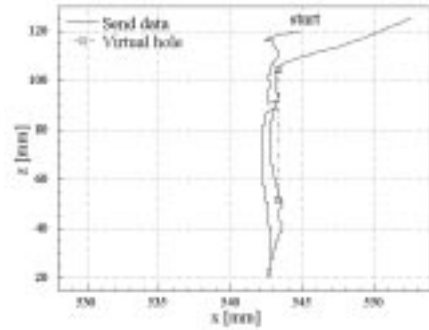
Fig. 9 Peg-in-whole task with force joystick mode.



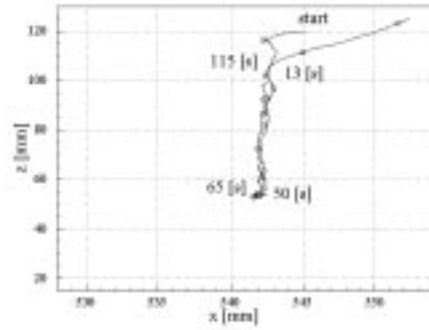
(a) Operator input data



(b) Slave arm data

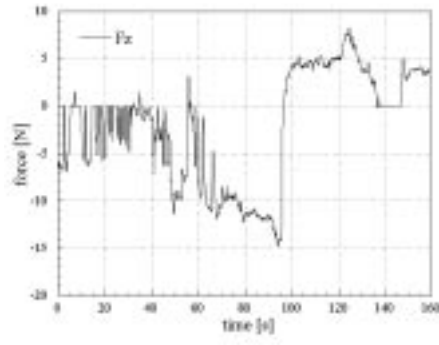


(c) Send position data

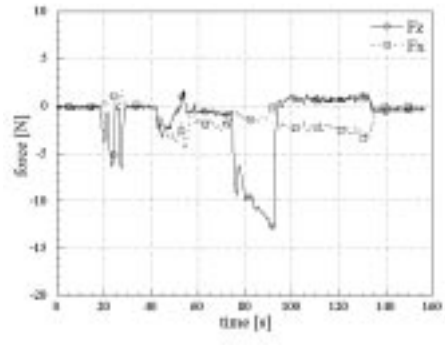


(d) Slave arm data

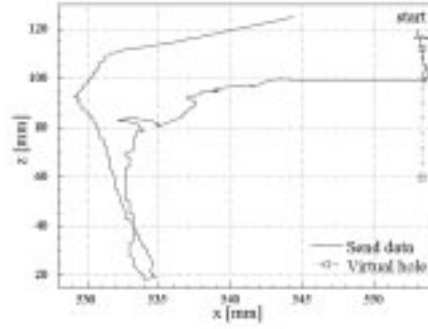
Fig. 10 Peg-in-whole task with master-slave mode.



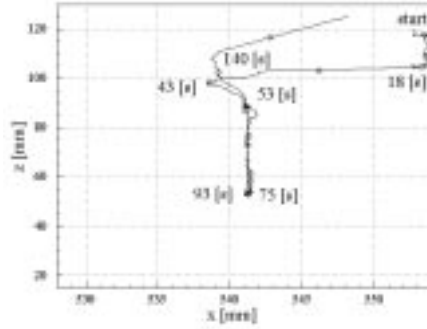
(a) Operator input data



(b) Slave arm data

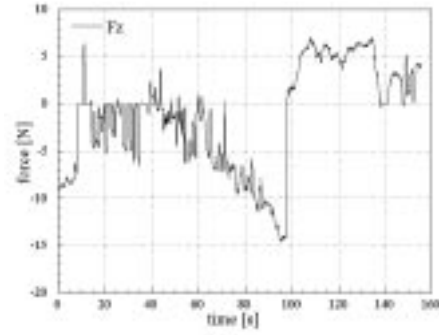


(c) Send position data

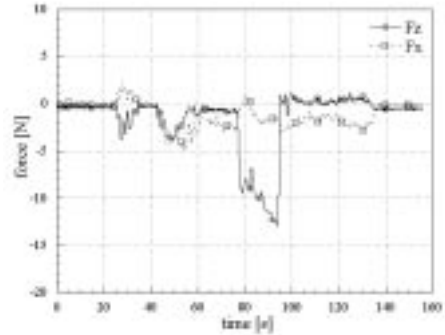


(d) Slave arm data

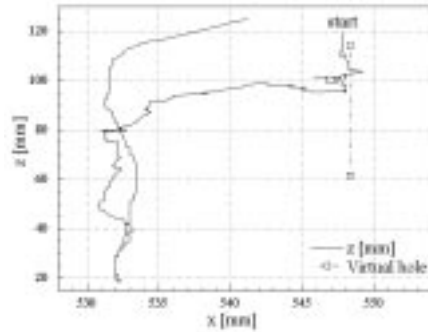
Fig. 11 Peg-in-whole task with force joystic mode under modeling error.



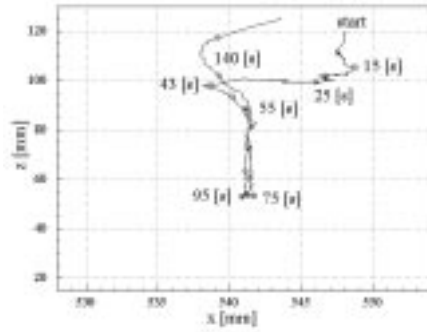
(a) Operator input data



(b) Slave arm data



(c) Send position data



(d) Slave arm data

Fig. 12 Peg-in-whole task with master-slave mode under modeling error.