

This thesis is composed of the following six chapters.

In chapter 1 (Introduction), the background and the purpose et al. of my research are described.

In chapter 2 (Space Robot Teleoperation System), an experimental teleoperation system for space robotics has been developed. A purpose of our work using this system is a development of space robot teleoperation technologies which can replace skills of an astronaut. Therefore, several concepts for flexibility and practicability are introduced to establish this setup. To realize an effective space teleoperation system, following technologies will be needed.

- Realization of skills of an astronaut.
- High autonomy of the remote system.
- Strong operator support system.

The experimental setup should have capability to verify these technologies on the ground. On the other hand, ease of maintenance is one of the important criteria for the experimental system. Design concepts are derived from these requirements. The details of design concepts are follows.

- Space system
 - A dual slave arm system is desired for complicated tasks.
 - Redundant DOF of the arm is needed for increasing of flexibilities.
 - A hand which can grasp any shaped object is desired for simplified operation.
 - A 6-axis force/torque sensor is required for force control.
 - Servo sampling rate of the slave arm should be more than 500 Hz to realize high gain force control.
 - An image processing and a stereo camera systems are required for realization of high level autonomy.
 - In order to realize high performance control, the control system should be divided between high level and low level controls.
- Ground system
 - The master arm should have 6-DOF.
 - A 6-axis force/torque sensor is required for force control.
 - More than 500 Hz servo sampling rate is required for the master arm to realize high gain force control.
 - A high performance 3D graphics computer is required for an effective operator support.
- Common

- In order to keep ease of maintenance, all components should be commercial products.
- The software system has to be provided with high extendibility and easy maintenance ability.
- Each system should be connected to communicate each others using LAN.

This system is composed of the space system, the ground system and the software development system. The space system includes dual 7-DOF manipulators, multipurpose hands, force/torque sensors and an image processing system. The ground system is composed of a master arm and a graphic workstation. A novel developed 6-DOF haptic interface device is employed as a master arm. To achieve an effective teleoperation ability, new concepts of virtual grip and virtual ball are introduced. Virtual grip displays the posture of the grip of the haptic interface at the end-effector of the virtual arm in the computer graphics. Virtual ball shows the workspace of the haptic interface. These are very helpful tools for teleoperation of a big slave arm with a small master arm.

In chapter 3 (ETS-VII Robot Arm Teleoperation Using a Haptic Interface), a space robot teleoperation experiment of Engineering Test Satellite VII (ETS-VII) manipulator was described. This experiment was executed using part of space robot teleoperation system in chapter 2. In our previous works, 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 has been confirmed by the experiments in our laboratory. The most important features of this teleoperation system are a robustness against modeling errors and ability to realize the operator exerted force at a remote site.

All the arms in our system are controlled by the velocity command and incorporated an automatic function to change between contact and non-contact modes. However, the manipulator mounted on the ETS-VII is controlled by the position command only. We cannot manipulate the velocity control and change the control modes between contact and non-contact for the ETS-VII manipulator. Therefore, we introduced a new control method which improved our model-based teleoperation system and this method was applied to the ETS-VII manipulator teleoperation. A compact haptic interface was used as a master device in these experiments.

We performed surface-tracking and peg-in-hole tasks with and without artificially introduced modeling errors with a real manipulator in orbit. The surface-tracking task was carried out safely with and without artificially introduced modeling errors. The peg-in-hole task could also be carried out successfully though the operation with artificially introduced modeling errors became very complicated.

These results confirm that our teleoperation system can be applied easily to real space robotics,

and our system does have some level of robustness against modeling errors.

In chapter 4 (Evaluation of Control Methods in a Model-Based Teleoperation), control methods in a model-based teleoperation is evaluated. This experiment was executed using part of space robot teleoperation system in chapter 2. In the teleoperation, a master-slave approach which can display both motion and force information to an operator is quite effective. However, it is not used for the space robotic teleoperation from the ground, since it becomes unstable due to the communication time delay problems. Therefore, a joystick has been a popular control device in such space teleoperations until now. Instead, the master-slave approach can be applied to a model-based space robotic teleoperation employing the virtual reality technologies. In our previous works, a model-based space teleoperation system having robustness against modeling errors has been demonstrated using a real space system ETS-VII. This approach has lead to a new possibility of the employment of the master-slave approach into the model-based space robotic teleoperation. In this paper, the operability of both the master-slave and the joystick approaches is evaluated. Furthermore, we evaluate a force-joystick approach too which is another control method in our teleoperation system. From the results, we could conclude that the master-slave is the best control approach for the contact tasks in which the directions of motion of the slave arm and the operator's input force are different.

Moreover, we performed the surface-tracking and the peg-in-hole tasks in order to evaluate the operability of the master-slave and force joystick approaches without artificially introduced modeling errors. We utilized both the motion and force information from all arms for this evaluation. We also utilized the viewpoint information of the operator for this evaluation. From our results, the mater-slave approach appears to be the best control approach for contact tasks that require different directions between the motion and the force of the slave arm, as in the surface-tracking task. Moreover, the master-slave and force-joystick approaches are suitable for the tasks that require the same directions of the motion and the force of the slave arm, as in the peg-in-hole task.

In chapter 5 (Design of a Haptic Interface (Modified Delta Mechanism) based on Structural Stiffness Analysis), a modified Delta mechanism, which is a suitable stiffness, is designed using our stiffness analysis method. In our previous work, we developed a compact 6-DOF haptic interface as a master device which achieved an effective manual teleoperation. The haptic interface is component of the space robot teleoperation system in chapter 2. The haptic interface contains a compact modified Delta parallel-link positioning mechanism. Parallel mechanism is usually characterized by a high stiffness, however, it is reduced by elastic deformations of both parts and bearings. Therefore, to design such a compact parallel mechanism, we should analyze a structural stiffness of a parallel mechanism, including elastic deformation of both parts and bearings. Then, an analysis method of structural stiffness for a parallel mechanism is proposed. Key points of our method are:

- a modeling of bearings,
- a modeling of a parallel mechanism.

This method is based on the tip compliance of the link, and can be applied to both serial and parallel mechanisms. Our method is applied to the modified Delta parallel-link mechanism. We obtained the following results.

- The stiffness of two set bearings is insufficient.
- α which is the angle between the rod and the traveling plate, will be the design guideline parameter to evaluate the stiffness of the modified Delta mechanism.

From results, we proposed that α is restricted to values from 40 degrees to 70 degrees in order to obtain a well-balanced stiffness in each axial direction and rotation. Moreover, we set the base radius and the traveling plate radius to 40 mm, the arm length to 93 mm and the rod length to 127 mm in order to increase the tip stiffness and maintain a motion area to a sphere of about 150 mm diameter. The experiment showed that the modified Delta mechanism has a sufficient stiffness as expected from the analysis. Therefore, we have been able to develop a modified Delta mechanism with a well-balanced tip stiffness.

In chapter 6 (Conclusion), the discussion above chapters is summarized.

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	尹 祐根
論文題目	モデルベースト遠隔操作に関する研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 内山 勝 教授 福永 久雄 教授 小菅 一弘 助教授 近野 敦

論文審査結果の要旨

モデルベースト遠隔操作は、宇宙ロボットを地上から遠隔操作する場合のような、通信時間遅れが問題となる遠隔操作において有効な手段であり、広く研究されている。しかし、操作者が効率よくロボットを操作するために必要な、仮想現実感およびユーザーインタフェースなどで、まだ改善すべき点が多い。特に、宇宙ロボットでは、マスタームは従来のジョイスティック型が広く使用されており、操作者への力覚呈示に難があるばかりか、操作性も悪い。本論文は、こうした問題を解決するために実施した宇宙ロボットの操作性向上に関する研究の成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、宇宙ロボットの遠隔操作システムを実現するための設計思想をまとめている。そして、宇宙ロボットの遠隔操作を地上で模擬するための実験システムの構築について述べ、さらに、操作者への仮想現実感の呈示、および操作者支援システムについて議論し、新しいヒューマンインタフェースを提案している。

第3章では、技術試験衛星 VII 型機 (ETS-VII) に搭載された宇宙ロボットアームのモデルベースト遠隔操作実験について述べている。マスタームとして、小型6自由度ハプティックインタフェースを採用し、ならい作業とピン挿入作業の実験を行い、提案するモデルベースト遠隔操作システムの有効性を検証している。これは重要な成果である。

第4章では、宇宙ロボットのモデルベースト遠隔操作方式として、マスタスレーブ方式、カジョイスティック方式、およびジョイスティック方式の比較操作実験を行い、それぞれの操作性について考察し、各方式の違いを明らかにしている。

第5章では、小型6自由度ハプティックインタフェースの剛性を解析し、剛性評価を運動学と結び付けて行うための解析モデルを提案している。そして、このモデルを使用することにより、動作範囲内で良好な剛性特性を有する小型6自由度ハプティックインタフェースの設計を行っている。小型6自由度ハプティックインタフェースの並進部は、パラレル機構を採用しており、パラレル機構の剛性を定量的に評価することのできるこの解析手法は、単にハプティックインタフェースの性能を評価するだけでなく、パラレルロボットの設計にも応用が可能で、有用性が高い。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、宇宙ロボットの効率的なモデルベースト遠隔操作方法、および遠隔操作システムについて、総合的な立場より検討を加え、新しいモデルベースト遠隔操作手法の提案、実際の宇宙ロボットによる検証実験、およびハプティックインタフェースの設計を行ったもので、宇宙工学およびロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

学力確認結果の要旨

平成15年7月17日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は宇宙工学およびロボット工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

論文審査結果の要旨

モデルベースト遠隔操作は、宇宙ロボットを地上から遠隔操作する場合のような、通信時間遅れが問題となる遠隔操作において有効な手段であり、広く研究されている。しかし、操作者が効率よくロボットを操作するために必要な、仮想現実感およびユーザーインタフェースなどで、まだ改善すべき点が多い。特に、宇宙ロボットでは、マスタアームは従来のジョイスティック型が広く使用されており、操作者への力覚呈示に難があるばかりか、操作性も悪い。本論文は、こうした問題を解決するために実施した宇宙ロボットの操作性向上に関する研究の成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、宇宙ロボットの遠隔操作システムを実現するための設計思想をまとめている。そして、宇宙ロボットの遠隔操作を地上で模擬するための実験システムの構築について述べ、さらに、操作者への仮想現実感の呈示、および操作者支援システムについて議論し、新しいヒューマンインタフェースを提案している。

第3章では、技術試験衛星 VII 型機 (ETS-VII) に搭載された宇宙ロボットアームのモデルベースト遠隔操作実験について述べている。マスタアームとして、小型6自由度ハプティックインタフェースを採用し、ならい作業とピン挿入作業の実験を行い、提案するモデルベースト遠隔操作システムの有効性を検証している。これは重要な成果である。

第4章では、宇宙ロボットのモデルベースト遠隔操作方式として、マスタスレーブ方式、カジョイスティック方式、およびジョイスティック方式の比較操作実験を行い、それぞれの操作性について考察し、各方式の違いを明らかにしている。

第5章では、小型6自由度ハプティックインタフェースの剛性を解析し、剛性評価を運動学と結び付けて行うための解析モデルを提案している。そして、このモデルを使用することにより、動作範囲内で良好な剛性特性を有する小型6自由度ハプティックインタフェースの設計を行っている。小型6自由度ハプティックインタフェースの並進部は、平行機構を採用しており、平行機構の剛性を定量的に評価することのできるこの解析手法は、単にハプティックインタフェースの性能を評価するだけでなく、平行ロボットの設計にも応用が可能で、有用性が高い。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、宇宙ロボットの効率的なモデルベースト遠隔操作方法、および遠隔操作システムについて、総合的な立場より検討を加え、新しいモデルベースト遠隔操作手法の提案、実際の宇宙ロボットによる検証実験、およびハプティックインタフェースの設計を行ったもので、宇宙工学およびロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。