

アブドル モヒディーン ヌズラス ハミダ

氏 名 **ABDUL MOHIDEEN NUZRATH HAMEEDHA**

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1247号

学位授与の日付 2022年3月31日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 Network Delay Mitigated Remote Robot Control with Force Feedback for Improved QoS  
(QoS 向上のための力覚フィードバックを用いたネットワーク遅延緩和型遠隔ロボット制御)

論文審査委員 主査 教授 石橋 豊  
教授 内匠 逸  
准教授 布目 敏郎  
教授 三好 孝典  
(長岡技術科学大学)

## 論文内容の要旨

Remote robot systems find their applications from manufacturing units in industries to intensive care units in hospitals. Traditionally, teleoperation has been used in applications where normal onboard manual operation/control cannot be used or where it would be too hazardous or expensive. The evolution of teleoperation has generated sophisticated telepresence systems where the operators can feel that their presence in the teleoperation site. By adding force feedback to the remote robot systems, the operators can perceive the force from the remote robots. With force sense, the accuracy and efficiency of the system can largely be improved. When the feedback information is sent over a Quality of Service (QoS) non-guaranteed network such as the Internet, an object carried by the robots may be subjected to a large force owing to network delay, delay jitter, and packet loss. This large force may seriously damage the object.

In this thesis, we mainly concentrate on QoS control to mitigate the influence of network delay in remote robot systems with force feedback. When multiple remote robot systems are used to perform a cooperative task, the spatial and temporal synchronization may seriously be deteriorated owing to the network delay. To solve this problem, in this thesis, we investigate the influences of network delay and the effects of various types of QoS control by performing the task of carrying an object together by using two remote robot systems with force feedback. We also consider two types of relationships between the systems; namely the master-slave relation and peer-to-peer relation to clarify how network delay affects each relationship. In the master-slave relation, one system acts as the master, and the other system acts as the slave. In the peer-to-peer relation, the two systems act as independent systems working together to complete a given task. We conduct experiments to study the influence of network delay in remote master-slave systems with force feedback. Based on the experimental results, we propose a combination of the adaptive  $\Delta$ -causality control and the robot

position control with force information to ensure smooth operation under unfavorable network conditions. We investigate the influence of different network delays such as network delay of each system, and network delay between robots in remote robot systems with peer-to-peer relation. We also clarify that the adaptive  $\Delta$ -causality control should be applied globally to keep the operability high while performing a cooperative task.

The thesis is organized as follows:

In Chapter 1, we explain the research background and various technologies used in our experimental system. We also elaborate on the purpose and contributions of the thesis.

In Chapter 2, we investigate the influence of network delay in the system by using experimental results in remote master-slave robot systems. We clarify the influence by performing cooperative work carrying an object together. Based on the experimental results, we found that the average work time, the average force of robots, and the average reaction force at the haptic interface devices increase as the network delay becomes larger. These larger forces make the system unstable and difficult to operate. This results in degradation of operability and deteriorates QoE. As a result, we conclude that to eradicate this problem, it is necessary to perform QoS control to achieve efficient operation during unfavorable network conditions.

In Chapter 3, we investigate the effects of the adaptive  $\Delta$ -causality control and robot position control using force information in remote master-slave robot systems to reduce the influence of network delay. We find that the position difference between master and slave robots increases, as the network delay becomes larger. This results in larger force exerted on the object carried by the robots. In the adaptive  $\Delta$ -causality control, the output timing of the position of the master robot is dynamically changed to reduce the difference in position between the robots to achieve smooth completion of work. In the robot position control using force information, the robot position is changed to reduce the force exerted on the object. We also clarified the effects of a combination of both types of control. Based on the experimental results, we found that a combination of the adaptive  $\Delta$ -causality control and robot position control using force information is the most effective.

In Chapter 4, we propose the global and local adaptive  $\Delta$ -causality control to alleviate the influence of network delay in remote robot systems with peer-to-peer relation. The global adaptive  $\Delta$ -causality control dynamically delays output timing of the position of each robot according to the network delay between robots, and in each system to reduce the difference in position between the robots. The local adaptive  $\Delta$ -causality control between robots dynamically changes the output timing of each robot according to the network delay between the robots, while the local adaptive  $\Delta$ -causality control between the haptic interface device and the robot involves dynamically changing output timing of the position at each robot according to the network delay in each system to minimize the position difference. By experiment, we also make a comparison between the global and local adaptive  $\Delta$ -causality control. Based on the experimental results, we illustrate that the global adaptive  $\Delta$ -causality control is better than the local adaptive  $\Delta$ -causality control.

In Chapter 5, we summarize and conclude the thesis. We also discuss future directions and challenges based on the results of this study.

## 論文審査結果の要旨

本論文は、力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムを研究対象とし、二つのシステム間で行う協調作業の高品質化（サービス品質（QoS: Quality of Service）の向上）を目的とし、ネットワーク遅延の影響を軽減するためのQoS制御の提案を行っている。このシステムでは、一人の利用者が触覚インタフェース装置を用いて、力覚センサを有する遠隔の産業用ロボットを操作し、その操作の様子をビデオカメラでモニタしながら、他のシステムと一緒に物体を運んだり、手渡したりする協調作業を行うことができる。産業用ロボットのアームが物体に触ったり、当たったりすると、アームに付与された力覚センサでそのときの力を検知し、触覚インタフェース装置にその力情報を送り、利用者に提示（すなわち、力覚フィードバック）することによって、その力を知覚することが可能である。協調作業に従来のビデオや音声だけでなく、力覚情報を用いることができるので、協調作業の作業効率が大きく改善されると期待されている。

しかし、インターネットのようにQoS保証のないネットワークを介して協調作業を行うと、ネットワーク遅延、遅延揺らぎ、およびパケット欠落によって、協調作業の品質や効率が大きく劣化する可能性がある。このうち、本論文はネットワーク遅延に起因する問題を解決するものである。複数のシステムを用いて物体と一緒に運んだり、手渡したりする作業においては、二つのシステムにおいて物体を把持しているロボットアームが同時に同じ高さや角度で移動しなければ、物体に大きな力が加わり、物体が破損する可能性がある。このため、時間的な同期と空間的な同期（時空間同期という）が必要である。本論文は、この時空間同期の高品質化を目指しており、5章から構成されている。

第1章は、研究の背景、関連する技術を述べた後、研究の目的と貢献を説明している。

第2章は、二つの力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムを利用して、システム間にマスタとスレーブの関係を持たせて、一つの物体と一緒に運ぶ協調作業を扱っている。マスタシステムのロボットアームとスレーブシステムのそれとの位置を合わせるため、マスタシステムのロボットアームの位置情報を、スレーブシステムに送信して、スレーブシステムのロボットアームの位置を合わせる。本論文では、両システム間のネットワーク遅延の影響を調査している。調査の結果、ネットワーク遅延が大きくなるにつれて、平均作業時間、物体に加わる平均力、利用者に提示される平均反力が大きくなることが明らかにされる。このことから、QoS制御が必要であることが示されている。

第3章は、第2章のシステムを対象に、ネットワーク遅延の影響を軽減するため、時空間同期のためのQoS制御として、既存の適応型 $\Delta$ 因果順序制御と力情報を用いたロボット位置制御を適用し、それらの効果を調査している。適応型 $\Delta$ 因果順序制御は、マスタシステムのロボットアームの位置情報を出力するタイミングを、スレーブシステムへのネットワーク遅延分だけ遅らせることによって、二つのロボットアームの位置を揃えようとする。また、力情報を用いたロボット位置制御は、力覚センサによって検知された力情報を元に、力を軽減する方向にロボットアームの位置を微調整する。そして、実験を行うことによって、両制御を併用することの効果は明確にされている。

第4章は、二つのシステム間の関係が対等な場合を扱っている。二つのシステム間の関係として、大きくマスタ・スレーブの関係と対等な関係が考えられるが、それらの利用は作業場面に依存すると考えられるため、マスタ・スレーブ関係だけでなく、対等な関係にある場合も検討対象にする必要がある。本論文では、QoS制御として、グローバル適応型 $\Delta$ 因果順序制御（以下、グローバル制御と呼ぶ）とローカル適応型 $\Delta$ 因果順序制御（以下、ローカル制御）の概念を提案し、それらの有効性を実験により明らかにしている。ローカル制御は、ロボット間の制御と、ロボットと触覚インタフェース装置間の二つに分けられる。グローバル制御は、二つのローカル制御を同時に行うものである。第3章と同様の実験によって、グローバル制御が最も優れていることが示されている。

第5章は、本論文のまとめと結論、今後の課題などを述べている。

以上、本論文は、遠隔ロボット制御の適用範囲を大幅に広げるものであり、遠隔医療や遠隔リハビリで使用される手術ロボットやリハビリロボット、危険で人が入れない宇宙空間や深海で活躍する作業ロボット、地震や集中豪雨などで孤立した地域への物資を運搬するレスキューロボットやドローンなどへの適用が考えられる。本論文の成果は、これらの遠隔ロボットへの力覚フィードバックの導入を加速するものであり、大きな進展をもたらすことが期待できる。したがって、本論文は博士（工学）の学位を授与するのに十分な価値があると判断する。