

# リアルタイムロボティクスの遠隔制御

移動通信ネットワークを介して、ロボットを遠隔制御する技術に関して、通信遅延のある環境下で発生するさまざまな技術課題について研究している。従来の方式では実現が難しかった、力覚や触覚をリアルに双方向で伝えることができる手法を提案し、その性能評価実験を行った。なお、本研究は慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 大西研究室（大西 公平教授）との共同研究により実施した。

たかはた みのる 高畠 実	しょうじ みちひこ 庄司 道彦
みうら かなこ 三浦 郁奈子	ふるかわ ひろたか 古川 博崇

## 1. まえがき

ドコモは通信インフラを提供する事業を基盤として、生活インフラを支える事業への発展を目指しており、将来、生活分野において市場が大きく伸びると期待される民生用ロボットは注目すべき領域の1つである[1]。生活・ビジネスシーンに、人間のような知能と器用さを持つ自律型ロボットが登場するのは当面先の話であるが、まずはロボットを用いた遠隔制御が近い将来実現される有望なアプリケーションの1つと考えられる。

生活・ビジネスシーンにおいて人間がロボットを操作し、さまざまな作業を効率的に行うためには、遠隔制御技術が鍵となる。遠隔地に置かれたロボットをネットワーク経由で操作しても、あたかもロボットやネットワークが介在していないように振舞え、透明かつ双方向の遠隔制御技術が理想として求められる。

ロボットの機構を実現するためにはデバイスやセンサなど多くの技術課題があるが、特に今後の通信インフラを検討するにあたり必要な要素を抽出するため、制御技術およびネットワーク技術に着目した。これらの技術の中でも、単純な遠隔操作にとどまらず、双方向でかつ力覚や触覚を伝達可能な透明性を持ったリアルタイムロボット制御技術を確立することは、重要かつチャレンジングな課題である。従来、遠隔ロボットアームが物体に接触した際の鋭敏

な触覚をフィードバックすることについては、安定性の確保など難しい課題があった。本稿では、これまでに検証した主要な技術を解説する。

## 2. バイラテラル制御

ロボットの遠隔制御の1つとして、人間がマスタアームを操縦し、スレーブアームがそれに追従して作業を行うシステムがある。このようなシステムをマスタスレーブマニピュレータと呼ぶ。このときにロボット（スレーブ側）は人間（マスタ側）の指示通りの的確な動作を行うだけではなく、何かをつかんだり、ぶつかったりした場合、その結果として得られる位置や力の情報を的確に人間へフィードバックさせることで高度な操作性を得ることができる。このような制御をバイラテラル制御という（図1）。

図中において $F_m$ は操作者がマスタに加える力情報、 $F_s$ はスレーブが環境に加える力情報、 $X_m$ 、 $X_s$ は各々マスタ、スレーブの位置情報を表す。

従来のバイラテラル制御には主に以下の方式がある。

### (1) 対称型

マスタとスレーブの位置の偏差から、これを修正する方向へ駆動力を与える。力検出器などが不要であり、安定性が高く構成が簡単であるが、システムの慣性力や摩擦の影響を受けるため、操作感が重い（図2）。

### (2) 力逆送型

スレーブは位置サーボで構成され、マスタにはスレーブ側の力センサで検出された反力が伝わる。スレーブ側の反力がマスタによく伝達されるが、マスタ機構が影響を受け、操作感は重い（図3）。

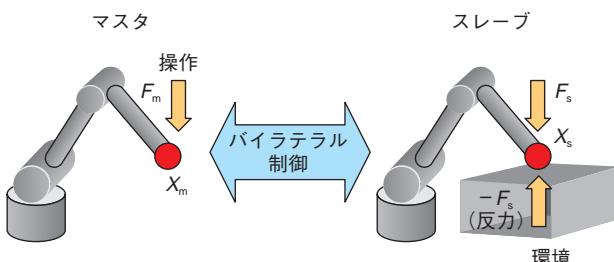


図1 バイラテラル制御概念図

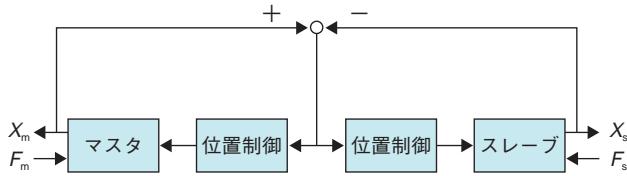


図2 対称型バイラテラル制御方式

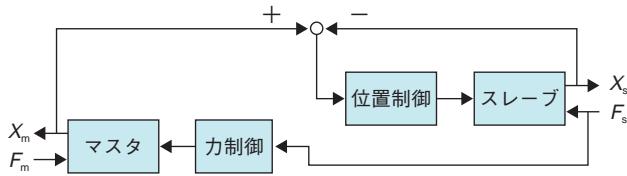


図3 力逆送型バイラテラル制御方式

### (3) 力帰還型

力逆送型の欠点を補うものであり、マスタにも力のサーボ系が構成され、マスタの操作感が軽く、かつ、スレーブ側の反力の伝達は良好である（図4）。

しかし、これまでのバイラテラル制御方式は操作感や摩擦やさまざまな雑音などの外乱の影響を考慮した利得を用いて設計する考え方である。通信遅延を含む、外乱の影響を考慮して安定性を確保しようとなれば、利得を小さく設定する必要があり、操作感が悪くなるという問題があった。

そこで新たにロバストバイラテラル制御方式を提案する。この制御方式は「再現性」「操作性」「安定性」を個々に設計できるという意味で優れた特性を持つ。これらの性質を満たすことで、双方向でかつ力覚や触覚を伝達可能な透明性の高いシステムを設計できる。数学的観点から遠隔制御システムは2つのロボットの位置と力の関係のみであり[2]、完全な透明性を実現するため、図5のようにマスターとスレーブの加速度の差で位置制御、加速度の和で力制御を行う。

再現性は、スレーブでとらえられる環境のインピーダンスをマスター側で再現する程度であり、良好な再現性の実現により、鋭敏な触覚が伝達可能となる。

操作性は、スレーブ側から伝わる真の環境からの反力をそのままマスター側で感じる程度であり、良好な操作性の実現により、システム自身の硬さを感じることのない軽い操作が可能となる。

安定性は、制御の基本的要件であり、システム応答が発散することのないようにすることで、操作する人間およびシステムの安全を保つために重要である。

また、マスターとスレーブの各々においては力

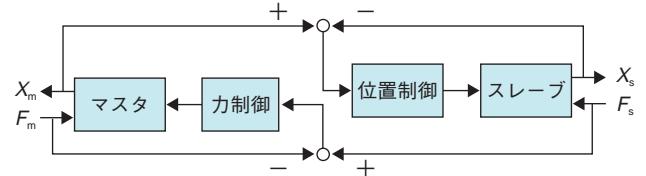


図4 力帰還型バイラテラル制御方式

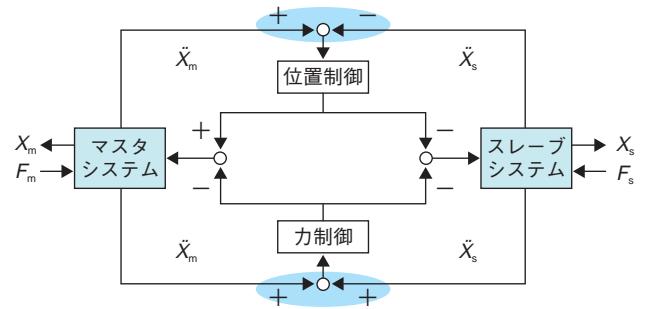


図5 ロバストバイラテラル制御方式の概要

センサを用いずに、位置情報から得られる加速度とシステムの状態を推定する機構であるオブザーバを用いる。マスター・スレーブの各々において、外乱に対するオブザーバと力を推定するオブザーバを利用する[3]。この方法では、力センサを用いるよりも広い帯域の情報が得られる。

## 3. 実験結果

### 3.1 力覚伝達バイラテラル制御ロボットと実験結果

方式を検証するためのツールとして遠隔手術用鉗子ロボットを製作し実験を行った。写真1は医療現場で用いられる手術用鉗子である。ハンドル操作により先端の剪刀部が開閉可能な機構を持ち、1自由度である。

これを操作部と先端部に分割、各々に直線運動して高精度な位置決めが可能なリニアアクチュエータを接続し、マスターとスレーブとした。制御演算はPCを用いて、リアルタイムOS（RT-Linux）上でリアルタイム制御を実現した。写真2にマスターおよびスレーブロボットの外観を示す。

最初にマスター・スレーブを同じPCに接続、マスター側を操作しスレーブ側でやわらかい物体（スポンジなど）や硬い物体（金属）を持した際の位置と力の応答を測定した。マスター、スレーブ共によく追従でき、また、従来は安定性に問題が生じることが多かった硬い物体を持した際にも、安定した接触を確認した。

次に、マスターとスレーブをそれぞれ別のPCに接続し、PC間はネットワークで結んで遠隔制御実験を行った。



写真1 手術用鉗子

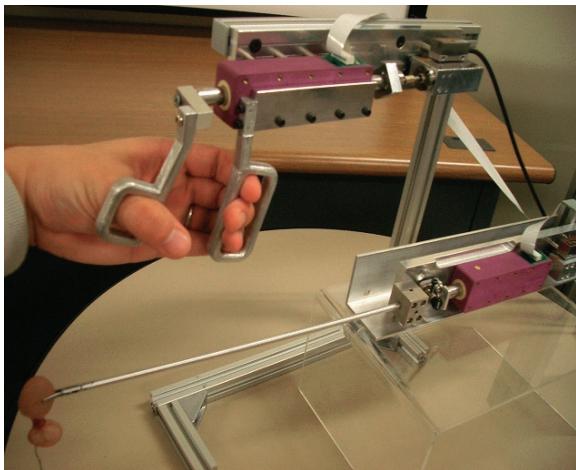


写真2 マスタロボットとスレーブロボットの外観

マスタとスレーブ間に有線 LAN (100BASE-TX) を用いて接続し、硬い物体を把持した場合の位置応答と力応答を図6,7に示す。マスタ・スレーブ間の往復の通信遅延が約1～4ms程度の条件下での安定動作と、操作者側でマスタ操作によりスレーブが把持した物体の感触とを確認できた。

また、マスタ・スレーブ間に無線 LAN (IEEE802.11g) を用いて接続した場合の位置応答と力応答を図8,9に示す。往復の通信遅延は約2～8msであるが、時々周期的に100ms程度の大きな遅延が生じていた。有線LANを用いたバイラテラル制御よりもさらにマスタの位置のオーバーシュートが大きくなっている。また、オーバーシュートが大きくなると行過ぎ量を戻すための大きなトルクが発生、マスタが押し戻され過ぎ、応答が振動的になっている。さらに、1.5～2s付近では大きな通信遅延（最大150ms程度）により、位置、力共に大きな偏差が生じている。

### 3.2 バイラテラル遠隔操作実験と実験結果

大きな通信遅延は制御の位相遅れにつながるため、安定性を確認する必要がある。遠距離間でのバイラテラル遠隔操作システムの例として、慶應義塾大学新川崎K2キャンパス（日本）とマリボル大学（スロベニア）とをインターネットで接続し、実験を行った。ここで実験に用いたマニピュレータは双方とも1自由度の回転型マニピュレータであり、通信遅延に対する外乱オブザーバ[4]を導入している。

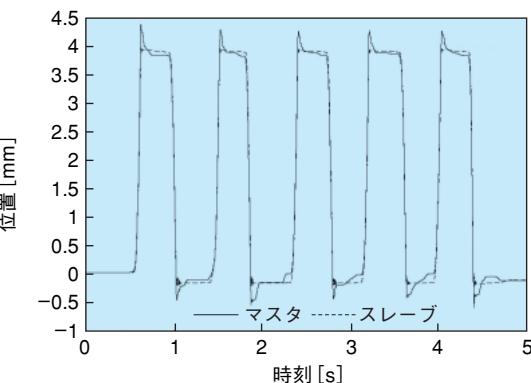


図6 位置応答 (有線 LAN)

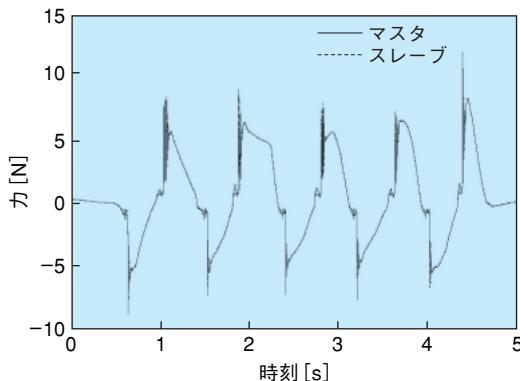


図7 力応答 (有線 LAN)

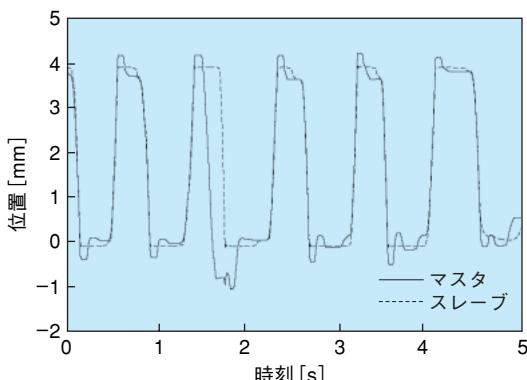


図8 位置応答 (無線 LAN)

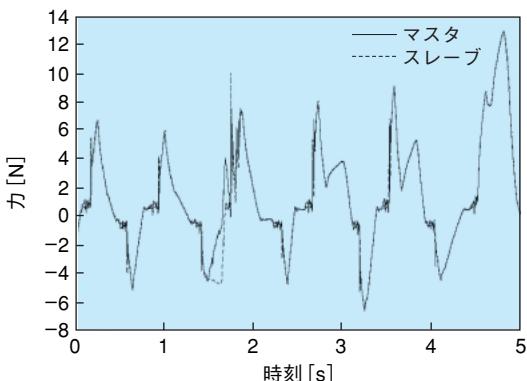


図9 力応答 (無線 LAN)

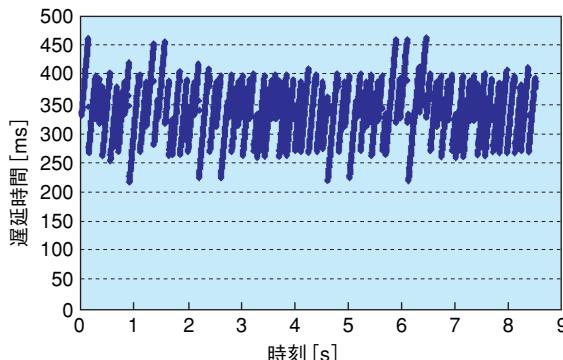


図10 往復遅延時間の変動

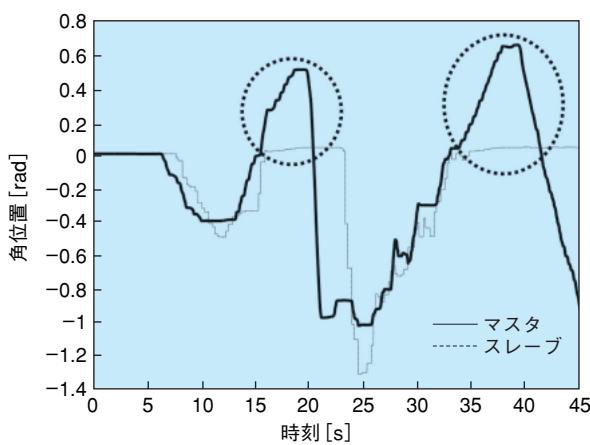


図11 位置応答（遠距離）

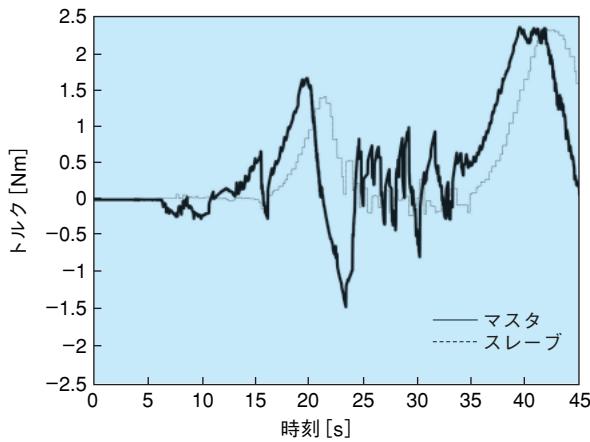


図12 力応答（遠距離）

往復遅延時間の変動を図10に示す。遅延時間、ジッタ共に大変大きいネットワークである。図11の位置応答より、接触時（点線で囲った部分）のマスタ側に若干の行過ぎがあるものの、追従している様子が分かる。また図12の力応答より、スレーブ側の環境からの反力をマスタ側で再現できている様子が分かる。

## 4. あとがき

力覚・触覚をリアルに双方向で伝えられる遠隔制御技術を検討し、ネットワークを介して実際にマニピュレータのバイラテラル制御を行った。実験により、ネットワークの条件に柔軟に適応可能なシステムの基本的な性質を確認した。今後、人間の触覚受容器が応答可能といわれる300Hz以上の広い帯域まで良好なフィードバックが可能な制御技術を確立していくとともに、繊細な触覚通信を実現するために必要な、ネットワークの伝達特性を明らかにしていきたい。

## 文 献

- [1] 経済産業省 技術戦略マップ, pp.104-111; <http://www.meti.go.jp/report/data/g50330bj.html>
- [2] I. Aliaga, A. Rubio and E. Sánchez: "Experimental Quantitative Comparison of Different Control Architectures for Master-Slave Teleoperation," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 12, No. 1, pp. 2-11, Jan. 2004.
- [3] W. Iida and K. Ohnishi: "Reproducibility and Operability in Bilateral Teleoperation," Proc. of the 8th IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, AMC '04-KAWASAKI, pp. 217-222, 2004.
- [4] K. Natori, T. Tsuji, K. Ohnishi, A. Hace and K. Jezernik: "Robust bilateral control with internet communication," Proc. of the 30th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 3, IECON 2004, pp. 2321-2326, Nov. 2004, Busan, Korea.