

リアルタイムロボティクスによるハプティック通信技術

モバイル環境における遠隔制御の通信技術の確立を目指す研究を進めており、ロボットを介した遠隔操作において、大きな通信遅延環境下で力覚の双方向伝送が行えることを確認した。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 みのも はやし こうき
高畑 実 林 宏樹
ふるかわ ひろたか
古川 博崇

1. まえがき

低侵襲性^{*1}の手術用ロボットや建設における無人化施工など、産業・特殊分野ではそれぞれ、人の手を超える精度が必要な領域や危険な災害復旧現場への応用のためロボット関連の技術開発が進んでいる[1]。専門家を遠隔の現場と結びつけることは大きな意義があり、また、移動体であるロボットの普及に伴い、将来のモバイル市場拡大が見込めるが、今のところロボットの遠隔操作のためにモバイル網を用いたビジネス応用は例が少ない。主な課題としては通信コスト、つながりやすさ（接続性）、通信路の信頼性、通信遅延などが挙げられるが、多様な通信手段や接続技術の開発により、解決の期待される課題があるものの、原理的に不可避な通信遅延に対応できる技術を欠かすことはできない。

遠隔操作を行う際にはどのような対象があり（環境認識）、どのように作業を行うのか（軌道計画）などの準備段階と、次に作業（ロボット動

作）を実施する実行段階がある。実行段階は特にリアルタイム性が重要であり、通信と深いかわりを持つ。そこで遠隔のロボット動作を実現する技術であるモーションコントロールに着目した。このモーションコントロールにおいて位置と力の共通要素である加速度情報を基にして、ロボット自身の重さや硬さを感じることにないように制御を行うことで高い操作性と、制御の安定性を両立できる。さらに、モーションコントロールを精密かつ高い頻度で行い、遠く離れたロボットがどのように環境に触ったのかという感触（ハプティック情報）をオペレータに伝達することで自然かつ安全な遠隔操作を実現できる。

ロボットを遠隔操作する技術の1つにマスタ・スレーブ方式がある。この方式では、図1に示すようにオペレータが操作するマスタの情報を基に遠隔側のスレーブを制御する。スレーブ側で環境に接触した際の情報をマスタ側に的確にフィードバックすることで高度な操作性が得られる。このようなマスタとスレーブが

相互に情報をやり取りして密接に結びついている制御手法をバイラテラル制御と呼び、マスタとスレーブ間で互いの姿勢（位置）と力の2種類の情報を往復でやり取りする4ch制御の手法により、遠隔地間で作用反作用の法則の再現を確認している[2]。

本稿では、通信遅延を前提とした遠隔操作を実現するため、モーションコントロールの要素技術である、通信遅延のとらえ方を工夫した通信外乱オブザーバ、および性能向上のために処理周期を工夫したマルチレート制御の概要を解説し、バイラテラル制御システムを用いた実験結果を述べる。なお、本研究はハプティック情報を扱える高精度なモーションコントロールで世界的に先行している慶應義塾大学 大西研究室と共

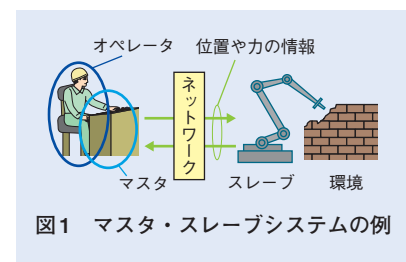


図1 マスタ・スレーブシステムの例

^{*1} 低侵襲性：ていしんしゅうせい。本稿では従来よりも人体を傷つけない外科的処置を指す。例えば切開箇所の小さな低侵襲性の手術により、患者に与える負担を低減でき、入院期間の短縮や良好な術後経過などの効果が見込めるが、基本的に

は限られた情報に基づく遠隔操作であり、場合により難しい手術となる。

同で検討を行った。

2. 通信外乱オブザーバ

マスタ・スレーブ間で相互に通信を行うシステムでは、ネットワークで遅延が発生するが、モバイル網の利用を想定する場合、通信遅延の事前予測は極めて難しい。そこで、通信遅延の正確な予測なしに制御を行う方法を説明する。ブロック線図^{*2}を用いると、パイラテラル制御システムの片側の要素は図2のように表すことができる。マスタ側からの情報を基にスレーブに力 F を加えると、スレーブが動く速度 sX (s はラプラス演算子であり、スレーブ位置 X の微分を示す)は、加わる力 F を積分し、スレーブの慣性モーメント J で除して得られる。通信遅延がない場合、マスタへはこの sX がそのままフィードバックされる。通信遅延は制御のむだ時間要素^{*3}として定義され、遅延時間を T とすると、 e^{-Ts} で表される。ここで遅延時間 T は、マスタからスレーブへの遅延 T_1 とスレーブからマスタへの遅延 T_2 の和であり、マスタ側には sXe^{-Ts} がフィードバックされるが、これは図3の場合と等価である点を利用する。

この図は、ネットワークにおいて発

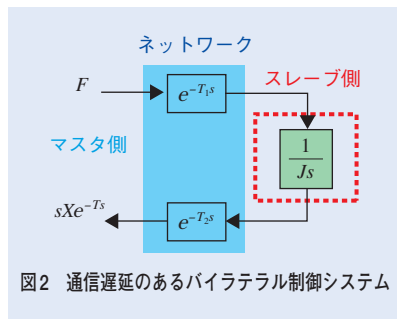


図2 通信遅延のあるパイラテラル制御システム

生する通信遅延をあたかもスレーブ側に加わる、外部からの力のノイズ $F(1-e^{-Ts})$ (以下、通信外乱)として扱えることを示している。ここで図4に示すように、通信外乱を推定して制御を行う仕組みを導入することで、通信遅延の補償が可能となる。この推定器を通信外乱オブザーバ (CDOB: Communication Disturbance OBserver) と名づけ、解析や実験により有効性の検証を行った。CDOBはローパスフィルタを用いて構成できる[3]。

パイラテラル制御実験システムの構成を図5に示す。実験はスレーブのエンドエフェクタ (環境などに直接作用する箇所) が回転動作を行う過程で環境に接触させる状況で行った。オペレータの操作で変化する位置情報 (角度) を制御に用いる。実験結果の一例を図6に示す。図6は、マスタとスレーブ間の通信にネット

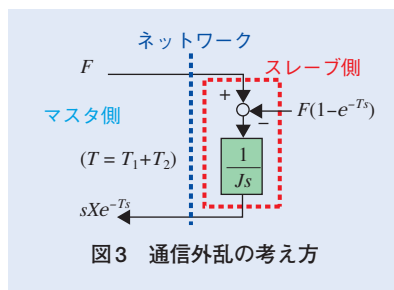


図3 通信外乱の考え方

ワークエミュレータを用いて片道1秒の大きな遅延時間を与えた場合の結果である。CDOBを用いない場合は安定した制御ができず無秩序な動きがみられるが、CDOBを用いる場合は制御が安定し、マスタの動きに応じて1秒後にスレーブの追従動作ができています。また、これはスレーブが環境に接触した網掛け部の区間においても同様であるが、スレーブの位置は、環境接触後にそれ以上に動くことがないため、頭打ちになる (図6(c) のスレーブ応答)。反力情報はスレーブが環境へ接触した際のトルクであり、図6(d) はスレーブで生じた力が約1秒後にマスタへ帰ってきている様子を示している。

3. マルチレート制御

デジタル制御システムの性能は、サンプリング周期に大きく依存するが、CPUやデバイス技術が進歩した

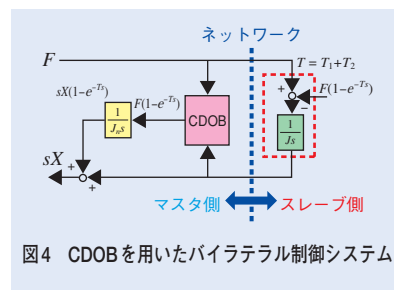


図4 CDOBを用いたパイラテラル制御システム

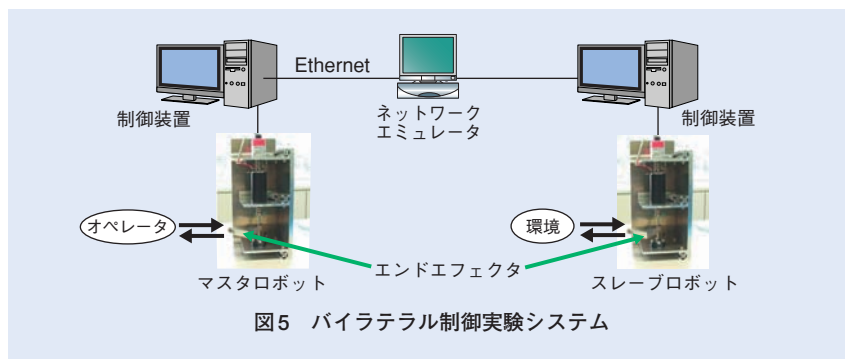
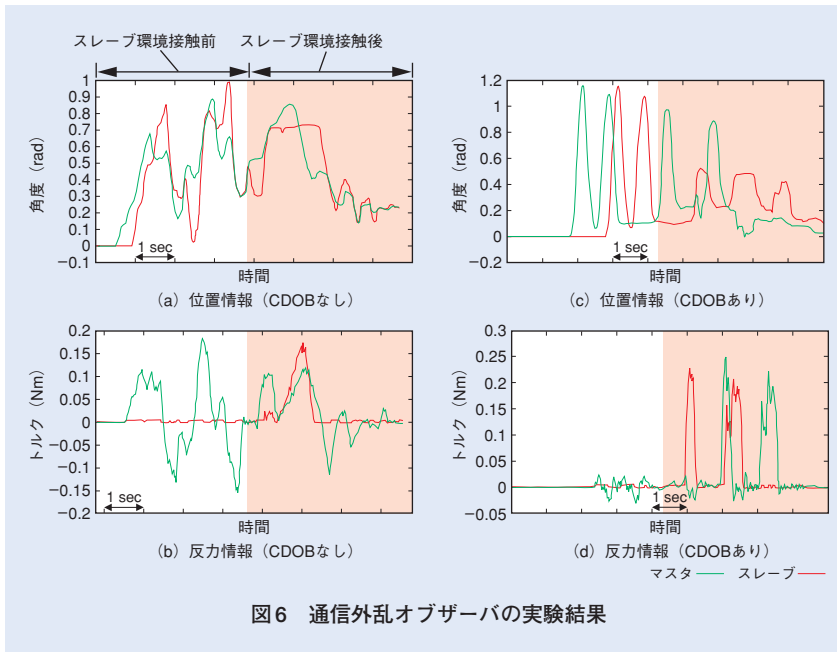


図5 パイラテラル制御実験システム

*2 ブロック線図：機能を実現するための要素に着目し、システムの構造や信号の流れを図式的に表現した図。

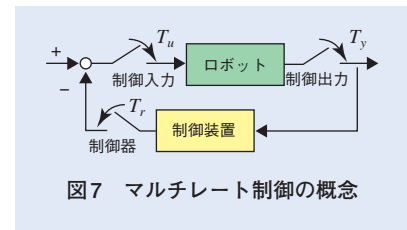
*3 むだ時間要素：指数関数の形で表される無限次元の要素。むだ時間要素を含む場合、極が無限に存在することから扱いが

難しい。また、周波数領域における位相は周波数およびむだ時間に比例して際限なく遅れる性質を持ち、制御システムの不安定化など、深刻な影響を与えることがある。



現在でも、サンプリング周期は無限に短くできるわけではない。また、システムの構成要素ごとに実現可能なサンプリング周期が大きく異なる場合がある。そこで、性能を向上させるためのマルチレート技術を適用した一例を紹介する。ロボットと制御装置で構成した制御システムにおける、マルチレート制御の基本的な概念を図7に示す。ロボット制御のための指令情報を更新する入力周期を T_u 、ロボットの制御結果の情報をセンサで取得する出力周期を T_y 、制御装置からの制御周期を T_r とすると、一般的な制御方法においては、これら3つの周期のうちもっとも長いサンプリング周期に合わせ1つの共通周期で制御を行う（シングルレートシステム）。これに対して、マルチレートシステムは3つのサンプリング周期をそれぞれ独立に設定して制御を行い、性能向上を図るものである。

ロボット制御のため、カメラ計測を用いたビジュアルサーボシステムを例に挙げると、サンプリング周期はそれぞれ $T_u=1\text{ms}$ （モータドライバ）、 $T_y=33\text{ms}$ （画像フレーム出力）、 $T_r=10\mu\text{s}$ （DSP（Digital Signal Processor）制御）程度の値に設定できる。性能向上のためにはもっとも大きな T_y を短くする必要がある。高速カメラやデータ補完などの工夫が行われる。一方で、繊細なハプティック情報を伝えるためには、より高速かつ高精度なセンサが必要となる。精密な位置計測デバイスとして、半導体レーザのエンコーダがあるが、その場合、 $T_y=100\text{ns}$ 程度に設定可能である。このとき、前述のビジュアルサーボシステムとは逆に、制御・出力周期よりも入力周期 T_u が長くなる。ところが、ロボットのサーボモータを駆動する入力周期 T_u はモータドライバに限界があり、



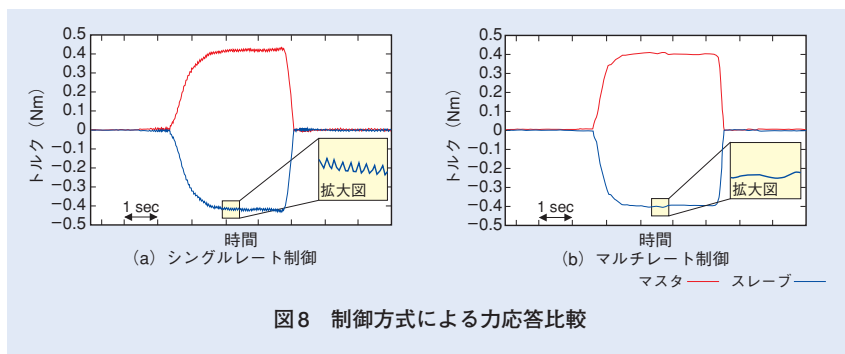
大幅に短くすることが難しい。そこで、もっとも長い入力周期 T_u に他の周期を合わせるのではなく、短い出力周期 T_y を活かす方法が必要である。今回、加速度情報を基にしたロバスト制御^{*4}で特に重要な外乱オブザーバにマルチレート制御を適用した。制御・出力の更新周期を、入力の更新周期よりも短くすることで、以下の2つの効果がある。

1つは用いることのできるデータ数の増加、つまり、実質的な時間分解能の向上により、外乱オブザーバのカットオフ周波数を高く設定できる。これにより位相遅れが低減し、制御性能が向上する。もう1つは、外乱情報が短い周期で得られるため、外乱に対する速応性が高くなり、ロバスト性の向上が見込める。

これらについてバイラテラル制御システムで比較検証した実験結果の一例を図8に示す。シングルレート制御（図8(a)）、マルチレート制御（図8(b)）をそれぞれ用いて、マスタを操作し、スレーブが環境に接触した時の力応答を示す（作用反作用の法則により符号は逆）。シングルレート制御で発生している環境接触時の細かな振動が、マルチレート制御では抑えられている様子が見分かる。さらに、マルチレート制御は安定に保つことのできる帯域が広く、立ち上がりの

^{*4} **ロバスト制御**：未知の外乱や制御対象のパラメータ変動などによる影響を受けずに所望の出力を得る制御をロバスト制御という。ロバスト（頑健）なシステムとは目標動作に対して忠実なシステムであり、要求される動作が複雑かつ高度に

ればなるほど、高いロバスト性が要求される。精度の高い外乱推定が重要である。



速さから、応答性の向上がみられる。この実験において、シングルレート制御で大きく不安定になるカットオフ周波数においても、マルチレート制御は安定した制御が可能であった。

また、シングルレート制御を基準に、入力周期のみを高速化した場合、出力周期のみを高速化した場合などを比較した結果、入力周期の高速化よりも、出力周期の高速化の効果が大きいことなどが判明しており、マルチレート制御の有効性を確認している[4]。

4. あとがき

通信遅延は制御システムに入ってくる力の外乱と等価に扱えるという

重要かつ基本的な考え方について、共同研究を通して検証してきた。また、実験システムを構築し、ロボットの遠隔操作およびハプティック情報の伝達が行えることの実証を進めてきた。

さらに、性能向上のためのマルチレートの考え方を示した。外乱オブザーバへの適用のほか、この考え方はさまざまな要素に応用可能と考えられるため重要な技術である。

これらの技術はバイラテラル制御に限定されるものではなく、別稿の「遅延環境下における5指力覚通信の評価」の研究で得られた知見を合わせることで、よりロバスト性の高い遠隔操作情報の通信技術としてさらなる展開が考えられ、また、今後

は多様な通信環境における検証を進めることにより、将来の産業あるいは生活におけるインフラを支えるための新しいコミュニケーション技術への成長が期待される。

文 献

- [1] 特許庁：“平成18年度 特許出願技術動向調査報告書-ロボット,” <http://www.jpo.go.jp/shiryou/gidou-houkoku.htm>, Apr. 2007.
- [2] N. Iiyama, K. Natori, R. Kubo, K. Ohnishi, H. Furukawa, K. Miura and M. Takahata: “A Bilateral Controller Design Method Using Delay Compensators,” IEEE Int. Conf. on Industrial Technology, pp. 836-841, Dec. 2006.
- [3] K. Natori, R. Kubo and K. Ohnishi: “Transparency of Time Delayed Bilateral Teleoperation Systems with Communication Disturbance Observer,” The 4th IEEE Int. Conf. on Mechatronics, WA1-A-3, pp. 1-6, May 2007.
- [4] M. Mizuochi, T. Tsuji and K. Ohnishi: “Multirate Sampling Method for Acceleration Control System,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 3, pp. 1462-1471, Jun. 2007.