

ネットワークを介した双方向力制御におけるパケット転送時間補償

藤岡 与周*・須郷 浩行**・松坂 知行***

Network Time Delay Compensation for Bilateral Tele-Operation Systems via Networks

Yoshichika FUJIOKA*, Hiroyuki SUGO** and Tomoyuki MATSUSAKA***

Abstract

To improve the responsibility and stability for force-reflecting bilateral tele-operation through the network such as the Internet, we propose a concept for compensation of the delay time for packet transfer based on model predictive control method. In the bilateral master-slave tele-operation control, there are two kinds of network time delay, one is the delay time from master to slave (T1) and another is the delay time from slave to master (T2). On the Internet, T1 and T2 change irregularly. To measure T1 and T2 precisely, we constructed a master-slave control system with GPS-based time servers. Moreover, to compensate T1 and T2, we propose a new concept of a model predictive control method with model-based simulation for T1 or T2.

Key words: Internet, Bilateral control, GPS, Packet transfer delay

1. ま え が き

ネットワーク技術と制御技術を融合したネットワーク遠隔操作には様々な手法が存在するが、ロボットの力覚を操作者側にフィードバック可能な双方向力制御が、繊細な遠隔作業を遂行する上で有用である。

ここで、ネットワーク部分が固定回線ではなくインターネットである場合には、ネットワーク部分の伝送遅延が一定でなくまたパケット情報がしばしば欠落する可能性があるため、制御特性が著しく悪化することが多い。この問題を解決するために様々な手法が提案されているが、いずれもロボットをゆっくり動作させるようにして、動作の不安定化を防ぐことが基本になっている。

そこで本研究では、より機敏な動作を目指すため、ロボットの動特性があらかじめわかっていることに着目し、ロボットの物理シミュレーションによりネットワーク遅延分程度の未来予測情報を常に計算しながら、これによりネットワーク遅延を補償する概念に基づく、俊敏な遠隔操作が可能なネットワーク遠隔制御システムの構築を目的としている。

2. 遠隔操作ロボットシステムの構成

ネットワークを利用したロボットシステム応用の一種である遠隔操作ロボットシステムの構成にはいくつかの種類が存在するが、そのなかで作業対象にかかる力情報

を操作側で感じながら作業が可能な、双方向力フィードバックを有するバイラテラル遠隔制御システムの基本構成を想定する。

操作側から作業側に操作指令が伝達され作業側で実行する。その際、障害物に衝突した場合に負荷情報を作業側から操作側に力覚としてフィードバックするようなシステムである。本システムでは操作側マニピュレータから作業側マニピュレータに伝達指令が送られ、作業側マニピュレータで得られた力情報が操作側マニピュレータに力覚としてフィードバックされる。現在想定する、ネットワーク遠隔操作ロボットシステムの構成を Fig. 1 に示す。

遠隔制御では、パケットの往復時間ではなく、一方から他方へのパケット転送時間を正確に測定する必要がある。片道の遅延時間を測定するには、両方に正確な時計を用意し、送信時刻と受信時刻からその差を求めればパケット転送時間を正確に調べることができる。このため、制御用に備えられている操作側のパソコンと作業側のパソコンの時計がミリ秒単位で正確でなければならない。しかし、通常パソコンの内部時計はそれほど正確ではない。そこで、GPS (Global Positioning System) が位置のみならず時刻をも正確に求める事ができることに着目し、各パソコンに GPS モジュールを備えている。

3. ネットワークパケット転送遅延時間の測定

まず、パケット転送の往復時間を測定するため、5 分ごとに Ping コマンドを使用した。パケットを送信してから送り返されるまでの時間を計測することにより、コンピュータ間の時計の同期が取れてなくても比較的高精度

平成 18 年 1 月 6 日受理

* システム情報工学科・助教授

** 電気電子工学専攻前期課程

*** システム情報工学科・教授

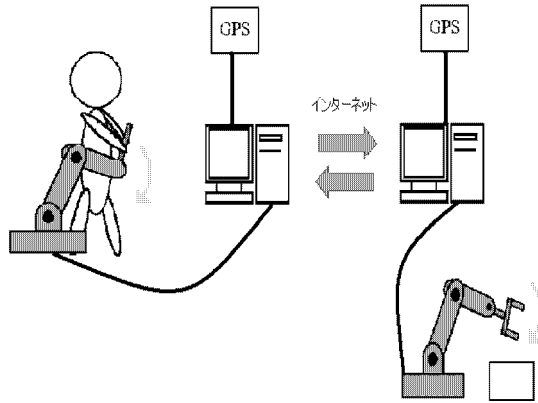


Fig. 1 システム構成

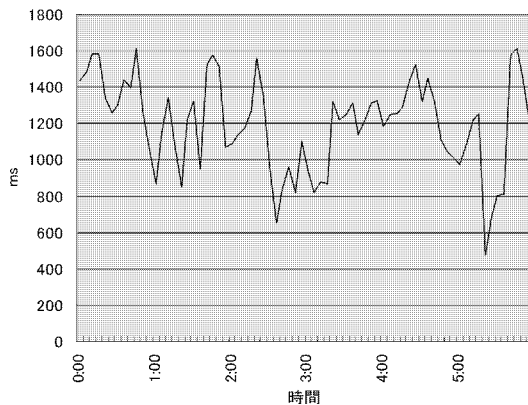


Fig. 2 研究室・自宅間のパケット往復時間

にパケット往復時間を求めることができる。

仮定として、往路と復路の遅延時間が同一であるとすれば、操作側から作業側へのパケット転送時間や作業側から操作側へのパケット転送時間を求めることも可能である。この結果、システム情報工学科棟の3階から1階研究室までは0~0.1 ms ととても少なかった。しかし、システム情報工学科から数百メートルしか離れていない階上にあるアパートまでのパケット転送往復時間の測定を行った結果、Fig. 2 に示すように大幅にパケット転送遅延時間が変化し、平均 1,195 ms となった。

tracert コマンドは実際のパケットの転送経路に従ってパケットを送信しながら、ネットワーク上で通過したルータの存在を通知するための仕組みを調べることが出来る。そこで、tracert コマンドを使用してシステム情報工学科棟3階からアパートまで経由ルートを調べた結果 Fig. 3 のようになった。経由ルータ数は17個あり、また八戸から一度東京にパケットが送られ、再び八戸に転送されていた。これらの理由により、大幅にパケット転送時間が増加したと考えられる。

4. GPS に同期させた PC 内部時計補正実験

今回使用した GPS モジュールの1秒周期出力パルス

```
1 133.98.145.* *
4 hirosaki-1-GEO.....sinet.ad.jp
5 tohoku-S1-GO.....sinet.ad.jp
6 tokyo-core1.....sinet.ad.jp
7 nii-S1.....sinet.ad.jp
8 nii-IX1.....sinet.ad.jp
```

```
17 .....okidate.aomori.ocn.ne.jp
```

Fig. 3 研究室・自宅間トレースルート

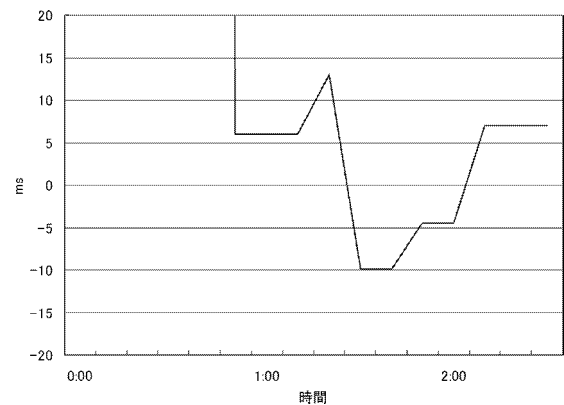


Fig. 4 NTP サーバとの時刻のずれ

(1 PPS) の精度は ± 200 ns であるため、パケット転送遅延時間を十分な精度で測定できるものと期待される。

GPS ユニットにはジュピターを使用し、Linux 上で NTP (Network Time Protocol) を用いて構築した。最初に八戸工業大学にある NTP サーバと時間同期を行った。この結果、時刻のずれは Fig. 4 で示すように平均 2.1 ms であり、通信遅延は平均 0.33 ms となった。次に GPS を備えた場合の時間同期だが、本来は高精度な 1 PPS 出力に同期させる必要があるが、まずは GPS ユニットから出力される NMEA (National Marine Electronics Association) メッセージにパソコン内部の時計を同期させている。この結果、Fig. 5 に示すように操作側と作業側の時刻のずれは平均 1.44 ms となり、通信遅延は平均 0.12 m となった。また、パソコン本体の時計精度を調べるため、片側の GPS をはずしたところ、Fig. 6 に示すように平均 153 ms のずれが生じた。

以上から GPS を備える事により、正確な時間測定が

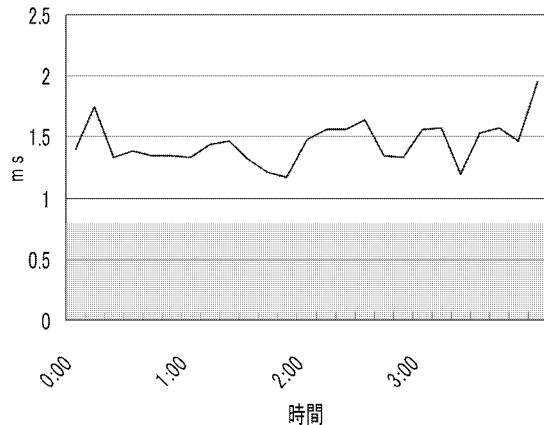


Fig. 5 操作側，作業側双方に GPS を備えた場合の時刻のずれ

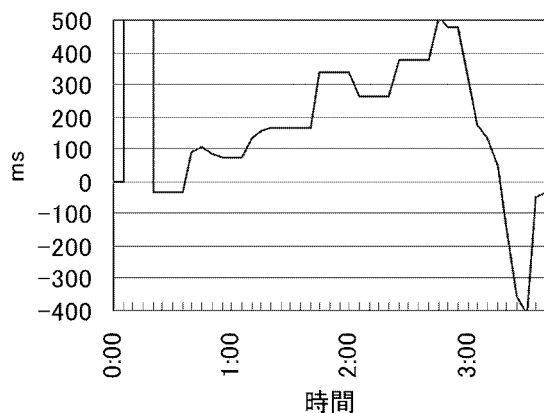


Fig. 6 一方の PC のみに GPS を備えた場合の時刻のずれ

可能となることを検証できた。

5. 片方向パケット転送時間の測定

まず，パケット転送方式に，確認応答制御のために大幅にパケット転送時間が増加するが，パケットが損失する危険性がない TCP を用いることが望ましいと考えられる。

そこで操作側と作業側それぞれのパソコンにおいて，get time of day 関数を用いたプログラミングを行えば，ms 単位で時刻を得ることができ，パケット転送の直前に取得した ms 単位の時刻情報をパケットに組み込んで操作側から送信し，作業側でパケットを受信すると同時に時刻を取得すれば，パケット転送時間を正確に調べることができる。

実際に片道の測定を行なったプログラム実行結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 では Send at (c) はクライアントがサーバに送る時のクライアントの時間を表示している。Receive at (S) はサーバが受信した時のサーバの時間を表示している。Receive at (c) はサーバから返って来たときの時間を表示している。Send at (c) と

```
[root@Fujioka-lec1@info root]# gcc -o tcp3 tcp3.c
[root@Fujioka-lec1@info root]# ./tcp3 133.98.150.45
connected to '133.98.150.45'
TCP> Receive at (C) 2006/01/10 11:14:37:191
ping
Send at (c) 2006/01/10 11:14:41:581
Receive at (S) 2006/01/10 11:14:42:391
Receive at (C) 2006/01/10 11:14:41:581
TCP> Receive at (C) 2006/01/10 11:14:41:581
□
```

Fig. 7 パケット転送時間の正確な測定法

Receive at (S) の差分が往路時間となり，Receive at (S) と Receive at (c) の差分が復路時間となる。2 台のパソコンに GPS を接続し，かつ双方をスイッチングハブを介して直接接続してその遅延を計測した結果，Fig. 7 に示すようにパケット往復転送時間が 1 ms 以下であり，また 2 台のパソコン間の時刻誤差が 810 ms あることが明らかとなった。その理由として，今回実験に使用した GPS モジュールが出力する 1 PPS 信号とよばれる 1 秒ごとに発生する高精度な信号を利用しない設定で ntp サーバを起動していたためと考えられる。GPS からは NMEA メッセージにより時刻情報が出力されているが，さまざまなメッセージ出力に阻害されるなどしてせいぜい 1 秒程度の精度でしか出力されないため，PPS 信号に同期した ntp サーバの構築が重要と考えられる。

6. シミュレーション予測による遠隔操作ネットワーク遅延の補償

インターネットなどを介した双方向力制御システムでは，時々刻々と変化するネットワーク上のパケット転送遅延が制御ループに直列に含まれ高速応答性や安定性が劣化するため，これまで主に安定性改善の観点から種々制御法が提案されている。ネットワーク上のパケット転送遅延分の未来情報をマニピュレータ物理モデルに基づくシミュレーションで予測し，それを転送することにより，パケット転送時間を補償し高速なマニピュレータ動作を可能とする概念を想定する。本システムの構成を Fig. 8 に示す。Fig. 1 の構成に加えて，Fig. 8 ではモデルに基づくシミュレーションを各サンプリング時間毎に高速に実行する処理と，過去に受信した未来情報を蓄積しその中からもっとも信頼性の高い情報を制御指令に送る処理などが追加されている。このため，原始的にはネットワーク遅延がゼロの状態での処理が可能となると考えられる。

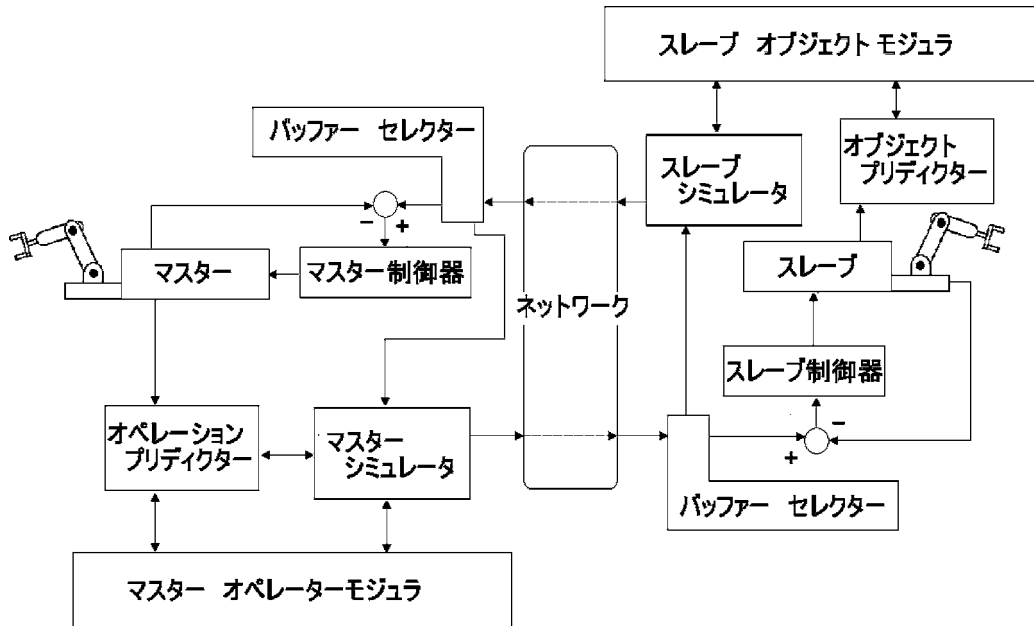


Fig. 8 インターネットを介した双方向力制御におけるパケット転送時間補償システム

7. む す び

具体的なインターネット上のパケット転送遅延について調査を行なった結果、かなり変動があることが明らかとなった。往復のパケット転送時間だけでなく、片道のパケット転送時間の測定を行なうために、GPS を使用した際のパソコン内部時計の同期手法を用いれば高精度測定が可能になると考えられる。実際、プログラムによりクライアントの送受信時間、サーバの受信時間を取得することが可能となったため、両パソコンの時間が一緒にあれば片道だけの時間が測定できた。

今後の課題として、PPS 信号に同期した ntp サーバ上で正確な時計を実現し片方向パケット転送時間を正確に測定できるようにするとともに、実際のネットワーク上のパケット転送遅延パターンを再現するネットワークシミュレーションを開発し、モデルシミュレーションに基

づくパケット転送時間補償システムのシミュレーション評価による検討が重要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 須郷浩行, 藤岡与周, 松坂知行: “インターネットを介した双方向力制御におけるパケット転送時間補償システムの構成”, 平成 17 年度第 2 回情報処理学会東北支部研究会資料, 5-2-5, pp. 1-5 (2006).
- 2) 藤岡与周, 苦米地宣裕: “ネットワークパケット転送時間変動の事例調査”, 八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要, Vol. 1, pp. 121-128 (2003).
- 3) 藤岡与周, 苦米地宣裕: “ギガビットネットワークを用いた動画伝送遅延時間の評価”, 八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要, Vol. 3, pp. 49-56 (2005).
- 4) 汐月哲夫: “インターネットを介した双方向遠隔制御における伝送遅延問題, 計測と制御”, Vol. 41, No. 7, pp. 507- 512 (2002).